

文章编号:1004-4213(2010)04-0764-5

# 基于高速 CMOS 图像传感器的空间瞬态光探测\*

杨文才<sup>1,2</sup>, 汶德胜<sup>1</sup>, 陈淑丹<sup>1,2</sup>, 王宏<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** (以 CMOS 图像传感器 LUPA-1300-2 为对象, 研究了多斜率积分功能) 在空间瞬态光探测系统中的应用. 以 ACTEL 公司 APA600 Flash 型 FPGA 为硬件载体, 分析设计了其驱动控制, 验证了 LUPA-1300-2 的易操作性, 结果表明, 该功能可以降低系统的复杂程度和提高系统观测的动态范围, 有利于观测瞬态光点周围的瞬间变化, 从而提高系统的可靠性和信息收集能力.

**关键词:** CMOS 图像传感器; 多斜率积分; 空间瞬态光; FPGA

**中图分类号:** TN29

**文献标识码:** A

**doi:** 103788/gzxb.20103904.0764

## 0 引言

在大视场条件下, 空间瞬态光信号的观测, 不仅要求系统要具有大的观测动态范围和捕捉高速运动目标的能力, 而且要求图像传感器的外围驱动电路简单, 以降低系统功耗和提高系统的可靠性. 尽管 CCD 图像传感器在动态范围和灵敏度方面优于 CMOS 图像传感器, 但相对于 CMOS 图像传感器, CCD 图像传感器的驱动电路复杂, 功耗高, 信号处理度低, 并且随着 CMOS 器件技术的发展, CMOS 图像传感器越来越多的应用于空间技术中. 在某些空间光学系统中, 使用 CMOS 成像器件比 CCD 成像器件具有更大的优势<sup>[1]</sup>.

本文以 Cyperss 公司最新推出的 CMOS 图像传感器 LUPA-1300-2 为对象, 研究了多斜率积分功能在空间瞬态光信号观测中的应用, 并验证 CMOS 图像成像器件能有效地降低空间瞬态光信号观测系统电路的复杂度, 进而提高系统的可靠性.

## 1 空间瞬态光信号

空间瞬态光信号是一种可见光瞬态变化过程, 这一过程的持续时间在几毫秒到几秒之间. 宇宙每时每刻都有这种现象存在. 比如, 太阳耀斑, 木星大气中的超级闪电, 宇宙间的各种核爆炸, 地球上的雷电等. 所有这些瞬态光信号在时域中变现为突变信号, 如图 1(a) 的模拟空间核爆光信号实验所得波形图. 可以看出空间核爆光信号是双峰信号, 波形特点

是第一阶段为辐射扩展阶段, 第二阶段为冲击波扩张阶段, 第三阶段为复燃冷却阶段. 总的频率变化过程是由快到慢. 这一过程持续的时间一般  $\geq 1$  s, 能量谱主要集中在 7~1 000 Hz 之间. 相对于空间核爆波形, 闪电波形呈单峰状, 持续时间短 (一般  $\leq 1$  ms), 频率较高 (主要在 5 500 Hz~7 800 Hz 之间), 如图 1(b).

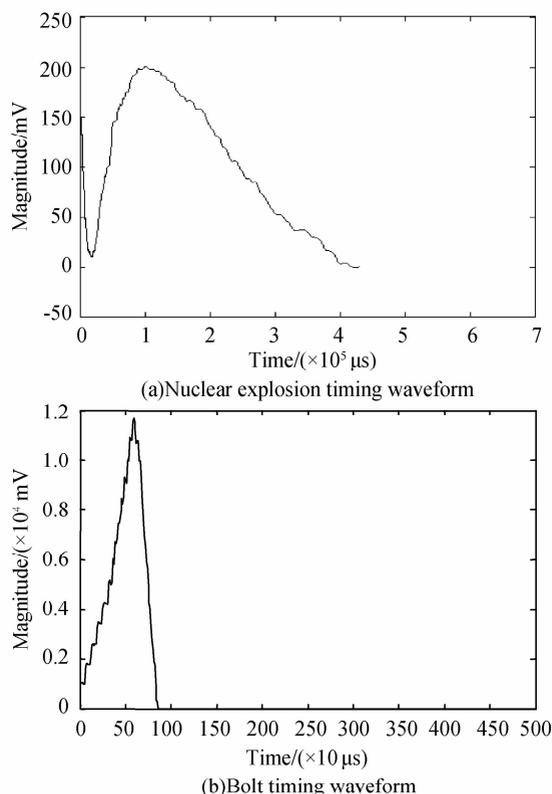


图 1 模拟天基观测所得空间瞬态光时域波形  
Fig. 1 The spatial transient optical waveform by simulated detection based on space

## 2 基于 CMOS 图像传感器的多斜率积分在空间瞬态光探测中的作用

### 2.1 多斜率积分原理

像素能有效检测到的光强决定了它的动态范围,如图 2,入射光强  $I_1 < I_2 < I_3$ . 入射光强的强度决定了积分斜率的大小. 光强越大,PN 结收集的电子空穴对越多像元输出电压曲线斜率越陡,像元二极管越容易达到饱和. 一旦饱和,像元输出电压值就只停留在饱和电压  $V_{sat}$  处,不再随时间变化. 因此,在初始复位电压( $V_{reset}$ )相同、积分时间( $T_{int}$ )相同的情况下,对信号电压进行采样,  $I_1$  和  $I_2$  的采样值都在有效的 A/D 转换电压范围之内,而  $I_3$  的采样值只是它的饱和值( $V_{sat}$ ). 这样,经过模数转换后的电压值,就不能有效地反映  $I_3$  的光强<sup>[2-3]</sup>.

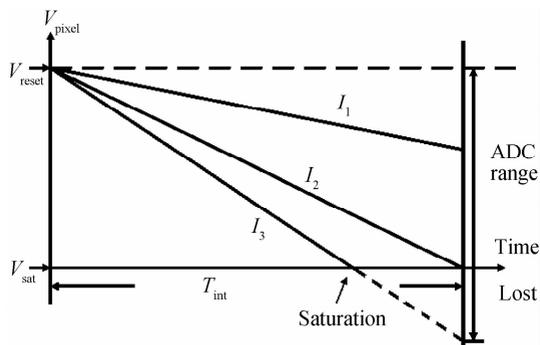


图 2 光强与像素输出电压关系  
Fig. 2 The relation of light intensity and pixel output voltage

应用多斜率积分能改变以上这种状况,提高 CMOS 的动态范围. 其原理是,在同一积分时间内对像元进行两次或两次以上的复位. 图 3 为三次斜率积分示意图,在积分时间内,像元  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$  的模拟信号电压随时间线性变化,由于  $p_3$ 、 $p_4$  的积分斜率陡,在下次复位到来之前它们就已经处于饱和状态. 如果在  $p_3$ 、 $p_4$  快达到饱和状态时单独对它们进行另外两次复位,每次的复位值都比前一次复位值小,而且每次大于复位值的模拟信号  $p_1$ 、 $p_2$  不会受到影响. 这样,在同一积分时间内,  $p_3$ 、 $p_4$  就复位了三次,而  $p_1$ 、 $p_2$  只复位了一次. 这样就确保了在下次像素集体复位前,  $p_3$ 、 $p_4$  不会处于过饱和状态<sup>[2-4]</sup>. 从而有效提高了 CMOS 器件的动态范围,图 4 为应用多斜率积分前后对比图.

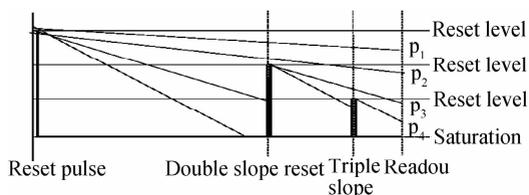


图 3 三次斜率积分的光强与像素输出电压关系  
Fig. 3 The relationship between light intensity and pixel output voltage of three slope integration



(a)Not apply multiple slope integration



(b)Apply multiple slope integration

图 4 Cypress 公司提供的使用多斜率积分前后对比图  
Fig. 4 The Cypress provides the compared pictures around using multi-slope integration

### 2.2 多斜率积分在空间瞬态光探测中的作用

在探测瞬态光过程中,由于瞬态光信号本身的瞬间光强很强,所以瞬态光点周围的变化很难被侦测到. 如果探测系统的图像传感器采用多斜率积分的方式,就能进一步侦测到瞬态光点周围在此期间的瞬态变化,为分析瞬态光对周围物体的瞬时影响提供了有利的参考依据<sup>[2]</sup>. 尽管目前尚无法得到天基观测条件下的瞬态光多斜率积分数据,但由图 4 的效果图可以看出,多斜率积分是一种可以改变瞬态光观测动态范围,提高观测质量的有效手段.

## 3 基于高速 CMOS 图像传感器的空间瞬态光探测电子学系统

### 3.1 系统的组成与工作原理

图 5 为基于高速 CMOS 图像传感器设计的空间瞬态光探测电子学系统<sup>[5-7]</sup>. 由于 CMOS 器件本身的优点,使得系统图像传感器的驱动控制,接收指令,图像数据前期处理可以只通过一片 FPGA 实现,使系统高度集成化.

卫星平台提供 +5 V 的电源电压,经过 LDO 电路调整及滤波后给各功能模块提供稳定的 +2.5 V 和 +3.3 V 工作电压;外部时钟电路提供给 FPGA 工作时钟,再经过 FPGA 片内 PLL 倍频后,提供给外部 FIFO 时钟;RS422 接口接收遥测指令,控制 FPGA 改变 CMOS 成像器的工作状态. CMOS 成像器输出一路同步信号给 FPGA,用于图像数据的恢复;输出 12 路数据经过 FIFO 缓存后传递给 FPGA 的图像数据接口模块,进行数率转换,变成一路 10 bit 的数据流传递给 LVDS 电路,最后由 LVDS 电路下传给后续处理电路.

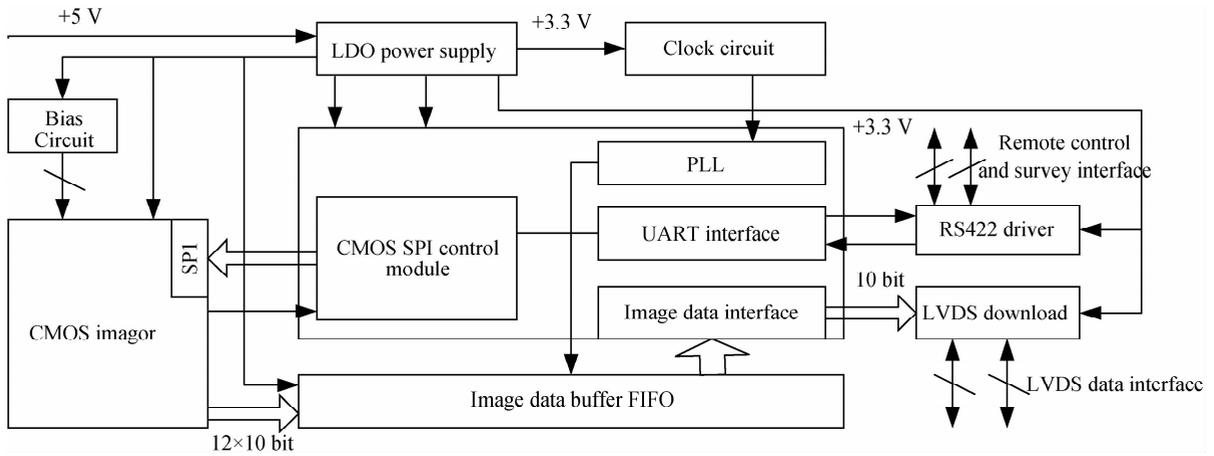


图 5 空间瞬态光探测电子学系统框图

Fig. 5 The spatial transient optical detection electronics system diagram

### 3.2 CMOS 图像传感器及 FPGA 的选型

由于系统所探测的目标信号变化极快,持续时间短,通过比较闪电和空间核爆光信号的持续时间知道,应以闪电的持续时间量级为参考选择 CMOS 成像器<sup>[5]</sup>. 故系统图像传感器的帧频应能达到 500 fps 的速度. 系统选用 Cypress 公司的 CMOS 器件 LUPA-1300-2. LUPA-1300-2 拥有 104 个 2~8 位长的内部寄存器. 这些内部寄存器通过四条内部总线与 SPI 的 IO 口连接,用户通过 SPI 接口对其内部寄存器进行设置,从而确定其工作方式. 所有这些功能使其操作容易,并且在保持低噪音、低变形的同时完成高速和高带宽数据的信号传送能力,减轻外围电路的设计负担,符合系统的要求.

由于此系统在空间环境下作业,故 FPGA 器件的使用应考虑到速度、容量、工作温度范围及抗辐照能力等. 选择 ACTEL 公司 APA600 FLASH 型

FPGA, APA600 具有两个 PLL, IO 电压为 +3.3 V, 核心电压为 +2.5 V, 属低功耗器件.

### 3.3 图像传感器 SPI 控制模块的分析设计

#### 3.3.1 LUPA-1300-2 的 SPI 接口

LUPA-1300-2 的 SPI 接口由四个端口 (SPI\_CS, SPI\_CLK, SPI\_IN, SPI\_OUT) 组成, 均为串口输入输出. 当 SPI\_CS 为低电平时, SPI 模块被选中, 此时 SPI\_IN (SPI\_OUT) 端口信号在 SPI\_CLK 端口的时钟信号作用下, 对 CMOS 的内部寄存器进行读/写操作, 读写格式如图 6. 第一位 C 为读/写标志位, 当 ‘1’ 为写操作, ‘0’ 为读操作; 第 2~第 8 位是要操作的目标寄存器的地址; 第 9~第 16 位是所要写/读给目标寄存器的值. SPI\_IN 端口的数据在 SPI\_CLK 的下降沿被写到内部总线上, 在上升沿被采样<sup>[3]</sup>.

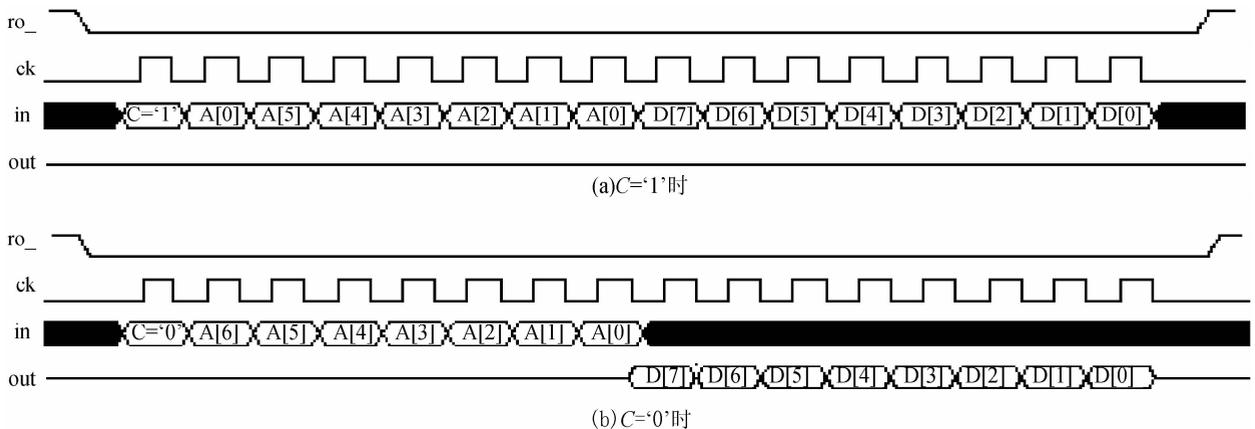


图 6 SPI 接口各端口的时序关系

Fig. 6 The timing relation of SPI interface ports

#### 3.3.2 图像传感器控制模块的实现

因为 LUPA-1300-2 的内部寄存器较多, 厂家把这些内部寄存器设计成了具有上电初始化功能, 用户只需在上电后对感兴趣的内部寄存器的值进行修改即可, 不必一一访问. 比如, 可以只设置积分时间,

窗口功能, 快门模式等.

根据验证要求, 设置 CMOS 传感器为三次斜率积分, 分别向内部寄存器 tint\_timer, tint\_ds\_timer, tint\_ts\_timer 写入三个复位时间 (注意, 时间单位为行或 SYSCLK 时钟周期), 分别为 1024

行,128 行,12 行,而恰好这些值都是 CMOS 上电初始化的寄存器值.故只需上电后设置同步快门,三次斜率积分功能和启动拍照即可.查厂家提供的寄存器说明,知道这三个功能都由一个 8 位长内部寄存器 seqmodel 控制,它地址数是 56,需要写给 seqmodel[7]~seqmodel[0]的数值为“01000011”.所以,在 CMOS 开始工作之前,只需通过 SPI 接口向 seqmodel 写入“1011100001000011”.

为了简化 FPGA 的设计,对 FPGA 进行模块化设计,分为 SPL\_CS,SPL\_CLK,SPL\_IN 三个模块,这三个模块都在共同的时钟 SYSCLK 驱动下工作.为了能有效读取 SPI\_IN 端口的数据,SPI\_IN 端口的数据在 SPL\_CLK 时钟上升沿到来时需达到稳定状态并持续一段时间.为此,设计 SPI\_CLK 为 SYSCLK 的二分频,下降沿触发.SPI\_IN 串口输出的数据为 SYSCLK 上升沿触发,维持两个 SYSCLK 时钟周期.这样,通过同一时钟周期内不同沿时刻的触发,维持的时间长度一样,达到正确读取 SPI\_IN 端口数据的目的.

### 3.3.3 仿真结果

图 7 为基于 3.3.2 的设计思想,以 LiberoIDE v8.3 为实验平台,APA600 为目标器件设计,并由 modelsim ACTEL 调用事先编写好的测试激励文件 testbench.vhd 仿真的时序图.由仿真图可以看出,时序完全符合设计要求.

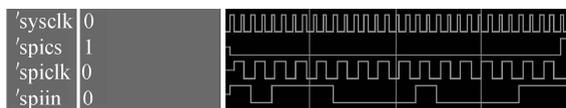


图 7 时序仿真结果

Fig. 7 The result of timing simulation

图 8 为由 Synplify Pro 逻辑综合后的模块示意图,由模块示意图可以看出,LUPA-1300-2 的控制电路只用到了少许的 FPGA 资源,从而验证了其外围电路设计是简单的,能有效降低空间瞬态光信号观测电子学系统的复杂性,符合系统的设计要求.

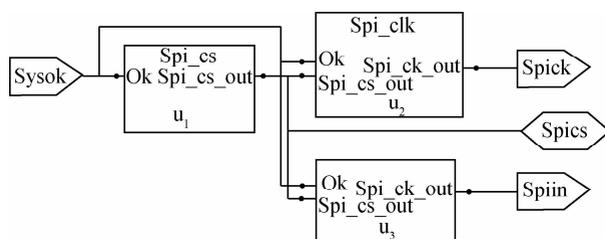


图 8 逻辑综合模块

Fig. 8 Synthesize map

由此可见,基于 LUPA-1300-2 的瞬态光探测电子学系统的 CMOS 图像传感器驱动电路设计相当

简便,能非常有效地提高系统的集成化程度,从而大大有效地减小了系统功耗、提高了系统的可靠性与稳定性,而且也有利于系统功能的升级.

## 4 结论

随着 CMOS 图像传感器设计、制造水平的提高,其在空间观测系统中的应用将会愈加频繁.本文提出了在空间瞬态光信号观测系统中的应用多斜率积分功能,以提高系统观测瞬态光点周围变化的能力,并以 LUPA-1300-2 CMOS 成像器在空间瞬态光信号观测电子学系统中的作用,说明了高速 CMOS 成像器能在提高成像质量的同时,有效地减轻了系统的电路设计负担,使系统简洁、高效.

致谢:感谢我的导师汶德胜研究员在该项目中对我的信任与帮助,感谢项目组的其它老师们给予我宝贵的指导.

### 参考文献

- [1] WANG Jun, LI Guo-hong. The application of CMOS image sensor in space remote sensing[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, **29**(2): 42-47.  
王军,李国宏. CMOS 图像传感器在航天遥感中的应用. 航天返回与遥感, 2008, **29**(2): 42-47.
- [2] Dual Slope Dynamic Range Expansion Technical Brief, Cypress Semiconductor Corporation, 2005. www.cypress.com.  
两次斜率动态范围扩展技术简要, Cypress Semiconductor Corporation, 2005. . www.cypress.com.
- [3] LIU Hai-ying, CAO Jian-zhong, DONG Sen, et al. Multiple slope integration based on CMOS image sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(Z): 331-334.  
刘海英,曹剑中,董森,等. 基于 CMOS 图像传感器的多斜率积分的研究[J]. 光子学报, 2007, **36**(Z): 331-334.
- [4] PIETER, LUPA-1300-2 Datasheet Preliminary. Cypress Semiconductor Corporation, 2006. . www.cypress.com.  
皮特, LUPA-1300-2 技术手册, Cypress Semiconductor Corporation. www.cypress.com.
- [5] GUO Rui, LIU Xue-bin, WEN De-sheng, et al. A detection and orientation system of lighting signal from space thunderbolt[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 953-956.  
郭瑞,刘学斌,汶德胜,等. 空间雷电探测实时采集定位系统[J]. 光子学报, 2006, **35**(6): 953-956.
- [6] WANG Hua, WEN De-sheng. Research and design of the circuit technology for spacial transient optical signal location system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(9): 1421-1424.  
王华,汶德胜. 空间瞬态光辐射信号定位系统电路设计与实现[J]. 光子学报, 2006, **35**(9): 1421-1424.
- [7] WANG Shun-yi, YAN Lei, ZHAO Hong-ying, et al. The applicanction of CMOS image sensor in visible light remote sensing[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(6): 891-897.  
王顺义,晏磊,赵红颖,等. 基于 CMOS 图像传感器的可见光遥感相机原型系统设计[J]. 光学技术, 2005, **31**(6): 891-897.
- [8] ZHU Ming-cheng, XIONG Yuan-xiao. ACTEL digital system field integration technique[M]. Tsinghua University Press, 2004. 7.  
朱明程,熊元校. ACTEL 数字系统现场集成技术[M]. 清华大学出版社, 2004. 7.

## Spatial Transient Light Detection Based on High-speed CMOS Image Sensor

YANG Wen-cai<sup>1,2</sup>, WEN De-sheng<sup>1</sup>, CHEN Shu-dan<sup>1,2</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>

(1 *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:** Through introducing CMOS image sensor LUPA-1300-2, the application of multiple slope integration function in the spatial transient light detection system is investigated. Based on ACTEL corporation's Flash FPGA APA600 as the hardware carrier, the drive and control for the sensor are analyzed and designed. The experiment results show that the function is able to detect the instantaneous changes around the spatial transient optical point, and enhance system's reliability and capability of information collection.

**Key words:** CMOS image sensor; Multi slope integration; Spatial transient light; Dynamic range; FPGA



**YANG Wen-cai** was born in 1981. He is studying for his M. S. degree, and his research interests focus on signal and information Processing.