

文章编号 1004-924X(2008)10-1869-05

TDICCD 相机的低噪声视频处理技术

郝贤鹏^{1,2}, 任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:建立了 TDICCD 相机系统的噪声模型, 分析了 TDICCD 视频信号读出复位噪声的产生机理, 讨论了相关双采样技术的工作原理; 给出了 TDICCD 相机视频处理电路各个组成部分的设计, 并进行了分析。在此基础上设计了科学级 TDICCD 相机。实验结果表明, 该视频处理电路在本身引入噪声较小的同时, 有效地抑制了暗电流噪声、复位噪声、 $1/f$ 噪声等, 数据输出速率在 55 MHz 时, 整机信噪比(S/N)在 50 dB 以上。

关键词:TDICCD 相机; 低噪声; 相关双采样; 视频处理

中图分类号:TP73;V447.2 **文献标识码:**A

Low noise video processing technique for TDICCD camera

HAO Xian-peng^{1,2}, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: A noise model of TDICCD camera system was developed, the generated mechanism of read reset noise of TDICCD video signal was analyzed and the principle of Correlated Double Sampling (CDS) technique for high S/N (signal to noise ratio) and excellent imaging of TDICCD camera were discussed also. Each part of the video processing circuit was analyzed and the design methods were presented. The scientific grade TDICCD camera was designed according to analyzed results. Experimental results show that the designed circuit can effectively suppress dark current noise, reset noise and $1/f$ noise. The output S/N of TDICCD camera can exceed 50 dB when the data rate is 55 MHz.

Key words: TDICCD camera; low noise; Correlated Double Sampling(CDS); video processing

1 引言

TDICCD(Time Delay Integration CCD)器件是一种特殊的 CCD 传感器,具有多级结构,它采

用同步多级时间累积积分来延长曝光时间,与同样的线阵 CCD 比,由于 M 级积分的 TDICCD 的光能量利用率可提高 M 倍,信噪比可提高 \sqrt{M} 倍,从而降低了对相机相对孔径的要求,减小了相机系统的重量和体积,大大降低了成本。科学级

收稿日期:2008-05-29;修订日期:2008-07-09.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划基金资助项目(No. 863-2-5-1-13B)

TDICCD 相机 (Scientific grade TDICCD camera) 是一种具有低噪声、高灵敏度、大动态范围和高质量效率的优良性能的相机,它在空间遥感、天文观测、武器装备等多种技术领域得到了广泛应用^[1-3]。

TDICCD 器件的输出信号是空间采样的离散的模拟信号,即有模拟信号和数字信号的双重特性,其中夹杂着各种噪声和干扰,为了保证在 TDICCD 的动态范围内得到高信噪比的视频信号,以获得较高的图像质量,必须对这些噪声予以抑制。本文分析了 TDICCD 相机的噪声特征及其处理方法,介绍了 TDICCD 相机低噪声视频处理电路的原理设计,构建测试平台,并给出了实验测试结果。

2 TDICCD 相机噪声分析及改进

提高 TDICCD 相机的成像质量,首先应分析相机噪声的构成和机理,然后根据各噪声的特点分别采取行之有效的措施。TDICCD 相机系统中噪声主要包括 TDICCD 图像传感器的噪声以及片外视频系统的噪声两部分,如图 1 所示。TDICCD 的自身噪声包括光子散粒噪声、暗电流噪声、复位噪声、低频噪声和白噪声等。光子散粒

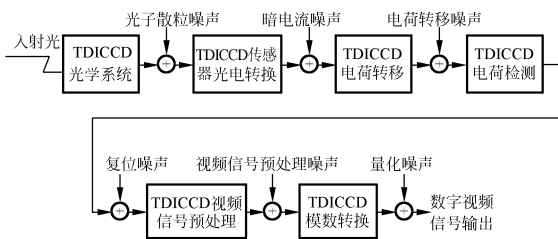


图 1 TDICCD 相机系统中的噪声源

Fig. 1 Noise source of TDICCD camera

噪声为 CCD 固有噪声,不能被抑制;对于暗电流噪声,当 CCD 的工作温度降低到 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,可以使暗电流噪声得到很大程度的抑制。片外视频系统的噪声主要有视频信号预处理噪声和量化噪声。视频预处理噪声通过采用低噪声器件和相关的低噪声设计与布线技术将大大降低,可忽略不计;为了减小量化误差对系统误差的影响,应尽量增大系统的增益。所以,视频信号处理电路需要

抑制的主要噪声源只剩下复位噪声和对系统噪声影响相对来说比较小的低频噪声和宽带白噪声^[4]。

2.1 复位噪声

复位噪声的产生与 CCD 的输出结构有密切联系,目前 TDICCD 最常用的是浮置扩散放大器结构 FDA (Floating Diffusion Amplifier),如图 2 所示^[5]。其中, φ_R 、 R_{ON} 、 R_{OFF} 、 C_0 是复位 MOS 晶体管的等效模型, R_{ON} 为 T_1 在导通时的阻抗, R_{OFF} 为 T_1 在关断时的阻抗、 C_0 为浮置扩散对地电容; T_2 是输出 MOS 晶体管。

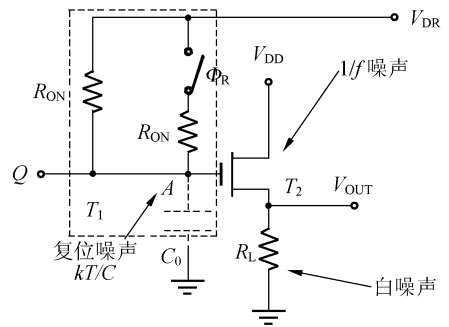


图 2 TDICCD 浮置扩散放大器输出方式等效电路

Fig. 2 Equivalent electric circuit of floating diffusion amplifier

当复位噪声对 C_0 充电时, A 点处的复位噪声电压均方值为:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{RC_0}\right) \right], \quad (1)$$

式中: R 为 A 点处的交流对地电阻。由于 T_2 的输入阻抗极高,浮置扩散区与衬底又处于反偏,故可认为 R 就是复位管 T_1 的沟道电阻。当进行“复位”时,也就是 φ_R 加上正脉冲使 T_1 导通,此时 $V_A \approx V_{DR}$,一般 $R = R_{ON} = 10^4\ \Omega$ 、 $C_0 = 0.1\ \text{pF}$ 数量级,则时间常数为: $t_{ON} = R_{ON} \cdot C_0 = 1\ \text{ns}$ 。而一般复位脉冲频率在几 MHz 以下,其脉冲周期 t 为微秒级,所以, $t \gg t_{ON}$,此时 A 点处的复位噪声电压将为:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{R_{ON} \cdot C_0}\right) \right] = \frac{kT}{C_0}, \quad (2)$$

也就是说,在“复位”时间间隔内,复位噪声电荷将迅速在 C_0 中充满,系统将处于稳态。

当 φ_R 为零电位时,复位管 T_1 关断。此时 A

点处于高电阻状态, $R_{OFF} > 10^6 \Omega$, 达到 $10^{10} \Omega$ 以上。此时, 时间常数为: $t_{OFF} = R_{OFF} \cdot C_0 = 1 \text{ ms}$ 。而一般复位脉冲周期 t 为 μs 级, 可见 $t \ll t_{OFF}$

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{R_{OFF} \cdot C_0}\right) \right] = 0, \quad (3)$$

也就是说, 因为放电回路时间常数 $R_{OFF} \cdot C_0$ 很大, 在 T_1 关闭的时间间隔中, 可以认为 C_0 中仍保持“复位”时引入的复位噪声, TDICCD 的复位 MOSFET 场效应管输出信号如图 3 所示。

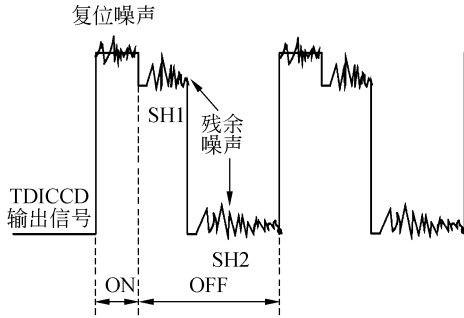


图 3 TDICCD 复位 MOSFET 场效应管的输出信号波形

Fig. 3 Output signal waveform of TDICCD reset MOSFET

由于当复位管 T_1 打开时 (ON 状态), 时间常数 $R_{ON} \cdot C_0$ 很小, 复位噪声电荷将迅速在 C_0 中充满, 系统将处于稳态; 当复位管 T_1 关断时 (OFF 状态), 此时时间常数 $R_{OFF} \cdot C_0$ 很大, 远大于复位区间时间间隔, 因而此时引入的残余噪声与复位区间引入的噪声值差不多, 因此 TDICCD 输出信号将不可避免地复位噪声混在一起, 无论在参考点 SH1 或 SH2 采样输出, 其复位噪声电压均为 $\sqrt{kT/C_0}$ 。

2.2 相关双采样原理

相关双采样基本原理是利用复位管的输出级的等效电容 C_0 上噪声电压涨落缓慢这一特点, 在同一像素周期内分别对输出参考电平和信号电平进行采样, 并使得两次采样时间间隔远小于时间常数 $R_{OFF} \cdot C_0$ 。这样, 由于两次采样的噪声电压相差甚小, 所以, 两次取样的时间是相关的。若将两次采样值相减, 复位噪声就从输入信号中抑制了, 两次采样之差就是视频信号的真实成分^[6], 其原理框图如图 4 所示。

经过采样保持器 SH1、SH2 后, 得到的输出

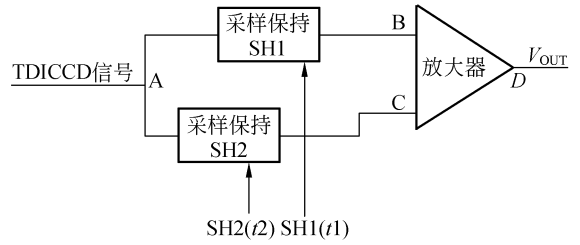


图 4 CDS 原理框图

Fig. 4 Principle of Correlated Couple Sampling (CDS)

信号:

$$\begin{aligned} \overline{V_{OUT}^2} &= \overline{V_B^2} - \overline{V_C^2} = \\ &= \overline{V_{TDICCD}^2} + \frac{kt}{C_0} \exp\left(-\frac{2\Delta t}{R_{OFF} C_0}\right) \cdot \\ &= \left[\exp\left(-\frac{2\Delta \tau}{R_{OFF} C_0}\right) \right]^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: Δt 表示复位管 T_1 截止到采样保持脉冲 SH1 导通的时间间隔, $\Delta \tau$ 表示两次取样之间的时间间隔。由于两次取样都是在复位开关截止时间内进行的, 且 $\Delta \tau \ll R_{OFF} \cdot C_0$, 可以求得:

$$\exp\left(-\frac{2\Delta \tau}{R_{OFF} \cdot C_0}\right) \rightarrow 1, \quad (5)$$

所以, 输出信号可表示为:

$$\overline{V_{OUT}^2} = \overline{V_{TDICCD}^2}, \quad (6)$$

由此可见, 两次采样点的噪声是相关的, 且采样间隔 $\Delta \tau$ 越小对复位噪声抑制的程度越大, 所以复位噪声基本能够消除。

CDS 技术的关键在于取样保持, 要求两个取样保持的脉冲和 CCD 数据时钟之间要有严格的相位关系, 而且要求取样保持器要有严格的对称性。

3 TDICCD 相机低噪声视频处理电路原理设计

TDICCD 相机低噪声视频处理电路原理设计主要由两部分组成: 前处理电路和后处理电路, 如图 5 所示。前处理电路主要是对 TDICCD 输出的视频信号进行预处理, 以及滤波、放大, 以降低噪声对信号的影响, 使信号符合 CDS 电路的要求; 后处理电路主要是去除信号复位噪声, 将模拟信号转换为数字信号^[7]。

1/f 噪声等,能够提高信噪比,改善成像质量。该系统成像画面清楚,整个系统数据输出速率在 55 MHz 时,信噪比达到 50 dB 以上,完全可满足实用化的要求。

参考文献:

- [1] GERALD C H. *CCD Arrays Cameras and Displays*[M]. SPIE Optical Engineering Press,1998.
- [2] 李文煜,程湘爱,赵伊君. TDI-CCD 的特性及改进方法分析[J]. 半导体光电,2005,26(3): 409-411.
LI W Y, CHENG X A, ZHAO Y J. Characteristics Of TDI-CCD and Their Improvement[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2005,26(3): 409-411. (in Chinese)
- [3] 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.
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI-CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)
- [4] 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.
TONG SH F, RUAN J, HAO ZH H. Noise reducing scheme on output signal of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 140-145. (in Chinese)
- [5] 黄巧林,金伟其,朱敏. 航天 TDI-CCD 相机视频信号处理中相关双采样技术的研究[J]. 航天返回与遥感,2002,23(4):17-25.
HUANG Q L, JIN W Q, ZHU M. TDI-CCD video data sampling technique for space remote sensing camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002,23(4):17-25. (in Chinese)
- [6] 黄美玲,张伯珩,边川平,等. 相关双采样技术在航天相机中的应用研究[J]. 传感器技术, 2005,24(8):31-33.
HUANG M L, ZHANG B H, BIAN CH P, *et al.*. Application research of correlated double sampling technique in space camera[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005,24(8):31-33. (in Chinese)
- [7] 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.
XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8):1191-1195. (in Chinese)
- [8] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
TONG SH B, HUA CH Y. *Fundamentals of Analog Electronics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese)
- [9] Philips Semiconductors Inc. TDA8783 Datasheet[OL]. <http://www.semiconductors.philips.com>

作者简介:郝贤鹏(1979—),男,黑龙江尚志人,博士研究生,主要从事空间遥感器成像系统设计、精密智能仪器设计、数字信号处理技术等方面的研究。E-mail:haoxp@ciomp.ac.cn