

·测试、试验与仿真·

## CCD 噪声建模与仿真分析

江宝坦<sup>1,2</sup>, 邱跃洪<sup>1</sup>, 文 延<sup>1</sup>, 陈 智<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高在弱光照下电荷耦合器件图像传感器 CCD(charge coupled device)工作性能, 分析了传统相关双采样(correlated double sampling)技术的不足, 介绍了在数字域对 CCD 读出噪声抑制的方法. 首先, 分析了 CCD 的各种噪声源, 然后在 MATLAB 中建立 CCD 噪声的产生与分析平台. 由此平台的分析结果可以看出, 在弱光照、低频输出速率情况下, 能为实际数字滤波电路设计出合适的数字滤波器. 因此, 在数字域处理 CCD 噪声, 不仅没有引入其他电路噪声, 而且比传统方法能更好地抑制复位噪声.

**关键词:** 电荷耦合器件; 噪声分析; 数字滤波器, 离散傅里叶变换

**中图分类号:** TN386.5; TP391.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)02-0064-04

## Modeling and Analyzing the Noise of CCD

JIANG Bao-tan<sup>1,2</sup>, QIU Yue-hong<sup>1</sup>, WEN Yan<sup>1</sup>, CHEN Zhi<sup>1</sup>

(1. Xian Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China;

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

**Abstract:** In order to improve performance of CCD(charge coupled device) at low light levels, a new technique of eliminating readout noise is presented after analyzing the short of classical technique, namely, correlated double sampling. First, the primary kinds of noise in CCD are analyzed, and then a platform for generating and analyzing the noise in CCD is established. An array of proper numbers can be found to be used in the practical filter circuit from the result obtained by the platform under low light level. Therefore, the reset noise of CCD can be eliminated more efficiently than classical technique and any other noise passes doesn't introduced through digital filter.

**Key words:** charge-coupled device; noise analysis; digital filter; discrete Fourier transform

电荷耦合器件 CCD(charge coupled devices)是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型半导体器件. 由于其具有自扫描、高分辨率、易与计算机连接等特点, 以及噪声低、动态范围大、量子效率高、电荷转移效率高、光谱响应范围宽、几何稳定性好等突出优点, 使得其作为一种自扫描式光电接收器件, 广泛应用于工业监控、非接触测量、PC、多媒体技术、天文观测、图像识别、可视通信等领域<sup>[1]</sup>. 在 CCD 采集系统中, CCD 图像传感器输出的信号是一组空间采样离散的模拟信号, 其中夹杂着各种噪声和干扰. 首先

介绍了 CCD 的噪声来源与分类、以及传统的降噪措施, 接着重点分析了复位噪声, 并介绍数字域滤波算法对复位噪声的抑制, 以及通过数学仿真软件 MATLAB, 建立 CCD 噪声分析平台, 分析带有复位噪声的视频信号.

### 1 CCD 噪声来源

噪声概括起来主要包括以下几种<sup>[2,3]</sup>: 光子散粒噪声、复位噪声、暗电流噪声、模式噪声、 $1/f$  噪声、宽带白噪声及量化噪声; 其中模式噪声分为固定

收稿日期: 2009-01-30

基金项目: 国家 863 计划(2006AA12Z133)

作者简介: 江宝坦(1983-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 研究方向为信号与信息处理.

模式噪声和像元响应不均匀性噪声 2 种;  $1/f$  噪声、宽带白噪声均属于放大电路引入的噪声, 因此根据放大电路是否在 CCD 内部, 将其分为片上放大器噪声和片外放大器噪声 2 种. 光子散粒噪声、复位噪声、暗电流噪声、模式噪声及片上放大器噪声是由 CCD 探测器本身引入; 而片外放大器噪声和量化噪声是在 CCD 视频处理链路中引入的. CCD 相机系统噪声模型及各噪声引入示意图如图 1 所示.

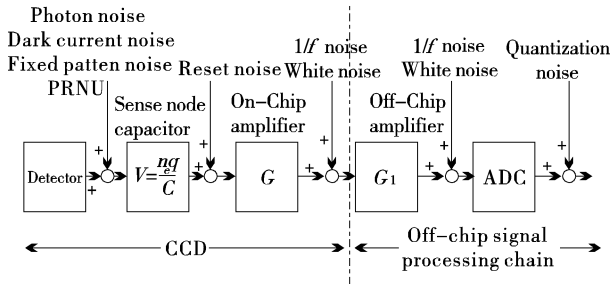


图 1 CCD 相机系统噪声模型

由于光子噪声是不能消除的系统噪声, 暗电流噪声可以采用制冷技术将其降低到可以忽略的程度, 固定模式噪声可以采用制冷和定标技术将其消除, 采用高分辨率 A/D 转换器可以减小量化噪声, 而对于复位噪声和  $1/f$  噪声等读出噪声, 即使采用目前广泛应用的相关双采样技术 (correlated double sampling)<sup>[1]</sup> 也只能将其减小到十分之一左右, 而这十分之一通常是决定光学探测器噪声水平的主要因素. 因而, 必须考虑进一步减小读出噪声的新思路和新途径, 以提高光学探测器的动态范围和对弱目标的探测能力.

## 2 CCD 读出噪声抑制

### 2.1 复位噪声的来源

读出噪声中的复位噪声与 CCD 的输出结构有密切关系, 主要由 CCD 输出级复位的电阻热噪声所引起. 典型的 CCD 浮置扩散输出结构如图 2 所示, 其中复位管的等效 RC 电路如图 3 所示.

在图 2 中, 每一次信号的读取都以单个电荷包的形式出现在放大器的栅节点 A 上. 每个信号电荷包产生的电压变化被读出后, 输出管 T 的栅节点需加以复位. 当复位脉冲到来时, 复位管导通,  $R_{on}$  为导通时的电阻, 它所产生的电阻热噪声加在电容  $C_s$  的两端, 使输出的视频信号中引入了复位噪声, 由于复位脉冲周期  $t \gg R_{on} \times C_s$ , 故此时栅节点 A 的复位

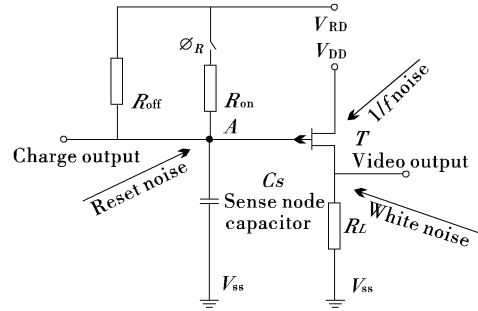


图 2 CCD 浮置扩散输出电路

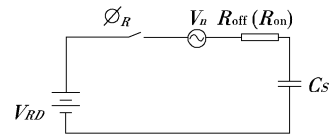


图 3 等效的 RC 电路

噪声电压均方值为

$$\overline{V^2(t)} = \frac{KT}{C_s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2t}{R_{on}C_s}\right) \right] = \frac{KT}{C_s} \quad (1)$$

式中,  $K$  为波尔兹曼常数,  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K;  $T$  为 CCD 的工作温度<sup>[1]</sup>. 当复位脉冲过去后, 复位管截止, 截止沟道电阻为  $R_{off}$ , 此时  $C_s$  处于放电状态, 此时既要考虑复位噪声按  $R_{off}C_s$  时间常数在  $C_s$  上充电, 又要考虑缓慢放电. 又因为充电作用近似为零, 于是可以认为此时栅节点处的复位噪声电压均方值为

$$\overline{V^2(t)} = \frac{KT}{C_s} \exp\left[-\frac{2t}{R_{off}C_s}\right] \quad (2)$$

从式 (2) 可以看出, 当读出速率很慢时 (大约 20 kHz), 在一个像元时钟周期内, 复位噪声在复位脉冲过去后, 在慢输出速率下, KTC 噪声值是逐渐衰减的, 所以, 此时传统的相关双采样技术 (CDS) 并不能很好地抑制复位噪声.

### 2.2 片上放大噪声

除了复位管构成的复位电路引入到复位噪声外, 由图 2 可以看出还包括由输出 MOSFET 管 T 以及负载电阻  $R_L$  构成的输出放大电路, 该输出放大电路会引入低频  $1/f$  噪声和白噪声, 综合考虑  $1/f$  噪声和白噪声 2 个噪声源, 可以得到片上输出放大器的噪声方程如式 (3) 所示

$$V_{on-chip} = V_{nw} \left( 1 + \frac{f_{knee}}{f} \right) \sqrt{\Delta f} \quad (3)$$

其中,  $V_{nw}$  为白噪声电平;  $f_{knee}$  为转角频率 (即当  $1/f$  噪声功率等于白噪声功率时的频率);  $\Delta f$  为输出放大电路的噪声等效带宽, 它与像元读出频率成正

比.片上输出放大器噪声实际即为 CCD 器件手册上通常给出的读出噪声.

### 2.3 噪声抑制技术

针对复位噪声的特点,当前降低 CCD 读出噪声水平的主要技术措施有 2 种:电子倍增技术<sup>[4,5]</sup>和相关双采样(CDS)技术.电子倍增技术的原理是在 CCD 芯片内部采用电子倍增技术将读出之前的光电荷放大较高的倍数,从而将读出噪声减小到亚电子水平,E2V 公司和 TI 公司有采用该技术的产品,但产品种类有限,大信号时信噪比常规技术的 CCD 差.相关双采样(CDS)技术是目前比较通用的和最主要的 CCD 噪声抑制技术,自 20 世纪 70 年代提出以来一直被广泛采用,其原理是利用复位噪声的缓变特性,采用相关处理技术将其抑制,它有多种实现形式,但都是模拟实现,其频域特性对于 CCD 信号噪声特性而言不是最佳的,因而其抑制噪声的能力限制在十分之一左右.

为了突破传统相关双采样(CDS)技术的瓶颈,必须考虑新的解决方案.一种可行的思路是:借鉴软件无线电技术的概念,利用高速高分辨率 A/D 转换器以远高于读出速率的采样频率将 CCD 视频信号数字化,然后针对 CCD 信号读出噪声的特性设计最优的数字信号处理算法,将噪声抑制到亚电子水平,当前大规模集成电路技术尤其是高速高分辨率 A/D 转换器技术和数字信号处理技术为这一新思路的实现提供了技术基础.该新技术相对 EMC-CD 技术具有更强的通用性,不仅能减小 CCD 读出噪声,而且也能为用高速低分辨率 ADC 实现低速高分辨(16 bit)要求提供了一种技术途径.

为此,文献[6]提出了一种权值滤波的方案,通过分析 CCD 输出信号的特点,发现 CCD 输出信号在一个像元周期内,参考电平和像元输出附近采样数据的相关性明显比其两边较远处的高得多,也就是说,此处的采样点包含了更多的有用信息,所以对该处的采样数据赋予更大的权值可以有效抑制输出噪声.这样对一个像元周期内的采样数据赋予的权值近似高斯概率分布函数的钟形,为了达到数字 CDS 的效果,其中前半参考电平采样值的权值系数取负值.具体算法如下

$$Pix = \frac{\sum_{i=n}^{2n-1} \alpha_i s_i}{\sum_{i=n}^{2n-1} \alpha_i} - \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i s_i}{\sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i} \quad (4)$$

式中, $s_i$  是第  $i$  个采样值; $\alpha_i$  为第  $i$  个采样点的加权系数,而且  $\alpha_i = \alpha_{2n+1-i}$ .一个像元周期内采样  $2n$  个数据,其中前  $n$  个是参考电平的采样点数.实际应用中式(4)还可以再简化,即给前  $n$  个加权系数取负值,简化为

$$Pix = \frac{\sum_{i=0}^{2n-1} \omega_i s_i}{\sum_{i=0}^{2n-1} \omega_i} \quad (5)$$

其中, $\omega_i = -\omega_{2n+1-i}$ ,实验中用到的一组高斯形权值数据数值分布图如图 4 所示.

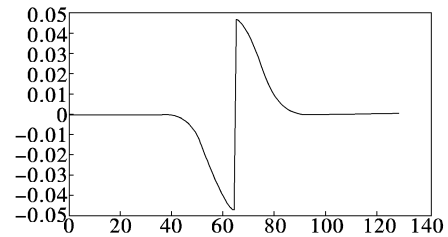


图 4 高斯形权值滤波系数

对 CCD 输出的像元数据直接采样,并进行权值滤波,既可以得到模拟 CDS 的效果,又可以省去实际中 CDS 电路引入的噪声,从而可以提高信号的信噪比.

### 2.4 数字滤波模拟实现

#### 2.4.1 频域滤波实现

文中重点介绍视频信号噪声的频域处理方法,首先在数学仿真软件 MATLAB 中建立 CCD 噪声分析平台,该平台操作界面如图 6 所示,通过此模拟平台,不但可以很方便地模拟出传统 CDS 技术对复位噪声的抑制效果,还可以分析视频信号的频谱特性,典型视频信号如图 5 所示,复位噪声在复位管导通阶段,其噪声电压的均方值为  $KT/C_s$ ,在复位管截止阶段,由式(2)可知复位噪声按指数衰减,其频谱只与复位管截止电阻( $R_{off}$ )和  $C_s$  有关,所以基本不会变化.而 CCD 的读出噪声为高斯白噪声,分布于整个频谱,但一般读出噪声都很小,只有几个电子,所以可以通过频域滤波的方法消除复位噪声,同时也能减小高斯白噪声.

具体方法为:直接对每个像元采样,经过快速傅里叶变换,在频域进行滤波.通过此仿真平台,可以修改各种参数,如:复位管截止电阻  $R_{off}$ 、工作温度  $T$ 、像元读出频率、每个像元的采样点数,以及不同 CCD 的输出响应度和读出噪声电子数.然后改变像元的输出峰值和 CCD 的读出噪声电子数,分析复位噪声和高斯白噪声对滤波结果的影响.文中以 E2V 公司的

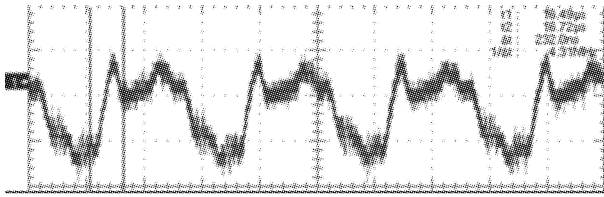


图 5 示波器显示的视频信号

CCD47-20 AIMO 为例,其读出噪声在 20 kHz 时为  $2e^-$ ,输出响应度为  $4.5 \text{ uv}/e^-$ ,读出噪声电子数为  $2e^-$ .由输出响应度可计算出  $C_s = 35.6 \text{ fF}$ .通过仿真分析,可以得出频域滤波能更好地抑制噪声.

### 2.4.2 高斯权值滤波器仿真

通过以上对复位噪声的定量分析可得,高斯权

值滤波不仅比传统的相关双采样(CDS)技术能更有效地抑制复位噪声,而且由于完全在数字信号下处理,也就不会再引入其他电路噪声.通过此噪声分析平台在不同工作频率和不同的采样点数下,可得出最佳的高斯滤波权值.对 CCD47-20 AIMO 的实验结果可以看出,在读出频率 20 kHz 时,数字域下的高斯权值滤波能够很好地抑制复位噪声,如图 6 中的坐标轴 -1 所示,比传统 CDS 技术达到更好地抑制噪声效果.

## 3 结束语

虽然在高速输出应用场合,相关双采样技术

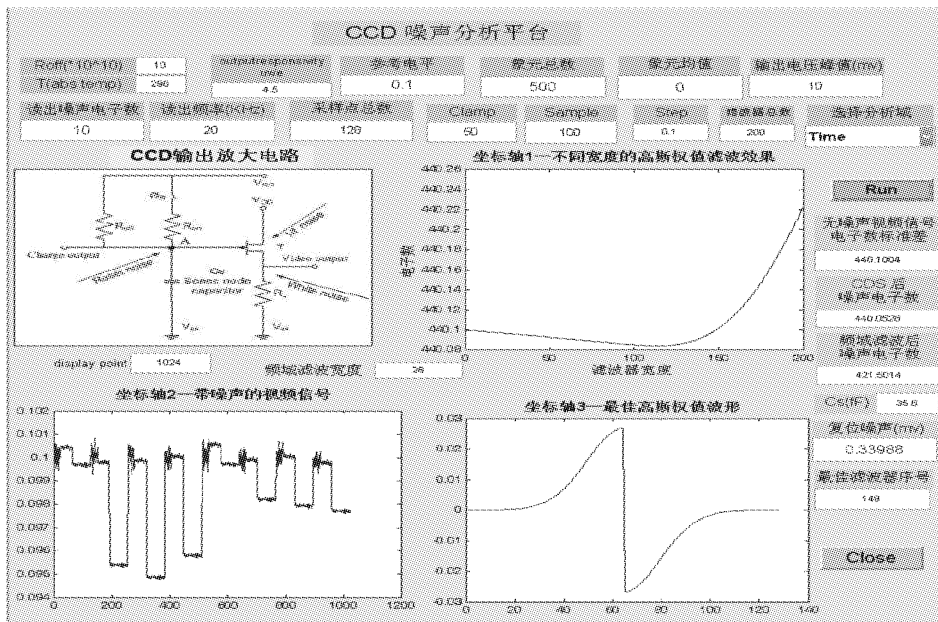


图 6 CCD 噪声分析平台

(CDS)能够很好地抑制 CCD 复位噪声,但随着 DSP、FPGA 等大规模集成电路的发展和模数转换器性能的进一步提高,以及各种新算法的出现,使得数字域对信号处理的灵活性和实时性越来越可行.分析了 CCD 各种噪声来源及其特性,特别在天文观测这种弱光照、低输出速率应用时,研究了针对 CCD 的主要噪声复位噪声抑制的滤波算法,在 MATLAB 中建立 CCD 噪声产生与分析平台,并以 CCD47-20AIMO 为例,分析比较了不同滤波方法的结果,为后续实际电路的设计提供依据.

### 参考文献

[1] 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.

[2] 王书宏,胡谋法,陈曾平. 天文 CCD 相机的噪声分析与信噪比模型的研究[J]. 半导体光电,2007,28(5): 731-734.

[3] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8) : 1196-1202.

[4] 张闻文,陈钱. 电子倍增 CCD 噪声特性研究[J]. 光子学报,2009,38(4):756-760.

[5] 唐红民,魏宏刚,廖胜. 电子倍增 CCD(EMCCD)的噪声特性分析[J]. 应用光学,2009, 30(3):386-390.

[6] Gach J L, Darson D,Guillaume C M,et al. A new digital CCD readout technique for ultra-low-noise CCDs [J]. The Astronomical Society of the Pacific,2003,115(9):1 068-1 071.

[7] 蔡荣太,王延杰. CCD 成像传感器的降噪技术[J]. 半导体光电,2007,28(5): 607-612.