

CCD 噪声分析及处理技术

许秀贞, 李自田, 薛利军

(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘要: 为了提高 CCD 的工作性能, 根据 CCD 器件的工作原理, 对 CCD 图像的噪声组成进行了较完整的分析, 给出了其噪声的详细分类。根据各噪声的特点, 提出了相应的噪声处理技术, 并针对输出噪声, 给出了双相关采样法、双斜积分法、钳位采样法三种相关双采样电路处理方式, 使器件的信噪比得以提高。

关键词: CCD; 暗电流噪声; 输出噪声; 相关双采样

中图分类号: TN386.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)04-0343-04

Analysis and processing of CCD noise

XU Xiu-zhen, LI Zi-tian, XUE Li-jun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

Abstract: In order to improve CCD performance, the noise composition in CCD image is analyzed according to the operating principle of CCD, and CCD noise is categorized. Corresponding measures are introduced to deal with different noise. Signal processing schemes of double-correlated sampling, dual slope integration and clamp sample are given to eliminate readout noise in this paper. As a result, the SNR of CCD is improved.

Key words: CCD; Dark current noise; Readout noise; Correlated Double Sampling (CDS)

0 引言

目前, CCD 器件以其自扫描、高分辨率、易与计算机连接等特点, 以及输出噪声低、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, 被认为是可见光成像、空间光学、微

光夜视等领域最有前途的探测器件^[1]。

CCD 图像传感器的输出信号是空间采样的离散模拟信号, 其中夹杂着各种噪声和干扰。对 CCD 信号进行处理的目的是在不损失图像细节的前提下尽可能消除噪声和干扰, 以提高信噪比, 获取高质量的图像。为此必须对 CCD 噪声的种类、特性有所了解, 并针对各种噪声进行相应的去噪处理。

收稿日期: 2003-08-26; 修订日期: 2003-10-08

作者简介: 许秀贞(1979-), 女, 山东济宁人, 硕士生, 主要研究方向为 CCD 信号与信息处理。

1 CCD 的噪声分析

在 CCD 中存在以下几种主要噪声:

(1) 光子噪声^[2]:光子发射是随机的,因此,势阱收集光信号电荷也是一个随机过程,这就构成了一种噪声源,它是由光子的性质决定的。这种噪声在低照度摄像时会较严重。

(2) 散粒噪声^[3]:光注入光敏区产生信号电荷的过程是随机的。单位时间产生的光生电荷数目在平均值上作微小波动,即形成散粒噪声。散粒噪声与频率无关,在所有频率范围内有均匀的功率分布(白噪声特性)。低照度、低反差条件下,当其他噪声被各种方法抑制后,散粒噪声将成为 CCD 的主要噪声,并决定了器件的极限噪声水平。

(3) 肥零噪声:肥零,即采用肥零电荷填充势阱位置,使信号电荷可以通过杂乱无章的区域进行转移,分为光学肥零和电子肥零。其产生的噪声分为光学肥零噪声和电子肥零噪声,光学肥零噪声由所使用的 CCD 的偏置光的大小决定,电子肥零噪声由电子注入肥零机构决定。

(4) 转移噪声:CCD 中前一电荷包的电荷未进行完全转移,一部分电荷残存在势阱中,成为后来电荷包的噪声干扰。引起转移噪声的根本原因是转移损失、界面态俘获和体态俘获。

(5) 暗电流噪声:半导体内部由于热运动产生的载流子填充势阱,在驱动脉冲的作用下被转移,并在输出端形成电流,即使在完全无光的情况下也存在,即暗电流。暗电流分为扩散暗电流和表面暗电流等。扩散暗电流产生于 CCD 的导电沟道和势阱下的自由区域,其扩散长度越短,势阱数目越多,暗电流越大。表面暗电流是指一个电子能够在热激发下从界面态跃跳到导带,形成自由电子后又被势阱当作暗电荷收集起来形成的电流。

所有的 CCD 传感器都会受到暗电流的影响,它的存在限制了器件的灵敏度和动态范围。由于热运动产生的暗电流噪声的大小与温度的关系极为密切,温度每增加 $5^{\circ}\text{C}\sim 6^{\circ}\text{C}$,暗电流将增加到原来的两倍。它还与电荷包在势阱中存储时间的长短有关,存储时

间越长,暗电流噪声越大。在弱信号条件下,CCD 采用长时间积分的方法进行观测,暗电流将是主要的影响因素。

另外,在 CCD 阵列中,局部晶格缺陷或杂质的存在还可造成暗电流尖峰。随着掺杂浓度增大,离表面距离越近,电场强度就越大。在最接近表面处,电场强度达到最大,暗电流峰值就更容易出现。暗电流峰值会给图像背景造成很大涨落。

(6) 输出噪声^[1,4]:CCD 信号的输出是通过浮置电容将 CCD 的信号电荷转换成为相应的电压,并多采用浮置扩散型电容输出,其原理如图 1 所示。 T_1 是复位开关,其漏极接至复位电平; T_2 是浮置扩散放大器,实际上是一个电压跟随器; D 是电荷包收集二极管,工作于反偏电压状态下; C_s 是浮置扩散电容,用来存储电荷。

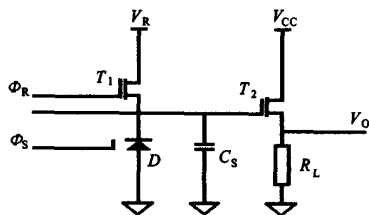


图 1 浮置扩散型 CCD 的典型输出结构

Fig. 1 The floating-diffusion output structure of the CCD

在每个像元的输出过程中,复位脉冲 Φ_R 先将 C_s 置为高电平 V_R ,当时钟驱动输出脉冲 Φ_S 到来时,待输出电荷转移到输出端,对 C_s 进行充电,使其电压下降,下降的幅度与读出电荷量成正比,由 T_2 输出。在将 C_s 置为高电平时,由于参考电源滤波不足,通过源漏极之间的导通电阻将电源的波动引入到 C_s ,产生一定压降 $\Delta V'_R$ 。

当输出信号被后续电路采集后,浮置扩散电容 C_s 将被放电,从而为下一个像元的电荷转换做好准备。将 C_s 放电的复位开关启动时有随机温度噪声加在 C_s 上,产生 kTC 噪声(T 表示绝对温度, C 表示浮置电容值, k 为玻耳兹曼常量)。另一方面,当 CCD 的像元输出速率较高时,电容将没有足够的时间放电,这就造成电容上每次都有剩余电荷,从而使 CCD

输出信号发生畸变,这种噪声和由 $\Delta V'_R$ 产生的噪声为复位噪声。

2 CCD 噪声处理

图像的质量与信噪比有着密切的关系,要提高图像信噪比必须减小噪声。在 CCD 应用中为抑制和消除上述噪声采取了以下措施:

(1) 在电路工艺上,增加直流电源的滤波,消除来自电源的干扰。缩短驱动电路与 CCD 器件的连线,降低时钟感应造成的尖峰干扰。数字地与模拟地分开,减少来自地线的干扰。采用三阶滤波电路滤除高频噪声。

(2) 对于转移噪声,采用将 CCD 电压取反倒置或者提高衬底电压使 CCD 电压倒置,可以消除界面态俘获噪声;降低运行温度可以使体俘获噪声明显呈指数减小。另外,将 CCD 在序列图像取出之前放电,也可以有效减小转移噪声。

(3) 对于散粒噪声,传统的相邻像素或相邻行积分平均器法较大地影响了水平和垂直分辨率。在此,介绍相邻多帧取平均法,即将采集的多帧图像加权取平均后作为输出信号。这样,散粒噪声就能得到较好的抑制了。其原理如图 2 所示。

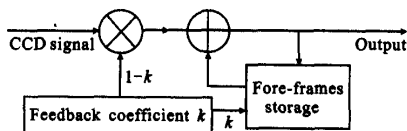


图2 CCD图像多帧平均处理原理

Fig. 2 The principle of taking the average from close frames

将新采集的图像以比例系数 $(1-k)$ 与前面采集的多帧图像加权求和取平均,作为输出信号,能较好地消除散粒噪声。在图像的输出端加一个图像检测处理器,以形成闭环控制。

(4) 暗电流噪声:对于各像元暗电流较平均的 CCD 来说,如果在像元阵列的起始处有少量哑像元(被遮盖着不对景物曝光,但仍有暗电流产生),则对其输出信号采样存储,并与后续有效像元的输出信号

采样值相减以去除暗电流噪声。但必须保证两次采样的积分时间和温度相同。对于含有暗电流尖峰的 CCD,由于尖峰总是出现在固定的像元位置,因此可以预先记录其位置及大小,每次采样到这个像元时,与其相减即可去除暗电流尖峰。而且,暗电流与电荷转移时间成正比,故需尽量减小 CCD 的电荷转移时间。另外,在应用中对 CCD 器件采取制冷措施,当温度降到 $-30^{\circ}\text{C} \sim -50^{\circ}\text{C}$ 时,暗电流噪声就小到无足轻重的程度了^[4,5]。

(5) 对输出噪声最简单的处理方法是使用截止频率为 $2f$ (f 为 CCD 读出频率)的低通滤波器。这种方法容易实现,但滤除噪声效果并不好。另外,还有相关双采样法^[6](CDS)、双斜率积分法(DSI)、反射一延迟噪声抑制法(RDS)、钳位切除法(CCS)等。此处重点介绍相关双采样(CDS)技术及钳位采样技术。

3 相关双采样

相关双采样,是在 CCD 的像元输出信号中,分别对复位噪声电平(即在复位脉冲过去之后,信号电荷包到来之前的某一时刻的电平)和像元信号电平(即信号电荷包到来时的电平)采样,再将两次采样的信号相减作为输出信号。由于两次采样的噪声是相关的,因此噪声被消除。由于两次电平采集在时间上是相关的,所以只要正确选择两次采样点的起止位置,并把两次采集的脉冲开关时间控制在适当的范围内,就能有效地抑制各种噪声干扰。下面给出三种典型的相关双采样电路。

3.1 三种典型的相关双采样电路

(1) 双相关采样法:原理如图 3 所示,在复位期间,对复位电平进行第一次采样,使 S_2 短时间闭合, C_2 电容保持的电压为复位电平(kTC 噪声、复位噪声)。在信号输出期间,进行第二次采样,使 S_1 短时间闭合, C_1 电容上的电压为 kTC 噪声、复位噪声和有用视频信号的叠加。两次采样间隔为 T_s ,两次采样值相减后得到的信号电平为输出信号。在本信号输出周期结束前,输出有效信号。双相关采样电路的 RC 常数较小,为点采样电路,采样点应尽可能选取

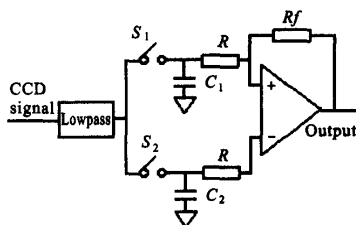


图 3 双相关采样电路原理

Fig. 3 Principle of double-correlated sample circuit

复位电平或信号电平的稳定点。其本身不具有低通滤波特性，应在它之前加低通滤波器限制带宽，从而组成双相关采样系统。

(2) 双斜积分法：双斜积分法的电路原理如图 4 所示，在输出信号周期的开始 S_3 关闭，积分电容 C 放电清零；在复位期间 S_1 闭合， S_2 断开，复位电平

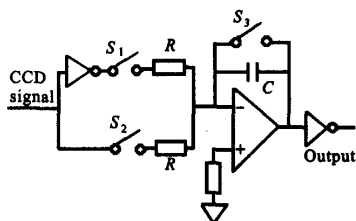


图 4 双斜积分法电路原理

Fig. 4 Principle of dual slope integration circuit

(kTC 噪声、复位噪声) 经过一反向器后对其进行积分；在信号输出期间， S_2 闭合，对叠加有 kTC 噪声、复位噪声的有用信号电平进行正向积分。在输出周期结束前积分结束，系统输出电压为有用视频信号。

双相关采样法与双斜积分法在本质上是相同的，都包括 RC 电路，也都是在一像素周期内进行前后两次采样(或积分)，系统的输出为两次采样之差，从而获得有用视频信号。但是由于 RC 常数的不同，使两者又各具特点。对于双相关采样， RC 值很小，提取信号电平非常迅速，特别适用于高频场合；而双斜积分中的 RC 常数相对于双相关采样中的 RC 常数要大得多，只要满足动态范围条件，它可以在复位时间内任意选取积分时间，且其本身含有低通滤波特性。

(3) 钳位采样法：钳位采样法原理如图 5 所示。当 CCD 器件处于复位状态时，钳位电平 Clamp 为高电平，将 T_2 栅极钳位到高电平 V_R 。当 CCD 器件进

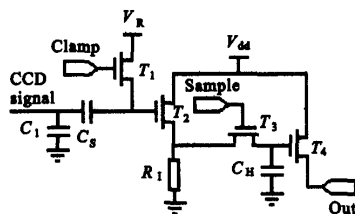


图 5 钳位采样法电路原理

Fig. 5 Principle of clamp sample circuit

入信号采样状态后，延迟一段时间，使 CCD 输出达到稳定状态，此时将钳位信号 Clamp 置为低电平。CCD 输出信号通过电容 C_1 、 C_3 耦合到 T_2 输入端。将采样电平 Sample 置为高电平， T_3 导通，并保持足够长时间，CCD 信号到达 C_H ，并对 C_H 进行充电至 CCD 信号电平。此时通过 T_4 ，CCD 输出信号变为可用，从 Out 端输出。当 CCD 器件复位信号跳变为高电平时，采样电平 Sample 置为低电平，钳位电平 Clamp 置为高电平，系统进入下一个采样周期。其中，电容网 C_1 、 C_3 将 CCD 输出信号中的直流噪声及高频干扰都滤除掉了，Out 端得到的为信号电平。

由于该采样电路的钳位电平、采样电平都与 CCD 器件的时钟周期及复位信号有紧密的相关性，其更适合于作 CCD 芯片内集成的信号输出处理电路。

3.2 结果分析

在屏蔽、超静室内用高精度示波器观测 CCD 输出像元电压信号。以质地均匀的白布或对比鲜明的明暗条纹作为被测物，取光强为 56 lx 的均匀光照，并将 CCD 镜头的光圈、焦距调至适当位置，使被测物成像最清晰，且信号大小约为 50 mV。

当取被测物为均匀光照下的白布时，CCD 输出的像元信号经复位、钳位后与经 CDS 电路(复位、钳位、采样)处理后的信号对比，如图 6 所示。

由图 6 可知，经 CDS 处理后的输出信号仅为被测物在对应像元产生的信号电荷，输出噪声已被消除。

此处选用本身读出噪声水平约为 $20 e^-$ 的 CCD 进行实验分析，该芯片带有内部钳位采样电路。芯片的灵敏度为 $2.1 \mu V/e^-$ ，即本身读出噪声为 $42 \mu V$ 。如果不采用 CDS 对输出信号进行处理，系统的噪声等效电子数很大，约为 $400 e^-$ ，即 $840 \mu V$ 。当采用外部

(下转第 357 页)

2.4 红外干扰机辐射强度的测量

得到红外干扰机的光谱辐射强度曲线后,可以很容易得到其在某个波段的辐射强度。如果要求测量红外干扰机在干扰波段(λ_3, λ_4)内的辐射强度,则可由公式(13)计算得到:

$$I = \int_{\lambda_3}^{\lambda_4} I_{\text{tar}}(\lambda) d\lambda \quad (13)$$

3 结 论

由于考虑了红外光谱仪的综合光谱响应和红外辐射计的光谱响应,所以本系统具有较高的辐射强度测量精度。实际测试结果表明,这种红外干扰机测试系统测量的辐射强度误差达到了 $\pm 2\%$ 。另外,因为本系统能够测得干扰机在 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 波段内的光谱分布,所以一方面可对干扰机进行更全面的评价;另

一方面还可以测得具有不同干扰波段的不同类型红外干扰机(只要在 $1 \sim 15 \mu\text{m}$ 波段内)的辐射强度,因而具有很好的通用性。本系统在实际应用中已经取得了较好的效果。

参考文献:

- [1] 刘君华. 检测技术与测试系统设计[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2001.
- [2] 胡士凌,孔得人. 光电电子线路[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.
- [3] 李世祥,魏江英. 红外干扰机干扰原理分析[J]. 红外与激光工程, 1994, 24(1): 10-13.
- [4] 刘敬海,孙志勇,王茜蕾,等. 红外光谱辐射计的研制[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2): 14-17.
- [5] 苏大图. 光学测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.

(上接第 346 页)

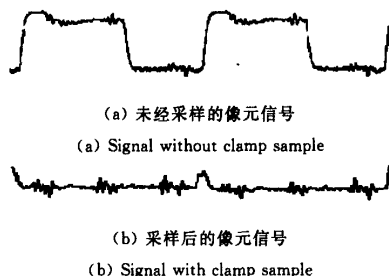


图 6 经复位、钳位采样前后信号对比

Fig. 6 Contrast between signal with clamp sample and without clamp sample

双相关采样、双斜积分法对电路进行处理后,系统的噪声水平降为 $45 \sim 50 e^-$,即 $94.5 \sim 105 \mu\text{V}$ 。采用片内的钳位采样电路时,系统的等效噪声降为约 $35 \sim 40 e^-$,即 $73.5 \sim 84 \mu\text{V}$ 。限于 CCD 其他噪声及电路结构工艺等方面的原因,系统并未达到器件本身的读出噪声水平,但是 CDS 电路的作用确实明显,已将大部分噪声消除了。

4 结 论

在 CCD 的应用过程中,应根据 CCD 噪声的特

点,做出相应的降噪处理。其中,为了减小 CCD 复位噪声和 kTC 噪声,相关双采样技术得到了极为广泛的应用。现在,许多公司专门研制开发了单片 CCD 信号处理芯片,如 ADI 公司的 AD9807, XRD 公司的 XRD98L61, TI 公司的 VSP 系列 CCD 信号处理器等。它们不仅具有 CDS 功能,还具有自动暗电流补偿、自动增益控制、模数变换等功能。

另外,随着 CCD 的迅速发展,已经出现了输出电容很小,灵敏度很高的 CCD 器件,在一定条件下可以对噪声处理过程进行适当简化。

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, 2002, 8(2): 140-145.
- [2] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津:天津大学出版社, 2000. 30-45.
- [3] Kriss Michael, Parulski Ken, David Lewis. Critical technologies for still imaging systems[A]. SPIE[C]. 1989, 1082. 157-183.
- [4] 江孝国,祁双喜,王婉丽,等. CCD 输出信号的低噪声处理电路研究[J]. 光电子·激光, 2001, 12(11): 1126-1129.
- [5] Jim Janesick, Tom Ellion. Sandbox CCDs[A]. SPIE[C]. 1995, 2415. 2-41.
- [6] 张坤. 高帧速 CCD 摄像器件的设计[J]. 红外与激光工程, 1999, 28(2): 58-61.