

# 基于相关双采样技术的 CCD 视频信号处理研究

张 林<sup>1,2</sup> 李永新<sup>1</sup> 胡学友<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094 2. 合肥学院电子系, 合肥 230022)

**摘 要** 在动态目标的 CCD 探测中, 一个非常关键的技术就是对 CCD 输出信号噪声的抑制或削弱, 以提高输出信号的信噪比。首先, 对 CCD 输出信号的特性及常用处理方法进行了简要描述, 并结合 CCD 输出噪声的特点, 对相关双采样 (Correlated Double Sampling) 法进行了细致地分析。最后在建立 CDS 传输函数及噪声分析模型的基础上, 利用最适合的相关双采样技术对 CCD 信号存在的复位噪声及其它低频噪声的抑制进行了相关测试。结果表明: 对 2 $\phi$  CDS 电路, 只要选择合适的采样时间, 不仅能有效地消除 KTC 噪声, 而且对低频噪声及其它白噪声也有不同程度的抑制。

**关键词** 电荷耦合器件 噪声 相关双采样 信号处理

## Research on CCD Video Signal Processing Based on Correlated Double Sampling

ZHANG Lin<sup>1,2</sup> LI Yongxin<sup>1</sup> HU Xueyou<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering Nanjing University of Science & Technology Nanjing 210094

2. Department of Electronic Engineering Hefei University Hefei 230022)

**Abstract** In charge coupled device (CCD) detection to moving targets, it is a key technique that the output noises signal of CCD must be eliminated or weakened so that the Signal to Noise ratio can be improved. Firstly, the character of CCD output noises and its common signal processing methods are described briefly and the Correlated Double Sampling is analyzed in detail combined with the character of CCD output noises. Based on the established models of correlated double sampling (CDS) transmission function and noise analysis model, the restrain of reset noises and other low frequency noises in CCD signal are tested by using the most suitable CDS technology. As is concluded, only with suitable sampling time, 2 $\phi$  CDS circuit can not only remove KTC noises effectively but also restrain low frequency noises and other white noises to an extend.

**Key words** Charge coupled device Noise Correlated double sampling (CDS) Signal processing

收稿日期: 2006-10-09

基金项目: 安徽省教育厅科学研究项目 (编号: 2005kj090), 安徽省高校青年教师科研资助计划项目 (编号: 2006j1230)。

作者简介: 张林 (1962-), 男, 副教授, 在职博士, 研究方向: 传感与测试技术。

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

# 1 引言

线阵 CCD 扫描相机作为先进有效的图像采集手段,在现代靶场立靶测试中已受到越来越广泛的重视。CCD 作为一种图像传感器,无论是线阵还是面阵结构,其中混杂有各种噪声,极大地影响了 CCD 在高准确度测量领域中的应用。为了适应 CCD 高灵敏度、高速率和宽动态范围的应用要求,需要对其噪声进行处理。CCD 输出信号处理的目的是在不损失图像细节,并保证在 CCD 动态范围内图像信号随目标亮度线性变化的前提下,尽可能地消除视频信号中的各种噪声和干扰,以准确地提取出各像元中的信号成分。对 CCD 噪声处理的主要方法有:相关双采样法、双斜积分法、开关指数滤波法等<sup>[1]</sup>。这几种方法在使用时各有侧重,但它们在本质上是相同的,都是通过将视频信号在一个像素周期内进行前后两次采样(或积分),然后分别送至差动放大器的两个输入端,在进行视频信号放大的同时可消除复位脉冲所造成的干扰,同时还可以抑制低频噪声和宽带白噪声。由于相关双采样电路简单、易实现,其采样保持电路在足够短的时间内能达到新的电平,并且不必清除前一个像素的电荷,从而成为高速 CCD 噪声处理的首选方法。另外,只要改变两次采样时间的间隔,可以使之应用于很宽的工作频率范围,所以它又具有较强的灵活性。为了满足靶场对高速动态目标检测与识别的要求,保证输出高信噪比的视频信号,本文采用相关双采样 CDS 技术,此方法不仅可以很好地滤除复位噪声,而且对 TDI-CCD 传感器的水平时钟驱动及电源地线耦合串扰噪声、输出放大器的白噪声和  $1/f$  噪声等成份也有一定的滤除作用<sup>[2]</sup>。

## 2 相关双采样法

### 2.1 CDS工作原理

CCD 输出的视频信号包含大量的噪声,主要有光子散弹噪声、暗电流噪声、输出放大器产生的复位噪声。其中,以 CCD 输出结构产生的复位噪声为主要因素,如不消除将严重影响视频信号的信噪比。相关双采样是信号处理电路的关键,它对复位噪声和参

考电平的变化可用相关特性加以抑制,这项技术基本上可以将噪声降低一个数量级<sup>[1]</sup>,CCD 输出放大器的结构及其输出信号分别如图 1 和图 2 所示。

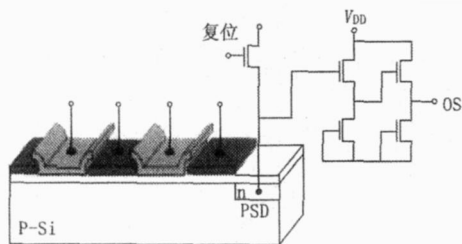


图 1 CCD 输出放大器

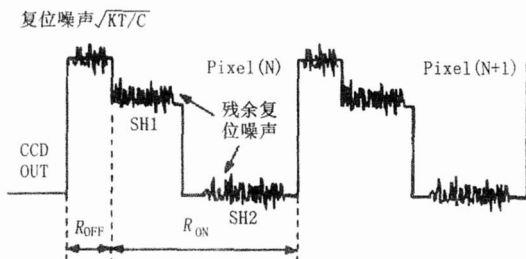


图 2 CCD 的输出信号

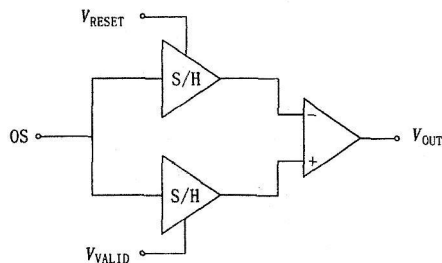


图 3 CDS 采样保持电路

CCD 视频处理电路的目的主要是消除复位噪声(也称 KTC 噪声),同时抑制低频噪声和宽带白噪声<sup>[3]</sup>。在 CDS 拓扑电路中,一般采用了两级高速采样保持器(S/H)(如图 3 所示):一级用来采集复位电平,即在复位脉冲过去之后至信号电荷包到来之前某一时刻的电平;另一级用来采集像元信号电平,即在水平时钟串扰后到信号电荷到来前的某一时刻电平;然后将两次采集的电平进行差分比较,就得到了实际的信号电平,使任何与采样信号相关的复位噪声得以滤除。当 CCD 信号经过低通滤波器后,在 R<sub>ON</sub> 复位信号阶段结束时,SH1 上升沿迅速将复位电平 V<sub>SH1</sub> 采样并锁存在保持器中,在此后的 R<sub>OFF</sub> 期间,SH2 上升沿

出现, 信号的输出电平  $V_{SH2}$  也被采样并被锁存在另一保持器中(时序关系如图 4)。由于复位噪声表现为在同一像素周期内近似为常数, 那么使得两次电平采样在时间上是相关的, 所以只要正确选择两次采样点  $SH1$  和  $SH2$  并把两次采集的脉冲开关时间控制在适当的范围, 就能有效地抑制上述噪声的干扰<sup>[4-5]</sup>。

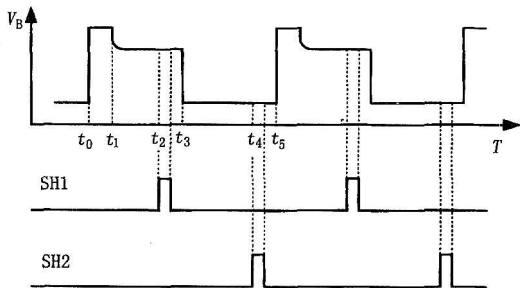


图 4 CCD 输出信号的采样时序

## 2.2 CDS 系统组成

在多种 CDS 拓扑电路中, 一般采用两级采样和

保持电路, 即 2 $\phi$  法 CDS 电路。由于相关双采样电路本身不具备低通滤波功能, 为了抑制宽带白噪声, 必须在其前面加一级低通滤波器, 用以限制信号通道的带宽, 相关双采样系统的组成如图 5 所示。其工作过程如下: CCD 输出驱动两个采样保持器, 在 CCD 输出像元 N 的信号周期内, 由 CCD 驱动电路产生的参考脉冲使采样保持器 (SH1) 对像元 N 的参考电平进行采样并保持, 当像元 N 的电荷注入输出级时, 复位噪声就迭加到输出上了。当驱动电路产生的视频脉冲到来时, 用采样保持器 (SH2) 对像元 N 的视频电平进行采样并保持。两个采样保持器的输出经差动放大器就得到了视频信号  $V_{OUT}$ 。这一过程把与参考电平和视频电平都相关的复位噪声滤除了。 $V_{OUT}$  就是经过相关双采样电路处理后 CCD 像元 N 的视频信号。这种处理方法不仅能除去复位噪声的影响, 而且对 CCD 输出放大器产生的  $1/f$  噪声也有一定的滤除效果, 相关双采样电路输出信号及采样时序如图 6 所示。

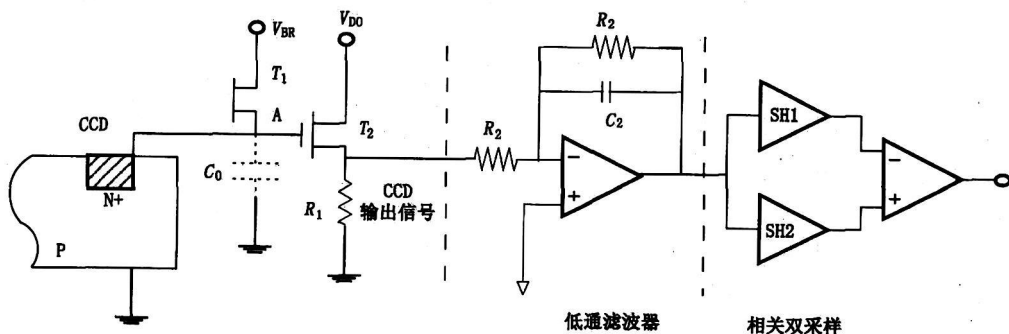


图 5 相关双采样系统

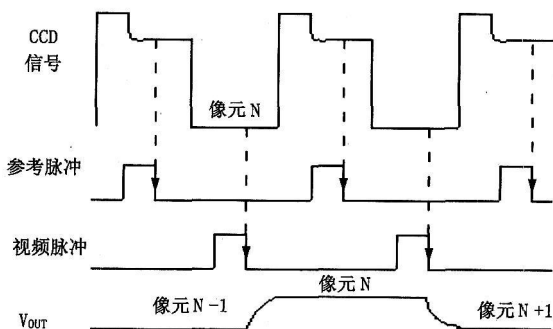


图 6 相关双采样输出信号及采样时序

本的方法。即首先得出相关双采样电路的阶跃响应, 由于是点采样, 然后对阶跃响应进行求导, 并得到冲激响应, 最后对冲激响应进行傅立叶变换, 傅立叶变换后的模的平方即为相关双采样系统的传输函数。设  $\Delta\tau$  为 CDS 两次采样的时间间隔,  $\omega_c$  为 CDS 中积分电路的截止频率, 则其传输函数为

$$|H(\omega)|^2 = K \frac{4\omega_c^2}{\omega_c^2 + \omega^2} \times \sin^2\left(\frac{\omega\Delta\tau}{2}\right) \quad (1)$$

式中:  $\omega_c$ ——差放大器的带宽。

该式的频谱曲线将表现为带通滤波器, 可以有效地抑制低频和高频噪声, 2 $\phi$  形式 CDS 传输函数增益最大点均在

$$\frac{\omega\Delta\tau}{2} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \omega \Rightarrow \frac{\pi}{\Delta\tau}$$

## 2.3 CDS 系统频率特性分析

推导相关双采样系统的传输函数, 可采用最基

根据奈奎斯特采样定律可以确定线阵 CCD 输出视频信号的最高频率。设一次行扫描的有效像元数为  $N$ , 理论上 CCD 能分辨的最小空间距离应为  $N/2$ 。若把黑白相间的条纹图像转换成为电信号, 最多只能得到  $N/2$  个信号脉冲。当光积分周期为  $T$  时, 信号的最高频率为  $f=N/(2T)$ , 若设像素周期为  $T_p$ , 则大致可以得到  $f=1/(2T_p)$ 。因此可以看出, 若要使 CCD 信号的增益尽可能大, 两次采样的时间间隔  $\Delta\tau$  应该小于  $T_p/2$ 。这样滤波器通带范围窄, 可以改善高频噪声滤波效果<sup>[1]</sup>。同时, 相关双采样还能有效消除  $1/f$  噪声。相关双采样电路 CDS 对复位噪声来说, 其也是随时间变化的信号, 在时间间隔内的传递函数是

$$G(j\omega) = G_0 \frac{1 - \exp[-j\omega\tau]}{1 + j\omega/\omega_0} \quad (2)$$

式中:  $G_0$ ——信号增益;  $\tau$ ——前后两次采样的时间间隔;  $\omega_0$ ——前置放大器的带宽。

下面分析零点情况: 当  $|G(j\omega)|^2 = 0$  时, 有  $2(1 - \cos\omega\tau) = 0$  则  $\omega\tau = \omega T/2 = 2N\pi$  ( $N = 0, 1, 2, 3, \dots$ ), 于是  $\omega = 4N\pi/T$  ( $N = 0, 1, 2, 3, \dots$ )。当  $N = 0$  时,  $\omega = 0$  即坐标原点处的  $|G(j\omega)|^2$  为零; 当  $N = 1, 2, 3, \dots$  时, 即在时钟角频率  $\omega = 2\pi/T$  的偶次谐波处  $|G(j\omega)|^2$  为零。也即是如果  $\tau$  等于时钟周期  $T$  的一半, (2) 式在  $f = 0$  和时钟频率  $f$  的所有偶数谐波处均为零, 表明 CDS 系统对复位噪声有很强的抑制能力。同时也可以抑制  $1/f$  噪声和由电源来的低频干扰及脉冲跳动等影响。必须指出, 上述分析的传递函数及频率特性都是对复位噪声而言的, 对信号来说则无衰减作用, 系统相当于一个零阶保持器。由此可以看出, CDS 电路完成双采样消除 KTC 噪声形成有用信号的同时, 若要达到良好的高频和  $1/f$  噪声滤波效果, 需要在两次采样时间点上充分考虑, 使得对于两者的滤波效果尽可能协调, 从而使系统能实现良好的信噪比<sup>[6]</sup>。

### 3 CCD 噪声分析

#### 3.1 复位噪声分析

复位噪声是 CCD 输出电路复位过程中产生的热噪声即 KTC 噪声, 它是由电路结构和电路工作方式引起的, 其典型的噪声分析模型如图 7 所示。在读出

电路中, 每个信号电荷包产生的电压变化被读出后, 输出 MOS 管  $T_2$  的栅节点 A 需加以复位。当复位脉冲  $\phi_R$  到来时, 复位 MOS 管  $T_1$  导通, 存在导通沟道电阻  $R_{ON}$ , 它所产生的电阻热噪声 KTC 加在电容  $C$  (电容  $C$  是反偏二极管  $D$  结电容和源极跟随器电容之和) 两端。复位过程等效漏电压通过电阻  $R_{ON}$  对电容  $C$  充电, 产生复位噪声电压  $V_N(t)$ 。当光生电荷转栅打开时, 图像电荷在时钟脉冲作用下在 CCD 中传输, 每个电荷包进入浮置扩散区, 带有信号的电荷和储存在  $C$  上的噪声电荷迭加在一起通过放大器  $T_2$  输出, 这一过程主要把 CCD 的光生信号电荷量转换成以电压形式输出的视频信号  $V$ 。可以证明, 经过相关双采样后的 KTC 噪声电压均方值<sup>[7]</sup>为

$$\overline{V_N(t)^2} = \frac{KT}{C} e^{-2\Delta t_2/R_{OFF}C} (e^{-2\Delta\tau/R_{OFF}C} - 1) \quad (3)$$

式中:  $K$ ——波尔兹曼常数;  $T$ ——绝对温度;  $R_{OFF}$ ——CCD 内部复位 MOS 管  $T_1$  的截止电阻;  $C$ ——是 CCD 内部与浮置扩散式有关的总电容,  $\Delta t_2 = (t_2 - t_1)$ ;  $\Delta\tau$ ——两次采样的时间间隔 ( $\Delta\tau = t_4 - t_2$ )。

由 (3) 式可知,  $\Delta\tau$  越小, 则两次采样间 KTC 噪声的相关性越大, 即输出噪声电压的均方值越小<sup>[6-7]</sup>。因此, 只要适当地选择  $\Delta\tau$ , 采用相关双采样抑制 KTC 噪声的效果就越明显。

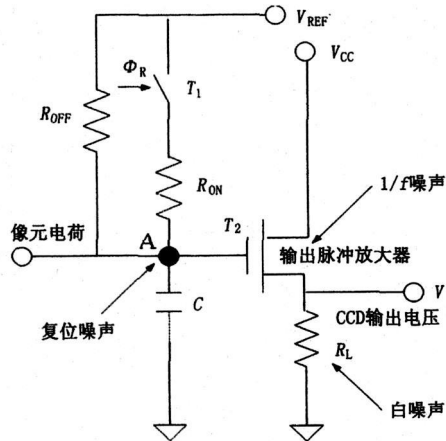


图 7 浮置扩散型 CCD 输出电路模型

#### 3.2 $1/f$ 噪声、白噪声分析

$1/f$  噪声存在于所有的有源器件中, 它与材料的表面状态和 PN 结的漏电流有关。  $1/f$  噪声是一种低频噪声 (即闪烁噪声), 主要表现在  $1\text{ kHz}$  以下, 频率越低, 噪声越大。  $1/f$  噪声的电流幅度分布为高斯型,

其功率谱密度函数为

$$S_f(f) = \frac{K_f I^\gamma}{f^b} (V^2 \text{ Hz})$$

式中:  $K_f$ ——闪烁噪声系数, 是因器件而异的常数, 其典型值为  $2.4 \times 10^{-28}$ [8];  $I$ ——电流;  $\gamma$ ——常数, 约为 0.5 ~ 2.0 之间;  $b$ ——近似为 1 的常数[9]。

因此, 在  $f_1$  和  $f_2$  之间的频段中,  $1/f$  噪声的功率可表示为:  $P_f = \int_{f_1}^{f_2} K_f I^\gamma / f^b df = K_f I^\gamma \ln(f_2/f_1)$ , 由此可见,  $1/f$  噪声功率取决于频率上下限之比。白噪声是电子器件中最常见的一种噪声, 电阻的热噪声、PN 结的散弹噪声都属于白噪声, 白噪声的功率谱密度为常数, 各种频率成分的强度相等[10]。若输入噪声由  $1/f$  噪声 ( $e_f^2/|f|$ ) 和白噪声 ( $e_w^2$ ) 组成, 则其输入功率谱密度为

$$e_0^2 = e_f^2/|f| + e_w^2 \quad (4)$$

经过相关双采样后, 输出噪声电压均方值[8,9]为

$$V^2 = \int_0^{+\infty} |H(\omega)|^2 \frac{e_f^2}{f} df + \int_0^{+\infty} |H(\omega)|^2 e_w^2 df \quad (5)$$

将式 (1) 代入式 (5), 可得到输出噪声与  $\omega_c \Delta \tau$  的关系如图 8 所示。图中对  $1/f$  噪声,  $e_0^2 = 2e_f^2$ ; 对白噪声,  $e_0^2 = e_w^2$ 。  $\omega_c \Delta \tau$  越小, 对  $1/f$  噪声的抑制作用越强。当  $\omega_c \Delta \tau$  约等于 0.5 时, 白噪声的输出为一个单位, 当  $\omega_c \Delta \tau > 0.5$  时, 相关双采样反而增加了输出噪声。因此, 在实际应用中应选取适当的采样间隔  $\Delta \tau$  和放大器带宽  $\omega_c$ , 使相关双采样能有效地抑制  $1/f$  噪声和白噪声。

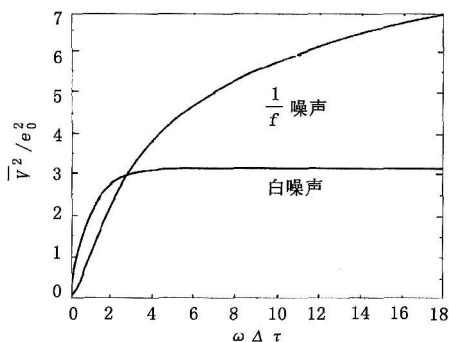


图 8 相关双采样后的白噪声与  $1/f$  噪声随  $\omega_c \Delta \tau$  的变化关系

## 4 实验与结论

LVDS 数据采集卡对 CCD 输出视频信号和经相关双采样电路处理后的信号分别进行了测试, 测试结果如图 9 所示。

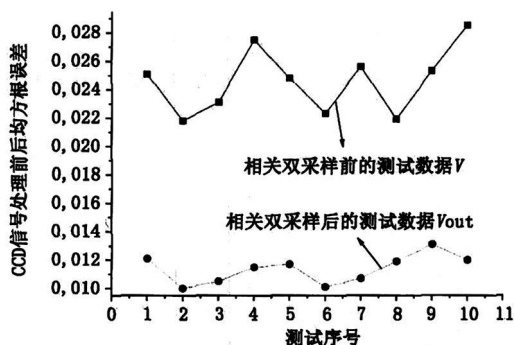


图 9 CCD 采用相关双采样前、后输出信号的均方根误差

从图 9 可以看出, 采用相关双采样后 CCD 输出信号  $V_{out}$  的均方根误差比没有采用相关双采样时输出信号  $V$  的均方根误差明显得到了改善。即相关双采样对 CCD 中的 KTC 噪声、 $1/f$  噪声及白噪声具有较好的抑制作用, 说明了该方法的有效性。

### 参考文献

- [1] 万文, 王学良, 汪骏发, 薛永祺. 基于 XRD98L61 的线列 CCD 图像采集系统的设计. 电子技术, 2002(6): 58~62
- [2] 佟首峰, 阮锦, 郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究. 光学精密工程, 2000 8(2): 140~145
- [3] 许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术. 红外与激光工程, 2004 33(4): 343~347
- [4] 佟首峰, 刘金国, 阮锦等. CCD 视频信号处理电路应用分析. 激光与红外, 2002 30(6): 373~375
- [5] 刘国媛, 李露瑶, 张伯珩等. CDS 器件在 TDI-CCD 视频信号处理中的应用. 光子学报, 2000 29(1): 82~86
- [6] 李艺琳, 冯勇, 安澄全. 用相关双采样技术提高 CCD 输出信号的信噪比. 电测与仪表, 1999 36(5): 31~32
- [7] 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. 航天返回与遥感, 2002 23(4): 17~25
- [8] Leonard Forbes, Harish Gopalakrishnan, and Weetit W analertak. Analysis and simulation of noise in correlated double sampling imager circuits. Proc. of SPIE Vol 5844 238~247.
- [9] 张文普, 袁祥辉, 贺国权. 基于相关双采样的接触式图像传感器的噪声抑制. 重庆大学学报, 2004 27(1): 21~24
- [10] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004 11: 20~47

用 DAISA 公司的 EC-11-01k40 型相机和 X64