

文章编号 1004-924X(2007)08-1196-07

TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理

李云飞^{1,2}, 李敏杰³, 司国良¹, 郭永飞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 130022;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039; 3. 长春工业大学, 吉林 长春 130012)

摘要:为提高 TDI-CCD 的工作性能,根据 TDI-CCD 器件的工作原理,较完整地分析了 TDI-CCD 图像的噪声组成,给出了其噪声的详细分类。TDI-CCD 的噪声主要来自两个方面,一个是 TDI-CCD 器件本身所固有的噪声,如霰粒噪声、非均匀性噪声、暗电流噪声、固定图形噪声、转移噪声等,另一个是 TDI-CCD 工作过程中的各种噪声干扰,如复位噪声和 $1/f$ 噪声等。根据各种噪声的特点,提出了相应的噪声处理技术,并针对 KTC 噪声,给出了双相关采样电路处理方式,提高了器件的信噪比,输出信噪比达到 53.8 dB。

关键词:TDI-CCD; 图像传感器; 暗电流噪声; KTC 噪声; 相关双采样

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A

Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor

LI Yun-fei^{1,2}, LI Min-jie³, SI Guo-liang¹, GUO Yong-fei¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*; 3. *Changchun University of Technology, Changchun 130012, China*)

Abstract: In order to improve TDI-CCD performance, the noise in TDI-CCD image was analyzed and categorized according to the operating principle of TDI-CCD. TDI-CCD noise mainly comes from two ways, one is TDI-CCD proper noise, such as photo shot noise, non-uniformity noise, dark current noise, fix pattern noise, transfer noise and so on, the other is TDI-CCD noise interference in work process, such as reset noise and $1/f$ noise. Several noise processing methods were presented based on noise characteristics and the signal processing schemes of double-correlated sampling were given to eliminate KTC noise. As a result, the output SNR of TDI-CCD has reached up 53.8 dB.

Key words: TDI-CCD; image sensor; dark current noise; KTC noise; correlated double sampling (CDS)

1 引言

CCD (Charge Coupled Devices) 电荷耦合器

件是 20 世纪 70 年代初发展起来的新型半导体集成光电器件。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 的 TDI (Time Delayed Integration) 工作模式在不牺牲空间分辨能力的情况下,提高了相机的灵敏度,是解决遥感相机轻型化的主要技术途径和关键技术措施^[2]。TDI-CCD 应用技术中对信号电平抑制主要有三个方面,即噪声电平抑制、工作速度匹配和视频信号提取,其中噪声处理是十分关键的技术环节之一。因为较大的噪声干扰,会降低 TDI-CCD 测量系统的探测灵敏度,减小工作动态范围,降低图像信号质量,从而限制系统的应用功能,影响系统测量精度^[3]。为此,必须对 TDI-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。

2 TDI-CCD 的噪声分析

TDI-CCD 是一种具有面阵结构、线阵输出的新型 CCD。较普通的线阵 CCD 而言,它具有多重级数延时积分的功能。从其结构来看,它的列数是一行的像元数,它的行数是 TDI-CCD 的级数 M 。一个 TDI-CCD 可选控的级数 M 通常为 6、12、24、48、96 或其它数值类似排列。其工作原理是:第一行某一列的第一个像元在第一个曝光积分时间内的电荷包并不直接输出,而是移向同列第二个像元并与第二个像元在第二个曝光积分时间内的电荷包相加,依次类推,最后一行的像元累加了本身和前面所有电荷包后输出信号。可见 TDI-CCD 输出信号的幅度是多行电荷包的累加,如果选择 TDI-CCD 的级数是 M ,则 TDI-CCD 输出信号是普通线阵 CCD 输出信号的 M 倍,TDI-CCD 的噪声是每一行噪声平方和的平方根。也就是说,增加 TDI-CCD 器件的级数,可以使 TDI-CCD 的输出信号的信噪比增加。

TDI-CCD 的噪声主要来自两个方面,一个是 TDI-CCD 器件本身所固有的噪声,如霰粒噪声、非均匀性噪声、暗电流噪声、固定图形噪声、转移噪声等,另一个是 TDI-CCD 工作过程中的各种噪声干扰,如复位噪声和 $1/f$ 噪声等。

2.1 霰粒噪声

光注入 TDI-CCD 光敏区产生信号电荷的过程可看作独立、均匀、连续发生的随机过程。单位

时间内产生的信号电荷数目并非绝对不变,而是在一个平均值上做微小的波动。这一微小的起伏便形成霰粒噪声。它可以近似用离散型泊松分布函数表示

$$P(n\tau) = \frac{(a\tau)^n}{n!} \exp(-a\tau), \quad (1)$$

其中, τ 为观察的时间间隔, n 为在 τ 秒内发出的粒子数, a 为每秒发出粒子的平均数。光子霰粒噪声等效电荷数为

$$N_{No} = \sqrt{\bar{n}} = \sqrt{N_S}, \quad (2)$$

\bar{n} 为 τ 秒内产生电荷数的平均数。由此可见,霰粒噪声与信号是相关的,它与势阱总电荷数的平方根成正比,是 TDI-CCD 敏感器件所固有的噪声,不能被后续电路所抑制或抵消^[4]。

2.2 非均匀性噪声

非均匀性噪声包含暗电流非均匀性噪声和光子响应非均匀性噪声。暗电流非均匀性噪声是由于 TDI-CCD 每个像元的暗电流不同形成的。光子响应非均匀性噪声是由于 TDI-CCD 器件的光敏元对光子响应存在微小的差别而形成的^[5]。

2.3 暗电流噪声

TDI-CCD 成像器件在既无光注入又无电注入情况下的输出信号称暗信号,即暗电流,暗电流的根本起因在于半导体的热激发。暗电流有三个来源:其一,耗尽区里产生复合中心的热激发;其二,耗尽区边缘的少数载流子(电子)热扩散;其三,界面上产生中心的热激发。其中,第一项的贡献是主要的。在弱信号条件下,TDI-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 TDI-CCD 阵列中,局部晶格缺陷或杂质的存在还可能造成暗电流尖峰。随着掺杂浓度的增大,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,最容易出现暗电流峰值。暗电流峰值会给图像背景造成很大涨落。

2.4 固定图形噪声

固定图形噪声是由于暗电流分布不均匀、各光敏元大小间隔不等引起的空间分布噪声。暗电流分布的不均匀性是由于硅体内不均匀分布的硅、二氧化硅界面的复合中心的不均匀分布造成的,特别在某些单元的位置上,由于缺陷大量集中而造成暗电流尖峰,这些缺陷的数目由衬底材料的质量和高温工序决定。在摄像应用中,各个信

号电荷包的积分地点不同,读出路径也不同,因此暗电流尖峰对各个电荷包贡献的电荷量不等,于是造成很大的背景涨落,这往往称为固定图形噪声。若用镜头盖遮住进入 CCD 相机的所有光线,此时在监视器上进行观测,在屏幕上可以看到灰度等级不同的条纹。由于固定图形噪声不随时间、空间变化,所以只要检测时分离出噪声便可予以清除^[6]。

2.5 转移噪声

TDI-CCD 中前一电荷包的电荷未完全转移,一部分残存在势阱中,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。

2.6 复位噪声

复位噪声的产生与 TDI-CCD 输出结构有密切联系,复位噪声通常产生于输出检测单元为浮置扩散放大器结构的 TDI-CCD 中。图 1 为 TDI-CCD 浮置扩散放大器结构,图中 T_1 为复位 MOS 晶体管, R_{ON} 为 T_1 导通沟道电阻, R_{OFF} 为 T_1 截止沟道电阻, C_0 为浮置扩散对地电容, T_2 是输出 MOS 晶体管。

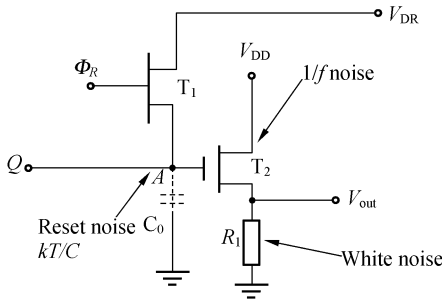


图 1 TDI-CCD 浮置扩散放大器结构

Fig. 1 Architecture of TDI-CCD floating diffusion amplifier

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上。每个信号电荷包产生的电压变化被读出后, T_2 的栅节点需加以复位。当复位脉冲到来时, T_1 导通,复位过程等效于漏电压通过电阻 R_{ON} 对电容 C_0 充电。由于电阻热噪声的影响,每一次复位操作都将产生复位噪声。当复位噪声对 C_0 充电时,A 点处的复位噪声电压均方值^[7]为:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{RC_0}\right) \right], \quad (3)$$

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 R_{ON} 。当进行“复位”时,也就是 Φ_R 加上正脉冲使 T_1 导通,此时 $V_A \approx V_{DR}$, $R = R_{ON} = 10^4 \Omega$,一般 C_0 为 0.1 pF 数量级。则时间常数为: $R_{ON} \cdot C_0 = 1 \text{ ns}$,为纳秒级。而一般复位脉冲频率在几个 MHz 以下,相应的脉冲周期为微秒级。可见, $t \gg R_{ON} \cdot C_0$,故:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{R_{ON}C_0}\right) \right] = \frac{kT}{C_0}. \quad (4)$$

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,A 点处于高电阻状态, $R_{OFF} > 10^4 \Omega$ 。此时,时间常数为: $R_{OFF} \cdot C_0 = 1 \text{ ms}$,为毫秒级。而一般复位脉冲频率在几个 MHz 以下,相应的脉冲周期为微秒级。可见, $t \ll R_{OFF} \cdot C_0$ 。如果 T_1 未导通(即 C_0 中尚未充有复位噪声电荷),则 A 点处的复位噪声电压为:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{2t}{R_{OFF}C_0}\right) \right] = 0, \quad (5)$$

如 T_1 已导通过,此时既要考虑复位噪声按 $R_{OFF} \cdot C_0$ 时间常数在 C_0 上充电,又要考虑缓慢放电。充电作用如上所述,近似为零;于是可以认为此时 A 点处的复位噪声电压均方值为:

$$\overline{V^2(t)} = \frac{kT}{C_0} \exp\left(-\frac{2t}{R_{OFF}C_0}\right) = \frac{kT}{C_0}, \quad (6)$$

也就是说,因为放电回路 RC 时间常数很大,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。图 2 表示了 TDI-CCD 复位 MOSFET 场效应管输出的电压波形。

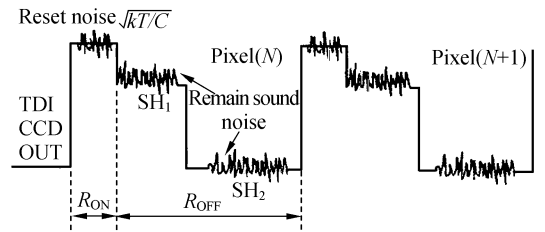


图 2 TDI-CCD 复位 MOSFET 输出的电压波形
Fig. 2 Output voltage waveform of TDI-CCD reset MOSFET

如果此时由放大器输出信号,复位噪声将不可避免地 与信号混在一起。无论在参考点 SH_1 还是在 SH_2 采样输出,其复位噪声电压均为

$\sqrt{kT/C_0}$, 由于 RC 时间常数小, 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。复位区间过去后, 进入 R_{OFF} , 图 1 中的复位管关断, 此时 A 点处于高电阻状态, 时间 RC 放电常数很大, 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。 $V = Q/C = nq/C$, 得到了复位噪声所产生的等效电子数

$$Q_n = \sqrt{KTC_0}/q,$$

式中: 波尔兹曼常数 $K = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C, T 为 TDI-CCD 工作温度。由于复位噪声与以上三个参数有关, 所以亦称 KTC 噪声。由式 $Q_n = \sqrt{KTC_0}/q$ 可知, 输出电容越大、温度越高, 复位噪声越大。

若取 C_0 值为 0.25 pF, T 为绝对温度 298 K, 则 KTC 噪声电荷 Q_n (电子数) 为:

$$Q_n = \sqrt{KTC_0}/q = 200, \quad (7)$$

对于 TDI-CCD 应用来说, 这已经是相当可观的数值了, 必须予以抑制。通常抑制办法是在 TDI-CCD 器件片外用电路方法解决, 也就是应用相关双采样技术。

3 TDI-CCD 噪声处理

要提高图像质量必须减小噪声, 在 TDI-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 TDI-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^[8]。

(2) 对于非均匀性噪声和固定图形噪声可采用辐射定标的方法进行修正, 从而使非均匀性噪声和固定图形噪声得到较好的抑制。

(3) 对于各像元暗电流较平均的 TDI-CCD 来说, 如果在像元阵列的起始处有少量亚像元(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 TDI-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 TDI-CCD 的电荷转移时间。另外, 在 TDI-CCD 芯片生产制造中采用吸杂工艺以增加硅体内复合中心的均匀性, 相应的暗电流噪声将减小。在应用中对 TDI-CCD 器件采取制冷措施, 当温度降到 $-30 \sim -50$ °C 时, 暗电流噪声就小到无足轻重的程度了。

(4) 采用将 TDI-CCD 电压取反倒置或者提高衬底电压使 TDI-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 TDI-CCD 在序列图像取出之前放电, 也可以有效减小转移噪声。

(5) 对复位噪声的处理方法是采用相关双采样法, 当复位电平为高, 复位管 T_1 导通时, 导通沟道电阻 R_{ON} 比较小时, 所以 $R_{ON}C$ 时间常数很小, 这就表明复位管 T_1 开启后, 复位噪声也立刻达到 $Q_n = \sqrt{KTC_0}/q$ 值。而当复位脉冲为低, 复位管 T_1 截止, 截止沟道电阻 R_{OFF} 非常大, 说明复位噪声电压下落时间常数 $R_{OFF} \cdot C_0$ 很大。由此可见, 复位噪声在复位结束后, 电压均方涨落相对于像素周期十分缓慢, 可以认为复位噪声在一个像素周期内为常数。但是因为电阻热噪声是随机的, 所以不同的像素周期的复位噪声也是随机的。故在电荷包输出之前和输出之时, 在同一像素周期内进行前后两次采样或差分平均, 这样两次采样的 KTC 噪声相差十分微小, 将两次采样值相减, KTC 噪声就在输出信号中被抑制了, 于是得到了视频信号的真实成分, 这便是著名的相关双采样法。采用相关双采样法可以使 KTC 噪声等效电子数从几百个减小到十几个甚至更小^[9]。

4 相关双采样

相关双采样 (Correlated Double Sample, CDS) 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。

相关双采样方法不仅能有效地消除 KTC 噪声、低频噪声和共模噪声, 而且具有电路简单、适

合于高速应用等特点,专用的视频信号处理芯片中基本上采用这种方法。这里以 EXAR 公司的

XRD4460 专用处理芯片为例来介绍相关双采样。XRD4460 的 CDS 原理框图如图 3 所示。

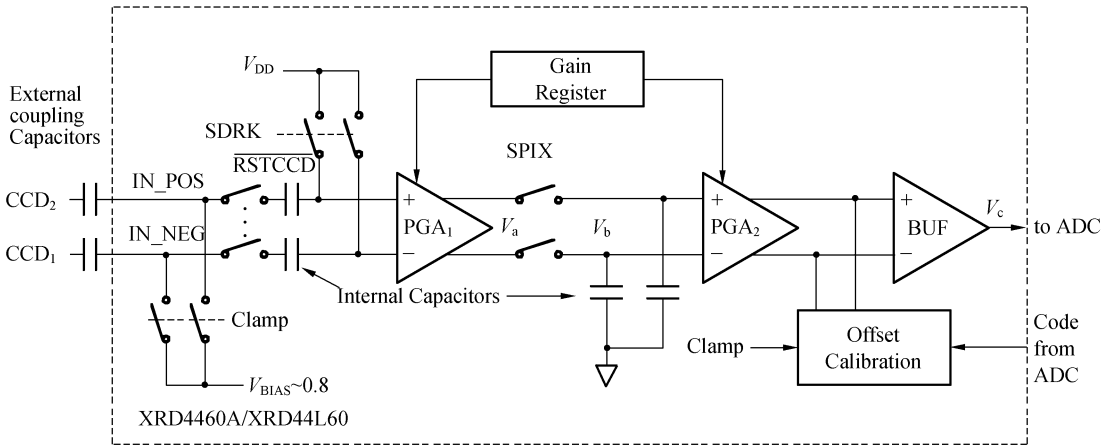


图 3 CDS 和 PGA 的原理框图

Fig. 3 Block diagram of CDS & PGA

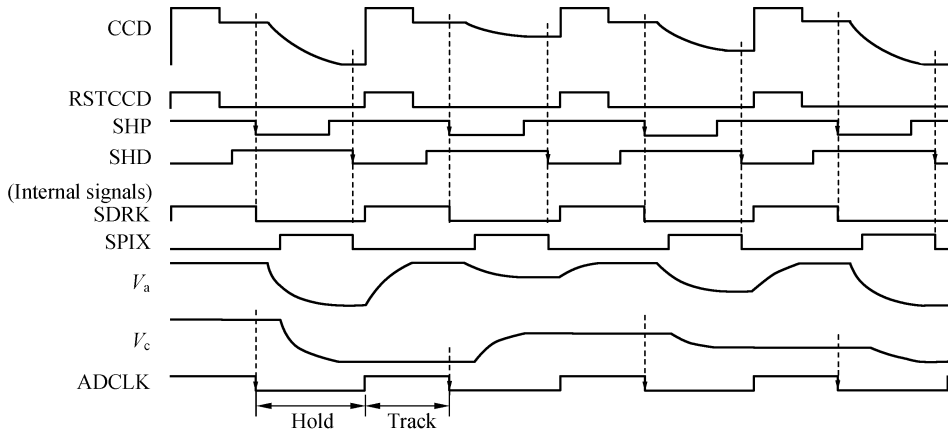


图 4 CDS 控制信号和内部结点信号的时序图

Fig. 4 Timing diagram of CDS clock and internal signal

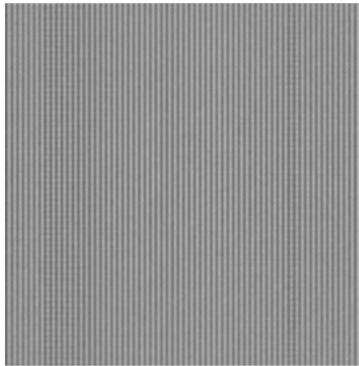
CDS 输入信号为差分输入方式,这种差分方式不仅能有效地抑制开关干扰,而且采用较小的内部电容可以获得比较长的保持时间。CCD₂ (IN-POS)是公共电压端,即 TDI-CCD 的视频信号地,CCD₁ (IN-NEG)为实际的 TDI-CCD 视频输出端。为了便于分析相关双采样的工作过程,这里结合控制信号和内部结点的波形图来进行分析,如图 4 所示。TDI-CCD 视频信号为周期信号,每一周期起始于复位脉冲的上升沿。首先 SDRK 为高电平,将 PGA(可编程增益放大器)的输入信号箝位于 VDD 电平,内部电容对暗参考电平采样。为了消除复位脉冲串扰的影响,应使 RSTCCD 脉冲的高电平与 TDI-CCD 视频信号的

复位脉冲串扰电平的相位匹配,当 RSTCCD 为高电平时,将 TDI-CCD 输入信号与 CDS 隔离。当 RSTCCD 为低电平时,内部电容对暗参考电平进行采样。当 SDRK 为低电平时,信号电平通过内部电容耦合到差分放大器 PGA₁ 的输入端。PGA₁ 的输入电压为信号电平与暗参考电平的差,PGA₁ 输出的全差分信号如图 3 中的 V_a。当 SPIX 为高电平时,PGA₂ 输入端的内部电容对 PGA₁ 的输出信号 V_a 的信号电平进行采样保持。这样 PGA₂ 的输出信号 V_b (V_b 与 V_c 的波形相似,仅仅幅度和直流电平可能不同)便是噪声和干扰被抑制的视频真实信号。由于暗参考电平和信号电平的采样点由 SHP 和 SHD 的下降沿控制,

为了消除复位脉冲和水平移位时钟的串扰影响,需要对 SHP 的下降沿进行精确定位,考虑电荷转移时间和耦合电容的影响需要对 SHD 的下降沿进行精确定位。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。

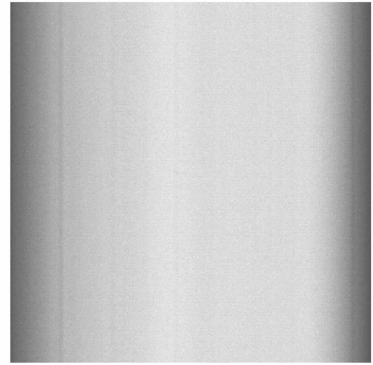
相关双采样电路具有抑制噪声效果好、引入噪声小、工作频率高、电路结构简单和易于集成化等优点,特别适合用于科研、实验级等高性能 TDI-CCD 信号处理^[10]。

经过辐射标定后的 TDI-CCD 安装在相机上,调整焦面后进行室内分辨率板和相机信噪比的实验。图 5(a)为 TDI-CCD 相机室内实验的极限分辨率图像,(b)为 TDI-CCD 相机室内实验的信噪比图像。使用图像软件测得图 5(b)的平均灰度值为 240,图像的标准差为 0.49。



(a)极限分辨率图像

(a) Image with limit resolution



(b)信噪比图像

(b) Signal noise ratio of image

图 5 TDI-CCD 相机的极限分辨率和信噪比图像
Fig. 5 Limit resolution and signal noise ratio of imaging for TDI-CCD camera

5 结 论

本文对 TDI-CCD 自身噪声以及工作过程中的各种噪声干扰进行了分析,根据各种噪声的特点,提出了相应的噪声处理技术。对于非均匀性噪声和固定图形噪声可采用辐射定标的方法进行修正,对于暗电流噪声可采用热电制冷方法,针对 KTC 噪声,给出了双相关采样电路处理方式。实验证明,这些方法可以有效地抑制 TDI-CCD 工作信号的各种噪声干扰,使得 TDI-CCD 器件输出信噪比达到 53.8 dB。

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.
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)
- [2] 郝云彩,杨秉新. 长焦距 TDI-CCD 遥感器光学系统的特点和发展趋势[J]. 航天返回与遥感. 1999,20(1):13-19.
HAO Y C, YANG B X. Characteristics and development tendency of TDI CCD remote with long focal length [J]. *Spacecraft recovery & Remote sensing*, 1999,20(1):13-19. (in Chinese)
- [3] MARTIN G J, BLESSINGER K V, VEITS C. High-resolution CCD camera for industrial imaging[J]. *SPIE*, 1901: 2-11
- [4] 闫丰,于子江,杨怀江,等. 电晕探测紫外 ICCD 相机图像噪声分析与处理[J]. 光学 精密工程,2006,14(4):709-713.
YAN F, YU Z J, YANG H J, *et al.*. Noise analysis and processing of ultraviolet ICCD for corona detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 709-713. (in Chinese)
- [5] 刘金国,李杰,郝志航. APS 星敏传感器探测灵敏度研究[J]. 光学 精密工程,2006,8(4):553-557.

- LIU J G, LI J, HAO ZH H. Study on detection sensitivity of APS Star tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 8(4): 553-557. (in Chinese)
- [6] GLENN D, BOREMAN. Fourier spectrum techniques for characterization of spatial noise in imaging arrays [J]. *Opt. Eng.*, 1987, 26(10): 985-991.
- [7] 李云飞, 司国良, 郭永飞. 科学级 CCD 相机的噪声分析及处理技术 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(增): 158-163.
LI Y F, SI G L, GUO Y F. Noise analyzing and processing for scientific grade CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13 (Supp.): 158-163. (in Chinese)
- [8] 许秀贞, 李自田, 薛利军. CCD 噪声分析及处理技术 [J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(4): 343-357.
XU X ZH, LI Z T, XUE L J. Analysis and processing of CCD noise [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 343-357. (in Chinese)
- [9] MCCURNIN T W. Signal processing for low level, high precision CCD imaging [C]. *SPIE*, 1991, 1448: 225-235.
- [10] DOTY J P, LUPPING G A, RICHER G R. Design of low noise, high performance X-ray charge-coupled device camera [J]. *Opt. Eng.*, 1987, 26: 829-836.

作者简介:李云飞(1971—),男,吉林榆树人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所在读博士研究生,主要研究方向为光电成像中的计算机应用技术;E-mail: liyf@ciomp.ac.cn

李敏杰(1972—),女,吉林长春人,博士,长春工业大学讲师,主要研究方向为光电成像中的计算机应用技术;

郭永飞(1961—),男,吉林长春人,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士生导师,研究员,主要研究方向为光电成像中的计算机应用技术。