

线列红外焦平面中几种相关采样法分析

房骏 李言谨 陈新禹 方家熊

(中国科学院上海技术物理研究所, 传感技术国家重点实验室, 上海, 200083)

TN214

摘要 介绍了相关双采样法(CDS)、四δ采样、差分平均法等方法对像元复位噪声(KTC)的抑制作用,从理论上分析了这几种方法对输入噪声的影响.将这几种方法用于线列红外焦平面,并对不同方法对噪声改善的程度进行了实验比较.

关键词 相关采样, KTC 噪声, 红外焦平面.

CDS

引言

红外焦平面将探测器与信号处理电路集成在一起,工作模式与单元探测器有很大的不同,信号一般以“电荷包”的形式传递.因此需要输出电路将电荷信号转换为电压或电流信号.在检测信号的过程中,输出电路会引入所谓的像元复位噪声(KTC).在室温下,折算为噪声电子数 $\Delta n = 400 \sqrt{C}$ (C的单元为 pF).若 CCD 输出电容为 04pF, $\Delta n = 253$ 个噪声电子数, CCD 的总噪声一般约为 1000 个电子数,可见 KTC 噪声已不容忽略.开关 MOS 电路的主要噪声就是 KTC 噪声.这是因为视频总线电容与列阵有关,列阵越长,总线电容愈大,从而 KTC 噪声的影响更为严重.为了降低 CCD 的 KTC 噪声,1974 年 White 提出了用相关双采样法^[1](CDS)来降低输出噪声.这种方法的优点还在于可以对输入信号中的 1/f 噪声和白噪声起到抑制的作用.在此基础上,后来又发展了四δ采样、差分平均法^[2,3]等技术.本文先分析了这几种方法的原理和实现方法,然后将这几种方法用于线列红外焦平面,并对结果进行了比较分析.

1 实验原理及方法

本文先详细介绍相关双采样(CDS)方法,其他方法具体分析过程与 CDS 方法一致.

1.1 CDS 对 KTC 噪声的抑制作用

图 1 和 2 是 CDS 方法电路示意图和采样方式. CDS 具体实现方法是:先对复位电平采样,经时间 $\Delta\tau$ 后对信号电平采样,二者相减(这可通过片内或片外信号处理电路实现)即为抵消部份 KTC 噪声的信号.

相关采样实施的理论基础是利用噪声的相关性,白噪声(噪声不相关)通过一低通滤波器后将成为有色噪声(噪声相关).这是由于电容的存在,上一时刻的电荷信息不能马上被放电消除掉,使得信号在时间上有一定的联系.可以证明, KTC 噪声的相关系数为

$$P_R(\tau) = e^{-\Delta\tau/R_o/fC} \quad (1)$$

因此,经过 CDS 后的 KTC 噪声为

$$V_n = \frac{kT}{C}(1 - e^{-\Delta\tau/R_{off}C}). \quad (2)$$

式(1)和(2)中, $\Delta\tau$ 是两次取样的时间间隔, R_{off} 是 MOS 管的截止电阻. 由式(1)和(2)可知, $\Delta\tau$ 越小, 则两次采样间 KTC 噪声的相关性越大, CDS 方法抑制噪声的效果就越明显. 例如, $R_{off}C = 1\text{ms}$, 若需抑制复位噪声的程度不小于 99%, 按上式估算, τ 应小于 $100\mu\text{s}$.

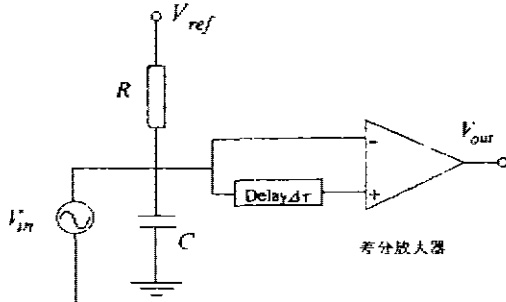


图 1 CDS 方法电路示意图
Fig. 1 Schematic of CDS circuit

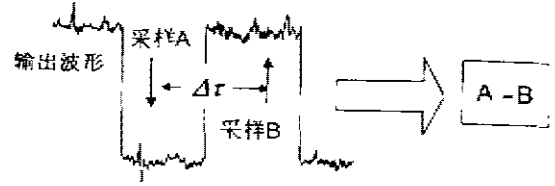


图 2 CDS 方法采样示意图
Fig. 2 Schematic of CDS sampling

1.2 CDS 对输入信号中噪声的抑制作用

现讨论相关采样法对输入信号的影响,从频域分析的角度来看, CDS 的传递函数为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{4\sin^2 x}{1 + (x/x_c)^2}. \quad (3)$$

其中 $x = \omega\Delta\tau/2$, $x_c = \omega_c\Delta\tau/2$, $\Delta\tau$ 为采样间隔, ω_c 为放大器的带宽. 分析式(3), 当 $\omega = 0$ 时, $|H(\omega)|^2 = 0$, 因此相关采样法的一个附带好处是可以降低 $1/f$ 噪声. 若输入噪声由 $1/f$ 噪声、 e_k^2/f 和白噪声、 e_0^2 组成, 即

$$P = e_k^2/f + e_0^2, \quad (4)$$

经过相关采样后的输出噪声为

$$V_n = \int_0^{+\infty} |H(\omega)|^2 \frac{e_k^2}{f} df + \int_0^{+\infty} |H(\omega)|^2 e_0^2 df. \quad (5)$$

将式(3)代入式(5), 输出噪声与 $\omega_c\Delta\tau$ 的关系如图 3^[4], 其中 $1/f$ 噪声的单位为 $2e_k^2$, 白噪声的单位为 $f_e e_0^2$. 图 3 中 $\omega_c\Delta\tau$ 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, 白噪声输出为 $f_e e_0^2$. 即意味着 $\omega_c\Delta\tau > 0.5$ 时, 相关采样反而增加了输出噪声. 因此, 采样间隔 $\Delta\tau$ 和放大器带宽 ω_c 过大会增加输出噪声. 在实际应用中要对 $\Delta\tau$ 与放大器带宽 ω_c 进行合适的选取.

1.3 四采样法(double CDS)

如图 4(b)所示, 在复位电平间隔时间 τ 取两次样 A 和 B, 隔 $\Delta\tau$ 后再在信号电平上间隔 τ 取两次 C 和 D, $|A+B-C-D|/2$ 即为处理后的信号. 它的传递函数为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{16\sin^2 x \sin^2 \Delta\tau}{1 + (x/x_c)^2} \quad (6)$$

式中, $\Delta = \Delta\tau/\tau$, 其他各参数定义同式(3).

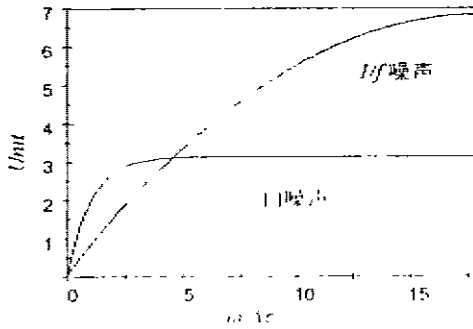


图 3 应用 CDS 方法后的白噪声与 1/f 噪声随 $\omega\tau$ 的变化
Fig. 3 The variation of white noise and 1/f noise after CDS

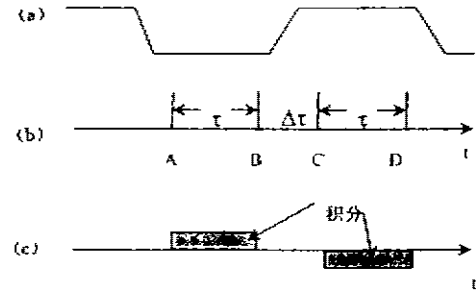


图 4 采样方法示意
(a) 输出波形, (b) 四 δ 采样, (c) 差分平均法
Fig. 4 Schematic of sampling
(a) output wave, (b) quad- δ sampling, (c) differential average method

1.4 差分平均法(differential average)

如图 4(c)所示,先在输入信号参考电平上积分 τ , 时间 $\Delta\tau$ 后对信号积分 τ , 将二者相减并对 τ 平均, 该方法的传递函数为

$$|H(\omega)|^2 = \frac{4\sin^2 x \sin^2 \Delta\tau (1 + \Delta)}{x^2} \quad (7)$$

式(7)中各参数定义同式(6).

假使输入信号中的噪声成分由式(4)表示, 则经过四 δ 取样、与差分平均后的噪声变化如表 1. 与 CDS 方法一样, 四 δ 取样、差分平均法对 KTC 噪声均有消除作用.

表 1 经过 4δ 、差分平均法处理后的噪声成分
Table 1 The noise component after 4δ and differential average processing

	白噪声	1/f 噪声(单位: $\pi/e\tau^2$)
四 δ 采样法	$\omega_c e_0^2$ 当 $\omega_c \Delta\tau \leq 3$	$2C + 2\ln \omega_c \tau - \ln(\Delta^2 - 1)$ 当 $\omega_c \tau \Delta - 1 , \omega_c \Delta\tau \geq 3$
差分平均法	e_0^2/τ	$1/2(\Delta^2 \ln \Delta + (2 + \Delta)^2 \ln(2 + \Delta) - 2(1 + \Delta)^2 \ln(1 + \Delta))$

从以上的分析不难看出, 这些方法的主要目的是构造出合适的传递函数, 能有效的抑制信号中含有的噪声. 理论上, 已知输入噪声的频谱特点, 可以找到所谓的“匹配”滤波器(可以利用数字滤波器实现), 它的传递函数与输入信号的信噪比成正比, 可最大程度地降低噪声.

但这将对读出电路的信号处理功能提出较为苛刻的要求,实际中很难实现.另外,不同读出电路输出波形有可能不一样,但采样原理是一致的.

1.5 实验方法

本试验选用线列碲镉汞短波红外焦平面.读出电路采用自积分单元结构,等效电路如图5(a)所示, C 为视频总线电容,约8PF,源极跟随器的增益近似为1,此时的KTC噪声由 $T_1 T_R$ 产生.探测器处于一定的偏压 V_0 ,光信号通过探测器的电容积分后,每隔一积分周期,寻址脉冲 Q 打开 T_1 ,将探测到的信号分配到 C 后经 T_2 读出,之后, T_1 在复位脉冲 Φ_R 的作用下对 C 及探测器的电容进行复位后,探测器继续进行下一周期的信号积分.这样依次打开各单元的 T_1 后,信号串行输出.

由于在片内未进行信号的硬件处理,所以将信号采样后输入计算机内再进行处理.具体实现方法是每隔积分时间 T_{int} 后对某单元复位、信号波形进行S/H和A/D变换后,送入计算机拼接起来.而后,分别用双 δ 采样法、四 δ 采样法、差分平均法进行处理,并将处理后的噪声进行FFT变换,求得噪声频谱,其中输出信号每单元的周期为 $16\mu s$.

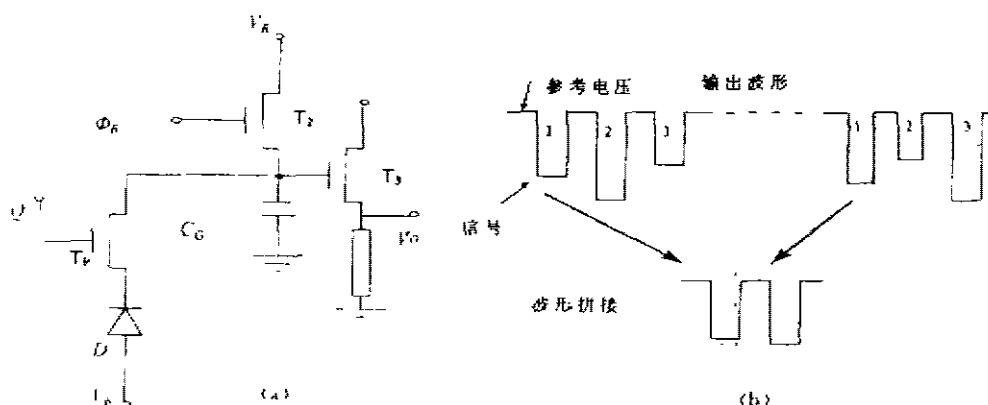


图5 测试电路示意图及波形拼接

Fig. 5 Schematic of measuring circuit and output wave pasted

2 实验结果及分析

对抑制KTC噪声而言,一般来说 $\Delta\tau$ 越小越好,这样噪声的相关性越大,消除KTC噪声的效果就越好.同时还要考虑相关采样法对输入噪声的影响,参见式(6)、(7). Δ 与 τ 、 $\Delta\tau$ 有关,因此 τ 与 $\Delta\tau$ 的取值要根据具体情况进行调整,才能对输入的噪声进行有效的抑制.我们取 τ 约为 $4\mu s$, $\Delta\tau$ 为 $2\mu s$.

表2是用不同方法处理后的结果,列出每种方法改善的百分比.分析表2的数据,可以看出四 δ 采样与差分平均对噪声均有较好的抑制作用,能将噪声改善为原来的70%左右,虽然有几个单元效果不明显,但其平均效果比CDS好.这与Johannes. Solhusvik^[3]用信号发生器模拟的结果基本一致.

图6是No. 1单元在黑体辐照下,用不同方法处理后信号的分布.图7是No. 1单元的噪声频谱,系统带宽1.4kHz.从频谱上清楚地看到相关采样法对 $1/f$ 噪声与白噪声的抑制

效果. 4δ 采样与差分平均法的效果基本一样, 但 4δ 采样的直伏较大.

表 2 不同方法处理噪声后的结果(单位: $10^{-4}V$)比较
Table 2 The result from different methods

单元编号	原始噪声	CDS	改善	4δ 采样	改善	差分平均	改善
1	4.05	2.57	0.63	1.51	0.37	1.57	0.39
2	3.02	1.92	0.64	1.93	0.64	1.95	0.65
3	2.81	2.46	0.88	2.38	0.85	1.95	0.69
4	3.08	1.86	0.60	1.90	0.62	1.96	0.64
5	3.07	2.02	0.66	1.93	0.63	1.95	0.64
6	2.33	2.38	1.02	2.47	1.06	2.41	1.03
7	2.28	1.74	0.76	1.83	0.80	1.75	0.77
8	2.10	1.96	0.93	1.94	0.92	1.92	0.91
平均			75.5%		73.6%		71.5%

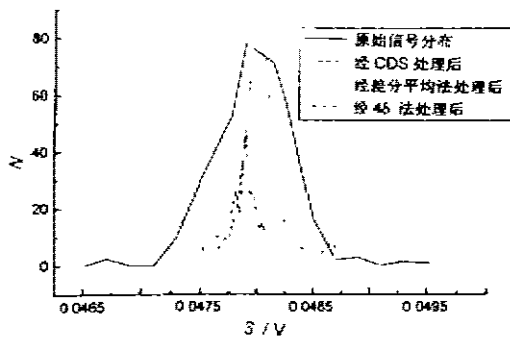


图 6 信号分布

Fig. 6 Distribution of input signal

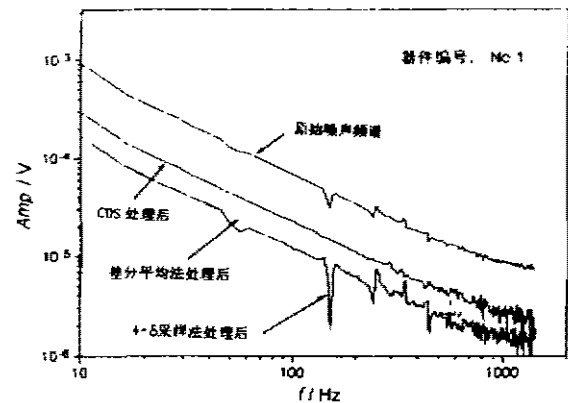


图 7 噪声频

Fig. 7 The spectra of noise

3 结语

本文介绍了相关采样法对噪声的抑制作用, 并将其用于红外焦平面, 结果表明 4δ 采样与差分平均法对噪声均有较好的抑制作用. 红外焦平面已普遍将 CDS 方法用硬件在读出电路中实现. 可以根据不同焦平面结构的噪声特点, 采用合适的方法, 将其在读出电路中实现, 可望取得较好的结果.

REFERENCES

- 1 White W H. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1974, SC-9:1
- 2 Hopkinson G R, Lumb D H. *J. Phys E: Sci. Instrum.*, 1982, 15:1214
- 3 Johannes Solhusvik. *SPIE Infrared Readout Electronics*, 1994, 2226:223
- 4 Kansy R J. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1980, SC-15(3):373

THE EXPERIMENTAL COMPARISON OF SEVERAL CORRELATED SAMPLING METHODS IN LINEAR IR FPA

FANG Jun LI Yan-Jin CHEN Xin-Yu FANG Jia-Xion

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai 200083, China)

Abstract Some correlated sampling techniques were introduced, such as the correlated double sampling, quad- δ sampling and differential averager, which are effective methods to reduce KTC noise in readout circuit due to the MOSFET transistor used for resetting the voltage on capacitance. Theoretically analyzed was the another advantage of these methods in attenuating the input noise including white noise and $1/f$ noise, then those techniques were applied to linear infrared focal plane array (FPA). Results were analyzed and compared for different methods.

Key words correlated sampling technique, KTC noise, IR focal plane array.