

# 红外焦平面读出集成电路噪声分析研究

李敬国

(华北光电技术研究所,北京 100015)

**摘要:**信噪比和动态范围是衡量红外焦平面读出电路性能的两个重要指标,读出电路的随机噪声与这两个指标直接相关。本文对红外焦平面读出电路链路里的随机噪声进行了深入分析研究,同时给出每个噪声源的理论计算方法以及整个读出链路噪声的理论计算方法。最后用 Matlab 仿真计算出了各个电路参数对读出电路噪声的影响以及信噪比和动态范围的影响。

**关键词:**读出集成电路;信噪比;动态范围;噪声分析

**中图分类号:**TN432      **文献标识码:**A

## Noise analysis and study of ROIC for infrared focal plane array

LI Jing-guo

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:**Signal noise ratio and dynamic range are two very important figures of merit of infrared focal plane readout integrated circuit (ROIC). It is directly relative to temporal noise of ROIC. In this paper, we deeply analyze and study the temporal noise of ROIC, at the same time we give the theory of computing noise method of all kinds of noise sources and the whole ROIC noise. At last, we give the relations between the whole noise, SNR, DR and several circuit parameters.

**Key words:** readout integrated circuit; SNR; dynamic range; noise analysis

### 1 引言

信噪比和动态范围是红外探测器读出集成电路两个重要的性能指标,与红外组件的成像质量密切相关。随着红外应用技术的发展,越来越多的场合对红外焦平面读出集成电路的信噪比和动态范围提出了更高的要求。而读出电路的噪声与信噪比和动态范围直接相关,因此,对读出电路噪声进行深入分析研究,对今后提高读出集成电路性能很有意义,从而提高红外组件的成像质量。

### 2 信噪比和动态范围

SNR(信噪比)定义为输入信号功率与输入参考噪声功率之比。动态范围是传感器对场景暗影和强光的量化,其定义为最大的非饱和输入信号与最小可探测的输入信号之比<sup>[1]</sup>。图1为红外探测器和读出集成电路互连后的噪声模型。

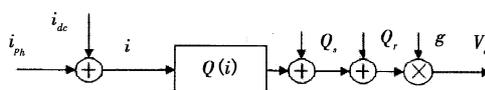


图1 读出电路的噪声模型

其中,  $Q_{\max}$  为最大电荷容量(e);  $Q_s$  为积分产生的噪声电荷,  $Q_s = \frac{(i_{ph} + i_{dc})t_{int}}{q}$  (e), 其中  $i_{ph}$  为光电流信号,  $i_{dc}$  为暗电流信号,  $t_{int}$  为积分时间,  $q$  为电子电量;  $Q_r$  为复位读出产生的噪声电荷;  $g$  为读出集成电路

$$\text{的转换增益 } V/e; Q(i) = \begin{cases} \frac{it_{int}}{q} (0 < i < \frac{qQ_{\max}}{t_{int}}) \\ Q_{\max} (i \geq \frac{qQ_{\max}}{t_{int}}) \end{cases}。$$

作者简介:李敬国(1976-),男,硕士,工程师,主要从事读出集成电路的设计研究。E-mail:lijg@live.com

收稿日期:2009-12-09;修订日期:2010-01-29

图1说明读出电路的随机噪声(temporal noise)主要由因积分产生的噪声和因复位和读出产生的噪声电荷。

图2为计算读出电路的信噪比(SNR)和动态范围(Dynamic Range)的理论模型。

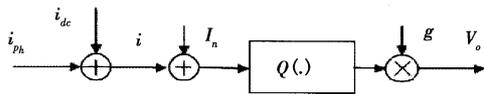


图2 计算RCIC的SNR和DR的理论模型

下面给出计算信噪比和动态范围的模型和公式：

(1)信噪比(SNR)

$I_n$ :等效输入参考噪声的方差(平均输入参考噪声的功率)。其公式定义为：

$$\sigma_{I_n}^2 = \frac{q^2}{t_{int}^2} \left( \frac{1}{q} (i_{ph} + i_{dc}) t_{int} + \sigma_r^2 \right)$$

SNR:信噪比定义为：

$$SNR(i_{ph}) = 10 \lg \frac{i_{ph}^2}{\frac{q^2}{t_{int}^2} \left( \frac{1}{q} (i_{ph} + i_{dc}) t_{int} + \sigma_r^2 \right)} \text{ dB}$$

说明:SNR随着输入信号的  $i_{ph}$  的增加而增加,刚开始当读出噪声占主导的时候( $i_{ph}$  比较小),SNR以 20 dB/decade 增加;然后当 shot noise 占主导的时候,SNR以 10 dB/decade 增加。

(2)动态范围(Dynamic Range)

其公式定义为：

$$DR = 20 \lg \left( \frac{i_{max}}{i_{min}} \right) = 20 \lg \left( \frac{\frac{qQ_{max} - i_{dc}}{t_{int}}}{\frac{q}{t_{int}} \sqrt{\frac{i_{dc}^2}{q} + \sigma_r^2}} \right) \text{ dB}$$

其中,  $i_{max}$  为最大的非饱和和信号电流;  $i_{min}$  为最小可探测的输入信号,即光电流为零时的输入参考噪声信号的标准偏差,  $\sigma_{I_n}(0)$ 。

3 读出集成电路的工作原理

图3示意了读出集成电路的工作原理。读出集成电路是将探测器光电流信号转化成模拟电压信号

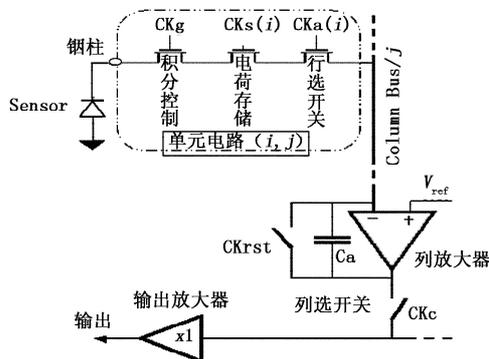


图3 焦平面读出集成电路工作原理图

的成像部件,其主要工作原理是光电流信号在读出集成电路的积分电容上积分,经过开关电容电荷电压转换电路,转换为模拟电压,经过缓冲,列选择读出。<sup>[2]</sup>

4 读出集成电路噪声分析

读出集成电路噪声来源主要来自积分期间、复位期间和读出期间。为了便于分析,我们分析红外探测器和读出集成电路互联以后的噪声。在积分期间,红外探测器的信号电流和暗电流会产生散粒噪声(功率谱密度为  $S_I(f) = qiA^2/\text{Hz}$ )和闪烁噪声(功率谱密度为  $S_I(f) \propto i^c \frac{1}{f^\alpha} A^2/\text{Hz}$ <sup>[3]</sup>),在复位期间,噪声主要来自复位晶体管产生的热噪声、运算放大器噪声和位线噪声(由于衬底噪声以及其他噪声源);在读出期间,噪声主要来自行选开关产生的热噪声、运算放大器的噪声、位线噪声以及以上噪声反馈到积分电容上在读出期间产生的噪声、由于列运算放大器和芯片运算放大器产生的噪声。

为了方便分析,忽略闪烁噪声(1/f);电荷放大器输入参考噪声为有限带宽白噪声电压源,  $B \leq A\omega_0$ ;衬底噪声为有限带宽白噪声电压源,  $B \leq A\omega_0$ 。忽略列和芯片源随放大器噪声(与其他噪声源相比可以忽略不计)。

4.1 积分期间产生的输出噪声

$$\overline{V_{o1}^2} = \frac{q(i_{ph} + i_{dc}) t_{int}}{C_f} V^2$$

4.2 复位期间产生的输出噪声

复位期间,读出集成电路的噪声分析原理图如图4所示。 $V_s(t)$ 为复位开关产生的热噪声源,双边功率谱密度为  $S_{V_s}(f) = 2kTR_s$ ;  $V_{op}(t)$ 为运算放大器产生的噪声源,双边功率谱密度为  $S_{V_s}(f) = \frac{N}{2}$ 。 $V_{bl}(t)$ 为位线噪声源,其双边功率谱密度为  $S_{V_{bl}}(f) = \frac{M}{2}$ 。三个噪声源独立且非相关。

复位晶体管热噪声在输出端贡献的噪声为：

$$\overline{V_{o2}^2} = \frac{kT}{C_f + C_b} \left( \frac{C_b}{C_f} \right)^2$$

复位期间运算放大器和衬底产生的输出噪声：

$$\overline{V_{o3}^2} = (M \times N) \times B \times \left( \frac{C_b}{C_f} \right)^2$$

其中,  $B \leq Af_0$  (增益带宽积) 为白色噪声电压源的带宽;  $C_b$  为位线电容;  $C_f$  为运放大器两端的反馈电容。

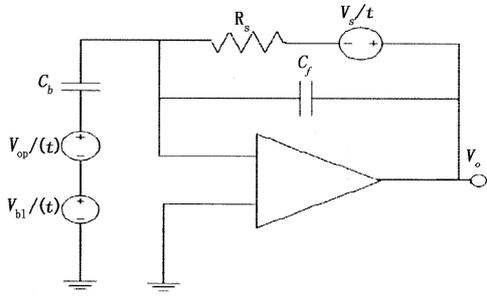


图4 复位期间 ROIC 噪声分析原理图

4.3 读出期间产生的输出噪声<sup>[4-5]</sup>

读出期间,读出集成电路的噪声分析原理图如图5所示。行选可开关噪声源为  $V_a(t)$ ,  $V_{op}(t)$  为运算放大器产生的噪声源,  $V_{bl}(t)$  为位线噪声源。三个零均值,不相关的。

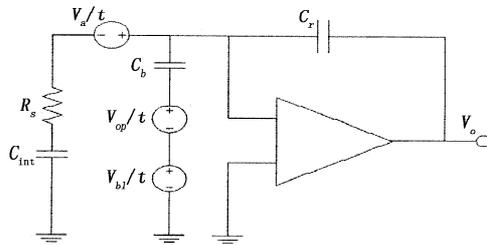


图5 读出期间,ROIC 噪声分析原理图

行选开关在输出端产生的噪声为:

$$\overline{V_{o4}^2} = 2\kappa TR_s \left( \frac{C_{int}}{C_f} \right)^2 \beta \pi V^2$$

其中,  $\beta = \frac{Af_0 C_f}{C_f + C_{int} + C_b}$ ,  $C_{int}$  为像素里面的积分电容,  $Af_0$  为运算放大器的增益带宽积。

运算放大器与衬底在输出端产生的噪声为:

$$\overline{V_{os}^2} = (N \times M) \beta \left( \frac{C_b}{C_f} \right)^2 \tan^{-1} \frac{B}{\beta} V^2$$

反馈到积分电容上的噪声,在读出的下降沿,三个噪声源会在积分电容上存储噪声。这个噪声会在下一个读出周期输出。

行选开关噪声会反馈到积分电容上,在下一个读出周期产生的噪声为:

$$\overline{V_{o6}^2} = \frac{kT}{C_{int}} \left( \frac{C_{int}}{C_f} \right)^2 V^2$$

因运算放大器噪声反馈到积分电容上,在下一个读出周期产生的噪声为:

$$\overline{V_{o7}^2} = \left( \frac{C_{int}}{C_f} \right)^2 (N + M) \left( \frac{C_b}{C_f} \right)^2 \frac{\beta^3}{(Af_0)^2} \cdot \left( \frac{B}{\beta} - \tan^{-1} \frac{B}{\beta} \right) V^2$$

4.4 总的平均功率

$$\overline{V_o^2} = \sum_{i=1}^7 \overline{V_{oi}^2}, \text{rms}(V_o) = \sqrt{\overline{V_o^2}}$$

5 仿真计算结果

仿真计算结果主要反映反馈电容  $C_f$ 、电荷转换增益 gain、位线电容  $C_b$ 、积分时间  $t_{int}$  对输出噪声的影响趋势以及暗电流  $i_{dc}$ 、积分时间  $t_{int}$  对信噪比和动态范围的影响趋势。如图6~图11所示。

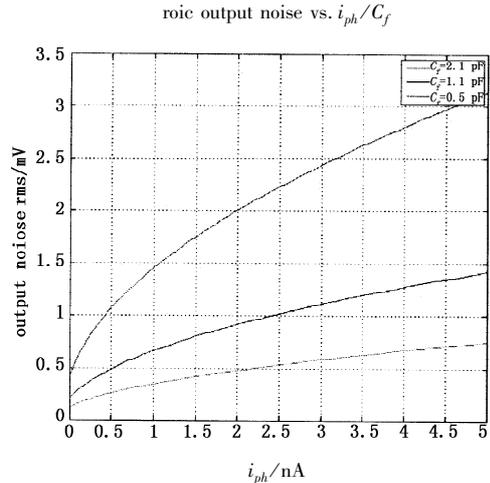


图6 不同反馈电容下,输出噪声和信号电流的关系

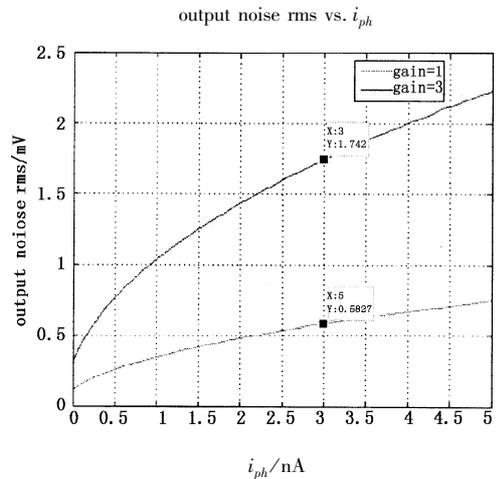


图7 不同增益条件下,输出噪声和信号电流的关系

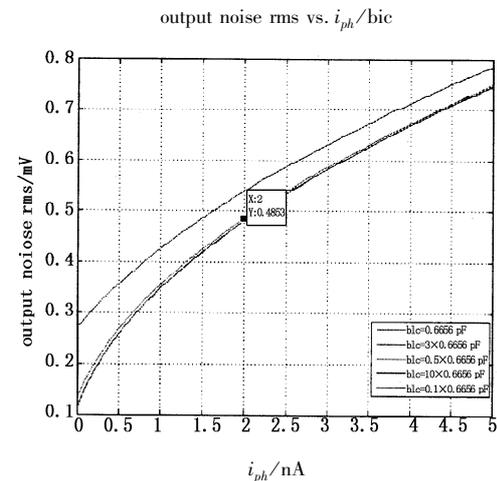


图8 不同位线电容下,输出噪声和信号电流的关系

output noise rms vs.  $i_{ph}/t_{int}$

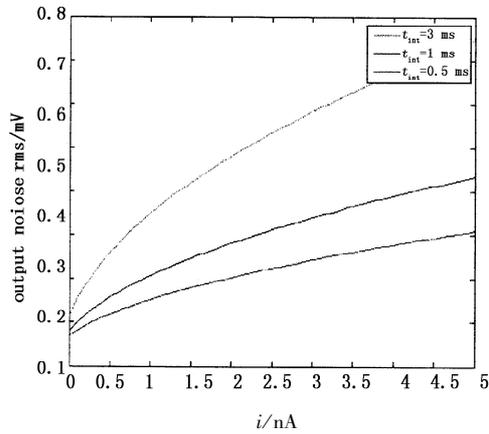


图9 不同积分时间条件下,输出噪声和信号电流的关系  
roic SNR/dB vs.  $i_{ph}/t_{int}$

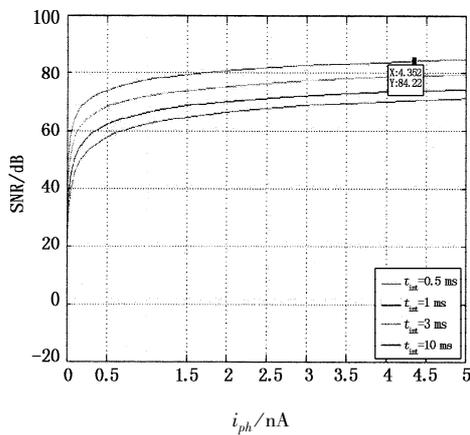


图10 不同积分时间下,信噪比和信号电流的关系  
roic DR vs.  $t_{int}/i_{dc}$

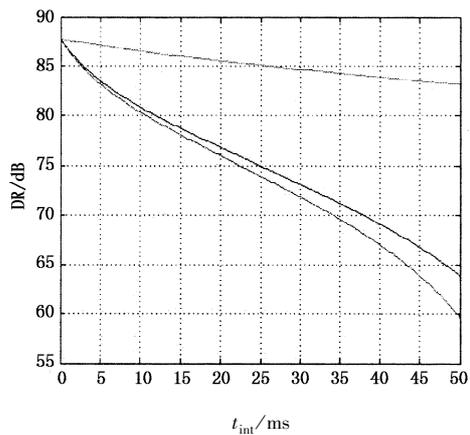


图11 不同暗电流条件,动态范围和积分时间的关系

从图6、图7、图8、图9可以看出,电荷转换增益为1时,运算放大器反馈电容越大,输出噪声越小;三倍增益的噪声大约是一倍的增益的3倍;位线电容越大,输出噪声成增大的趋势;积分时间越长,输出噪声越大。

从图10、图11可以看出,积分时间越长,SNR比越大;暗电流越小,动态范围越大,在一定的暗电流条件,积分时间越长,动态范围会降低。

## 6 总结

本文阐述了探测器和读出电路互联后噪声的分析计算方法,并且利用 Matlab 仿真计算了 ROIC 输出噪声与反馈电容  $C_f$ 、电荷转换增益 gain、位线电容  $C_b$ 、积分时间  $t_{int}$  之间的关系;仿真计算了读出集成电路的两个重要指标信噪比 SNR 和动态范围 DR 在不同条件下与积分时间的关系。对今后提高读出集成电路性能,进而提高红外组件的性能有一定的意义。

## 参考文献:

- [1] S Kawahito, N Kawai. A noise calculation model of high-gain column amplifiers of CMOS image sensors [J]. Proc. SPIE, 2003, 5017: 48 - 58.
- [2] K Singh. Noise analysis of a fully integrated CMOS image sensor [J]. Proc. SPIE, 1999, 3950: 44 - 51.
- [3] K K Hung, P K Ko, C Hu, et al. A unified model for the flicker noise in metal-oxide-semiconductor field-effect transistors [J]. IEEE Trans. Electron Device, March, 1990, ED - 37: 654 - 665.
- [4] O Yadid-Pecht, B Mansoorian, E R Fossum, et al. Optimization of noise and responsivity in CMOS active pixel sensors for detection of ultra low light levels [J]. Proc. SPIE, 1997, 3019: 125 - 136.
- [5] L K J Vandamme, X Li, et al.  $1/f$  noise in MOS devices, mobility or number fluctuations [J]. IEEE Trans. Electron Device, November, 1994, ED - 41: 1936 - 1944.