

# 红外探测器信息获取系统噪声特性

龚学艺\*, 苏晓锋, 黄思婕, 董玉翠, 陈凡胜

(中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外探测与成像技术实验室, 上海 200083)

**摘要:**理论上完成了红外图像传感器信息获取电路的噪声建模,并且分别从仿真和测试两个方面对电路的噪声进行分析.三种分析方法的结果基本相同,均为 0.11 mV 左右.从原理和实验两个方面证明了基于仪放的模拟信号调理电路可以满足噪声低至 0.2 mV 的红外探测器航天应用需求.在完成噪声量大小分析的同时进行了噪声频谱特性分析,证明了信息获取电路噪声主要成分是 1/f 噪声和白噪声,二者均满足高斯分布.

**关键词:**信息获取;噪声模型;噪声测试;红外;航天应用

中图分类号:TN62 文献标识码:A

## Noise characteristics of infrared detector signal acquisition system

GONG Xue-Yi\*, SU Xiao-Feng, HUANG Si-Jie, DONG Yu-Cui, CHEN Fan-Sheng

(Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** An accurate noise model was established for the infrared image information acquiring system. In the simulation and test, noise characteristics were analyzed. The results of the three are almost same, about 0.11 mV. Both theory and experiment proved that signal conditioning circuit based on instrumentation amplifier can be used for low-noise infrared detectors. The noise level was analyzed together with the spectral characteristics of the circuit noise. The results show that the main components of the noise are 1/f noise and white noise. Both of the two meet the Gaussian distribution.

**Key words:** signal acquisition, noise model, noise test, infrared, aerospace applications

**PACS:** 81.40.jm, 81.15.Cd, 68.55.A-

## 引言

红外图像传感器已经成功应用于航天,医学,安全,工业等各个领域.随着材料,半导体工艺等基础技术的进步,红外探测器的性能获得了大幅度的提升.上海技术物理研究所研制的面向航天应用的红外探测器面阵是国内同类产品中的代表作,其中中短波红外探测器在等效输出噪声方面的进步尤为明显,RMS 值已经低至 0.2 mV.为了配合低噪声红外探测器的应用,必须有低于其噪声水平的信息获取电路.目前,在航天应用领域,使用较为广泛的信息获取电路是仪器放大电路.但是,该电路的噪声大小是否满足探测器读出的需要一直未被明确证明;低噪声信息获取电路的研究已经迫在眉睫,如何给出

该类型电路的系统性的噪声研究方法便是重中之重.基于以上问题考虑,在下述三个部分的内容中分别完成了信息获取电路噪声模型的建立,噪声仿真以及噪声试验测试等相关工作.分析的内容主要包括噪声的时间域分布特征,频谱特性,噪声量大小等.

## 1 取电路噪声建模

信息获取电路所采用的电路为微弱信号获取中经常采用的仪器放大电路<sup>[1]</sup>,它具有高共模抑制比,高输入阻抗,低噪声,低线性误差,低失调电压和失调电压漂移,低输入偏置电流和失调电流误差,带宽充裕等特征<sup>[3]</sup>.非常适合光电成像系统,能够较好地完成图像信息的获取工作.具体的信息获取电路图如图 1 所示<sup>[7]</sup>.

收稿日期:2013-06-30,修回日期:2014-10-06

基金项目:中科院重大创新项目(G09K1200B00)

Foundation items: Supported by Chinese Academy of Sciences Foundation of China (61205056)

作者简介(Biography): 龚学艺(1987-),男,湖北黄冈人,博士生,主要研究方向为航天信息获取以及遥感仪器的量化应用等相关领域.

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: xygong@mail.ustc.edu.cn

Received date: 2013-06-30, revised date: 2014-10-06

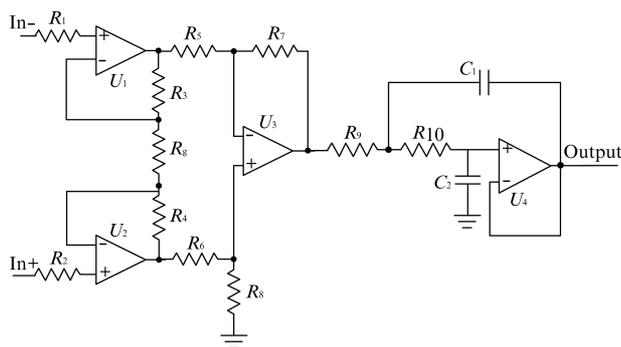


图 1 信号采集示意图

Fig. 1 The schematic of signal acquisition

在信息获取电路的噪声模型建立过程中,运算放大器的正端输入噪声值可以等效为正端到地的一个电流噪声源  $i_{pn}$ ,同理,负端噪声源可以等效为该端到地的一个电流源  $i_{nn}$ <sup>[2]</sup>.同时,由于正负输入端存在输入电压偏移,在这两段会有一个加性输入噪声存在,等效为跨接于两端的电压噪声源  $e_n$ .

对于信息获取电路中所使用的阻容器件,电容热噪声主要有电容器件中的阻抗部分决定,而本电路中所选用的电容其阻抗较低,因此电容所产生的热噪声在本文分析中不予考虑;电阻由于工作于绝对零度以上,其内部存在无规则的电子热运动,进而产生电阻热噪声,电阻热噪声的电流谱密度函数可由式(1)来表示<sup>[6]</sup>:

$$S_{in} = \sqrt{4kT/R} \quad , \quad (1)$$

上式中  $k$  代表波尔兹曼常数,具体数值为  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $T$  代表工作温度,以开尔文表示,  $R$  为电阻的具体阻值.电阻的噪声模型可以等效为噪声电流源和理想电阻的并联,也可以等效为噪声电压源和理想电阻的串联,在下面的分析过程中,选择为噪声电流源和理想电阻的并联.

通过上述分析可以得知,电阻和运放噪声是信息获取电路中噪声来源的主要成分,二者的具体噪声模型图如图 2 所示.

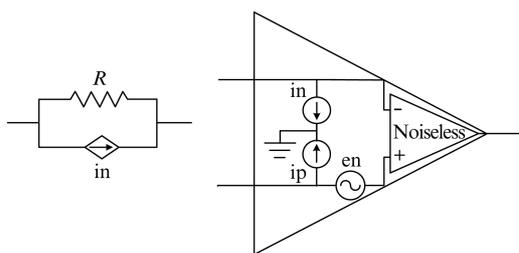


图 2 电阻噪声模型(a),运放噪声模型(b)

Fig. 2 Resistor noise model (a) and Op amp noise model (b)

按照上述分析所给出的运放与电阻噪声模型,将所给出的信息获取电路中的相关元器件替换掉,可以得到该电路的噪声总体模型,在该模型中为了分析问题的方便将整个信号流图分为三个部分,在图中分别以三个红框表示,其中方框 1 代表信息获取电路输入部分,主要作用是进行共模抑制和信号放大,方框 2 为标准减法电路,主要作用是完成相关双采样过程中的暗信号剔除,方框 3 为滤波电路,完成高频噪声的滤波工作.在噪声的分析过程中,对于这三个部分分别进行分析,最终按照理论的信号链图计算整个通道的噪声总量.在整个信息获取电路中一共包含十个电阻以及四个运算放大器,也就意味着整个链路中存在 18 个噪声电流源以及 4 个噪声电压源,采用固定变量法,在分析每一个噪声量对输出的影响时将其他的噪声量视为理想情况.分别对 18 个噪声量进行分别分析可以得到最终的输出噪声表达式.在下面的分析过程中为了突出信息获取电路中某一特定功能模块所对应的具体噪声量,分析过程以方框 1,2,3 所示的功能模块为基本单元,最终进行噪声级联<sup>[4]</sup>.

对于方框 1 中所包含的信号输入放大部分,一共含有 5 个电阻以及 2 个运算放大器,总共存在 9 个噪声电流源和 2 个噪声电压源,按照上文所述的固定变量法进行分析可以得到在该部分的两个输出端噪声大小分别为:

$$N_{1,p} = N_{1,n} = \sqrt{4kT * ENB \left[ \left( 1 + \frac{R_3}{R_g} \right)^2 R_1 + \left( \frac{R_3}{R_g} \right)^2 R_2 + R_3 + R_4 + \left( \frac{R_3}{R_g} \right)^2 R_g \right] \left[ \left( i_w R_1 \left( 1 + \frac{R_3}{R_g} \right) \right)^2 \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) \right] \left( i_w R_2 \right)^2 \cdot \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) \left( e_w \left( 1 + \frac{R_3}{R_g} \right) \right)^2 \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) \right] + \left[ \left( i_w R_2 \left( \frac{R_3}{R_g} \right) \right)^2 \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) \right] \left( e_w \left( \frac{R_3}{R_g} \right) \right)^2 \cdot \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) \right] \quad . \quad (2)$$

即对于第一级输出而言,在其两个不同的输出端所得到的等效输出噪声量是一样的,第一级的噪声量输出作为第二级减法电路的两个输入,这两个噪声量成为第二级减法电路的两个额外噪声源.

同理,对于方框 2 中的减法电路部分,该部分的主要功能是由于剔除红外或者可见探测器相关双采样输出的暗电流信号,仪器放大电路中不考虑将放大功能在此处实现,本部分一共含有四个电阻和一个运算放大器,加上第一级输出引入的两个额外噪

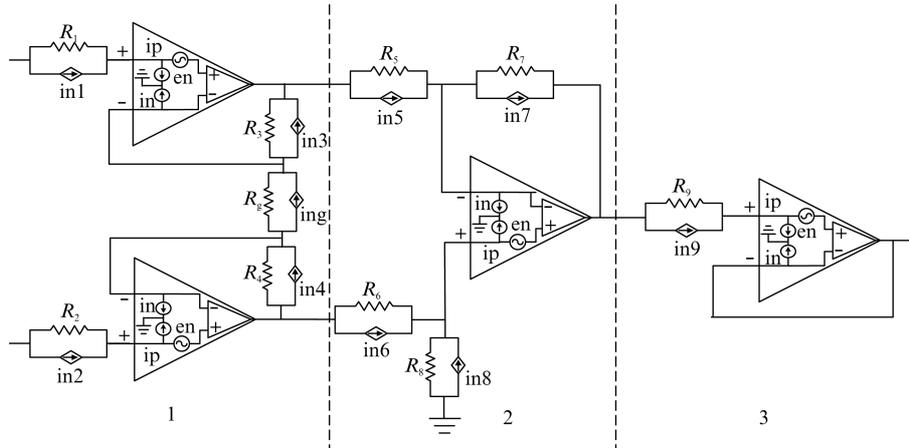


图3 信息获取电路噪声模型图  
Fig. 3 Signal acquisition circuit noise model

声源,此时噪声模型一共含有 6 个电流噪声源以及 3 个噪声电压源,分析方法相同,可以得到此时的第二部分等效输出噪声为(此时的表达式为不含第一级的输出端噪声值情况,含有的情况在最终的链路合成时统一进行):

$$N_2 = \sqrt{16ENBkTR_7 + 2(i_w^2 R_7^2) \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) + 4e_w^2 \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right)} \quad (3)$$

至于第三部分—滤波电路电路部分,为了滤除信息获取电路过程中的高频噪声,必须在信息 ADC 的输入端前进行滤波操作,从理论上说,滤波器的带宽越低可能导致的最终噪声电压越低,但是受限于探测器的工作频率,为了能够保证探测器输出信号的高频分量不被滤除掉,需要保证滤波器一定的带宽范围 BW,这个带宽范围由探测器输出的上升和下降时间常数决定,在工程应用中根据经验一般选择为探测器工作频率的 3~5 倍,在满足上述带宽范围的前提下可以保证探测器输出信号拥有 99% 以上

的保真度.本部分含有一个电阻和一个运算放大器,加上前端流入的噪声源总共含有 3 个噪声电流源和两个噪声电压源,同减法电路的分析过程相似,不考虑噪声输入电压,仅对本部分的本源噪声进行分析,分析结果如下:

$$N_3 = \sqrt{4ENBkTR_9 + (i_w^2 R_9^2) \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right) + e_w^2 \left( f_{ic} \ln \frac{f_H}{f_L} + ENB \right)} \quad (4)$$

上述过程分别对于三个分立模块的噪声情况进行了分析,为了得出信息获取电路全通道的等效输入噪声,需要建立整个的噪声链路图.如图 4 所示,三级分析分别产生的噪声值可以看作是额外的电压噪声源分布于信息获取链路中的不同位置,链路中的其他部分则视为理想值,在本文的电路设计中,减法电路放大倍数为 1,滤波电路部分为了保证其稳定性,不放大.图 4 所示的链路图已经较为详细的给出了链路中各噪声分量对等效输入以及输出噪声的贡献.

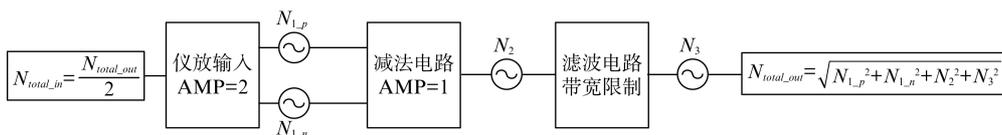


图4 噪声整体链路图  
Fig. 4 Overall block diagram of the noise

在上述噪声链路图中噪声的输入输出计算式分别如下:

$$N_{total\_out} = \sqrt{N_{1\_p}^2 + N_{1\_n}^2 + N_2^2 + N_3^2} \quad (5)$$

$$N_{total\_in} = \frac{N_{total\_out}}{2} \quad (6)$$

以上的分析过程完成了信息获取电路噪声建

模的工作,在分析过程中所用到的参数解释如下: $ENB$  为信息通道的噪声等效带宽, $T$  为电路所工作的温度, $i_w$  为运算放大器高频电流白噪声谱密度大小, $e_w$  为运算放大器高频电压白噪声谱密度大小, $f_H$  为电路截止频率, $f_L$  为分析所选择的最低频率值, $f_{ic}$  和  $f_{ec}$  则分别代表运放电流和电压噪声的频谱转角频率点,其余的则具体为各个电阻的对应阻值。

红外信息获取电路精确噪声模型的确立是系统噪声研究的必要一环,精确的噪声模型可以为整个红外信息获取系统带来如下好处:1) 可以方便的得到整个信号调理环节每一个部分的噪声所占百分比以及该部分噪声的主要成分;2) 在噪声模型的建立过程中可以得到每一个部分噪声产生的主要原因,比如影响热噪声和运放电流噪声大小的主要因素是电路中所选电阻阻值大小,影响运放电压噪声的主要因素则是电路的放大倍数.对这些问题有了全面的认识,可以在满足信息获取要求的前提下有针对性的进行降噪工作.3) 为红外信息获取系统低噪声应用技术提供了理论支持.4) 噪声建模的方法对于这一类型的信号调理电路普遍适用,给出了准确的噪声数值解析表达式。

## 2 信息获取电路噪声计算及仿真

为了验证第一部分中噪声模型的准确性,本部分针对于具体的电路,分别从模型数值计算和软件噪声仿真两个方面来分析噪声数值的大小.利用较为成熟的噪声仿真技术来验证所建立的噪声模型的准确性。

在本次设计工作中,信息获取电路带宽选择为 14.384 MHz,满足探测器工作于 3 MHz 条件下的要求;由于探测器帧频为 10 左右,在此选择低频截止频率为 10 Hz;运算放大器选择为 LINEAR 公司的 LT1810 器件,运算放大器相关参数如下:

$$\begin{aligned} f_{ic} &= 10 \text{ K}, f_{ec} = 10 \text{ K}, i_w = 5 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}, \\ e_w &= 16 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}} \end{aligned} \quad (7)$$

电阻除了  $R_g = 2 \text{ K}$ ,  $R_0 = 660$  外,其余的电阻值均为 1 K,在上述参数条件下可以通过第一部分分析所得的噪声模型数学表达式计算得出此时的等效输入端噪声为:

$$N_{total\_in} = 106.7345 \mu\text{V} \quad (8)$$

在电路分析过程中 PSpice 一直是一个重要的仿真工具<sup>[4]</sup>,利用该软件同样可以对上述的信息获取电

路进行相关仿真工作<sup>[8]</sup>,在此处重点关注信息获取系统的噪声问题,此处对噪声的相关情况进行仿真,仿真结果如下:

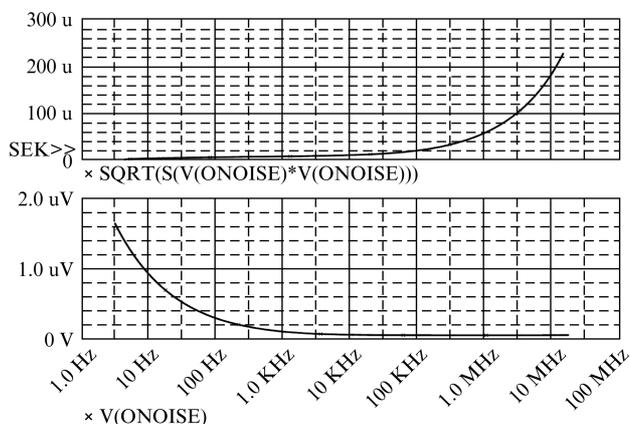


图5 信息获取电路噪声仿真图,噪声随截止频率变化图(a),噪声频谱图(b)

Fig.5 Simulation of noise in signal acquisition circuit. The total noise change with the cutoff frequency (a) and the noise spectrum (b)

从仿真图中可以看出,在截止频率为 14.384 MHz 时,对应的噪声输出量大小为 227  $\mu\text{V}$ .当然,此噪声量为等效输出噪声值,考虑电路的放大倍数为 2,此时的等效输入噪声值为  $227/2 = 113.5 \mu\text{V}$ ,与噪声数学模型的计算结果相似.噪声频谱曲线给出了噪声的转角频率为 10 kHz,与器件的电流电压噪声曲线相同。

## 3 信息获取电路噪声实测分析

根据前人的研究,我们知道在以运放为主搭建的模拟信号调理电路中,系统噪声主要包含白噪声和  $1/f$  噪声两种, $1/f$  噪声是系统低频部分的噪声,白噪声则是系统高频部分的噪声.二者之间存在一个转角频率,该频率主要由所选择的器件特性及电路结构特点决定.无论是白噪声还是  $1/f$  噪声,他们在时域的分布特征均满足高斯分布<sup>[2]</sup>,如下图所示:

以下针对于用于中波红外  $512 \times 128 \times 4$  探测器的多通道信息获取系统进行噪声量化测试.该中波探测器存在 4 路并行输出,四个通道的模拟信号调理电路基本相同,均为典型的仪放滤波电路构成.对于四个通道选择其中的一个进行相关测试.利用系统的 AD9243 和通信接口 USB2.0 完成对于空板图像信息的获取工作.保证信息获取电路的输入

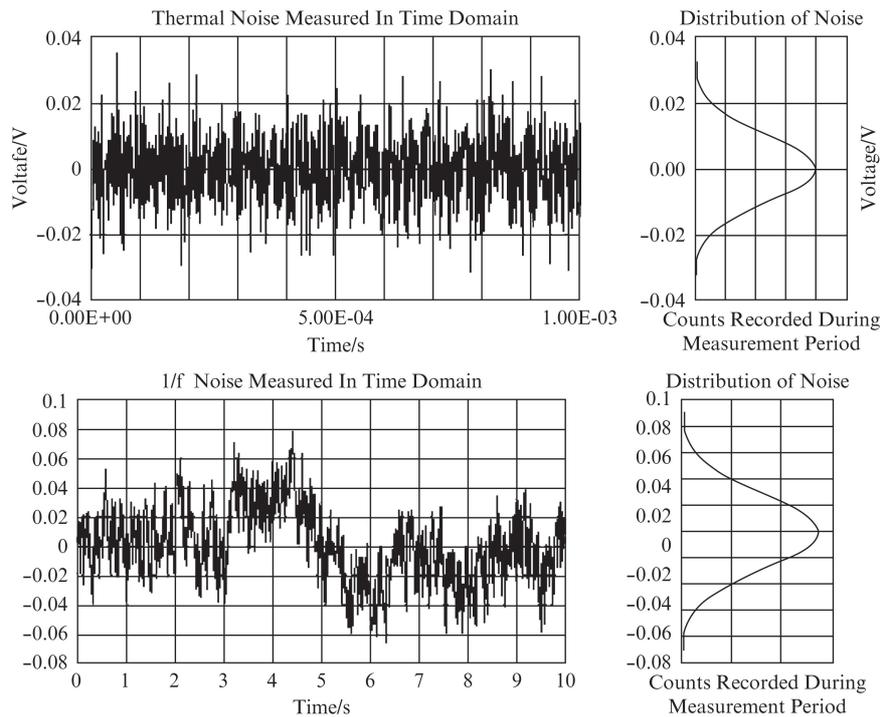


图 6 1/f 噪声(a)和白噪声(b)的时域统计特征  
 Fig. 6 The time-domain statistical characteristics of 1/f noise (a) and white noise (b)

端为零,利用信息获取电路采集若干幅图像分别统计出其时间变化曲线如图 7,统计出其分布特征并进行相关的拟合工作,所得的结果如图 8 所示。

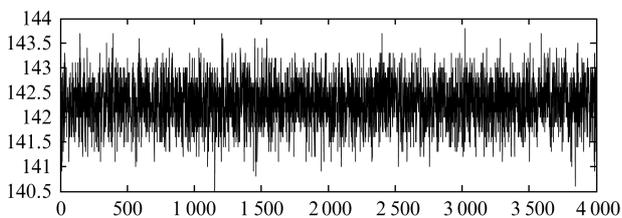


图 7 红外信息获取通路噪声变化图  
 Fig. 7 Noise in infrared signal acquisition channel

在对空板红外图像信息获取电路进行噪声测试的过程中有三个要点需要保证;其一是输入必须保证是一个干净的参考源,保证接近零的噪声水平,本测试中选择接地;其二是,统计需要大量的图像数据,采集多帧图像,一般选择 200 幅左右;其三是,对所得的图像数据进行噪声分析时需要注意,此时所测得的噪声包含 ADC 的直流等效输入噪声,在进行理论与实际对比时需要去除这一部分的噪声量,剔除 ADC 直流等效输入噪声的办法是给 ADC 提供标注的输入直流电压信号,使用相同的噪声统计方法,可以得到单独 ADC 及后续数字电路部分的噪声  $N_{ADC}$ ,在进行模拟调理电路噪声分析时必须剔除这

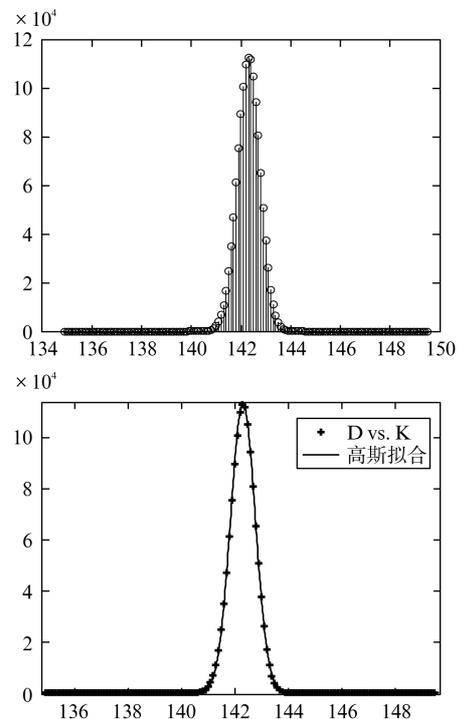


图 8 噪声分布特征图(a),高斯拟合曲线图(b)  
 Fig. 8 Noise distribution characteristic graph (a) and Gaussian fitting curve (b)

一部分。

在噪声分布特征的分析过程中,由于单幅图像灰度值以 LSB 为单位,统计过程中会出现采样率较

低,分布特征不明显的现象,因此处理过程中采用多帧图像累加求平均的方法,可以克服灰度值欠采样问题,此处采用 10 帧图像累加求平均,灰度值分辨率可以达到 0.1 LSB. 从图像的灰度直方图统计过程(图 8a)可以明显的看出噪声分布接近于高斯分布<sup>[10]</sup>,利用高斯曲线对该分布特征进行拟合,所选用的拟合模型如下:

$$y = ae^{-\frac{(x-b)^2}{c^2}}. \quad (9)$$

拟合后所得到的参数情况如下:  $a = 1.13 \times 10^5$ ,  $b = 142.3$ ,  $c = 0.6541$ , 拟合确定系数高达 0.9999, 说明该模型能够非常好的描述实际噪声的高斯分布特性,由于在高斯分布中,系数  $c$  与高斯分布的标准差  $\sigma$  存在关系  $c^2 = 2\sigma^2$ , 可以求得此时的标准差  $\sigma = 0.4625$  LSB, 灰度平均值  $\mu = b = 142.3$  LSB, 此时的分析过程中,标准差即为信息获取系统的等效输出端噪声值,灰度平均值即信息获取电路此时的输出零漂电平,实验中测试的信息获取电路,其放大倍数为 2, 故此时,对应的等效输入端噪声和零漂电压值分别为:

$$\sigma_{in} = \frac{\sigma}{2} = 0.2313 \text{ LSB} \quad (10)$$

$$\mu_{in} = \frac{\mu}{2} = 71.15 \text{ LSB}$$

上述的标准差值与 RMS 计算均是基于 10 帧图像叠加的结果,我们知道在凝视成像系统中,多帧叠加求平均能够起到降低图像噪声提高信噪比的功能,信噪比的提高和图像累加的帧数  $M$  的开平方成正比,也即噪声下降倍. 本例中,图像叠加帧数为 10, 因此,还原至单帧图像,其噪声量大小为  $\sigma_{one\_in} = \sqrt{10}\sigma_{in}$ , 具体数值为 0.7314 LSB.

另一方面,通过对单帧灰度图像数据进行直接的统计方法分析,可以计算此时序列所对应的 RMS 值, RMS 可由下列式子计算得出:

$$RMS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (11)$$

其中  $\bar{x}$  为灰度值,通过该式直接计算得出的  $RMS = 0.7291$  LSB, 可以看出此时拟合函数所对应的标准差值和我们直接对灰度序列计算所得的 RMS 值基本相同,进一步证明了电路噪声符合标准的高斯分布,也从另一个方面说明了噪声测试方法的可行性.

前面的噪声分析和计算所得到的噪声 RMS 数值均为红外信息获取通道的整个通道噪声值,包含模拟调理部分以及 ADC 直流噪声部分,利用相同的

方法,给 ADC 的输入接入标准参考源测试此时 ADC 的直流等效输入噪声值  $RMS_{ADC} = 0.3117$  LSB.

此时可以计算得出,信息获取系统中不含 ADC 部分,整个模拟信号调理电路部分所对应的噪声值为:

$$RMS_{analog} = \sqrt{RMS^2 - RMS_{ADC}^2} = 0.6591 \text{ LSB}. \quad (12)$$

对应为 AD9240 此时的工作状态,位宽为 14 bit, 输入动态范围 3.125 V, 可以计算此时的 LSB:

$$LSB = \frac{3.125}{(2^{14} - 1)} = 0.19075 \text{ mV}. \quad (13)$$

根据此时 LSB 的具体数值可以计算模拟信号调理部分噪声的具体数值为

$$N_{analog} = 0.6591 \times 0.19075 = 125.72 \mu\text{V}, \quad (14)$$

为了较仔细的分析模拟调理电路的噪声特性,光分析其噪声大小是远远不够的,还需要分析噪声的频谱特性<sup>[9]</sup>, 分析的对象为包含 ADC 的信息获取整个通道整体噪声,分析所得的噪声序列频谱如图 9 所示,测试转角频率为 30 KHz, 与仿真结果 10 KHz 基本相同,存在转角频率少量平移,这种平移主要是有 ADC 引入的,从 a 图中可以看出.

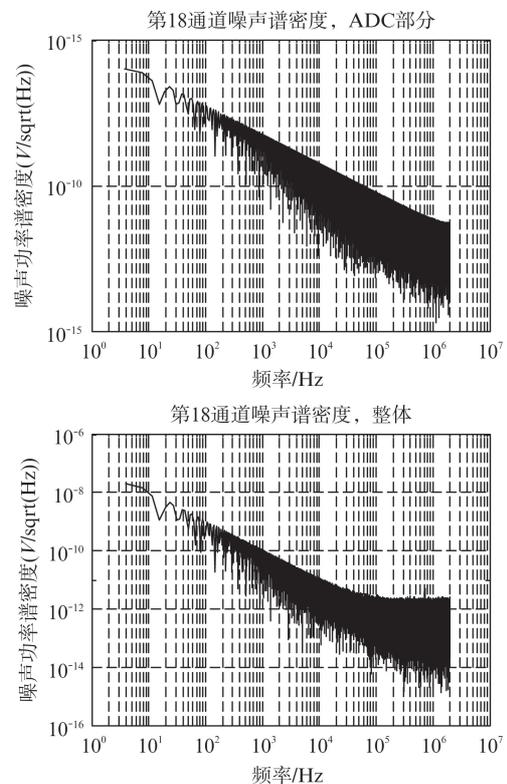


图 9 噪声谱密度曲线,ADC 部分(a),整体部分(b)

Fig. 9 Noise spectral density curve for ADOnly (a) and the total (b)

## 4 结果与讨论

对于应用于低噪声红外探测器图像信息获取的电路, 定量化分析其噪声情况至关重要, 噪声情况决定了该电路是否能够适用于探测器的需求. 上述内容分别从噪声数学模型, 电路仿真, 实际测试三个方面对噪声情况进行了分析, 三者所得结果相近, 从而验证了分析方法与所得结果的正确性. 噪声分析的内容主要包括 RMS 值大小, 统计分布特征, 频谱特性, 转角频率大小等. 各种方法分析所得的噪声大小及转角频率情况如表 1. 噪声在时间域服从高斯分布, 在转角频率以下主要是  $1/f$  噪声, 在转角频率以上的噪声成分则主要是白噪声, 分析结果符合器件特征.

表 1 红外信息获取电路噪声分析综合说明  
Table 1 Overview of noise analysis in the infrared signal acquisition circuit

噪声分析方法	截止频率	噪声量大小	转角频率
噪声数学模型		106.74 $\mu\text{V}$	无
仿真	14.384 MHz	113.5 $\mu\text{V}$	10 KHz
测试		高斯拟合	127.2 $\mu\text{V}$
		统计计算	125.72 $\mu\text{V}$

## 5 结论

噪声分析结果表明基于仪放的信息获取电路适用于目前航天应用低噪声红外探测器的需求. 对于以后此类信息获取电路噪声分析均可采用上述方法. 从噪声的数学模型中我们可以知道, 想要更进一步的降低电路噪声值可以通过以下手段: 1) 选择噪声水平更低的运算放大器; 2) 在满足放大倍数要求的前提下, 选择较小的电阻值; 3) 降低工作温度; 4) 在探测器建立时间进一步缩短的前提下, 可以减小模拟滤波器带宽; 5) 信息获取系统中使用高速 AD, 对每一个输出像元信号进行过采样平均, 能够使噪声降低  $\sqrt{N}$  倍.

## 6 展望

在上述分析的过程中, 已经完成红外信息获取系统噪声研究的全部内容, 通过分析, 对于噪声的数值大小, 频谱特性, 时域分布特征, 主要来源均有较为清晰的认识, 这为下一步的除噪, 降噪过程提供了

理论依据, 如结论中所列出的 5 种降噪手段. 在下一步的研究工作中, 重点是降噪. 在后续的工作中针对于总结中提出的第 5 点内容会进行详细的理论分析以及实验验证, 以期通过该方法能够是的电路噪声水平进一步大幅度降低.

## References

- [1] Matthieu Liger. *Uncooled Carbon Microbolometer Imager* [M]. California; California Institute of Technology Pasadena, 2006: 31-41.
- [2] Art Kay. Analysis and Measurement of intrinsic noise of the op amp circuit, TI Application Notes. [c] (Art Kay. 运算放大器电路固有噪声的分析与测量, TI 应用笔记.). 1-14.
- [3] HUANG Da-Jun, WANG Yong-Gang, ZHANG Li-Jun, et al. High-efficiency high-accuracy data acquisition method and realization for IRFPA test system [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (黄大骏, 王永纲, 张丽君, 等. 用于焦平面测试系统的高效高精度数据采集方法与实现. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(4): 305-309.
- [4] HUANG Jing. Noise Analysis of Pre-amplifiers for Infrared Photo-detectors [J]. *Modern Electronics Technique*, (黄静. 基于红外探测器的前置放大器噪声特性分析. *现代电子技术*), 2006(9): 82-83.
- [5] WEI Cui-Yu, HU Bing-Liang, SHAO Xiu-Juan, et al. Research on low noise design of HgCdTe infrared detector amplifying circuit based on ORCAD [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2009, **32**(2): 324-328.
- [6] HUANG Song-Lei, ZHANG Wei, HUANG Zhang-Cheng, et al. The noise of the extended wavelength InGaAs FPA with large perimeter area ratio [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, (黄松垒, 张伟, 黄张成, 等. 大周长面积比延伸波长 InGaAs 红外焦平面噪声. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(3): 235-238.
- [7] Gong Han, Chen Hao-Yu. The Design and Realization of an Optic = Electric Detecting Circuit for weak signal [J]. *Science & Technology Information*. (龚涵, 陈浩宇. 微弱光信号检测电路的设计与实现. *科技信息*), 2007(27): 85-87.
- [8] Hou Yong-Yan, Guo Wen-Qiang. Research on Simulative analysis of the difference amplifier base on PSPICE [J]. *Microcomputer Information*. (侯勇严, 郭文强. PSpice 在差分放大电路分析中的应用. *微计算机信息*), 2006, **3**, 09Z: 303-305.
- [9] Li Yuan-Ming, Chen Wen-Tao. The preamplifier circuit design of weak optical signal [J]. *Electronic Component & Device Applications*. (李远明, 陈文涛. 微弱光信号前置放大电路设计. *电子元器件应用*), 2007, **8**, 9(8): 148-153.
- [10] SUI Xiu-Bao, BAILian-Fa, CHEN Qian, et al. Algorithm for eliminating stripe noise in infrared image [J]. *J. Infrared-Millim. Waves*, (隋修宝, 柏连发, 陈钱, 等. 红外图像条纹噪声消除办法. *红外与毫米波学报*), 2012, **31**(2): 106-112.