

制冷型红外探测器关键驱动与信号处理电路设计

杨小乐, 史漫丽, 凌 龙
(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 驱动与信号处理电路是红外成像系统的重要组成部分, 高质量的电路有利于系统获得高信噪比。针对制冷型红外探测器电学接口特点, 成像电路架构采用焦面电路和信号处理电路, 基于电路架构, 设计出高集成度、低噪声的驱动与信号处理电路, 给出部分仿真结果和电路噪声估算方法。介绍了一种软硬结合的降噪方法, 最后给出了电路核心指标噪声的测试方法和具体噪声值。
关键字: 制冷型红外探测器; 电路噪声; 电源与偏置电压; 时序驱动; 模拟信号处理
中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2016)07-0556-05

Design of the Key Driving and Signal Processing Circuit
for Cooled Infrared Detector

YANG Xiaole, SHI Manli, LING Long
(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: Driving and signal processing circuit is a very important part of infrared imaging system. High quality circuit is beneficial to system SNR. According to the electronic interface characteristics of cooled infrared detector, the circuit structure consists of focal plane circuit and signal processing circuit. Based on the structure, high integration and low noise driving and signal processing circuit was designed. Simulation results and noise estimation method of composing circuit was given, and noise reduction method of combination of hardware and software is also given. In the last section, the core index noise test method and concrete value are presented.
Key words: cooled infrared detector, circuit noise, power and bias voltage, timing-driven, analog signal process

0 引言

红外成像系统是一种可探测目标红外辐射, 通过光电转换、电信号处理等手段, 将目标物体的温度分布转换成图像的系统。红外探测器是成像系统的核心, 为发挥探测器的最佳性能, 需要低噪声的成像电路。电路主要是为探测器提供电源与偏置电压、时序信号, 同时对模拟输出信号进行调理、模数转换。目前的文献中对红外图像处理技术介绍的较多, 详细研究具体电路的文献较少, 本文围绕制冷型红外探测器的特点, 从电路顶层架构出发, 设计出高集成度, 低噪声的驱动与信号处理电路, 给出了仿真结果和实际噪声测试结果, 并且提出了一种软硬相结合的系统降噪方法。

1 制冷型红外探测器

制冷型红外探测器典型电学接口信号有 3 类, 电源与偏置电压, 时序信号, 模拟输出信号。
电源和偏置电压噪声要求高, 其中 Gpol 电压 (RMS 噪声要求小于 100 μ V) 是直接注入 (DI) 型探测器输入级控制电压, 如图 1, 它控制 Mi 为注入管, 光生电流通过注入管在电容上积分, 其质量直接影响探测器的输出噪声^[1-3]。
VR_PIX 和 SUBPV 电压是电容反馈负导放大器 (CTIA) 型探测器输入级控制电压。如图 2, 该结构可以获得接近 100% 的注入效率, 适合小信号探测^[2-3]。2 个电压噪声水平直接决定探测器噪声水平。

收稿日期: 2015-12-17; 修订日期: 2016-03-15.
作者简介: 杨小乐 (1984-), 男, 满族, 辽宁丹东人, 硕士, 主要从事空间红外遥感器电子学方面的研究工作。E-mail: chinayao88@icloud.com。

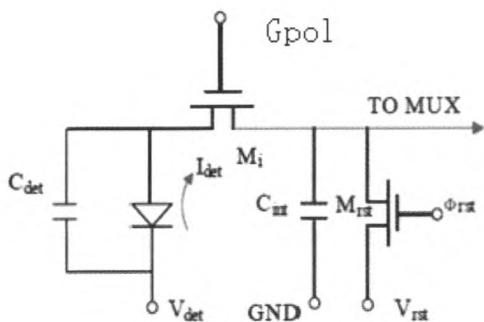


图 1 DI 输入结构示意图
Fig.1 DI input structure schematic diagram

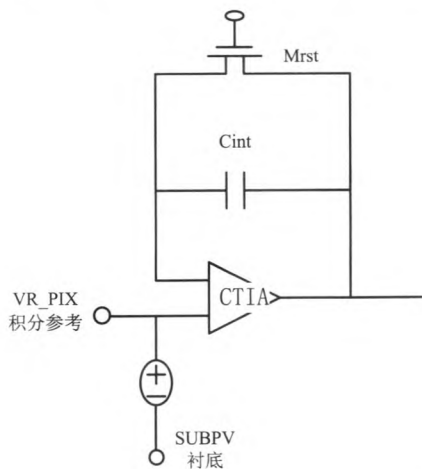


图 2 电容反馈负导放大器结构示意图
Fig.2 Capacitor feedback transimpedance amplifier schematic diagram

时序信号主要有时钟、积分控制、串口控制等，时序信号主要考虑信号间相位关系，例如积分控制信号必须在时钟上升沿±1/4 周期内改变状态，并且在此时间外保持稳定，无毛刺。

模拟输出信号特点是输出阻抗大，驱动能力弱，模拟输出典型负载由一个 $R \geq 100\text{ k}\Omega$ 的电阻与一个 $C \leq 10\text{ pF}$ 电容并联组成。

掌握以上探测器典型电接口特点，是设计高质量成像电路的前提。

2 电路设计

2.1 电路架构

制冷型红外探测器采用真空杜瓦封装，通过陶瓷引线环将电学信号引出，电路构架采用焦面电路和信号处理电路，如图 3。焦面电路安装在杜瓦上。如果杜瓦附近有足够空间，并且能够保证焦面电路的力学性能，应尽可能的将电路放置在焦面电路上，避免信号的长距离传输。本文因焦面位置空间有限，焦面电路主要完成探测器电源与偏压产生和滤波、时序信号整形驱动，模拟信号阻抗变换和单端转差分处理等

功能，信号处理电路主要完成时序产生与驱动，模拟信号调理与模数转换，图像处理以及输出等功能。

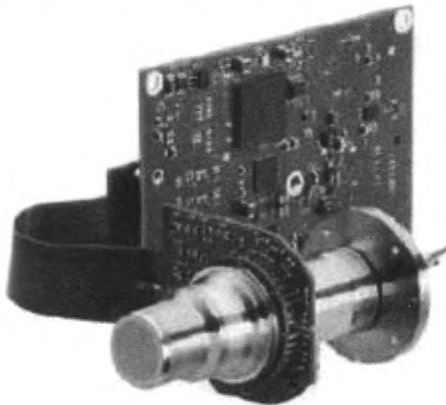


图 3 信号处理电路典型架构
Fig.3 Signal process circuit typical structure

2.2 电源与偏压电路设计

电源与偏置电压电路是成像电路的关键，直接影响探测器的性能。本文对 G_{pol} 或者 VR_PIX 和 $SUBPV$ 采用电压基准源供电，选用的电压基准源有较小的低频噪声、温度漂移、时间漂移等保证稳定性和噪声要求^[1,4-6]。选用 AD580-2.5 电压参考源，它提供标准 2.5 V 电压基准，温度稳定性可以达到 $10\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ， $1\text{ Hz} \sim 1\text{ MHz}$ 峰峰值噪声为 $600\text{ }\mu\text{V}$ ，但其噪声不能满足要求，为此增加 RC 滤波，滤除高频噪声，滤波频率 $1/RC$ 控制在 1 kHz 以下，噪声衰减 24 倍。为了减少电容的体积，尽量选用大的电阻，例如选择 100 K 电阻，因为滤波串入电阻，所以本身驱动能力只有 10 mA 的 AD580 带载能力更弱，同时考虑这类电压要求具有一定的可调范围，因此选用电压基准源+运放的方案，如图 4。 G_{pol} 或者 VR_PIX 和 $SUBPV$ 供电噪声为运放与电压基准源噪声之和，运放要选择窄带、低噪声电压、温度漂移系数低的运算放大器，本文推荐选用 AD822，输入阻抗为 $10\text{ M}\Omega$ ，远远大于 100 K 。

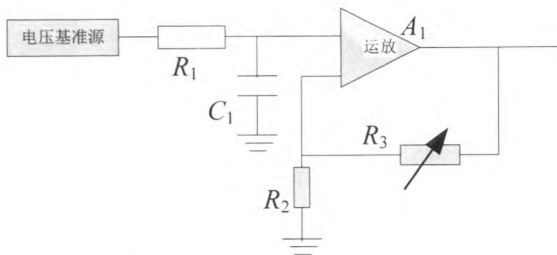


图 4 G_{pol} 或者 VR_PIX 和 $SUBPV$ 供电电路
Fig.4 G_{pol} or VR_PIX and $SUBPV$ power supply circuit

对于噪声要求相对较低，驱动能力要求较高的探测器模拟电源 $VDDA$ 、数字电源 $VDDD$ ，采用精密电压基准源与运放+三极管配合方案，通过三极管增加

驱动能力，典型电路如图 5。

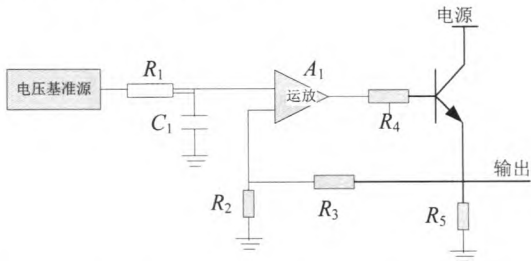


图 5 电源供电电路 Fig.5 Power supply circuit

2.3 时序电路设计

时序信号由信号处理电路 FPGA 产生，采用 54AC245TTL 总线驱动器增加信号驱动能力，同时为了避免信号远距离传输，信号质量下降，在焦面电路放置施密特触发器 54HC14 进行信号整形。

驱动时序采用无空闲时间的最优时序，驱动频率最小，小的驱动频率有利于探测器内部读出电路获得最佳性能，同时也有利于探测器输出信号采样，更有利于采用多路选择开关+AD 的信号处理方案，降低多路开关的速率要求。

探测器在驱动时钟的上升沿输出模拟信号，但是需要约半个时钟周期的建立过程，信号在驱动时钟的后半周平坦，因此要根据实际情况，通过 FPGA 调整采样时钟相位，获得最佳采样结果。

2.4 模拟信号处理电路设计

探测器输出模拟信号叠加在一个直流电平上，目前有交流耦合和直流耦合两种处理方式。

交流耦合加直流恢复如图 6，直流恢复在恢复直流电平的同时，抑制了放大器的温度漂移，但为保证精度，隔直电容和箝位电容会很大，并且受限于交流耦合电路低端频率带宽。

直流耦合电路形式简单，但无法抑制探测器输出的温漂以及运算放大器的温漂。目前二代红外探测器

整个读出电路都工作在低温区，温漂很小，慢变的温漂可通过非均匀性校正电路进行实时校正，本文采用直流耦合。

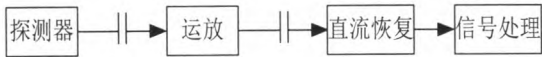


图 6 交流耦合电路 Fig.6 AC coupling circuit

探测器的输出阻抗大，需要进行阻抗变换，以便后续电路处理。阻抗变换采用跟随电路，并且在探测器与跟随电路间加入一阶低通 RC 滤波器^[1]，降低探测器输出噪声。低通滤波的截止频率设为探测器输出频率的 3~5 倍。阻抗变换电路位于信号处理链路中的最前端，必须选择低噪声、低温度漂移系数的运放，以降低经后级放大后的噪声和漂移量对有用信号的影响，同时尽量靠近探测器输出端，以减小布线中的寄生电容^[7]，本文选用 OP15 放大器。

AD 器件放在焦面电路上，模拟信号处理电路采用图 7 的形式，信号阻抗变换后直接进入 AD 转换器，尽可能降低信号的传输路径，如果选择单端 AD，图中差分运放 A_2 去掉即可。因焦面空间有限，焦面电路与信号处理电路距离约 2 m，采用图 8 形式，AD 器件放置在信号处理电路。

焦面电路与信号处理电路通过柔性 PCB 连接，焦面电路上的差分运放实现单端到差分的转换，信号处理电路上的差分运放实现信号的进一步调理，已滤除传输中引入的噪声。采用差分信号传输，抗干扰能力强，外接共模噪声几乎可以完全抵消，对外辐射的电磁场相互抵消，能有效的抑制 EMI，差分信号的开关变化位于两个信号的交点，时序定位精确^[4-5,8]。在差分放大电路的同相和反相输入端加入共模噪声，共模抑制仿真结果如图 9。

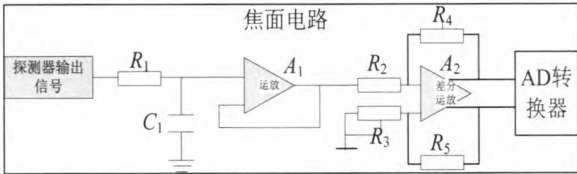


图 7 模拟信号处理电路 1 Fig.7 Analog signal processing circuit 1

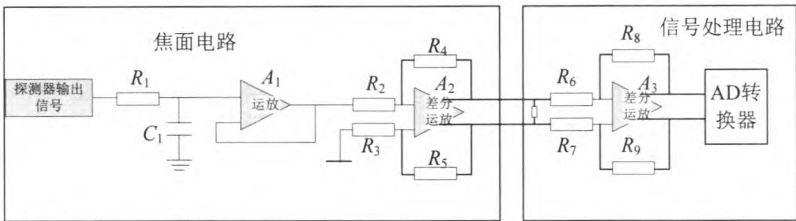


图 8 模拟信号处理电路 2 Fig.8 Analog signal processing circuit 2

差分放大电路往往采用双运放，一个是跟随器，另一个是增益为1的反向放大器，占用运放多，推荐使用 ADI 差分放大器 AD813x。AD813x 差分放大器可以是差分输入，也可以是单端输入，可以实现单端信号到差分信号的转换，它的输出平衡度由本身特性决定，而不依赖于反馈网络电阻，输出差分信号的共模电平可以由输入管脚 Vcom 简单设置。

为减少高频信号的反射和振铃效应，在 A/D 输出的数字信号中串入 33 Ω电阻^[6]。

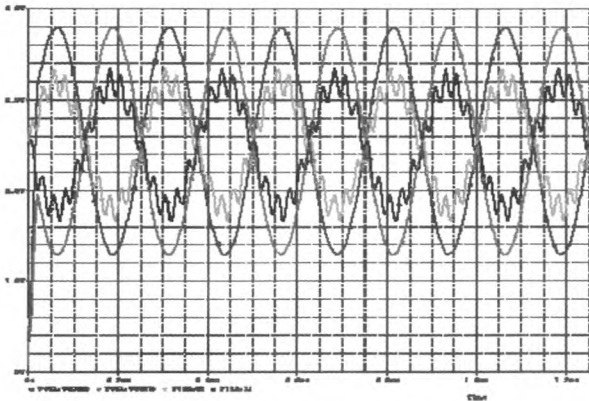


图9 差分放大电路共模抑制仿真

Fig.9 Difference amplifier common mode rejection simulation

3 噪声分析与测试

成像电路的噪声主要由模拟信号处理链路决定，模拟信号处理链路主要由运放与 AD 器件组成。运放的噪声电压计算如式(1)：

$$V_n = \sqrt{E_n^2 + (I_n \cdot R_s)^2 + E_t^2} \tag{1}$$

式中： E_n 为运放的等效输入噪声电压； I_n 为运放的等效输入噪声电流； R_s 为源阻抗； E_t 为源电阻的热噪声。 E_n 和 I_n 可以用式(2)、式(3)估算：

$$E_n = e_n \cdot \sqrt{\Delta f} \tag{2}$$

$$I_n = i_n \cdot \sqrt{\Delta f} \tag{3}$$

式中： e_n 为等效输入噪声的电压密度， $\text{nV}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ ； i_n 为等效输入噪声的电流密度， $\text{pA}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$ 。

源电阻热噪声按式(4)估算，其中 $K=1.38\times10^{-23}$ ：

$$E_t = \sqrt{4KTR\Delta f} \tag{4}$$

阻抗变换运放 OP15，经计算噪声为 129.63 μV。差分运算放大器 AD813x 采用 ADI 公司的仿真计算工具，得到其噪声为 149.9 μV。A/D 的噪声很多教科书上都按照最小量化分层 $\text{LSB}/12^{1/2}$ 进行计算，这是认为量化噪声在 $\pm\text{LSB}/2$ 内随机分布，取其标准差。本

文推荐按照最小 LSB 估算 A/D 噪声，AD 的输入量程除以信噪比，噪声为 338.1 μV。认为级联的模拟链路中各单元噪声互不相关，模拟链路的噪声 $V_{n\text{总}}$ 为 391.8 μV，如式(5)^[9-10]：

$$V_{n\text{总}} = \sqrt{(129.63)^2 + (149.9)^2 + (338.1)^2} = 391.8 \tag{5}$$

红外探测器的驱动频率较低，最大为 5 MHz，而 AD 器件的采样频率高达几十兆。在探测器输出平坦区上叠加了很多随机噪声，可以采用多次采样滤波的方法降低噪声、提高信噪比，多次采样滤波技术其原理如图 10，其认为探测器噪声时域分布特性是随机的、不相关的，且服从泊松分布，在探测器输出的平坦区利用 AD 的高采样频率对一像元进行 m 次采样，将采样得到的信号数字化之后取均值作为输出的信号。理论经过 m 次采样滤波后，信噪比能够提高 $m^{1/2}$ 倍。探测器主时钟以及 AD 时钟的相位要通过 PLL 锁定，防止温度漂移等因素造成 AD 时钟采样位置偏移，造成采样结果错误。

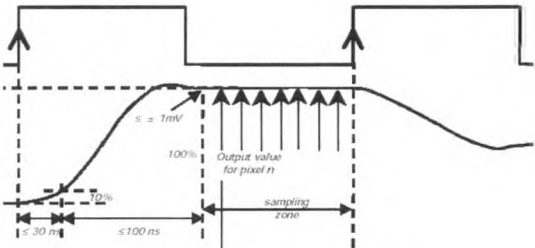


图10 多次采样滤波示意图

Fig.10 Multiple sampling filter schematic diagram

红外成像系统的噪声有时间噪声与空间噪声，空间噪声可以通过校正算法尽可能的降低，将时间噪声视为系统噪声，即连续采集 N 帧图像，计算出每一个探测像元的时间噪声，然后平均每个像元的时间噪声视为系统噪声^[1]。

实际测试电路的噪声，因探测器输出范围是 1.6~4.4 V，测试方法是 将焦面电路的输入端接入 2 节串联的干电池，通过采集经过模拟信号处理链路后的图像计算噪声，计算结果整个电路的噪声为 520 μV，采用 8 次采样滤波，整个电路的噪声为 350 μV，电路噪声明显降低。理论分析电路噪声为 391.8 μV，实际测试偏大，这主要是与实际电路设计中的 PCB 具体设计、接地设计，供电电源品质等因素有关。

4 结论

制冷型红外探测器主要电学接口信号有电源与偏置电压、时序信号和模拟输出信号，驱动与信号处理电路中任何一个环节，都会影响最终成像性能。本文从成像电路的架构出发，通过电压基准源与运放产

生高质量的偏置电压,通过驱动与整形芯片产生高质量的时序信号,通过阻抗变换电路和差分放大器构成模拟信号处理电路,并且给出了具体电路设计和噪声分析方法。电路实测噪声仅有 520 μ V,通过多次采样滤波技术,噪声进一步降低,成像质量得到明显改善。

参考文献:

[1] 谢宝蓉,傅雨田,张澄清. 480 \times 6 长波红外探测器的低噪声采集系统设计[J]. 激光与红外, 2009, 39(11): 1177-1182.
XIE Baorong, FU Yutian, ZHANG Yingqing. Design of the acquisition system with low noise based on 480 \times 6 long wavelength infrared detector[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(11): 1177-1182.

[2] 陶坤宇,李福巍,周彦平,等. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 265-269.
TAO Kunyu, LI Fuwei, ZHOU Yanping, et al. IRFPA imaging system dynamic range adaptive adjust technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 265-269.

[3] 方丹. 红外焦平面阵列读出电路技术分析[J]. 红外技术, 2004, 26(2): 23-28.
FANG Dan. Skill analysis of readout intergrated circuits of IRFPA[J]. *Infrared Technology*, 2004, 26(2): 23-28.

[4] 安永泉,禹健. 576 \times 6 长波红外探测器成像系统设计[J]. 激光与红外, 2009, 39(2): 173-177.
AN Yongquan, YU Jian. Infrared imaging system design for 576 \times 6 linear detector[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(2): 173-177.

[5] 禹健,颜景龙. 576 \times 6 长波红外探测器多通道高速数据采集系统设计[J]. 核电子学与探测技术, 2008, 28(6): 1272-1277.
YU Jian, YAN Jinglong. Design of 576 \times 6 infrared detector multi-channel high speed acquisition system[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(6): 1272-1277.

[6] 陈晓东,何锡君. 288 \times 4 长波红外探测器关键驱动电路的设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 562-564.
CHEN Xiao dong, HE Xi jun. Design of key driving circuits for 288 \times 4 long-wavelength infrared detector[J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 562-564.

[7] 王华,魏志勇,张文昱,等. 480 \times 6 红外探测器信号处理电路设计[J]. 红外技术, 2009, 31(9): 504-512.
WANG Hua, WEI Zhiyong, ZHANG Wenyu, et al. Design of 480 \times 6 infrared focal plane array signal processing circuit[J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(9): 504-512.

[8] 葛炜,王君,梁列国,等. 576 \times 6 红外焦平面阵列驱动电路的设计与实现[J]. 激光与红外, 2007, 37(6): 530-533.
GE Wei, WANG Jun, LIANG Lieguo, et al. Design and implementation of the 576 \times 6 IRFPA drive circuit[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(6): 530-533.

[9] 陈晓东. 288 \times 4 长波红外探测器数据采集模块的设计[J]. 红外技术, 2001, 33(3): 137-140.
CHEN Xiaodong. Design of signal acquisition module for 288 \times 4 long-wavelength infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2001, 33(3): 137-140.

[10] 张钰,邓希宁,高旭辉. 基于空间应用的红外探测器驱动电路设计[J]. 激光与红外, 2015, 45(2): 150-152.
ZHANG Yu, DENG Xining, GAO Xuhui. Design of infrared detector driver circuit for space applications[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(2): 150-152.