

数字化红外焦平面噪声分析研究

李 鸥¹, 杨德振²

(1. 中电科技集团红外工程技术有限公司, 北京 100015; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 基于自行设计的 TDI 线列红外焦平面数字化读出电路, 设计一款带有驱动 IRFPA 器件和数字化数据采集功能的红外焦平面测试系统, 分别进行数字化线列读出电路电注入方式、中波红外焦平面和长波红外焦平面的噪声分析以及红外探测器比较关心的 NETD 的分析, 并对积分时间、焦平面阵列注入区和偏置电压对红外探测性能的影响做了区分论证。

关键词: 数字化红外焦平面; 测试系统; 噪声分析; NETD

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2017.10.017

Noise analysis for digital IRFPA

LI Ou¹, YANG De-zhen²

(1. CETCIR, Beijing 100015, China;

2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: Based on a self-designed TDI linear infrared focal plane digitization readout circuit, a infrared focal plane test system with driving IRFPA device and collecting digital data function is designed. Noise analysis of linear digitization readout circuit electric injection method, medium wave infrared focal plane and long wave infrared focal plane is done; NETD that is important for infrared detector is also analyzed. The influences of integration time, focal plane array injection region and bias voltage on the infrared detection performance are discussed respectively.

Key words: digital IRFPA; test system; noise analysis; NETD

1 引 言

近年来,红外焦平面组件日渐成熟,数字化进程也是日新月异。当前较为传统的数字处理方式是利用片外 ADC 将输出的模拟图像信号根据特有频率进行数据转换输出数字信号,但片外 ADC 会带来信号完整性、易受干扰和组件体积较大等问题;相比较而言,集成在读出电路芯片内部的 ADC 优点十分明显,简化整个红外探测组件的系统设计,降低板级电路带来的噪声和干扰,减轻组件的重量和缩小系统体积。红外数字化组件的发展也相应引出了关于红外焦平面读出电路数字化设计的测试评价方法和测试系统的研究,本文基于自行设计的、集成有片内 ADC 的 TDI(时间延迟积分技术)线列红外焦平面

数字化读出电路,设计一款带有驱动 IRFPA 器件和数字化数据采集功能的红外焦平面测试系统,利用该系统进行噪声分析研究。

2 测试系统介绍

2.1 系统组成

本文的数字化红外焦平面测试系统与以往的红外焦平面测试系统不同之处在于:本系统不需要外接 ADC 进行模数转换,直接采集数字图像信号,减少了模数转换和模拟信号长距离 PCB 走线带来的干扰^[1]。系统主要包括高精度黑体源、封装在中低温杜瓦的红外焦平面组件、信号测试系统电路板和带有测试软件的计算机等,具体构成如图 1 所示。测试软件主要是 Camerlink 红外图像数据采集软件

和 Matlab 数据分析软件;测试系统电路板的主要功能是给数字化读出电路和红外焦平面阵列提供电源和偏压,配合读出电路的时序给予合适的脉冲序列,对读出电路读出的数据进行数据传输^[2]。

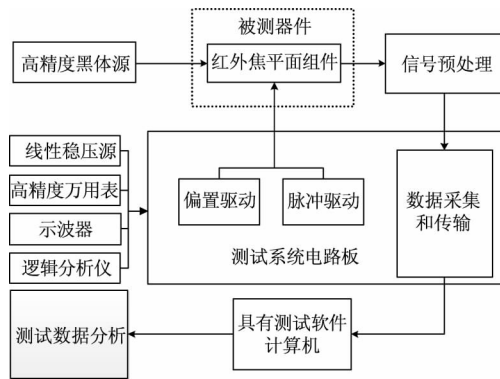


图 1 红外焦平面测试系统组成

Fig. 1 Composition of infrared focal plane test system

本系统能够对电注入的读出电路、中波和长波红外焦平面进行测试,主要测试参数包括红外焦平面的探测率、rms 噪声、非均匀性和噪声等效温差等。

2.2 测试环境

红外焦平面阵列需要在低温环境下工作,测试时一般保持在液氮的温度(77 K);黑体温度的微小改变,都将使控温系统启动来调节黑体温度,从而导致测试温度出现波动。因此,本系统将红外焦平面芯片安置在低温杜瓦里面,并选择净化间内进行测试,以提供低温、无风和温度恒定的测试环境。

2.3 测试方法

根据红外焦平面的吸收特性和 ADC 的转换精度特性,通过调节温度、积分时间或偏置电压,使测试数据在半阱时,可以测得最好的噪声性能和 NETD。结合国标 GB/T17444 - 2013 的测试方法^[3],得出具体测试步骤如下。

测试开始之前,使用万用表、示波器和逻辑分析仪对红外焦平面组件和测试电路进行测试,功能正常后开展读出电路的测试;首先,中测低温杜瓦加上液氮制冷使红外焦平面工作在稳定的低温环境中,然后使用 QuartusII 软件进行积分时间的选择,选择编译好积分时间的 . sop 文件进行逻辑程序的下载;接着,将黑体调至 20 ℃,待黑体温度稳定后进行测试,使用 Camerlink 软件进行红外图像数据的采集和存储,同理将黑体温度每次调高 5 ℃ 再进行相应测试,直至 40 ℃;最后,使用 MATLAB 对测试数据进行分析 and 处理。

测试有效像元的 NETD 平均值的计算公式为:

$$\text{NETD} = \frac{T - T_0}{\bar{V}_s / \bar{V}_N}, \text{其中: } \bar{V}_s = \bar{V}_{s_{T_1}} - \bar{V}_{s_{T_0}}$$

式中, T 取 40 ℃ 黑体温度, T_0 取 20 ℃ 黑体温度, $\bar{V}_s$ 是平均响应信号, $\bar{V}_N$ 是平均噪声电压, $\bar{V}_{s_{T_0}}$ 是 20 ℃ 黑体平均响应直流电压, $\bar{V}_{s_{T_1}}$ 是 40 ℃ 黑体的平均响应直流电压。

3 噪声分析

测试系统的噪声来源主要包括光学系统噪声、焦平面阵列和读出电路体现出来的红外焦平面噪声、测试系统对焦平面阵列的影响和测试系统本身的噪声,本文主要针对红外焦平面噪声进行研究。先分别使用电子注入和中波焦平面阵列材料进行测试,验证读出电路和测试系统的可用性,然后使用工艺还不是特别成熟、但可获取更多目标辐射能量的长波焦平面阵列材料进行测试,以保证测试结果可靠。

测试过程中,需要根据实际情况改变积分时间和偏置电压,使红外焦平面实现最佳的自身性能。对测试结果的分析主要是在时域^[4]上对像元在不同采集时刻的信号值和噪声,像元间的非均匀性校正和探测器的 NETD 做验证。

3.1 读出电路电子注入噪声分析

待低温杜瓦稳定在 77 K 之后,在积分时间为 30 ms、读出速率为 1 MHz 的情况下,采用在 V_{TEST} 引脚加入偏压^[5],并在平均码值为 20000、40000 和 60000 的情况下进行噪声测试,具体测试偏压是 V_{DD} 为 1.8 V, V_{REFP} 为 1.8 V, V_{REFN} 为 1.45 V, V_{B} 为 0.9 V,测试图像如图 2 所示。



图 2 30 ms 积分时间时电注入数据图像

Fig. 2 30 ms integration time electric injection data image

对红外焦平面读出电路的像元输出信号进行采样,采样结果如图 3 所示,得到噪声方差为 2.501919 个 LSB。

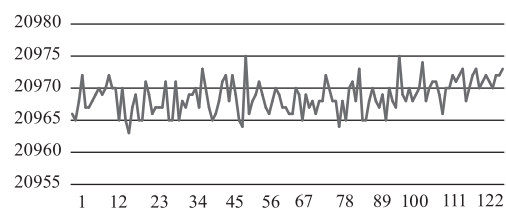


图 3 读出电路在 20969 码值时噪声分布

Fig. 3 Readout circuit noise distribution of 20969 code

通过调节偏置电压 V_{TEST} 改变注入电流,调节码值分别为 20000、40000、60000,红外焦平面读出电路的测试结果见表 1。

表 1 电注入读出电路性能

Tab. 1 Electric injection readout circuit performance

平均码值	噪声值	一致性	功耗
20000	3.5 LSB	28%	30 mW
40000	4.0 LSB	20%	36 mW
60000	5.4 LSB	15%	40 mW

电注入是采用在 V_{TEST} 引脚端进行测试,而电注入管本身又会存在一定的阈值偏差,故从上表可看出,测试系统可以满足实验要求,并验证读出电路基本满足设计要求。

3.2 中波红外焦平面噪声分析

如同电子注入时的偏置条件,中波红外焦平面在积分时间^[6]为 35 ms 时的测试图像如图 4 所示。

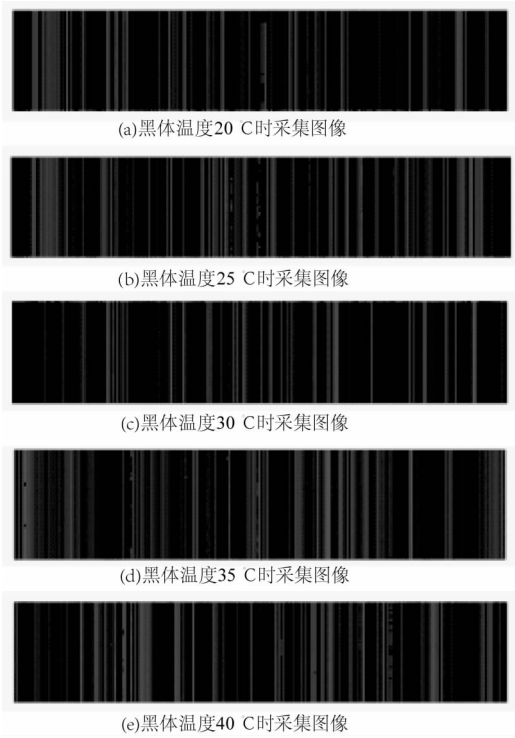


图 4 积分时间为 35 ms 温度变化图像数据

Fig. 4 35 ms integration time temperature change image data

从 20 °C 到 40 °C,每隔 5 °C 采集一组红外焦平面图像,使用 MATLAB 对采集的测试数据进行分析可得出表 2 的测试结果。

表 2 中波红外组件性能测试表

Tab. 2 Performance test table of medium wave infrared device

黑体温度码值	噪声值	平均码值	盲元数	功耗
20 °C	0.35 LSB	2391	10	26 mW
25 °C	0.43 LSB	2840	9	26 mW
30 °C	0.44 LSB	3360	6	27 mW
35 °C	0.49 LSB	4027	3	27 mW
40 °C	0.491 LSB	4630	3	28 mW

在去除盲元之后,由 2.3 节中的公式可得,中波红外焦平面的平均像元 NETD 可以达到 3.20 mK,小于 5 mK,验证了测试系统设计的准确性。

延长积分时间到 100 ms 时,采集到的图像如图 5 所示。

利用 MATLAB 对采集的长积分时间中波红外图像数据进行不同温度下的参数分析,可得出中波红外焦平面性能,见表 3。

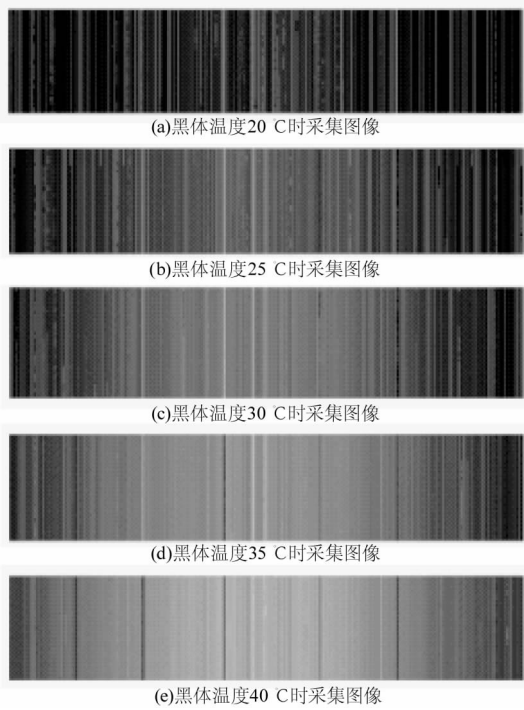


图 5 积分时间 100 ms 时温度变化图像数据

Fig. 5 100 msintegration time temperature change image data

在去除盲元之后,由 2.3 节中的公式可得,中波红外焦平面的平均像元 NETD 可以达到 1.58 mK,小于 5 mK,测试结果符合延长积分时间可使中波器件提高信噪比,降低 NETD 的理论分析。

从上述实验测得的读出电路的低噪声可看出,

中波探测组件已经十分成熟。

表 3 中波红外焦平面性能
Tab.3 Medium wave infrared focal
plane performance

黑体温度码值	噪声值	平均码值	盲元数	功耗
20 ℃	0.55 LSB	9078	5	25 mW
25 ℃	0.77 LSB	10474	5	25 mW
30 ℃	0.85 LSB	12091	3	26 mW
35 ℃	1.20 LSB	13948	3	26 mW
40 ℃	1.91 LSB	16094	3	26 mW

3.3 长波红外焦平面噪声分析

验证读出电路和测试系统的可用性后,对长波探测组件进行测试,读出电路提供的具体测试偏压是 V_{DD} 为 1.8 V, V_{REFP} 为 1.8 V, V_{REFN} 为 1.45 V, V_B 为 1.45 V, V_{COMP} 为 1.0 V。

在积分时间 3 ms、主频为 1 MHz、注入区^[7]是 14 μm 的条件下对长波红外焦平面组件采集图像数据如图 6 所示。

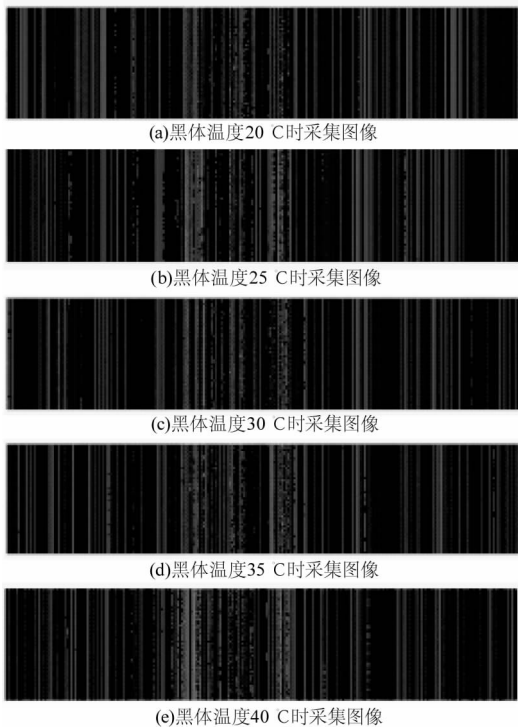


图 6 3 ms 积分时间图像(注入区 14 μm)
Fig.6 3m sintegration time image
(injection region 14 μm)

从图中可看出,相对中波器件而言噪声较大;然后延长积分时间,在 10 ms 和 30 ms 黑体温度 20 度时采集图像时对控温黑体进行 100 帧的采样,选取黑体 20 ℃ 和 35 ℃ 时的采样图像如图 7 所示。

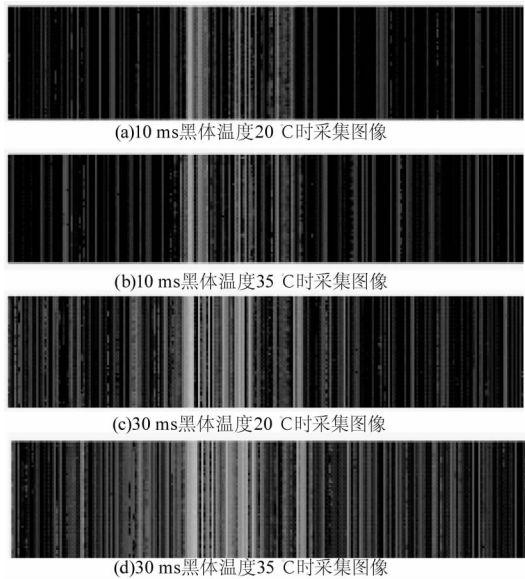


图 7 10 ms 和 30 ms 积分时间图像(注入区 14 μm)
Fig.7 10 ms and 30 ms integration time image
(injection region 14 μm)

针对上述多幅图像,用 MATLAB 进行数据处理,将噪声大于 2 倍平均噪声和 NETD 大于 2 倍像元平均 NETD 的视为盲元,得到结果见表 4。

表 4 不同积分时间的盲元测试结果

Tab.4 Blind pixel test result of different integration time

积分时间码值	盲元数	平均 NETD	部分 NETD	功耗
3 ms	116	25	5	25 mW
10 ms	100	19	4	25 mW
30 ms	88	18	2	25 mW

注:部分 NETD 为去除盲元之后的平均 NETD。

通过上述分析可得,长波器件的盲元率较高,且长波材料的暗电流较大,增大积分时间不能明显的减少 NETD,而且因为长波器件暗电流较大,结阻抗较低,无法大幅度增加积分时间。

为了提升信号质量,本文的方案是在保持像元不变的情况下,增加注入区,采集到的红外测试图像如图 8 所示。

用 MATLAB 对上述多幅图像进行数据处理,得到平均 NETD 为 200 mK,盲元数为 150 个。选择去除盲元后的部分中较好的元为 3 mK(数量只有 21 个),分别在 3 ms、10 ms 和 30 ms 积分时间进行测试,测试结果见表 5。

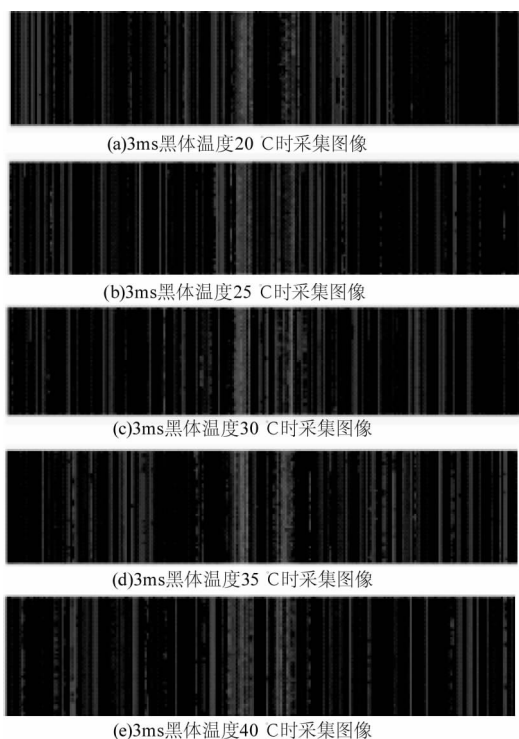
从表 5 可得,注入区加大到 20 μm 带来了更多的噪声,加上 TDI 的结构特点,盲元数急剧增加,这是由于直接注入输入级电路不适合长波焦平面阵列,而且跟工艺也有关。

表5 不同积分时间的 NETD 测试结果

Tab.5 NETD test result of different integration time

积分时间码值	盲元数	平均 NETD	部分 NETD	功耗
3 ms	150	200	3(21 个)	25 mW
10 ms	268	199	5(26 个)	25 mW
30 ms	269	293	12(22 个)	25 mW

从上面的分析过程可得,因为长波器件的工艺还不是十分稳定,TDI 结构虽然带来信噪比的提升,但是多个像元求平均的算法会使盲元率增加;从另一方面来说,仍然有部分像元 NETD < 5 mK,说明随着工艺和材料的提升,数字化读出电路的设计也是适合长波器件的。

图8 积分时间3 ms 下长波器件图像(注入区 20 μm)Fig.8 3 ms integration time long wave infrared device image(injection region 14 μm)

4 结 论

本文提出的数字化红外焦平面测试系统在数字化噪声测试方法和测试系统的研制方面尚属一项比较前沿的研究,数字化测试系统的搭建对红外焦平面读出电路数字化芯片的评估能起到很好的作用;得出的噪声分析和性能测试结果对数字化红外探测器的评价和数字化读出电路设计分析也能起到了一定的积极作用。

参考文献:

- [1] YANG Dezhen, YU Songlin. Design of on chip LDO for infrared focal plane ROIC[J]. Laser & Infrared, 2016, 46(7): 847 – 851. (in Chinese)
杨德振, 喻松林. 应用于红外焦平面读出电路的片上 LDO 设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(7): 847 – 851.
- [2] CHEN Honglei. Research on on-chip ADC for cooled infrared focal plane read-out circuit[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)
陈宏雷. 制冷型红外焦平面阵列读出电路片上 ADC 研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [3] Standardization Administration of the People's Republic of China. Measuring methods for parameters of infrared focal plane arrays [M]. Beijing: Standards Press of China, 2013. (in Chinese)
中国国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [4] CHENG Peiqing. Digital signal processing tutorial [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001. (in Chinese)
程佩青. 数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [5] Snoeijs M F, Theuvsen A J P, Huijsing J H. A 1.8 V 3.2 μW comparator for use in a CMOS imager column – level single – slope ADC [C]// Circuits and Systems, 2005. ISCAS 2005. IEEE International Symposium on. IEEE, 2005, 6: 6162 – 6165.
- [6] DONG Liangchu, DING Ruijun, HE Zhenkai, etc. The studies for parameter definition and test methods of IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering, 1997, (3): 14 – 18. (in Chinese)
董亮初, 丁瑞军, 何震凯, 等. 红外焦平面参数定义和测试方法的讨论[J]. 红外与激光工程, 1997, (3): 14 – 18.
- [7] HE Zhengrong. Noise analysis and design of operational amplifier circuit [J]. Micro-electronics, 2006, 36(2): 148 – 153. (in Chinese)
何峥嵘. 运算放大器电路的噪声分析和设计[J]. 微电子学, 2006, 36(2): 148 – 153.