

〈综述与评论〉

数字化红外焦平面技术

姚立斌, 陈楠, 张济清, 纪忠顺, 钟昇佑, 李正芬, 韩庆林
(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 数字化红外焦平面技术是从探测器起所有信号处理都在数字域完成的红外热成像技术, 是目前国际上最先进的新一代红外焦平面技术。通过将模拟-数字转换器(ADC)集成到读出电路中实现数字读出, 配合数字传输和数字图像处理形成数字化红外焦平面技术。通过中波 640×512 数字化红外焦平面探测器读出电路、成像组件以及数字化红外焦平面热像仪的设计和测试, 表明数字化红外焦平面技术具有接口简单、高抗干扰、高通道隔离度、低读出噪声、高传输带宽、高线性度、高稳定性等特点, 是红外热成像系统的技术发展趋势。

关键词: 数字化读出电路; 数字化焦平面; 探测器组件; 数字成像组件

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2016)05-0357-10

Digital IRFPA Technology

YAO Libin, CHEN Nan, ZHANG Jiqing, JI Zhongshun, ZHONG Shengyou, LI Zhengfen, HAN Qinglin
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Digital IRFPA technology is a thermal IR imaging technology which signal from detector is processed in digital domain, and it is the most advanced IRFPA technology. It integrates analog-to-digital converter (ADC) on readout integrated circuit (ROIC) to realize digital signal read out, while the digital signal transmission and digital image processing are also utilized to form the Digital IRFPA technology. The digital IRFPA ROIC, digital imaging module and digital IRFPA thermal imager of MWIR 640×512 are designed and tested, and the measurement results indicate the Digital IRFPA technology has some positive features, such as simple interface, good resistance to interference, high channel isolation, low readout noise, wide transmission bandwidth, high linearity, high stability and so on. The Digital IRFPA technology is the developing trend of thermal IR imaging system.

Key words: digital ROIC, digital IRFPA, detector module, digital imaging system

0 引言

红外热像仪是一种用来探测目标物体的红外辐射, 并通过光电转换、电信号处理等手段, 将目标物体的温度分布转换成视频图像的装置。红外热像仪是由红外光学系统、红外探测器组件与图像处理组件组成, 用于获取目标场景的红外热图像, 实现对目标红外特征的精确探测。目前凝视焦平面阵型探测器已经取代扫描型探测器成为红外成像应用的主流。

目前应用的红外热像仪是采用混合信号结构,

即红外焦平面探测器的光电信号读出是在模拟域完成, 模拟信号传输到成像处理电路后再进行数字化及数字图像处理。模拟读出技术固有的缺陷制约了红外焦平面热像仪性能的提高。如微弱的模拟信号多路切换及传输带来串音、干扰及噪声的问题。同时, 模拟信号传输的有限带宽限制了红外焦平面热像仪帧频及空间分辨率的提高。

数字化红外焦平面技术即从探测器起所有信号处理都在数字域完成的红外热成像技术, 其核心是数字化红外焦平面探测器技术。数字化红外焦平面技术采用数字读出、数字传输及数字图像处理技

术,是下一代红外焦平面热像仪的通用基础技术。数字化红外焦平面技术能够提升红外焦平面热像仪的系统集成度及抗电磁干扰性能,同时能提升红外热成像系统的多项技术指标。随着西方各国数字化红外焦平面技术的发展,国外已推出数字化红外焦平面热像仪实用化产品,显著提高了热像仪的整体性能。

红外热成像系统要实现全数字化处理,必须采用数字化读出电路。数字化红外焦平面技术的关键组部件为:数字化读出电路、数字化焦平面探测器及数字化成像处理电路3部分。本文介绍了目前数字化红外焦平面技术的发展现状,数字化红外焦平面技术的总体结构设计以及中波 640×512 数字化红外焦平面探测器读出电路及探测器组件的设计。

1 数字化红外焦平面技术及发展现状

1.1 数字化红外焦平面技术

传统的模拟红外热成像系统框图如图1所示,从红外探测器到成像电路之间的信号传输为模拟信号传输,经预处理后由模拟-数字转换器(ADC)转换成为数字信号,再进行数字图像处理供显示。红外探测器输出的微弱模拟信号传输存在精度、带宽、噪声、幅度匹配及阻抗匹配等问题,且易受到外界的干扰^[1]。

数字化红外热成像系统框图如图2所示。首先在成像电路上省去了复杂的模拟信号预处理电路及ADC,减小了电路板尺寸及功耗,易于系统的集成化设计。更重要的是从红外探测器到成像电路之间的信号传输为数字信号传输,不容易受到外界的干扰,同时不存在传输精度及噪声干扰的问题^[2]。

1.2 数字化红外焦平面技术发展现状

由于国外的红外焦平面探测器技术在90年代就成熟,在2000年前后国外针对红外焦平面探测

器的数字化工作就已经启动^[3]。在数字化焦平面探测器组件方面推出代表性产品的公司有以色列SCD公司、美国洛克希德·马丁公司等。

以色列SCD公司于2011年推出数字化焦平面探测器组件的代表产品Pelican-D^[4],为 640×512 面阵 $15\mu\text{m}$ 间距的锑化铟探测器,与数字成像电路集成,构成数字红外成像组件。除Pelican-D外,SCD公司还于2013年推出了 1280×1024 面阵的数字成像组件Heculers^[5];于2013年推出 1920×1536 面阵的高清数字成像组件BlackBird^[6],形成了数字红外成像组件的系列产品,成为世界领先的数字红外成像组件供应商。SCD公司的数字成像组件产品外形如图3所示。

美国洛克希德·马丁公司也推出数字化焦平面探测器组件系列产品^[7],产品涵盖 320×256 到 1280×1024 面阵,形成了系列产品。

法国的SOFRADIR公司也有数字化焦平面探测器组件研发计划,但目前只有一款数字化中波 1280×720 的焦平面探测器组件产品推出^[8]。

国内于“十二五”初期开始红外焦平面数字化研究工作,各高校及研究所均有少量研究论文发表,但均属于部分技术的理论探讨和部件试制,未见数字化焦平面探测器组件的研究成果报道^[9]。

2 数字化读出电路技术

读出电路是红外焦平面探测器中关键部件。读出电路担负着将红外焦平面探测器的微弱输出信号读出、积分并按顺序输出到成像电路的任务。

2.1 系统需求

由于读出电路处于信号处理链的最前端,因而其性能决定了整机性能。读出电路的性能对提高探测器整体性能起到至关重要的作用。

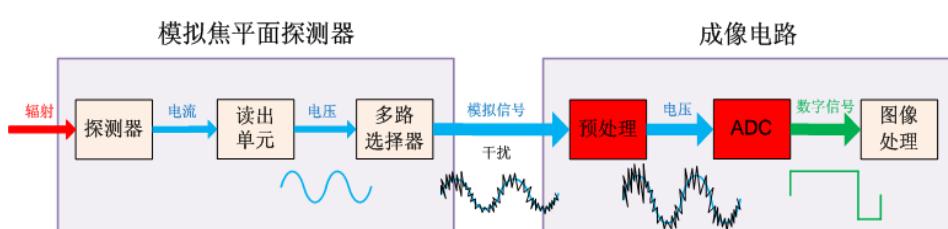


图1 模拟红外热成像系统框图 Fig.1 Block diagram of analog thermal IR imaging system

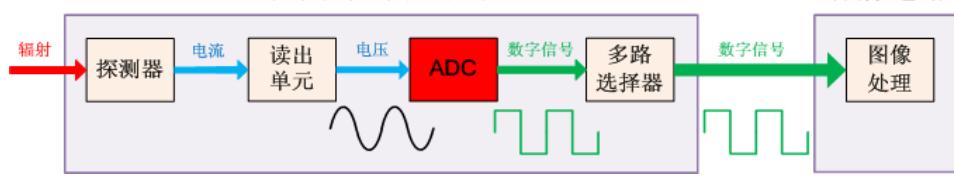


图2 数字化红外热成像系统框图 Fig.2 Block diagram of digital thermal IR imaging system

与可见光成像系统相比较,红外成像系统的主要特点有两个:大动态范围的输入及较高的探测器非均匀性。与之相关的红外焦平面探测器读出电路必须能够处理探测器信号的较高的动态范围及非均匀性问题,这对读出电路的性能提出了较高的要求。高性能红外焦平面探测器对读出电路的要求有:高注入效率、高偏置稳定性、高动态范围、高电荷存储能力、低噪声及低功耗。

2.2 片上模拟-数字转换

传统的模拟读出电路在模拟域处理光电信号,探测器输出的光电信号经读出单元电路读出并积分,经多路转换实现扫描,并输出模拟信号到成像电路。一直以来,在读出电路片内将光电信号数字化是探测器读出电路的发展方向。随着CMOS技术的发展,在读出电路片内、乃至像元内集成模拟-数字转换器(ADC)成为可能。与模拟读出电路相比,数字化读出电路将ADC集成到读出电路片内,不可避免地带来功耗的上升,对制冷型探测器来说提高了对制冷功率的要求,因而对ADC功耗的要求成为首要考虑。其次,要在读出电路片内集成ADC,由于像元尺寸等因素的限制,对ADC芯片面积也提出要求;由于红外信号的高动态特性,

对ADC的动态范围提出要求;ADC的速度要求由读出电路面阵规模及帧频决定。

2.3 数字化读出电路架构

数字化读出电路由3个主要部分构成:读出单元电路、ADC及数字传输电路。从系统架构来看,实现数字化读出电路主要有以下3种技术路径:片级ADC方式、列级ADC方式及像素级ADC方式,如图4所示。

片级ADC方式是数字化读出电路最基本的一种方式,将原来片外的实现模拟-数字转换的单个ADC集成到模拟读出电路芯片中。读出单元电路读出每个像素的光电信号并积分,经行及列多路转换后提供给ADC,实现模拟-数字转换,最终得到的数字信号输出到片外供图像处理电路。片级ADC数字读出电路的技术路径最简单,与传统的模拟读出电路相比只增加了ADC,将信号转换为数字信号后输出,其余电路都相同。采用片级ADC设计的优势是ADC芯片面积不受限制,且只需要一个ADC,但ADC的转换速度要求较高。每一列像元输出的信号在模拟域进行多路选通,仍然容易受到干扰。



图3 以色列 SCD 公司 640×512 (左)、1280×1024 (中) 及 1920×1536 (右) 数字成像组件外形照片
Fig.3 Digital imaging module of SCD: 640×512 (left), 1280×1024 (middle) and 1920×1536 (right)

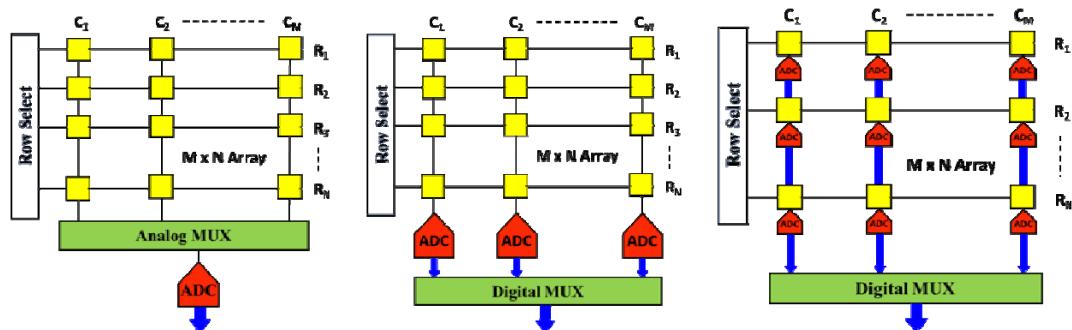


图4 片级 ADC 方式 (左)、列级 ADC 方式 (中) 及像素级 ADC 方式 (右) 数字化读出电路架构
Fig.4 Digital ROIC architectures of chip-level (left), column-level (middle) and pixel-level (right)

列级 ADC 方式是在读出电路中每一列采用一个 ADC 来进行模拟-数字转换, 列级的信号多路转换在数字域进行, 能提高输出信号的信噪比。采用列级 ADC 设计的优势是 ADC 芯片面积一维方向受到像元点距的限制, 而另一个方向理论上不受限制; 由于每个 ADC 仅对一列像元输出进行转换, 因此对 ADC 的转换速度要求不高。

像素级 ADC 方式的优点有: 信号的多路转换全部在数字域进行, 能有效降低信号多路转换中的衰减及干扰。同时可以在像素级进行数字信号处理, 如数字积分等, 能大大提高焦平面探测器及红外系统的性能指标。但每一个像元需要一个 ADC, 且 ADC 芯片面积必须小于像素面积, 对 ADC 的设计带来巨大的挑战。

对读出电路数字化的技术方案选择, 主要根据功耗、速度、面积和设计难度进行折中。从上述分析可见, 采用列级 ADC 的方案, 读出电路可以获得比片级 ADC 更好的性能, 同时仅需要中低速度的 ADC 和微功耗设计, 设计复杂度和难度低于像素级 ADC, 对于中波 640×512 像素的红外焦平面探测器读出电路, 是较为合理的选择, 因此采用列级 ADC 方案实现。

2.4 640×512 数字化读出电路设计

中波 640×512 红外焦平面探测器读出电路采用列级 ADC 方案实现, 整个读出电路系统框图见

图 5 所示。读出电路芯片由以下几个功能电路组成: 低噪声读出单元电路、行驱动电路、ADC、高速数字信号传输电路。其中低噪声读出单元电路完成探测器信号的读出和积分, 由 640 列 \times 512 行像素单元组成; 行驱动电路完成 512 行探测器的积分及读出控制, 主要包括复位控制和读出选通控制; ADC 将探测器和像元输出的模拟信号转换为数字信号, 每一列像元对应一个 ADC, 共 640 个 ADC 组成阵列; 高速数字信号传输电路完成数字信号的存储、多路选通和输出, 最终以 14 位串行数字信号送至外部的成像处理电路。电路设计将 ADC 置于阵列上下两边, ADC 的版图宽度为像元间距的两倍, 同时输出数字信号分两路输出。整个读出电路采用全局快门控制, 避免了卷帘快门对高速目标成像的变形问题, 同时减小了时域行噪声。读出控制采用边积分边读出的工作模式, 保证最大限度的利用系统帧时间来进行光电流积分, 提高系统的信噪比。

读出单元电路的作用是将焦平面探测器的光电流读出和积分, 得到电压信号。该部分电路是整个读出电路的最前端, 其性能对整个数字化热像仪起到决定性的影响。因此专门设计了低噪声像元电路以满足系统性能需求。读出单元电路采用直接注入结构, 电荷存储容量根据版图面积进行优化设计。积分时间控制及行选电路如图 6 所示, 积分时间可

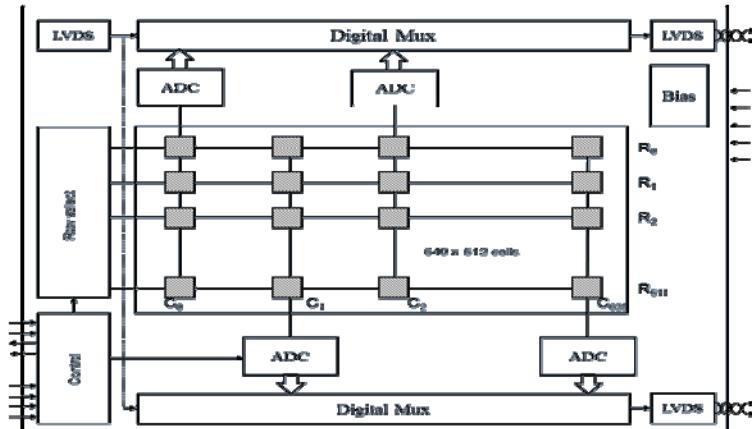


图 5 中波 640×512 数字化读出电路原理框图

Fig.5 Block diagram of MWIR 640×512 digital ROIC

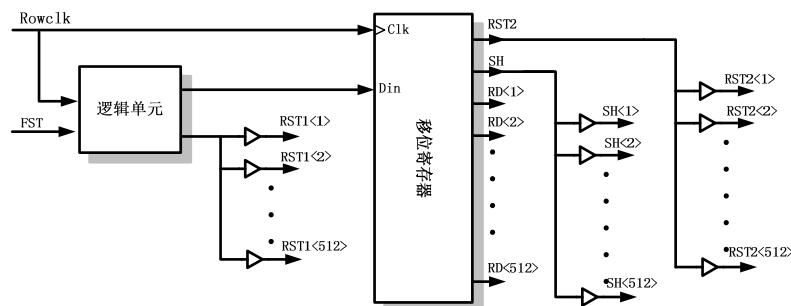


图 6 积分时间控制及行选电路

Fig.6 Block diagram of Integration time controller and row selector

以通过串口在线配置, 方便整机应用。

ADC 影响着读出电路的成像质量、帧频和功耗等指标, 是数字化读出电路的关键模块。针对红外焦平面探测器的应用, 要求 ADC 满足 14 位以上的精度; 同时由于每一列像元都有一个 ADC, 因此每个 ADC 必须采用低功耗设计; 此外, 其宽度也受到像元尺寸的严格限制, 要以小面积实现 ADC 的所有电路^[10]。

列级 ADC 的结构主要包括单斜率、循环和逐次比较型 ADC。单斜率 ADC 结构简单, 易于设计和实现, 但转换速度慢, n 位精度需要 2^n 个时钟周期。逐次比较型 ADC 可以提高速度, 并以低功耗实现, 但其精度受电容、电阻阵列匹配程度的限制, 因此难以实现高精度。循环 ADC 的面积比逐次比较型小, 然而它需要非常精准的运算放大器, 因而需要额外的功耗。Sigma-Delta ADC 是实现高精度的较佳选择, 但存在速度慢、数字滤波器面积大等缺点^[11]。

对于红外焦平面探测器读出电路应用, ADC 的输入离散时间采样信号, 为稳定的直流电压, 可以采用一种特殊的增量型 Sigma-Delta ADC, 其数字滤波器电路可以大大简化, 减小了占用的面积, 可用于高质量成像的读出电路。增量型 Sigma-Delta ADC 主要由 Sigma-Delta 调制器和数字滤波器组成, 如图 7 所示^[12]。其中调制器将输入电压信号调制为随机脉冲, 通过其个数的平均值表征电压幅度, 滤波器对脉冲信号进行低通滤波, 得到最终的数字输出。

Sigma-Delta ADC 通过过采样和噪声整形, 将量化噪声推到高频带, 减小了信号带宽内的噪声, 提高信噪比。不同于其他类型的 ADC, 该结构还可以减少模拟电路中失配、失调等误差造成的影响, 无需外加校正等手段即可实现较高的转换精度。相对常规的 Sigma-Delta ADC, 增量型的调制器和数字滤波器在每次转换前进行复位, 因此不是

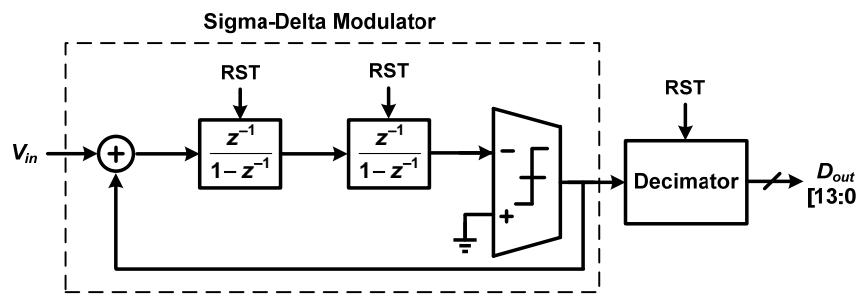


图 7 Sigma-Delta ADC 框图 Fig.7 Block diagram of Sigma-Delta ADC

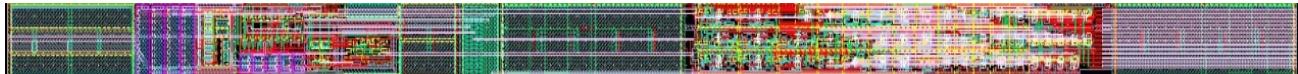


图 8 Sigma-Delta ADC 版图 Fig.8 Layout of Sigma-Delta ADC

连续的操作; 其数字抽取滤波器可以用简单的数字积分器级联实现, 免除了复杂的数字电路, 令 ADC 的面积和功耗得以大大减小。Sigma-Delta ADC 的版图见图 8 所示, 其版图宽度为像元间距的两倍, 长度控制在 600 μm 以内。在采样频率为 30 kHz 下, 整个 ADC 的功耗小于 100 μW ^[13]。

整个读出电路包括了 640 个 ADC, 每个 ADC 输出 14 位数字信号, 要在规定的帧周期内将 640×512 个像元对应的 14 位数字信号输出, 需要高速数字多路转换电路, 将列级 ADC 输出的大量并行数据转为串行数据。并-串转换及数据传输电路由数据缓存单元和数据选通逻辑单元组成。首先通过写入控制信号将 ADC 输出的并行数据同时写入缓存单元; 然后选通逻辑单元产生选通信号, 从左到右逐个选通缓存单元, 将其连接到输出总线上对外输出, 实现并行到串行的转换。该电路方案由于每次仅有 1 个寄存器同时工作, 电路的功耗大大减小。并-串转换及数据传输电路见图 9 所示^[14]。数据输出采用低压差分 (LVDS) 电路, 有效地降低了电路的功耗。该数据传输电路的传输数据率可达到 400 Mbps 以上。

中波 640×512 数字化读出电路在 0.35 μm CMOS 工艺上实现并流片。整个电路版图尺寸为 18 mm \times 16.8 mm, 如图 10 所示。图 11 为流片加工后的芯片照片。

3 数字化焦平面探测器组件

将中波 640×512 数字读出电路芯片与焦平面探测器芯片进行互连, 封装后最终完成 640×512 数字化中波焦平面探测器组件制备, 如图 12 所示。对 640×512 中波数字化焦平面探测器的测试主要参考 GB/T 17444-2013《红外焦平面阵列参数测试方法》^[15] 进行。通过测试电路板提供数字化焦平面探测器的偏压及驱动信号, 并采集数字化焦平面

探测器的输出信号, 通过 CameraLink 接口传输到计算机, 经计算得到数字化焦平面探测器的各参数。

图 13 为 640×512 中波数字化焦平面探测器对均匀黑体的原始信号成像图, 由图中可以看出探测器的盲元、非均匀性及固定图案噪声。图 14 为 640×512 中波数字化焦平面探测器输出列平均噪声的分布图, 从图中可以看出 640×512 中波数字化焦平面探测器的平均噪声大约是 1.9 LSB, 约为

0.28 mVrms, 小于普通的模拟探测器的噪声。图 15 为 640×512 中波数字化焦平面探测器的噪声等效温差 (NETD) 实测值分布, 在 19 ms 积分时间下, 640×512 中波数字化焦平面探测器的平均 NETD 为 8.4 mK, 优于一般的模拟探测器, 且数字化焦平面探测器的 NETD 散布较小。在积分电容半满井条件即 9 ms 积分时间下, 640×512 中波数字化焦平面探测器的平均 NETD 为 13 mK。

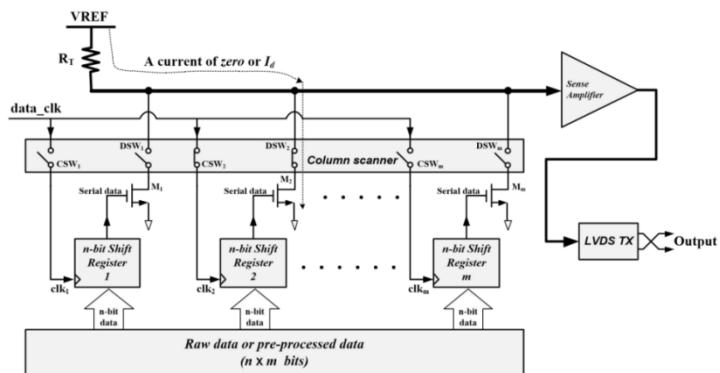


图 9 并-串转换及数据传输电路

Fig.9 Block diagram of parallel-to-serial converter and digital transmission circuit

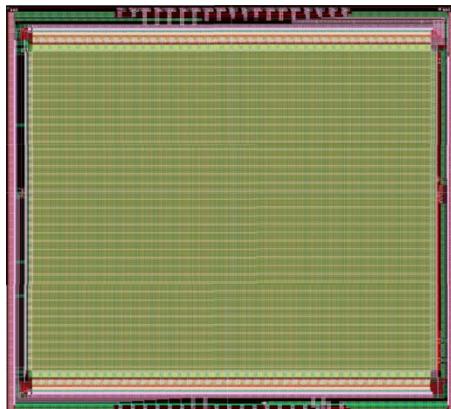


图 10 中波 640×512 数字化读出电路版图

Fig.10 Layout of MWIR 640×512 digital ROIC

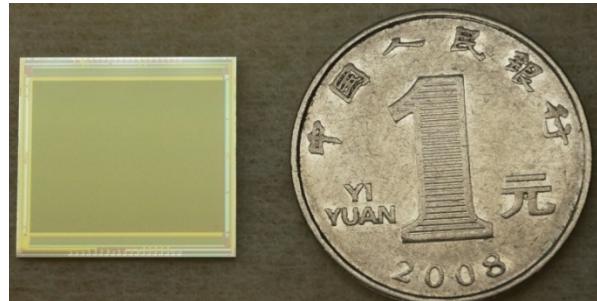


图 11 中波 640×512 数字化读出电路芯片照片

Fig.11 Picture of MWIR 640×512 digital ROIC chip

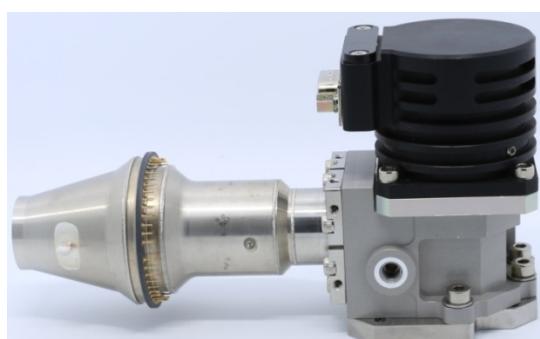


图 12 640×512 中波数字化焦平面探测器组件照片
Fig.12 Picture of MWIR 640×512 digital IRFPA module

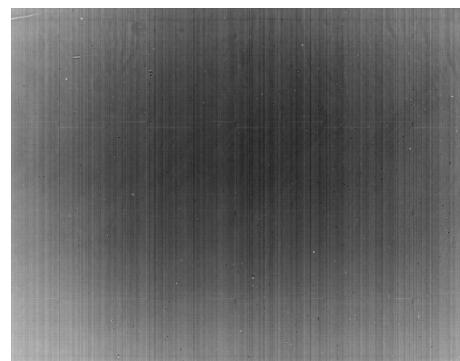


图 13 640×512 中波数字化焦平面探测器输出原始信号成像
Fig.13 Original image of MWIR 640×512 digital IRFPA

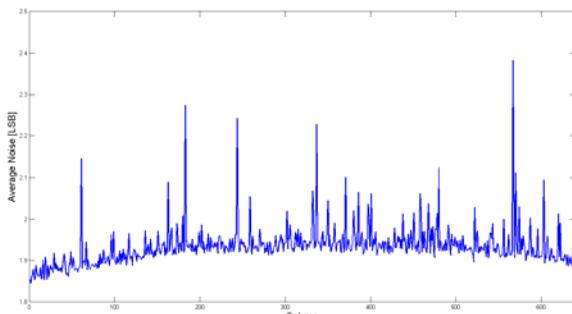


图 14 640×512 中波数字化焦平面探测器输出列噪声分布图

Fig.14 Distribution of column noise from MWIR 640×512 digital ROIC

表 1 列出了 640×512 中波数字化焦平面探测器的各项实测指标。除开光谱响应等指标主要由探测器决定外, 在与读出电路相关的指标上, 数字化焦平面探测器的各项指标均不低于模拟探测器。通过低功耗设计, 数字化焦平面探测器的功耗也和模拟探测器相当。

表 1 640×512 中波数字化焦平面探测器测试结果

Table 1 Measurement of MWIR 640×512 digital IRFPA

参数	测试结果
探测器规格	640×512
探测器材料	HgCdTe
像元中心间	25 μm
ADC 分辨率	14 bit
光谱响应范	3.68~4.82 μm
NETD	8.4 mK (19 ms)
最高帧频	120 Hz
动态范围	79.2 dB
芯片总功耗	91 mW
工作温度	80 K

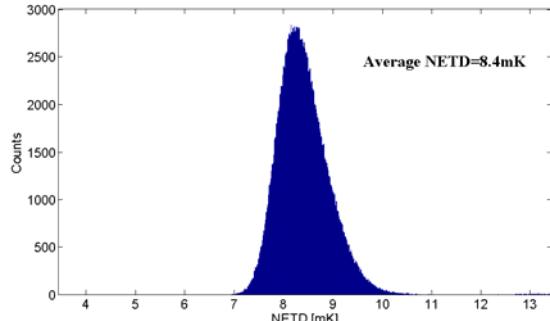


图 15 640×512 中波数字化焦平面探测器 NETD

Fig.15 NETD of MWIR 640×512 digital IRFPA

表 2 总结了目前各公司 640×512 中波数字化焦平面探测器组件的性能指标^[16], 从指标上看, 本文介绍的 640×512 中波数字化焦平面探测器组件和各大公司的产品处在同一技术水平。

4 数字成像组件

将成像处理电路与数字化焦平面探测器集成, 可以构成数字成像组件。基于模拟读出电路的传统成像组件和数字成像组件框图分别示于图 16 和图 17。数字化焦平面探测器集成 ADC 到读出电路中, 直接输出数字信号, 省却了成像处理电路中复杂的模拟信号调理电路及 ADC, 使成像处理电路的尺寸大幅度缩小, 有利于系统的集成。如图 16 所示, 传统成像组件在杜瓦外采用专门的电路对模拟信号进行采样、放大和模数转换, 工作温度由外界环境和整机决定。大范围的温度变化, 对模拟电路和 ADC 的工作点、器件特性等都有显著影响, 会造成电路性能在不同整机环境温度下的变化, 影响系统性能。而数字成像组件, 如图 17 所示, 所有模拟电路和 ADC 都集成在读出电路芯片内, 其处于杜瓦内部工作, 工作温度由制冷机决定, 可以恒定在液氮温度

表 2 各公司 640×512 数字焦平面探测器性能对比

Table 2 Comparison of performance with different MWIR 640×512 digital IRFPAs

技术指标	以色列 SCD	美国洛克希德·马丁	法国 Sofradir	本产品
	Pelican D	SBF191	Daphnis	
探测器材料	锑化铟	锑化铟	碲镉汞	碲镉汞
面阵规模	640×512	640×512	1024×768	640×512
像元间距	15 μm	20 μm	10 μm	25 μm (及 15 μm)
响应波长	2.0~4.0 μm	2.0~4.0 μm	3.7~4.8 μm	3.7~4.8 μm
读出模式	边积分边读出	边积分边读出	边积分边读出	边积分边读出
NETD	20 mK	13 mK	25 mK	13 mK
ADC 精度	13~15 bit	13~14 bit	14 bit	14 bit
最高帧频	240 Hz	120 Hz	120 Hz	120 Hz
功耗	45 mW@60 Hz	80 mW@60 Hz	70 mW@60 Hz	91 mW@60 Hz

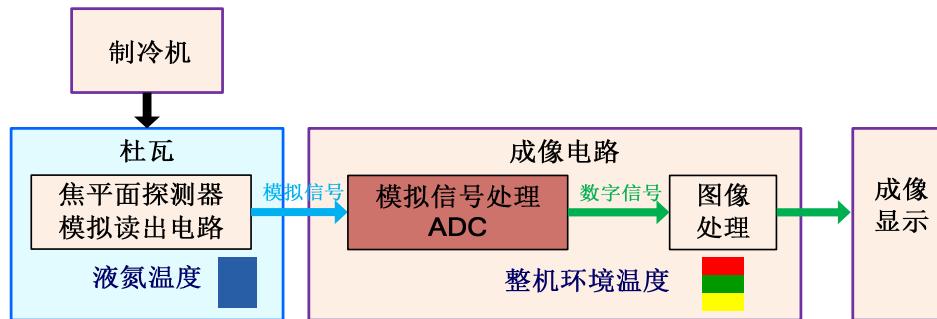


图 16 传统成像组件框图 Fig.16 Block diagram of conventional thermal IR imager

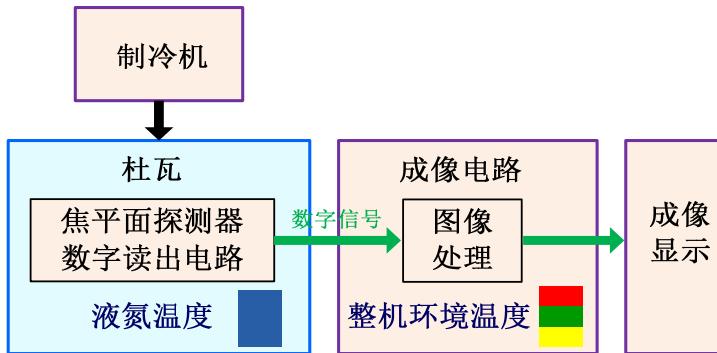


图 17 数字成像组件框图 Fig.17 Block diagram of digital thermal IR imager

附近，因而其性能不受外部环境和整机影响，保证了成像组件更好的环境适应性。此外数字成像组件具有高度集成及体积紧凑的特点，集成了热像仪中成像处理的所有功能，直接输出 CameraLink 数字视频信号，可以直接应用于各种红外热成像系统。

图 12 中的 640×512 中波数字化焦平面探测器组件与图 18 中的数字成像处理电路集成，构成数字成像组件，如图 19 所示。

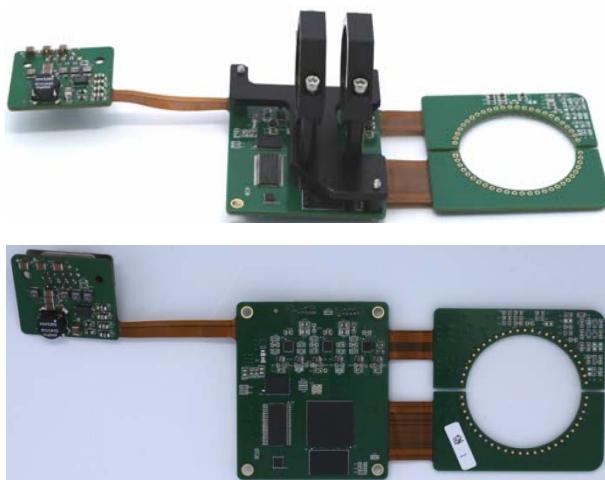


图 18 数字成像处理电路照片

Fig.18 Digital imaging process circuits

数字成像处理电路包括探测器接口板、主处理板及制冷机接口板。其中最大的主处理板的尺寸只有 $60 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，集成了 FPGA 为主的图像处理电路。图像处理电路包含盲元补偿、非均匀性校

正、图像灰度均衡及滤波、CameraLink 图像信号输出等红外热像仪的基本图像处理功能，直接输出红外数字视频信号。整个成像处理电路的总功耗小于 2 W。



图 19 640×512 中波数字成像组件照片

(左: 25 μm 像元间距; 右 15 μm 像元间距)

Fig.19 MWIR 640×512 digital imaging modules with 25- μm pixel (left) and 15- μm pixel (right)

数字红外成像组件将红外探测器、CMOS 数字化读出电路、微型杜瓦、制冷机与成像处理电路一体设计，具有高度集成、小体积、高性能及通用化的特点，配合光学系统即可成像。如图 20 所示，数字红外成像组件配合简单的光学系统及机械支撑结构即可组成一台红外热像仪，可以用来验证

数字红外成像组件的各项性能。其中光学镜头焦距为 45 mm, 视场为 $20^\circ \times 16^\circ$ 。

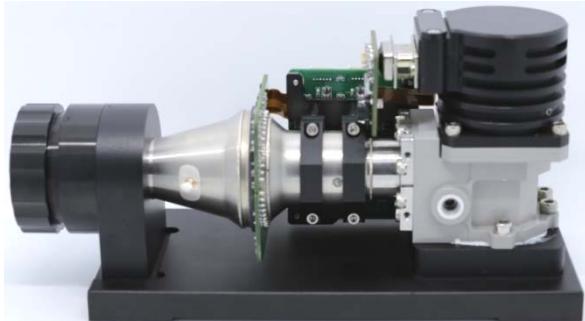


图 20 640×512 中波数字成像演示装置照片

Fig.20 Demo of MWIR 640×512 digital imaging system

数字红外成像组件演示装置的成像照片如图 21 所示。由于数字红外焦平面探测器的优异信噪比, 成像清晰、干净, 无杂波干扰。



图 21 640×512 中波数字成像组件成像图片

Fig.21 Image from MWIR 640×512 digital imaging module

5 数字化焦平面热像仪

由于数字红外成像组件已经集成了成像系统的所有信号处理功能, 数字化焦平面热像仪的设计大大简化, 只需考虑光学系统的设计及伺服系统的设计即可。如图 22 所示, 数字化焦平面热像仪样机由光学镜头、壳体结构和成像组件构成。采用不同的光学系统即可适应不同指标的红外热像仪应用, 提高了组件的通用性及降低了后期的维护成本。

图 23 是 640×512 中波数字化焦平面热像仪样机远景的成像图片。

6 结论

通过 640×512 中波数字化焦平面探测器读出电路、成像组件及数字化热像仪的设计及测试表

明, 数字焦平面探测器有接口简单、高抗干扰、高通道隔离度、低读出噪声、高传输带宽、高线性度、高稳定性等特点, 是红外热成像系统的技术发展趋势。



图 22 640×512 中波数字化焦平面热像仪样机

Fig.22 Prototype of MWIR 640×512 digital thermal IR imager



图 23 640×512 中波数字化焦平面热像仪样机成像图片

Fig.23 Image from MWIR 640×512 digital thermal IR imager

与传统的模拟红外焦平面探测器相比较, 数字焦平面探测器有以下优点:

①高集成度、接口简单。数字焦平面探测器直接输出数字信号, 无需模拟-数字转换器 (ADC) 电路、相关模拟信号预处理电路及 ADC 驱动电路, 可以提高红外热成像系统集成度, 降低成像组件体积、功耗及成本, 提高系统可靠性。

②高抗干扰、高通道隔离度、低读出噪声。数字焦平面探测器的信号多路切换及传输是在数字域实现, 数字信号的切换及传输是无损失的且不易受到电磁干扰; 加之数字焦平面探测器采用多个列级低速 ADC 代替片级高速 ADC, ADC 的噪声等效带宽大大减小, 带内噪声减小。以上特点能有效提高红外热成像系统的信噪比及通道隔离度。

③高传输带宽。数字焦平面探测器通过高速串行数字接口电路输出信号, 传输带宽高, 能实现大面积探测器每秒 1000 帧以上的视频输出。

④数字焦平面探测器采用数字总线控制探测器参数,能够以微秒级精度精确控制探测器的积分时间,有利于光电系统应用。

⑤高线性度。数字信号传输及处理没有非线性问题,提高成像系统的线性度。

⑥稳定性。数字电路性能不受工艺参数、工作温度及环境参数影响,数字焦平面探测器能提高红外热成像系统性能的一致性及稳定性。

参考文献:

- [1] 刘传明, 姚立斌. 红外焦平面探测器数字读出电路研究[J]. 红外技术, 2012, **34**(3): 125-133.
LIU Chuanming, YAO Libin. Study on digital readout circuit for infrared FPA detectors[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(3): 125-133.
- [2] PAIN B, FOSSUM E. Approaches and analysis for on-focal-plane analog-to-digital conversion[C]//Proc. of SPIE, 1994, **2226**: doi:10.1117/12.178483.
- [3] NESHER Ofer, ELKIND Shimon, ADIN Amnon, et al. Digital cooled InSb detector for IR detection[C]// Proc. of SPIE, 2003, **5074**: doi:10.1117/12.498154.
- [4] OIKNINE Schlesinger J, CALAHORRA Z, URI E, et al. Pelican-SCD's 640×512, 15 μm pitch InSb detector[C]// Proc. of SPIE, 2007, **6542**: 654231.
- [5] NESHER O, PIVNIK I; ILAN E, et al. High resolution 1280×1024, 15 μm pitch compact InSb IR detector with on-chip ADC[C]// Proc. of SPIE, 2009, **7298**: 72983K.
- [6] ILAN Elad, SHILOAH Niv, DLKIND Shimon, et al. A 3 Mpixel ROIC with 10 μm pixel pitch and 120 Hz frame rate[C]// Proc. of SPIE, 2013, **8659**: 86590A.
- [7] KRASHEFSKI B, ELLIOTT J, HAHN L, et al. A versatile, producible, digital, FPA architecture [C]// Proc. of SPIE, 2006, **6206**: 62062W.
- [8] REIBEL Y, PERE-LAPERNE N, AUGÉY T, et al. Getting small, new 10 μm pixel pitch cooled infrared products[C]// Proc. of SPIE, 2014, **9070**: 907034.
- [9] 白丕绩, 姚立斌. 第三代红外焦平面探测器读出电路[J]. 红外技术, 2015, **37**(2): 89-96.
BAI Pi-ji, YAO Li-bin. Read out integrated circuit for third-generation infrared focal plane detector[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(2): 89-96.
- [10] 陈楠, 姚立斌. 阵列型图像传感器模数转换技术[J]. 红外技术, 2014, **36**(10): 769-776.
CHEN Nan, YAO Li-bin. Analog to digital conversion techniques in array image sensors[J]. *Infrared Technology*, 2014, **36**(10): 769-776.
- [11] ZHONG S, YAO L, ZHANG J. A small-area low-power ADC array for image sensor applications[C]//Proceeding of the IEEE the 10th International Conference on ASIC(ASICON), Shenzhen, 2013: doi: 10.1109/ASICON.2013.6812052.
- [12] CHEN N, LI Z, ZHONG S, et al. A 15-bit Incremental Sigma-Delta ADC for CMOS image sensor[C]//Proc. of SPIE, 2015, **9522**: 95222A.
- [13] 姚立斌, 陈楠, 韩庆林. 小面积、微功耗增量型Sigma-Delta ADC设计[J]. 红外技术, 2015, **37**(12): 1011-1015.
YAO Li-bin, CHEN Nan, HAN Qing-lin. Compact, micro-power incremental Sigma-Delta ADC design[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(12): 1011-1015.
- [14] ZHANG J, LI Z, ZHONG S, et al. A novel data transmission circuit for digital image sensors[C]//Proc. of SPIE, 2015, **9522**: 95221G.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17444-2013 红外焦平面阵列参数测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [16] BROWN M G, BAKER Justin, COLONERO Curtis, et al. Digital-pixel focal plane array development[C]//Proc. of SPIE, 2010, **7608**: 76082H.