

数字化中波红外焦平面探测器组件研究进展

白丕绩, 赵俊, 韩福忠, 李立华, 王博, 姚立斌, 李敏

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 介绍了美国、以色列、法国等西方发达国家在数字化中波红外焦平面探测器方面的研究现状及发展趋势。从数字读出电路(ROIC)角度出发, 阐述了上述三个发达国家开发的列级 ADC 数字化中波红外焦平面探测器的最新研究成果。在 SWaP 概念牵引下, 以色列、法国都推出了小像元(中心距为 $10\mu\text{m}$ 及以下)、高温工作、数字化输出的百万像素中波红外焦平面探测器组件。最后介绍了昆明物理研究所在数字化中波红外焦平面探测器组件研究方面取得的最新进展。昆明物理研究所突破列级 ADC 数字读出电路关键技术后, 研制出一系列中心距($15\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$)的 640×512 列级 ADC 数字化中波红外焦平面探测器组件, 主要技术指标与国外同类数字化中波红外焦平面探测器组件相当。

关键词: 列级 ADC 数字读出电路; 中波焦平面; 数字化制冷红外探测器组件

中图分类号: TN386.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0102003

Review of digital mid-wave infrared focal plane array detector assembly

Bai Piji, Zhao Jun, Han Fuzhong, Li Lihua, Wang Bo, Yao Libin, Li Min

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The state and trend of digital cooled infrared focal plane array detector assembly in USA, Israel and France were presented. According to the work mode of digital Read Out Integrated Circuit (ROIC), recent research results on digital cooled infrared focal plane array detector assembly in USA, Israel and France were introduced. By the concept of SWaP, some kinds of small pixel, HOT performance, digital output, million pixels mid-wave infrared focal plane array assembly were developed in Israel and France. At last the research result on digital cooled infrared focal plane array detector assembly in Kunming Institute of Physics was briefly introduced. The key technology of column-level ADC ROIC had been broken through, and the 640×512 ($15, 20, 25\mu\text{m}$ pitch) column-level ADC digital cooled infrared focal plane array detector assemblies were developed. The performance measures of the digital detector in Kunming institute of physics were comparative with the digital detectors abroad.

Key words: column-level ADC ROIC; mid-wave focal plane array; digital cooled infrared detector assembly

收稿日期: 2016-08-10; 修订日期: 2016-09-20

基金项目: 国防重点预研基金

作者简介: 白丕绩(1976-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事红外探测及信号读出方面的研究。Email: pijibai@163.com

通讯作者: 姚立斌(1968-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事混合信号集成电路设计方面的研究。Email: libin.yao@ieee.org

0 引言

随着红外技术的迅猛发展,对大规模、多色、高分辨率、低功耗的新一代高性能红外成像系统提出了更高要求:一方面应加大探测器阵列规模并缩小像素面积来提高空间分辨率;另一方面对读出电路提出低功耗、低噪声、数字化设计要求^[1-4]。美国、以色列、法国等西方发达国家的制冷型红外焦平面探测器组件正向大规格、多谱段、数字化方向发展,国外已推出 640×512、1 280×1 024、1 920×1 536 等规格的数字化中波红外焦平面探测器组件实用化产品^[5-8],显著提高了红外热像仪的整体性能;尤其是最近两年推出的数字化中波红外焦平面探测器组件,还体现了“SWaP”(Size, Weight and Power)概念^[9-11]。

数字化中波红外焦平面探测器组件的关键技术之一是数字读出电路。数字读出电路将模拟-数字转换器(ADC)集成在读出电路芯片上,可以提高热像系统集成度,降低热像系统的体积和功耗,提高热像系统的抗干扰能力。根据数字读出电路架构,以及模数转换器在信号读出链路中所处的位置,数字读出电路可以划分为芯片级(Chip-Level)、列级(Column-Level)ADC 数字读出电路和像素级(Pixel-Level)ADC 数字读出电路等三种类型^[12]。

芯片级 ADC 数字读出电路在模拟信号传输链路的末端进行模-数转换,不能显著提升探测器组件的抗干扰能力,对于当今中、大规模制冷型数字红外焦平面探测器,采用芯片级 ADC 读出电路的数字化红外焦平面探测器已经基本没有报道。列级 ADC 数字读出电路在模拟信号传输链路的中间端(列级)进行模-数转换,可以大幅提升探测器组件的抗干扰能力,明显降低探测器组件的噪声,受到青睐,目前批量生产的、通用型的都是列级 ADC 数字化中波红外制冷焦平面探测器组件产品。像素级 ADC 数字读出电路直接对探测器光电信号进行模-数转换,可以进行数字积分、数字 TDI 处理等功能,能大幅提高电荷处理能力及动态范围,适用于长波/甚长波等定制型红外探测系统,成为星载、反导等各种尖端武器平台的新宠^[19]。

1 数字化中波红外焦平面探测器组发展现状

美国、以色列在数字化中波红外焦平面探测器研

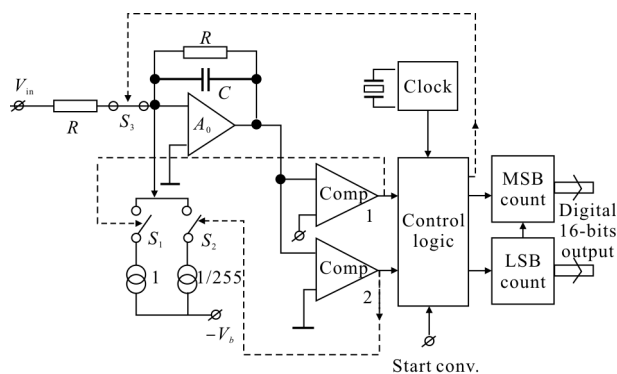
究方面起步较早,目前技术最为成熟,处于领先地位^[14-17]。其中以色列的 SCD 公司,美国的 Lockheed(洛克希德·马丁,现属 BAE)、雷声夜视系统(RVS)公司、洛克韦尔/波音(Rockwell/Boeing)、DRS 等著名公司都开展了数字化中波焦平面探测器组件的研制工作。法国 CEA-LETI 和苏法拉底(Sofradir)公司联合成立了一个部门—DEFIR,专门从事第三代碲镉汞红外焦平面探测器的研发工作,其研究的重要方向之一就是开展数字化读出电路设计及数字化探测器组件的研制工作。

从国外 SCD、BAE 及 Sofradir 公司报道的情况来看,SCD、BAE 两个公司都于 2001 年后开发了基于列级 ADC 数字读出电路的数字化中波红外焦平面探测器组件系列产品,并且实现货架销售;而 Sofradir 公司于 2006 年后开发了两种类型(15 μm、20 μm 中心距)的列级 ADC 数字读出电路,于 2014 年推出 1 024×768 数字化中波焦平面探测器组件的货架产品。

1.1 以色列 SCD 公司

从 2002 年到 2010 年,以色列 SCD 公司陆续开发出 Sebastian 系列(Seb640、Seb480 和 Seb320)D³C 的(Digital-Detector-Dewar-Cooler)中波探测器组件,其列级 ADC 精度达到 15 bit,像素间距为 20 μm×20 μm。Sebastian 系列数字中波探测器组件的主要技术指标如表 1 所示^[7]。

如图 1 所示,以色列 SCD 公司开发的列级 ADC 数字读出电路采用双列级、乒乓式读出拓扑结构,采用双积分(双斜率)型列级 ADC 技术方案。在 640×512 面阵规模和 100 Hz 帧率的情况下,实现了 15 bit 模数转换,而焦平面-数字读出电路芯片组的功耗小于 100 mW,单个 ADC 功耗低于 78 μW;如果帧频降至红外观瞄应用中常用的 60 Hz,则焦平面-数字读



(a) 双斜率型列级ADC的电路原理

(a) Circuitry diagram of the Dual-Ramp-Single-Slope ADC

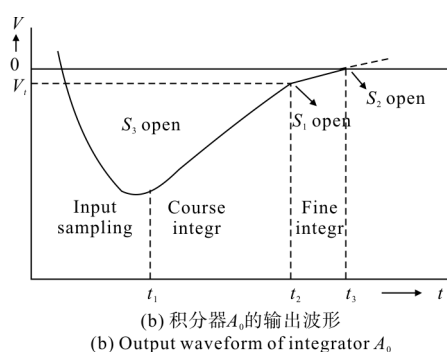


图 1 双斜率型列级 ADC 的电路原理及波形

Fig.1 Circuitry and waveform of Dual-Ramp-Single-Slope ADC





2011 年,以色列 SCD 公司采用 $0.18\ \mu\text{m}$ 先进 CMOS 工艺对列级 ADC 数字读出电路进行优化设计,基于该读出电路推出了更先进的 Pelican-D 数字中波探测器组件,其列级 ADC 转换位数达到 15bit,像素间距为 $15\ \mu\text{m}\times 15\ \mu\text{m}$,Pelican-D 数字探测器组件的技术指标如表 1 所示^[8]。

最近十年,欧美红外技术强国提出“SWaP”概念^[9-11],在保证探测器现有性能或更好性能的前提下,减小系统的尺寸(Size)、重量(Weight)、功耗、价格(Price)并提高其可靠性。SWaP 实现途径包括:(1)降低像元中心距;(2)提高工作温度;(3)数字化输出。

出电路芯片组功耗能够降低至 80 mW,单个 ADC 功耗也相应地降至低于 $62\ \mu\text{W}$ 。

表 1 以色列 SCD 研制的 Sebastian 和 Pelican-D 系列数字中波探测器组件

Tab.1 Series of Sebastian & Pelican-D digital mid-wave detector assembly in SCD of Israel

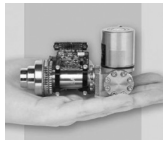



Model number	Seb320	Seb480	Seb640	Pelican-D
Material of detector	InSb	InSb	InSb	InSb
Array format	320×256	480×384	640×512	640×512
Pixel pitch/ μm	20	20	20	15
Fabrication	$0.5\ \mu\text{m}$ CMOS	$0.5\ \mu\text{m}$ CMOS	$0.5\ \mu\text{m}$ CMOS	$0.18\ \mu\text{m}$ CMOS
Mode of operation	ITR/IWR	ITR/IWR	ITR/IWR	ITR/IWR
Integration capacity	$7\text{Me}^-/\text{IWR}$ $10\text{Me}^-/\text{ITR}$	$7\text{Me}^-/\text{IWR}$ $10\text{Me}^-/\text{ITR}$	$7\text{Me}^-/\text{IWR}$ $10\text{Me}^-/\text{ITR}$	6Me^-
Power dissipation	$<80\ \text{mW}@250\ \text{Hz}$	$<100\ \text{mW}@200\ \text{Hz}$	$<100\ \text{mW}@120\ \text{Hz}$	$45\ \text{mW}@60\ \text{Hz}$
Conversion resolution/bits	12-15	12-15	12-15	13-15
Frame rate	250 Hz/15bits 300 Hz/13bits	160 Hz/15 bits 270 Hz/13 bits	120 Hz/15 bits 170 Hz/13 bits	300 Hz
Read out rate/MHz	≥ 40	≥ 40	≥ 40	≥ 160
Effective pixel	$\geq 99.5\%$	$\geq 99.5\%$	$\geq 99.5\%$	$\geq 99.5\%$
Residual non-uniformity	$<0.03\%$	$<0.03\%$	$<0.03\%$	$<0.04\%$
NETD/mK	<20	<20	<20	20
Photoshop of assembly				

为实现低成本“SWaP”,以色列 SCD 公司首先采用“HOT”技术途径开发出 Mini Pelican-D 等数字探测器组件。Mini Pelican-D 数字探测器组件采用 K562S 紧凑型制冷机,其探测器芯片组工作在 95 K 温度环境;随着技术进步,SCD 公司继续开发了 HOT Pelican-D 数字探测器组件,其探测器芯片组工作在 150 K 温度环境;2013 年,SCD 公司推出 $1\ 280\times 1\ 024$ 规格的

Hercules、HOT Hercules 数字中波探测器组件^[10];随着材料器件工艺逐渐进步,SCD 公司采用“Small”像素、“Digital”集成等两种技术途径相结合以实现低成本“SWaP”,于 2013 年推出了 $1\ 920\times 1\ 536$ 规格的 Blackbird 数字中波探测器组件产品^[11]。Mini Pelican-D、HOT Pelican-D、HOT Hercules、Blackbird 等数字中波探测器组件的技术指标情况如表 2 所示。

表 2 以色列 SCD 在 SWaP 概念下研制的系列数字中波探测器组件

Tab.2 Series of digital medium wave detector assembly under“SWaP”concept in SCD of Israel

Model number	Mini Pelican-D	HOT Pelican-D	HOT Hercules	Blackbird
Material	InSb (EPI)	InAsSb	InAsSb	InSb
Array format	640×512	640×512	1 280×1 024	1 920×1 536
Wavelength/μm	3.6- 4.9	3.6-4.2	3.6-4.2	-
Pixel Pitch/μm	15	15	15	10
Integration capacity/Me ⁻	6.5	0.9/3	1.5/5.8	-
Conversion resolution/bits	13-5	13-15	13-15	13-15
Frame rate/Hz	30/60	≤ 120	60	90
Effective pixel	-	>99.5%	>99.5%	-
Residual non-uniformity	<0.04%	<0.05%	<0.04%	-
Operating temperature/K	95	150	150	77
NETD/mK	<20	<23	<25	-
Cooler	K562S	K562S	K508N	-
Power of cooler	3.5 W @23°C	2 W/2.5 W @23°C	0.5 W @23°C	-
Cool down time	6 min @23°C	4 min @23°C	8 min @23°C	-
Weight of assembly/g	300	<300	<1 000	-
Photoshop of assembly				

目前,在低成本“SWaP”概念指引下,SCD 公司正在采用“HOT”工作、“Small”像素、“Digital”集成等三种技术途径相结合研制 HOT Blackbird 数字中波探测器组件,预计不久就会推出该型产品^[18]。

1.2 美国 BAE(洛克希德·马丁)公司

美国 BAE(原洛克希德·马丁)公司于 2006 年推出数字焦平面探测器组件——SBF 系列产品,既有中波凝视型数字焦平面探测器组件,也有长波扫描型数字焦平面探测器组件^[19]。详细技术指标如表 3 所示。

表 3 BAE(洛克希德·马丁)公司的 SBF 系列数字焦平面探测器组件

Tab.3 Series of SBF digital focal plane detector assembly in BAE (Lockheel Martin) of USA

Model number	Array format	Pixel pitch	Material of detector	Conversion resolution	Remarks
SBF-163	3×200×52	20 μm×20 μm	HgCdTe	14	Dual band/ Scanning
SBF-168	320×256	30 μm×30 μm	InSb	14	Staring
SBF-188	256×22	-	HgCdTe	16	Scanning
SBF-191	640×512	20 μm×20 μm	InSb	14	Staring
SBF-195	6 144×24	20 μm×20 μm	InSb	14	Scanning
SBF-196	1 024×1 024	25 μm×25 μm	InSb	14	Staring
SBF-199	640×512	24 μm×24 μm	InSb	14	Staring
SBF-200	320×256	30 μm×30 μm	InSb	14	Staring

如图 2 所示,美国 BAE 公司(原洛克希德·马丁公司)的列级 ADC 数字读出电路采用积分型 ADC 的设计思路,采用的是单斜率 ADC 的变种,这种 ADC 的特点是只存在一个格雷码计数器和一个积分式的斜坡信号发生器。各个列级 ADC 使用同一个斜坡信号发生器产生的斜坡信号分别与各自的待转换信号进行比较,并利用各自的格雷码计数器对比较器结果进行异步锁存,分别完成 ADC 转换。由于锁存数据的动作是异步的,用格雷码可以保证锁存的数据最多有一位的数据跳动误差。由于共用了计数器和斜坡信号发生器,有效地降低了列传输级的 ADC 阵列的总体功耗,对于单个 ADC 来说,主要由高精度/高灵敏度性比较器以及格雷码/二进制码转换器和数据锁存器组成,因此,单个 ADC 的功耗得以有效降低。

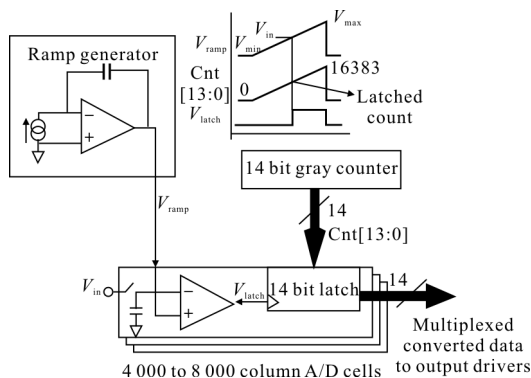


图 2 BAE(洛克希德·马丁)公司采用的积分型 ADC 的工作示意图

Fig.2 Operation of integration ADC in BAE (Lockheed Martin) of USA

1.3 法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司

法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司先后开发了两种类型的 640×480 列级 ADC 数字出电路。2006 年,法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司研制了阵列规模为 640×480、中心距为 15 μm 的数字化读出电路,拟用于碲镉汞焦平面探测器。

如图 3 所示,列级 ADC 数字读出电路采用了双斜率 ADC 的变种——单积分双放电型 ADC^[20]。通过移除积分器虽然可以简化列级 ADC 的结构并大幅降低功耗,但使得 ADC 电路对电源电压和外部噪声的抗干扰能力下降,严重影响到列级 ADC 的转换精度;使用两个精密微型电流源对高位和低位转换进行切换,对精密微型电流源提出了很高的设计要

求,并且切换开关是一个潜在的噪声源。

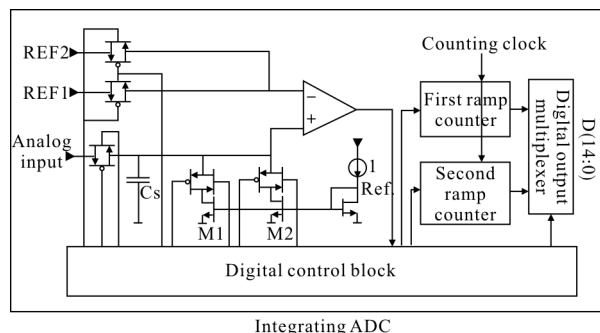


图 3 法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司采用的单积分双放电 ADC

Fig.3 Operation of one integration and dual discharging ADC in SOFRADIR & CEA-LETI of France

法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司采用单积分双放电型列级 ADC 数字读出电路的具体性能指标如下:(1) 面阵规格:640×480;(2) 像元间距:15 μm;(3) 电荷处理能力:6.5 Me⁻;(4) 加工工艺:0.35 μm 标准 CMOS 工艺;(5) 列级 ADC 输出位数:15 bit;(6) 列级 ADC 功耗:≤65 μW;(7) 帧频:120 Hz。

2007 年,法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司开始研究 Sigma-delta(Σ-Δ)型 ADC^[21]。如图 4 所示,列级 ADC 采用二阶增量型 Σ-Δ 结构,适用于中心距为 25 μm 的 320×240 或 640×480 碲镉汞阵列使用。法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司列级增量 Σ-Δ 型 ADC 的测试指标如下:(1) 面阵规格:640×480/320×240;(2) 像元中心距:25 μm;(3) 加工工艺:0.35 μm 标准 CMOS 工艺;(4) 输出 ENOB:13 bit;(5) 单个 ADC 功耗:≤270 μW;(6) SNR:81 dB;(7) 帧频:100/50 Hz。

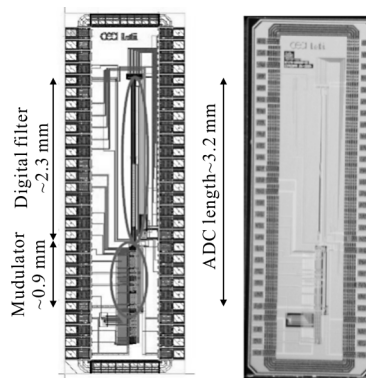


图 4 增量型 Σ-Δ 列级 ADC 版图和芯片照片

Fig.4 Photos of layout and chip of increment Σ-Δ column ADC

为了实现低成本 SWaP,基于上述列级 ADC 读

出电路的研究基础,2014年,法国 SOFRADIR 及 CEA-LETI 公司采用“Small Pixel Pitch”与“HOT”相结合的技术途径,研制出著名的 DAPHNIS 数字探测器组件产品^[17]。如图 5 所示,DAPHNIS 数字化探测器组件的阵列规模为 1 280×720/1 024×768,像元间距为 10 μm×10 μm,采用 14 bit 列级 ADC 数字出电路方案,帧频达到 120 Hz,其探测器芯片组工作在 110 K 温度环境,极大地降低了制冷机功率,提高了数字探测器组件的可靠性。

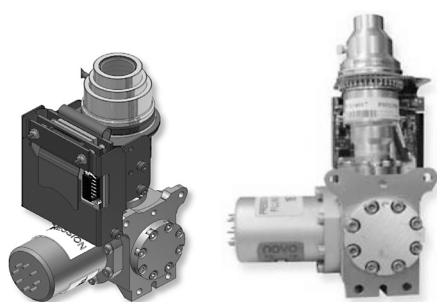


图 5 法国 SOFRADIR 和 CEA-LETI 公司的 DAPHNIS 数字探测器组件

Fig.5 DAPHNIS digital FPA detector assembly in SOFRADIR & CEA-LETI





2 国内数字化中波焦平面探测器的研究进展

虽然数字读出电路与之前的模拟读出电路存在一定的关联性,但要将以前在 PCB 模数处理板上的 AD 转换器集成到读出电路芯片上,在数字读出电路架构设计、低功耗高精度列级 AD 转换器设计、高速数字信号传输、高密度版图布局等方面遇到很大的挑战。

2013 年以来,昆明物理研究所在不同层面的项目支撑下,突破了小面积、低功耗、高精度列级 ADC 设计、高速数字信号传输等关键技术,开发了 SAR 型、Sigma-delta 型两类列级 ADC 数字读出电路芯片^[20],并与 640×512 中波焦平面探测器互连,研制出一系列中心距(15、20、25 μm)的 640×512 数字化中波制冷红外焦平面探测器组件,与国外同类数字中波焦平面探测器组件对比情况如表 4 所示。根据上述对比数据,昆明物理研究所研制的一系列 640×512 列级 ADC 数字中波制冷焦平面探测器组件与以色列 SCD 公司的 Pelican-D、法国 SOFRADIR 公司的

表 4 国内外 640×512 数字中波焦平面探测器组件技术指标对比

Tab.4 Specification of 640×512 digital mid-wave FPA detector assembly in civil and abroad

Manufacture	Seb640 of SCD	Pelican-D of SCD	SBF191 of BAE	DAPHNIS of Sofadir	Digital assembly of KNIST
Material of detector	InSb	InSb	MCT	MCT	MCT
Array format	640×512	640×512	640×512	1 280×768	640×512
Pixel pitch/μm	20	15	20	10	25/20/15
Wavelength/μm	3.6-4.9	3.6-4.9	2.0-4.0	3.7-4.9	3.7-4.9
Fabrication	0.5 μm Si-CMOS	0.18 μm Si-CMOS	-	Advanced CMOS	0.35 μm Si-CMOS
Mode of operation	ITR/IWR	ITR/IWR	ITR/IWR	ITR/IWR	ITR/IWR
NETD/mK	20	20	13	25	14
Power dissipation	45 mW@ 60 Hz	80 mW@ 60 Hz	80 mW@ 60 Hz	70 mW@ 60 Hz	91 mW@ 60 Hz
Conversion resolution/bits	12-15	13-15	13-14	14	14
Frame rate/Hz	170	300	120	120	125
Read out rate/MHz	≥ 40	≥ 80	-	-	120
Operating temperature/K	77	77	77	110	77
Photoshop of assembly			-		

DAPHNIS 等数字中波焦平面探测器组件水平相当。

图 6 为采用 640×512(25 μm)列级 ADC 数字中波焦平面探测器组件对 6 km 外的远景目标进行演示成像的效果。该成像照片采自未经过任何处理的原始热图像。



图 6 640×512 数字中波焦平面探测器组件(25 μm)远景成像照片

Fig.6 Prospective imaging photograph of 640×512 cooled digital FPA detector assembly(25 μm)

3 结论

综上所述,国外数字化中波红外焦平面探测器研究已经卓有成效,以色列的 SCD 公司,美国的 BAE(原来的 Lockheed-Martin)公司纷纷推出了各自的系列数字化中波焦平面探测器组件货架产品,其技术路线都是采用列级 ADC 的拓扑结构,达到的性能指标为列级 ADC 量化精度在 12~15 bit,数字读出电路的功耗在 50~100 mW 之间,帧频在 50 Hz 以上。因为列级 ADC 数字读出的通用型数字化中波红外焦平面探测器组件结构紧凑型、可靠性高,被高性能红外探测系统大量采购和装备。

近年来,随着“SWaP”概念的牵引,降低红外热成像机芯组件的体积、重量和功耗,提高器件可靠性,为高性能红外热像仪应用创造更多领域,此项共识逐渐为广大红外探测器研究单位接受并纷纷在最新的红外探测器组件产品上体现。红外探测器组件只有通过“HOT”工作、“Small”像素、“Digital”集成等几种技术的有效结合才能达到上述目的。随着像素间距越来越小($\leq 5 \mu\text{m}$),探测器工作温度越来越高($\geq 150 \text{ K}$),给数字读出电路设计者提出了更高的要求。只有不断缩小 IC 设计线宽,提出创新型的 ADC 架构才能满足上述要求。

另外一个值得关注的领域是像素级 ADC 数字读出电路及相应的数字化长波红外焦平面探测器。国外著名的红外探测器研究单位在最近几届

“SPIE”等国际学术会议上纷纷报道了各种类型的像素级 ADC 数字读出电路的长波制冷红外焦平面探测器^[23-24]。通过使用像素级 ADC 数字读出电路,大幅提升了长波制冷红外焦平面探测器的动态范围(DR)和电荷处理能力;通过采用片上数字 TDI 技术、片上数字非均匀性校正技术等,显著提升了数字长波红外探测器的高帧频和超低 NETD 等性能^[25-26]。

可以预见,随着弹载、星载等高端红外探测系统对像素级 ADC 数字长波探测器组件的需求逐渐增多,面对差异化极大的各类应用需求,需要设计不同架构的像素级 ADC 来满足高端红外系统对数字化长波制冷红外探测器组件的要求。这给数字读出电路设计者提出了极其严峻的挑战,也极大地提高了数字化长波制冷红外探测器组件的研制成本和研制周期。因此,上述列级 ADC 数字化探测器组件将沿着“通用型组件”的道路走下去,而像素级 ADC 数字探测器组件将走向一条“定制化组件”的道路,不同类型的 ADC 架构将在像素级数字化长波红外探测器组件的应用中绽放异彩。

参考文献:

- [1] Donald A R, Stuart Horn, James Campbell, et al. Third generation imaging sensor system concepts [C]//SPIE, 1999, 3701: 108-117.
- [2] Bai Piji, Yao Libin. Read out integrated circuit for third-generation infrared focal plane detector [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(2): 89-96. (in Chinese)
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.
- [3] Philippe Tribolet, Gérard Destefanis. Third generation and multi-color IRFPA developments: a unique approach based on DEFIR[C]//SPIE, 2005, 5783: 578337
- [4] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 091101.
- [5] Bai Piji, Zhao Jun, Liu Huiping, et al. Review of ROIC for MCT dual-band infrared focal plane arrays [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(10): 807-813. (in Chinese)
白丕绩,赵俊,刘会平,等.碲镉汞双色红外焦平面读出电路研究进展[J]. *红外技术*, 2015, 37(10): 807-813.
- [6] Radford W A, Radford W A, Patten E A, et al. Third generation FPA development status at Raytheon vision

- systems [C]// Proceedings of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXI, 2005, 5783: 331–339.
- [7] Neshor Ofer, Elkind Shimon, Adin Amnon, et al. Digital cooled InSb detector for IR detection[C]//SPIE, 2003, 5074: 10.1117/12.498154.
- [8] Olkline Schlesinger J, Calahorra Z, Uri E, et al. Pelican–SCD's 640×512, 15μm pitch InSb detector[C]//SPIE, 2007, 6542: 654231.
- [9] Alain M, Laurent R, Yann R, et al. Improved IR detectors to swap heavy systems for SWaP [C]//SPIE, 2012, 8353: 835334.
- [10] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. High operating temperature IR–modules with small pitch for SWaP reduction and high performance applications [C]//SPIE, 2011, 8185: 818504.
- [11] Michel V, Laurent R, Fabien C, et al. HOT infrared detectors using MCT technology [C]//SPIE, 2011, 8012: 80122 W.
- [12] Chen Nan, Yao Libin. Analog to digital conversion techniques in array image sensors [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(10): 770–776. (in Chinese)
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): 770–776.
- [13] Neshor O, Elkind S, Adin A, et al. A digital cooled inSb detector for IR detection [J]. *Infrared Technology and Applications XXIX*, 2003, 5074: 120–129.
- [14] Markovitz T, Pivnik I, Calahorra Z, et al. Digital 640x512 / 15 μm InSb detector for high frame rate, high sensitivity and low power applications [J]. *Infrared Technology and Applications XXXVII*, 2011, 8012: 80122Y.
- [15] Krashefski B, Elliott J, Hhan L, et al. A versatile, producible, digital, FPA architecture [C]//SPIE, 2006, 6206: 62062W.
- [16] Neshor O, Pivnik I, Ilan E, et al. High resolution 1280×1024, 15 μm pitch compact InSb IR detector with on–chip ADC [C]//SPIE, 2009, 7298: 72983K.
- [17] Lutz H, Breiter R, Rutzinger S, et al. High–performance IR detector modules for Army applications [C]//SPIE, 2013, 8704: 87040A.
- [18] Lior Shkedy, Maya Brumer, Philip Klipstein, et al. Development of 10μm pitch XBn detector for Low SWaP MWIR applications[C]//SPIE, 2016, 9819: 98191D.
- [19] Shin M S, Kim J B, Kim M K, et al. A 1.92–Megapixel CMOS image sensor with column–parallel low–power and area–efficient SA–ADCs [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2012, 59: 1693–1700.
- [20] Fillon P, Dugalleix S, Pistone F, et al. Digital output for high performance MCT staring arrays [J]. *Infrared Technology and Applications*, 2006, 6206: 62060U.
- [21] Guellec F, Villard P, Rothan F, et al. Sigma–delta column–wise A/D conversion for cooled ROIC [J]. *Infrared Technology and Applications*, 2007, 6542: 65423N.
- [22] Yao Libin, Chen Nan, Zhang Jiqing, et al. Digital IRFPA technology[J]. *Infrared Technology*, 2014, 38(5): 357–366. (in Chinese)
姚立斌, 陈楠, 张继清, 等. 数字化红外焦平面技术[J]. 红外技术, 2014, 38(5): 357–366.
- [23] Matthew G Brown, Justin Baker, Curtis Colonero, et al. Digital–pixel focal plane array development [C]//Proc of SPIE Solid–State Circuits Conference, 2010, 608: 7608–76082H.
- [24] Alexandre Guilvard, Josep Segura, Pierre Magnan, et al. A digital high dynamic range CMOS image sensor with multi–integration and pixel readout request [C]//Proc of SPIE in IS&T Electronic Imaging, 2007, 6501: 65010L.
- [25] Matthew G. Brown, Justin Baker, Curtis Colonero, et al. Digital–pixel focal plane array development [C]// Proc of SPIE in Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VII, 2010, 7608: 76082H.
- [26] Guellec F, Peizerat A, Tchagaspian M, et al. A 25 μm pitch LWIR focal plane array with pixel–level 15–bit ADC providing high well capacity and targeting 2 mK NETD[C]// Proc of SPIE in Infrared Technology and Applications XXXVI, 2010, 7660: 76603T.