

文章编号: 1672-8785(2013)02-0001-09

向高清化和数字化发展的红外成像系统

王忆锋 黄江平

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘 要: 高清(晰度)红外成像系统是一种根据高清电视标准(1280×1024、1920×1080 或者 1280×720)产生视频信号, 具有较高空间分辨率而又不会牺牲热灵敏度的热像仪。空间分辨率越高, 可探测到的目标越小, 距离就越远。空间分辨率的提高意味着探测器像元数量的增加、像元中心距的减小和像元信噪比的增强。数字化也就是要将模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)引入到读出集成电路(Readout Integrated Circuit, ROIC)中。ADC 可以用一个高速 ADC 在芯片级实现, 或者用几个中速 ADC 在列级实现, 或者用低速 ADC 在像元级实现。由于仅需传输数字数据, 像元级 ADC 有助于减小系统噪声, 适合用标准的数字 CMOS 工艺来实现。通过对部分有关英文文献进行归纳与分析, 介绍了近年来红外成像系统在高清化和数字化方面的发展动向和趋势。

关键词: 高清晰度; 数字化; 红外成像系统; 模数转换器

中图分类号: TN362 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2013.02.001

Infrared Imaging Systems Tending towards High Definition and Digitization

Wang Yi-feng, Huang Jiang-ping

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: High definition infrared imaging systems are those thermal imagers that have higher spatial resolution without sacrificing thermal sensitivity and generate video signals according to the high definition television standards (1280×1024, 1920×1080 or 1280×720). The higher the spatial resolution is, the smaller the detectable target is and the farther the target is from. The improvement of spatial resolution means that the number of detector pixels is increased, the pixel pitch is decreased and the signal-to-noise ratio in each pixel is enhanced. Digitization involves the incorporation of an analog-to-digital converter (ADC) into a readout integrated circuit (ROIC). Analog-to-digital conversion can be implemented with a high speed ADC at the chip level or be implemented with multiple medium speed ADCs at the column level or be implemented with multiple low speed ADCs at the pixel level. Because only digital data need to be transferred, the ADC at the pixel level is helpful to the reduction of system noise and is suited for implementation in the standard digital CMOS process. The recent advances and trends of infrared imaging systems in the aspects of high definition and digitization are presented.

Key words: high definition; digitization; infrared imaging system; analog-to-digital converter

收稿日期: 2012-11-16

作者简介: 王忆锋(1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

0 引言

电视技术中的“高清(晰度)”这一术语如今已是众所周知,与之相对应的还有“标清”和“低清”。简单地说,高清是指比标清具有更高分辨率的情况。一般而言,像素越多,分辨率越好,清晰度也就越高,如图 1 所示^[1]。

高清红外(High Definition Infrared, HDIR)热成像系统是一种以高清电视标准和较高空间分辨率产生视频信号的热像仪^[2]。高清化也是一个数字化的过程。从发展过程来看,西方发达国家的有关产品多年前即已从低清过渡到了标清,近年来正向高清化和数字化方向快速发展。

本文从基本概念入手,介绍了国外红外成像系统在高清化和数字化方面的发展动向。

1 关于高清显示格式

显示分辨率通常有两种表示方式:一种是用电视线的方式来表示,此时分辨率的含义与电视相似;另一种则是用像素的方式来表示,如 640×512 和 1280×1024 等形式。像素(pixel)是指显示器上的一个点;在讲到探测器时,pixel是指一个像元。用像素表示的分辨率具有多种形式的定义,其中的部分定义见表 1。2012 年 5 月,国际电信联盟将 3840×2160 定义为超高清电视标准。

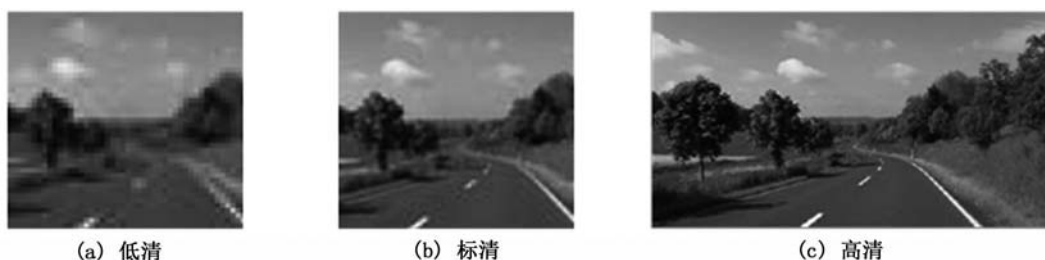


图 1 具有不同分辨率的图像

表 1 部分显示格式的定义

	标准	分辨率	宽高比
计算机 显示器 标准	CGA	320×200	16 : 10
	QVGA	320×240	4 : 3
	VGA	640×480	4 : 3
	SVGA	800×600	4 : 3
	XGA	1024×768	4 : 3
	SXGA	1280×960 ^[3]	—
	SXGA	1280×1024 ^[4]	5 : 4
模拟电 视标准	PAL	720×576	5 : 4, 非正方形像素, 总体比例通常为 4 : 3
	PAL/VHS	320×576	—
	NTSC	720×480	3 : 2, 非正方形像素, 总体比例通常为 4 : 3
	NTSC/VHS	320×482	—
数字电视 标准	NTSC	648×486	4 : 3
	D-2/NTSC	720×540	正方形像素
	PAL	720×486	—
	D-1/PAL	768×576 ^[4]	正方形像素
	HDTV/1080i (隔行)	1920×1080	16 : 9
	HDTV/1080p (逐行)	1920×1080	16 : 9
	HDTV/720p	1280×720	16 : 9
	超高清	3840×2160	16 : 9

用户一般更为关心的是显示格式的宽度,而不是高度,因此 HDIR 系统大多选取 16:9 的高清电视格式^[5]。美国 FLIR 公司将 HDIR 定义为 1920×1080 或 1280×720;法国 Sofradir 公司的定义是 1280×1024;德国 AIM 公司的定义是 1024×1024 和 1280×720。另外,640×512 或 640×480 为电视格式^[6],384×288 为中等电视格式^[6-7],320×256 和 256×256 为 1/4 电视格式^[8]。

在理想情况下,探测器的像元数应该与显示器的像素数一一对应。如果仅从显示的角度来看,当像元数与高清显示像素数相差较大时,通过算法等处理手段也可获得高清格式。例如,480×6^[9]、480×8^[3]和 576×n^[10](n 为时间延迟积分的级数)规格的焦平面阵列均可实现高清格式显示。但是 FLIR 公司认为,为了产生真正意义上的高清红外数据,红外成像系统的所有环节——光学系统、探测器、处理电子学以及接口等——都必须具有高清能力,而不仅仅是实际的数字文件格式^[1]。这些环节中只要有一个缺失,都将产生图像质量衰减和数据损失。例如,将一个高清焦平面阵列摆在标清光学系统的后面,这时只能得到标清图像。一块透镜可传递的清晰度水平是由线对数/毫米(LP/mm,单位长度内的线对数称为空间频率)来确定的。标清透镜的分辨率不超过 30 LP/mm。为了实现 1280×720 的高清质量,要求透镜的分辨率至少达到 80 LP/mm。FLIR 公司制备的高清透镜的分辨率超过 200 LP/mm^[1]。通过光学微扫描可以提高系统的原始分辨率^[1]。例如,经过微扫描可将 384×288 变为 768×576^[11]。FLIR 公司认为,为了实现 1280×720 的高清质量,焦平面阵列必须为 640×512+光学微扫描,或者直接使用 1280×720 规格的芯片;若低于这两个指标,则不能认为是真正的高清红外^[1]。

此外,与标清系统相比,高清系统产生的信息要多 4~6 倍,而且其所有的处理工作必须实时完成。这就需要具有更高的数据率和更强的数据处理能力,而这又不可避免地会在系统内产生更多的热量。因此,热量管理是构建一个可靠的高清红外成像系统所要面对的另一个挑战^[1]。

2 高清红外成像与系统性能之间的关系

一个焦平面阵列芯片由众多像元构成,其中起探测作用的是像元的光敏区域,称为光敏元;此外还有部分非光敏区,称为“死区”,包括制作过程中形成的芯片间距和芯片边缘的附属电路等。所谓的中心(间)距是指一个像元的中心与相邻像元中心之间的距离。

在过去的二十多年里,焦平面阵列的像元中心距从 50 μm 左右开始不断缩小^[12]。12 μm 中心距现已成为中波和长波红外探测器的标准^[13],另外还出现了 10 μm^[14]和 5 μm^[13]中心距的器件。中心距的减小意味着光敏面尺寸的降低,因此在给定的光学孔径内可以设置更多的像元。相应地,像素越多,获得的图像也就越清晰。

高清化给红外成像系统带来的好处不仅是清晰度的增加,而且还有作用距离的提高。当目标足够远时,由成像关系可以写出:

$$\frac{D}{R} = \frac{d}{F_o} \quad (1)$$

式中, D 为目标尺度, R 为目标与探测器之间的距离, d 为探测器尺度, F_o 为焦距。从式(1)中可以看出,对于一个给定的光学孔径,中心距越小,则光敏面越小,作用距离 R 就越远。文献[2]报道,16:9/HDTV 标准 & 1920×1152 可以显著提高作用距离。与具有相同垂直视场的标准电视兼容热像仪相比,其模型预测识别距离可提高 60%。小中心距焦平面阵列对于制备工艺和像元设计来说都是一个不小的挑战^[15]。

式(1)只是从几何关系的角度来考量的,其约束性较弱。约束性更强的一个关系则是落在光敏面上的光子数。光敏面从目标接收到的光子数与两者之间距离的平方成反比。假定量子效率等其他参数不变,光敏面变小之后,作用距离必然变近。如果光敏面变小之后仍然希望作用距离保持不变,那么只能是以时间换空间,即通过延长积分时间来累加出同样数量的光子。然而

延长积分时间也就意味着探测系统的反应速度会变慢。这一点对于静止目标或低速运动目标探测的影响可能不大,但是对于高速运动目标探测的影响却值得关注。

3 数字红外成像中的 ADC

从某种程度上来说,高清化也是一个模拟信号数字化的过程或结果。ADC 是数字化的基础。从发展过程来看,ADC 是与数字信号处理技术一起被引入红外成像系统的,只是以往大都是在读出电路 (ROIC) 芯片外围和在电路板级实现的。ADC 包括由电阻网络和模拟开关构成的数模转换器 (Digital-to-Analog Converter, DAC),其工作时需要消耗一定的能量,这部分能量反映为 ADC 的功耗。对于致冷型焦平面阵列来说,

ADC 需要与探测器一起放在低温环境下,因此人们自然希望 ADC 的功耗越小越好。近年来,基于 CMOS 工艺的 ROIC 研究已经取得了显著进步^[16]。ADC 的功耗持续下降,使得两者可以在无需明显增加热负载的条件下合为一体。

表 2 列出了数字红外成像的 6 个步骤^[17]。习惯上,表 2 中的第 4 步和第 5 步合并称为 ROIC。数字化就是通过进一步将 ADC 引入到 ROIC 中来实现的,从而构成了数字 ROIC^[18-21],或称为 (芯) 片上 ADC^[15]。数字 ROIC 和焦平面阵列即可形成数字 (像元) 焦平面阵列^[22-26]。这一概念还可以进一步延伸,例如有关厂家提供的致冷型探测器组件一般是探测器-杜瓦-制冷机 (Detector-Dewar-Cooler, DDC) 的集成件,引入数字 ROIC 后即可变成数字 DDC (D³C)^[27]。

表 2 数字红外成像的 6 个步骤

数字化成像步骤		使用的技术	
1	接收红外辐射	抗反射膜, 去除衬底	
2	电荷产生	探测器材料生长	红外探测器材料
3	电荷收集	pn 结	
4	电荷-电压转换	根据光通量、速度和噪声等优化过的放大器 - 源跟随器 - 电容阻抗放大器 - 直接注入	CMOS 集成电路
5	信号传递	读出电路 (ROIC)	
6	数字化	模数转换器 (ADC)	

ADC 的基本功能包括采样、量化和编码,称为脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM)。该过程称为数字化,其具体的实现方式决定了 ADC 的结构和功能。其中,采样是指使模拟信号离散化并最终变为采样信号的过程。对模拟信号进行采样的频度称为采样频率。根据采样定理,若采样频率 F_s 大于有限带宽信号 $x_a(t)$ 带宽 F_0 的两倍,即 $F_s > 2F_0$,则可保存模拟信号的全部信息;采用任何更高的采样速率时同样可以保存模拟信号的全部信息。 $2F_0$ 称为 Nyquist 频率,又称为 Nyquist 速率。当采样频率远大于 Nyquist 频率时,这种情况称为过采样。

红外成像系统本身就具有显著的过采样特征^[28]。经过探测器光电转换生成的电子必须先在一个势阱中保存一段时间 (一般通过给 ROIC 电容充电来实现)。当电容接近饱和时,就会出现强烈的电串音和非线性效应;一旦饱和,即不能再从中取出附加信息,相邻单元中的信息也会因深受影响而变得混杂起来^[28]。因此必须在电容饱和之前取出其中的电荷。由于电容容量有限,例如单元电容约在 100 μs 内充满至饱和,而帧时间处在 10 ms 量级^[29],因此有一个很自然的想法就是引入某种开关机制,将帧时间适当地均分为许多小于饱和时间的时间段 (该时间段

称为积分时间), 然后每隔一个积分时间就读取一次电容电荷。从信号处理的角度来看, 这一过程就是过采样。

事实上, 采样理论已经指出了实现片上 ADC 的两种途径: 一种是按 Nyquist 频率进行采样^[30-32]; 另一种是过采样^[31-34]。其中, 过采样有助于避免混叠, 改善分辨率以及降低噪声。通过提高采样速率和过采样率, 以时间交换精度, 可以避免使用高精度 ADC 所需的复杂电路。

量化是指使采样信号的幅值离散化并将其变成数字信号的过程。在一定的时间间隔内, 数字信号仅取有限数目的数值之一, 因而可用二进制数来表示。所用二进制数的位数或长度 n 称为分辨率或精度。一方面, 位数越多, 分辨率越高; 在理想情况下, 可以准确地表征一个模拟信号, 但是这可能会需要无限多的位数。另一方面, 实际中必须作出某种近似, 因此需要根据红外成像系统的动态范围来选择 ADC 的位数 n 。动态范围的定义是最大信号与最小信号之差与均方根噪声的比值^[35]。一个红外探测器的动态范围 (DR) 可按式 (2) 计算:

$$DR = \dots = \frac{N_{\Delta\lambda} \cdot A_o \tau_o \tau_a \cdot IFOV \cdot D_{\Delta\lambda}^*}{\sqrt{A_d \Delta f_n}} \quad (2)$$

式中, $N_{\Delta\lambda}$ 为 $\Delta\lambda$ 波段内含有最高温度物体时的场景辐亮度, 可按普朗克公式来计算; A_o 为光学透镜面积; τ_o 为透镜的透过率; τ_a 为大气透过率; $IFOV$ 为光敏元的瞬时视场; $D_{\Delta\lambda}^*$ 为波段平均探测率; A_d 为光敏元面积; Δf_n 为探测器的等效噪声带宽。文献^[35]介绍了一个算例。代入有关参数后, 根据式 (2) 可以算出:

$$DR = \dots = 1.639 \times 10^3 = 1639$$

如果该动态范围值要实现数字化, 那么就需要 11 位的 ADC ($2^{10}=1024$, $2^{11}=2048$)。

ADC 的性能可以用微分非线性和积分非线性等参数来描述^[36]。片上 ADC 的典型要求如下: 精度 >12 位, 低功耗, 微分非线性 <0.5LSB (最低有效位)^[15]。文献^[5]指出, 确定热像仪输出的动态范围必须从量子效率和 ROIC 每个像元单元的有效电荷存储容量来考虑。为了适应噪声与信号水平之间增加的动态范围, 需要使用高精度 ADC。文献^[37]分析了放大器增益、带宽、电容匹配、噪声和偏置电压等因素对 ADC 精度的影响。从系统噪声的总体改善程度来看, 一般认为系统性能可以从某种形式的片上 ADC 获益^[38]。大多数读出器件都伴有读出 (或复位) 噪声^[28], 一般在 50 ~ 1000 个电子之间, 可用相关双采样方法来降低^[17,28]。如果读出噪声足够低, 那么可以以 15 ~ 16 位的精度在片上实现数字化^[5]。文献中提到的 ADC 精度有 8 位^[30]、12 位^[39]、14 位^[23,36,40] 和 13 ~ 15 位^[7,22] 等。编码是将数字信号最终表示成数字系统所能接受的形式。实际上, 编码是在量化过程中同时完成的。

片上 ADC 可在芯片级、列级或像元级上实现^[41]。ADC 完成一次模数转换所需时间的倒数称为 ADC 的转换速率。从转换速率来看, ADC 有高速、中速和低速之分, 这与所选 ADC 的结构有关, 如图 2 所示^[15]。因为像元级 ADC 是在靠近信号产生的位置上以较低的速率并行完成的, 所以与列级 ADC 和芯片级 ADC 相比, 其信噪比较高, 功耗较低^[41]。

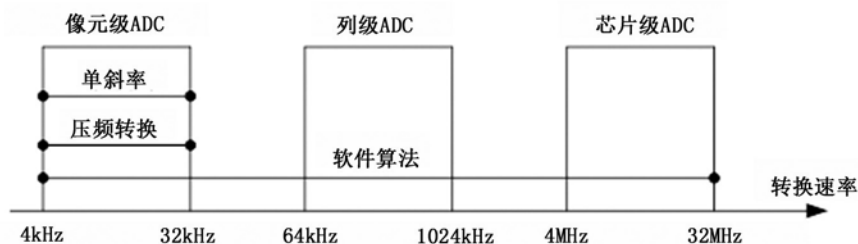


图 2 ADC 结构的选择依赖于转换速率和 ADC 在信号路径中的位置

3.1 像元级 ADC [7,30,42]

对于像元级 ADC 来说, 每一个焦平面阵列像元均配有一个 ADC, 它们同时工作, 大大降低了 ADC 的采样率。因此可以采用低速 ADC, 并可通过大量低速 ADC 的并行工作来获得一个高速 ADC 的效果。

由于面积有限, 常规的 ADC 结构并不容易在像元上得以实现 [32,41]。目前常用的有采用 Nyquist 频率多通道位串行 (Multi-Channel-Bit-Serial, MCBS) 的 ADC [32] 和采用增量调制的过采样型 ADC。采用 MCBS 结构的 ADC 的最主要优点是其可以通过多重采样和编程来扩大动态范围 [41]。文献 [30] 介绍了一种 8 位 ADC 结构, 它采用 Nyquist 频率单斜率设计, 包含三级比较器和一个 8 位内存, 每个像元配有一个 ADC。这种全像元并行 ADC 结构可以实现超过 1000 Hz 的帧率。

像元级 ADC 可以实现对像元输出的连续观察, 从而允许采用过采样来降低噪声、扩展动态范围和提高像元的电荷处理能力 [32]。采用过采样结构的 ADC 由积分器、比较器、1 位 DAC 和数字滤波器等组成。它在原理上近似于积分型结构, 即将输入电压转换成时间 (脉冲宽度) 信号, 然后用数字滤波器对其进行处理后得到数字值。

由于 ADC 个数与像元个数相等, 多的可达百万量级, 故像元级 ADC 对功耗和面积的要求非常苛刻。可以选择若干个 (例如 4 个 [24,43]) 像元作为一组, 以共用一个低速 ADC。文献 [43] 报道, 他们将每 4 个相邻像元作为一组, 共用一条读出线和一个积分电容。这样处理使得积分电容增加了 6 ~ 10 倍; 读出线数量减少了一半, 而且由于拉开了读出线之间的间距, 为信号处理功能的引入留下了空间。文献 [44] 介绍, 通过在电流域中用开关电流结构完成电荷积分, 可以降低所需芯片的面积。

图 2 中的软件算法是指用软件控制 ADC [31], 即通过使用某种算法将光电流转换为输出位流。每一个像元包括一个用于直接控制探

测器与软件之间状态的可编程数字处理单元, 它可以用于各层次的 ADC。另外, 图 2 中的压频转换是早期人们研究较多的一种像元级 ADC 方法。该方法是通过间接转换方式实现模数转换的。其原理是, 首先将输入的模拟信号转换成频率, 然后用计数器将频率转换成数字量。从理论上讲, 这种 ADC 的分辨率几乎可以无限增加, 只要采样时间能够满足输出频率分辨率要求的累积脉冲个数的宽度。因为压频转换 ADC 一次完成一行, 所以它在本质上还是一种列级 ADC, 而不是一种真正的全并行像元级 ADC [32,41]。

3.2 列级 ADC [18]

由于像元级 ADC 在工艺技术上的实现难度最大, 列级 ADC 作为芯片面积、功耗、电路速度和 ADC 精度等因素的一种折衷 [37], 可以为每一列像元配置一个 ADC, 并在并行方式下逐列完成 ADC, 故对速度的要求有所降低, 可用于中低速 ADC。列级 ADC 可以分为单斜率 ADC、双斜率 ADC、逐次逼近 ADC 和过采样 ADC 等, 其优点是可以使用简单的 ADC 结构, 缺点是它会使芯片版图布局变得更加复杂。

3.3 芯片级 ADC

对于芯片级 ADC 来说, 整个焦平面阵列使用一个 ADC, 而且它们大多采用高速率、中等功耗的流水线 ADC 结构 [36]。其中, 每个像元的输出都要经过该 ADC, 可以用单斜率 ADC 或算法 ADC 来实现。其优点是 ADC 面积不受很大限制, 缺点是 ADC 的高速率会带来较大功耗。在 2008 年发表的文献中, 最佳 ADC 功耗水平如下 [17]: 1 ~ 2 mW/MHz/12 位、3 ~ 4 mW/MHz/14 位和 3 mW/100 kHz/16 位。另外, 焦平面阵列与 ADC 之间传输的是模拟信号, 不可避免地会引入额外噪声, 使系统性能受到影响。

高清应用的特点之一是原始数据量大, 而且还不能压缩, 因为所有的视频压缩技术都将导致无法再获得高质量的高清视频信号 [1]。焦平面阵列的原始数据率可以表示为

$$\text{原始数据率} = \text{像素数} \times \text{帧频} \times \text{位数} \quad (3)$$

例如,对于一个帧频为 60 Hz、ADC 输出为 14 位的 1280×720 元焦平面阵列来说,其原始数据率为

$$1280 \times 720 \times 60 \times 14 = 774144000 = 774 \times 10^6 \\ = 774 \text{ Mbps} = 0.77 \text{ Gbps}$$

式中, bps 表示每秒可传输的位数。30 ~ 60 Hz 帧频对于目视显示已经足够了^[15],但是导弹预警和导弹导引头等应用则要求帧频在 300 Hz 以上^[22],这意味着原始数据率高达若干个 Gbps,由此可能会衍生出热负载增加等问题。利用光连接技术传输片上 ADC 的输出信号,可以进一步降低噪声干扰和功耗^[36,40]。

4 数字 ROIC 的发展

从某种程度上来说, ROIC 本身就是一个与 IC 生产工艺密切相关的设计与制造问题。借助于非常先进的 IC 设计工具(国内所用设计工具基本上都是国外产品), ROIC 的功能仅仅受制于设计者的想像力以及像元空间尺寸的局限性^[17]。设计方法则有半定制、全定制和逆向之分。其中,半定制正向设计是主流技术,全定制一般应用在 CPU 等高端产品,逆向方法一般用于军用集成电路的设计。另外,国内 IC 生产设备特别是高端设备对国外的依赖程度很高。

一般而言, ROIC 芯片的尺寸与焦平面阵列芯片的尺寸大体相同。随着焦平面阵列像元中心距的不断减小,给像元级 ADC 留下的空间也越来越小。空间局限性可以通过使用更为精细的设计规则(即 ROIC 可以实现的最小特征线宽)来克服。线宽是指 IC 生产工艺可达到的最小导线宽度,是表征 IC 工艺先进水平的主要指标。ROIC 用到的线宽先后有 $1.2 \mu\text{m}$ ^[33]、 $0.9 \mu\text{m}$ ^[24]、 $0.6 \mu\text{m}$ ^[36,45]、 $0.35 \mu\text{m}$ ^[30,44] 和 $0.18 \mu\text{m}$ ^[7-18,23] 等。线宽越小,集成度越高,在单块芯片上可容纳的元件数目也就越多。采用 $0.35 \mu\text{m}$ 线宽工艺可以在 $30 \times 30 \mu\text{m}^2$ 面积上安排一百多个晶体管^[30]。中心距较大时,可以采用线宽较大的工艺。例如,对于 $60 \mu\text{m}$ 中心距,可以用 $1.2 \mu\text{m}$ 线宽的工艺在每个像元位置上制作一个 ADC^[33]。目前主

流产品的线宽为 $0.25 \mu\text{m}$ (该线宽工艺可以在每个像元下制作一个完整的 16 位 ADC),先进的则已降至 $0.13 \mu\text{m}$ 。国内通过引进和吸收国外技术,已有 $0.35 \mu\text{m}$ 和 $0.25 \mu\text{m}$ 线宽的工艺线;有的企业在设计技术方面也达到了 $0.13 \mu\text{m}$ 的水平。用 $0.1 \mu\text{m}$ 工艺可以引入数百个晶体管^[46],使得原来放在 ROIC 外面(包括 ADC 在内)的一些信号处理功能可以移入 ROIC^[47-51]。文献[52]指出,通过将 $2.5 \mu\text{m}$ 线宽 CCD 工艺与 $2 \mu\text{m}$ 线宽 CMOS 工艺相结合,可以在 288×4 / 碲镉汞 / ROIC 中引入一般需要 $0.8 \mu\text{m}$ 工艺才能实现的坏像元剔除功能,同时还可以实现其他所需的大多数功能。文献[53]介绍了美国 BAE 公司为焦平面阵列 / ROIC 研发的一系列先进的信号处理结构,包括 ADC、偏置相减、单像元自动增益补偿、瞬态噪声抑制、坏像元剔除、开窗、空间神经网络处理以及亚帧噪声平均等。此外,该结构还可引入片上图像处理功能^[24-25]。

5 结束语

以往红外技术研发的重点主要集中在探测器方面^[54]。在过去的十多年里,国外的相关产品已经达到了极高的质量水平^[17],红外成像系统也正在朝着高清化的方向发展。为了获得真正意义上的高清红外影像,红外成像系统的所有环节——光学系统、探测器、处理电子学以及接口总线等——都必须具有高清能力^[1]。

焦平面阵列的高清化需要 ROIC 实现数字化。随着焦平面阵列结构变得越来越复杂, ROIC 已经成为系统性能的主要鉴定指标^[54]和研究重点^[7]。有关数字化问题的方案越早考虑,也就越容易得到实施^[17]。焦平面阵列数字化的核心是片上 ADC,它是一个涉及集成电路的问题,其设计挑战主要包括信噪比、功耗、位数、电路占用面积和吞吐量等^[7,36,42]。随着相关技术的不断发展,用集成电路工艺可实现的最小线宽不断减小,可以引入 ROIC 的数字信号处理功能也越来越多。但是小线宽工艺在带来集成优势的同时,也增加了模拟电路尤其是高性能 ADC 单元电路的设计难度。

参考文献

- [1] High Definition Infrared: the Truth about You Thought You Ynew [EB/OL]. <http://www.flir.com>, 2010.
- [2] Duchateau R, Hoefft J, Kuerbitz G, et al. HDIR: Very High Resolution Thermal Imager [C]. *SPIE*, 2000, **4130**: 303.
- [3] Kobayashi M, Wada H, Okamura T, et al. 480×8 Hybrid HgCdTe Infrared Focal Plane Arrays for High-definition Television Format [J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(8): 1876.
- [4] Costard E, Bois P. THALES Long Wave QWIP Thermal Imagers [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2006, **50**(2/3): 260.
- [5] Horn S, Norton P, Cincotta T, et al. Challenges for Third-generation Cooled Imagers [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 44.
- [6] Lanfrey D B, Trinole P, Pistone F, et al. New IR Detectors with Small Pixel Pitch and High Operating Temperature [C]. *SPIE*, 2010, **7854**: 78540M.
- [7] Bisotto S, Borniol E, Mollard L, et al. A $25 \mu\text{m}$ Pitch LWIR Staring Focal Plane Array with Pixel-level 15-bit ADC ROIC Achieving 2 mK NETD [C]. *SPIE*, 2010, **7834**: 77340J.
- [8] Tribolet P, Manissadjian A, Brochier E. Compact and Lightweight Cooled IR Detectors for High-resolution Applications [C]. *SPIE*, 2005, **5640**: 74.
- [9] Hong S M, Kim H S, Yu W K, et al. High Performance Long-wave Infrared Sensor with Large Zoom Optics and High-definition Television Format [J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(12): 123201.
- [10] Kuerbitz G, Duchateau R. Design and Development of a Very High Resolution Thermal Imager [C]. *SPIE*, 1998, **3436**: 396.
- [11] Fritze J, Munzberg M, Schlemmer H. Innovative Optics for the New PUMA Tank [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76600A.
- [12] Bercier E, Dessus J L, Manissadjian A, et al. State-of-the-art of Mass Production: Challenges for Low-cost and Application Benefits of High-performances Small-pitch IR Detectors [C]. *SPIE*, 2008, **6940**: 69400I.
- [13] Driggers R G, Vollmerhausen R, Reynolds J P, et al. Infrared Detector Size: How Low Should You go? [J]. *Optical Engineering*, 2012, **51**(6): 063202.
- [14] Sofradir [EB/OL]. <http://www.sofradir.com>, 2010.
- [15] Chen L P. Advanced FPAs for Multiple Applications [C]. *SPIE*, 2002, **4721**: 1.
- [16] 王忆锋, 钱明. 碲镉汞焦平面器件 CMOS 读出电路的发展 [J]. *红外*, 2011, **32**(7): 1-9.
- [17] Sprafke T, Beletic J W. High Performance Infrared Focal Plane Arrays [J]. *Optics & Photonics News*, 2008, **19**(6): 22-27.
- [18] Shkedy L, Markovitz T, Calahorra Z, et al. Megapixel Digital InSb Detector for Midwave Infrared Imaging [J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(6): 061008.
- [19] Tribolet P, Destefanis G. HgCdTe Large Staring Arrays at SOFRADIR [C]. *SPIE*, 2007, **6636**: 663603.
- [20] Vial L, Combette A, Gohier D. Latest Developments on MCT Staring Arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6395**: 63950E.
- [21] Pistone F, Verdet S, Tribolet P, et al. Progress in MCT Large Staring Array [C]. *SPIE*, 2006, **6295**: 62950K.
- [22] Markovitz T, Pivnik I, Calahorra Z, et al. Digital $640 \times 512 / 15 \mu\text{m}$ InSb Detector for High Frame Rate, High Sensitivity, and Low Power Applications [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80122Y.
- [23] Kelly M, Berger R, Colonero C, et al. Design and Testing of an All-digital Readout Integrated Circuit for Infrared Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2005, **5902**: 59020J.
- [24] Brown M G, Baker J, Colonero C, et al. Digital-pixel Focal Plane Array Development [C]. *SPIE*, 2010, **7608**: 76082H.
- [25] Decaens G, Zecri M, Maillart P, et al. Ultra-low Power ADC on Chip for High-performance IR Detector [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 72983H.
- [26] Fillon P, Dugalleix S, Pistone F, et al. Digital Output for High-performance MCT Staring Arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62060U.
- [27] Nesher O, Klipstein P C, Weiss E. Advanced IR Detector Design at SCD: from D^3C to ABCS [C]. *SPIE*, 2004, **5359**: 101.
- [28] Miller J L. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art [M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1994.
- [29] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation Infrared Photodetector Arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9): 091101.
- [30] Kleinfelder S, Hottes A, Fabian R, et al. Focal Plane Array Readout Integrated Circuit with Per-pixel Analog-to-digital and Digital-to-analog Conversion [C]. *SPIE*, 2000, **4028**: 139.
- [31] Gan W Ding R, Ni Y. Readout Circuit with Pixel-level Analog-to-digital Conversion [C]. *SPIE*, 2005, **5640**: 54.

- [32] Fowler B, Gamal A E, Yang D. Techniques for Pixel Level Analog to Digital Conversion [C]. *SPIE*, 1998, **3360**: 2.
- [33] Mandl W J. Focal Plane Analog-to-digital Conversion Development [C]. *SPIE*, 1995, **2474**: 63.
- [34] Mandl W J. Photon-to-digital Photodiode Imaging Array [C]. *SPIE*, 2001, **4369**: 619.
- [35] Campana S B. Infrared & Electro-Optical Systems Handbook (Volume 5): Passive Electro-Optical Systems [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [36] Kang S, Woo D H, Lee H C. Infrared Focal Plane Array Readout Integrated Circuit with on-chip 14 b A/D Converter [C]. *SPIE*, 2004, **5234**: 287.
- [37] Pain B, Fossum E R. Approaches and Analysis for on-focal-plane Analog-to-digital Conversion [C]. *SPIE*, 1994, **2226**: 208.
- [38] Mandl W J, Rutschow C M. All-digital Monolithic Scanning Readout Based on Sigma-delta Analog-to-digital Conversion [C]. *SPIE*, 1992, **1684**: 239.
- [39] Liu X, Ding R, Lu W, et al. A Novel Design of Infrared Focal Plane Array with Digital Readout Interface [C]. *SPIE*, 2010, **7658**: 765848.
- [40] Mandl W J, Ennulat R D, Terrill C W, et al. LWIR Focal Plane with Digital Readout Demonstrating a Passive Free-space Optical Readout Link [C]. *SPIE*, 1999, **3698**: 736.
- [41] Gamal A E, Yang D, Fowler B. Pixel Level Processing - Why, What, and How? [C]. *SPIE*, 1999, **3650**: 2.
- [42] 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]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76603.
- [43] Lee I I. A New Readout Integrated Circuit for Long-wavelength IR FPA [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2010, **53**(2): 140.
- [44] Yazici M, Kayahan H, Ceylan O, et al. Design of a ROIC for Scanning Type HgCdTe LWIR Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76603X.
- [45] Lu W, Ding R, Liu X, et al. 128 $\times$ 128 Dual-color ROIC with Electrical Crosstalk Resistant Design [C]. *SPIE*, 2010, **7658**: 76585Z.
- [46] Kleinfelder S, Hottes A, Pease R F. Focal Plane Array Readout Integrated Circuit with Per-pixel Analog-to-digital and Digital-to-analog Conversion [C]. *SPIE*, 2000, **4028**: 139.
- [47] Tchagaspian M, Villard P, Dupont B, et al. Design of ADC in 25 μm Pixels Pitch Dedicated for IRFPA Image Processing at LETI [C]. *SPIE*, 2007, **6542**: 65421W.
- [48] Bisotto S, Borniol E, Mollard L, et al. A 25 μm Pitch LWIR Staring Focal Plane Array with Pixel-level 15-bit ADC ROIC Achieving 2 mK NETD [C]. *SPIE*, 2010, **7834**: 78340J.
- [49] Brown M G, Baker J, Colonero C, et al. Digital-pixel Focal Plane Array Development [C]. *SPIE*, 2010, **7608**: 76082H.
- [50] Tyrrell B, Berger R, Colonero C, et al. Design Approaches for Digitally Dominated Active Pixel Sensors: Leveraging Moore's Law Scaling in Focal Plane Readout Design [C]. *SPIE*, 2008, **6900**: 69000W.
- [51] Kang S, Woo D H, Lee H C. Infrared Focal Plane Array Readout Integrated Circuit with on-chip 14 b A/D Converter [C]. *SPIE*, 2004, **5234**: 287-295.
- [52] Sizov F F, Reva V P, Derkach Y P, et al. Composite Readouts with TDI and Dead Elements Deselection [C]. *SPIE*, 2003, **5074**: 911.
- [53] Hairston A, Stobie J, Tinkler R. Advanced Readout Integrated Circuit Signal Processing [C]. *SPIE*, 2006, **6206**: 62062Z.
- [54] Chen L P, Hewitt M J, Gulbransen D J, et al. Overview of Advances in High-performance ROIC Designs for Use with IRFPAs [C]. *SPIE*, 2000, **4028**: 124.

新闻动态 News

美国 SBIRS GEO-2 卫星下月 即将发射升空

据 www.spacedaily.com 网站报道, 美国空军和洛克希德·马丁公司最近将天基红外系统 (SBIRS) 的第二颗地球同步轨道卫星 (GEO-2) 运

至卡纳维拉尔角空军基地, 该卫星计划于今年 3 月发射升空。

洛克希德·马丁公司的 SBIRS 合同包括 4 个 HEO 有效载荷、4 颗 GEO 卫星以及用于接收、处理和传送红外任务数据的地面设施。目前, HEO-1/2 有效载荷和 GEO-1 卫星已经在轨运行, GEO-5/6 卫星的初期研制工作也已启动。

□ 岳桢千