光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021111203

一种应用于短波红外焦平面的大动态范围像素级 ADC

张思韬[1,2,3,4]，汪鸿祎[1,2,3]，王绪泉[1,2,3]，黄松垒[1,2*]，方家熊[1,2*]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所 传感技术联合国家重点实验室，上海 200083；
2. 中国科学院上海技术物理研究所 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室，上海 200083；
3. 中国科学院大学，北京 100049；4. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 201210）

摘　要： 针对短波红外焦平面的大动态范围需求，设计了一种像素级脉冲频率调制(PFM)模数转换器(ADC)。传统 PFM ADC 采用 DI 输入级，进行弱信号探测时，注入效率会下降，造成动态范围的损失。设计的 PFM ADC 采用 CTIA 输入级，弱信号探测时仍能维持高注入效率；同时采用两档增益和增益自选择技术，使得每个像素都能够根据输入的光电流自动选择增益，在提升动态范围的同时，不增加额外的功耗。在 0.18 μm CMOS 工艺模型下，仿真结果表明该电路的动态范围达到 100.1 dB，单元 ADC 功耗小于 10.54 μW，并且基于所设计的改进型 PFM ADC 设计了规模为 32×32、中心距为 50 μm 的像素级数字化读出电路。

关键词： 短波红外焦平面；大动态范围；脉冲频率调制；CTIA；增益自选择；两档增益

中图分类号： TN402　**文章编号：** 1001－5868(2022)02－0341－06

A Wide Dynamic Range Pixel Level ADC for Short-Wave IRFPA

ZHANG Sitao[1,2,3,4], WANG Hongyi[1,2,3], WANG Xuquan[1,2,3], HUANG Songlei[1,2], FANG Jiaxiong[1,2]

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN; 4. School of Information Science and Technology, Shanghaitech Univerity, Shanghai 201210, CHN)

Abstract: In this paper, a pixel level pulse-frequency-modulation (PFM) ADC was designed for the wide-dynamic-range short infrared focal plane array (IRFPA). When the conventional PFM ADC uses DI to detect weak signal, the injection efficiency will decrease, which result in the loss of the dynamic range. In the designed PFM ADC, the CTIA is used to maintain high efficiency when detecting weak signal. Two levels of gain and self-selected gain technology are used to extend the dynamic range without increasing the power consumption. Self-selected gain technology enables each pixel to choose the gain according to the photocurrent automatically. The circuit was designed and simulated with 0.18 μm CMOS process model. The dynamic range is up to 101.5 dB, and the power consumption of each pixel is only 10.54 μW. A 32×32 pixel level digital readout circuit with the pixel pitch of 50 μm was designed based on the proposed PFM ADC.

Key words: short-wave IRFPA; wide dynamic range; PFM; CTIA; self-selected gain technology; two levels of gain

收稿日期：2021－11－12.
基金项目：国家自然科学基金项目(62175250).
* **通信作者：**黄松垒，方家熊
E-mail: jxfang@mail.stip.ac.cn

0 引言

相对于可见光，短波红外具有更强的透烟、透雾能力[1-2]，更适用于极端天气。同时随着暗电流和噪声的进一步降低[3]，短波红外焦平面展现了微光夜视的能力。自动驾驶系统需要应对极端天气和夜间能见度低的状况，所以短波红外探测器近年来也被应用于自动驾驶系统中。自动驾驶系统在夜间行车过程中需要探测开高照度远光灯的会车车辆和低照度背景下的行人。受光源强度影响，短波探测器的动态范围不足会导致低照度背景和高照度物体信息的丢失，影响成像质量，因此需要发展大动态范围的短波红外焦平面。

脉冲频率调制模数转换器(PFM ADC)具有大动态范围和大电荷容量等特点[4-6]，适用于短波红外焦平面的大动态范围需求，但是也面临着两个问题，第一个是在夜间对低照度背景进行探测时，光电流为皮安甚至飞安量级，传统 PFM ADC 采用直接注入(DI)作为输入级，进行弱信号探测时，注入效率会下降，造成动态范围的损失。第二个问题是增大积分时间内计数器和比较器的最大翻转次数能够提升 PFM ADC 的动态范围，但也会产生更多功耗[7]。

针对上述问题，本文提出一种应用于短波红外焦平面的大动态范围像素级 PFM ADC。该电路采用 CTIA 输入级，在进行弱信号探测时仍具有高注入效率，同时采用两档增益和增益自选择技术兼顾动态范围和功耗。

1 电路工作原理

传统的 PFM ADC 如图 1 所示，包含 DI 输入级、比较器、计数器和 SRAM。光电流在积分电容 C_{int} 上积分，V_{int} 端电压不断上升，当超过阈值电压 V_{th} 时，对 DI 输入级进行复位，B 端产生一个小的脉冲，该脉冲被称为 PFM 信号，同时驱动后一级的计数器加 1。输入光电流与 PFM 信号的频率成正比。

本文所设计的 PFM ADC 如图 2 所示，相较于传统结构，将 DI 输入级用 CTIA 输入级替代，来克服 DI 输入级进行弱信号探测时注入效率下降的缺点，增加了延时单元，避免 CTIA 由于复位时间过短而产生的振荡和复位不完全现象，增加了增益自选择逻辑和两档增益，在提高动态范围的同时不增加功耗。

该结构首先通过增益自选择逻辑进行预积分，根据光电流的大小自动选择增益，得到增益选择结果 Sign。完成增益选择后，开始主积分。首先断开复位管，光电流在积分电容上积分，V_{int} 端电压不断下降，当下降到阈值电压 V_{th} 时，比较器完成翻转，闭合复位管对 CTIA 进行复位，同时驱动计数器进行计数。通过延时单元延长复位时间后，断开复位管，CTIA 重新开始积分。重复上述工作过程至积分时间结束。积分结束后，SRAM 将计数器结果和 Sign 进行存储，等待传输至片外。

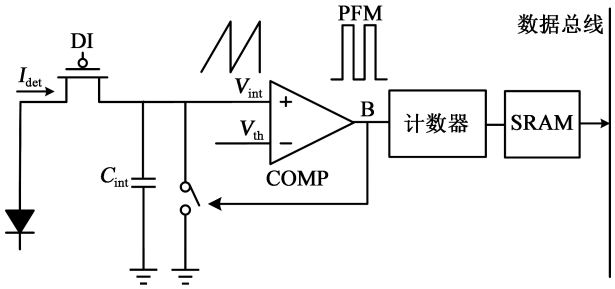


图 1 采用 DI 输入级的传统 PFM ADC 原理图

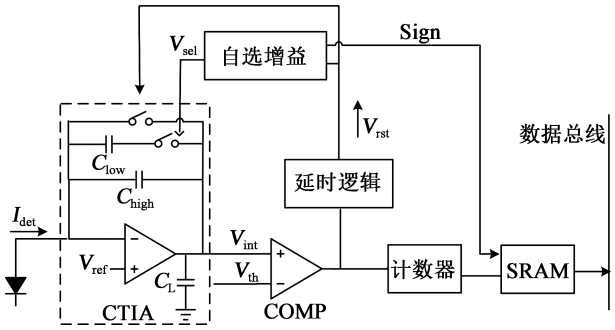


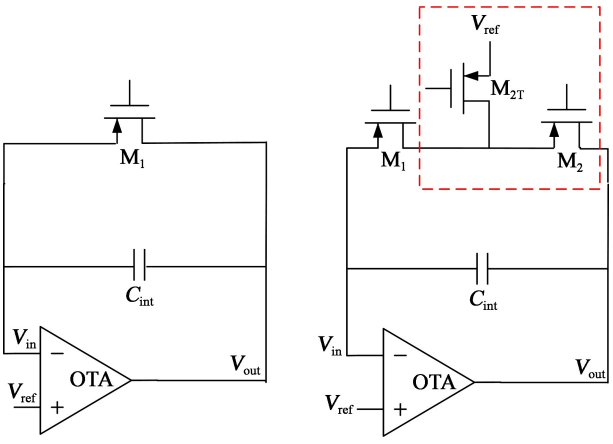
图 2 本文所设计的 PFM ADC 原理图

2 电路设计及分析

2.1 CTIA 输入级优化

短波红外探测器进行弱信号探测时，需要考虑由复位 MOS 管和增益选择 MOS 管的漏电流带来的影响。传统 CTIA 输入级如图 3(a)所示，M_1 为复位管。积分时，亚阈值漏电流 I_{ds} 流过处于截止状态的 M_1。I_{ds} 与 MOS 管的源漏电压 V_{ds} 相关。由于积分时 V_{out} 端电压不断下降，导致 V_{ds} 增大，I_{ds} 也逐渐增大。在对皮安甚至飞安级别的微弱信号进行探测时，亚阈值电流会对流过 C_{int} 的积分电流产生影响，从而对 CTIA 的输出产生一个非线性误差漂移[8]，影响输出线性度。改进的 CTIA 输入级如图 3(b)所示，增加了 M_2 和钳位管 M_{2T}。CTIA 积分时，M_1 和 M_2 截止，钳位管 M_{2T} 导通，将 M_1 漏端的电位拉至 V_{ref}，源端电压由于运放的虚地效应，恒定为 V_{ref}，源漏电压 V_{ds} 为 0，此时 M_1 的亚阈值漏电

流不随着 V_{out} 端电压变化而变化，保持为恒定值且接近于 0。改进后的 CTIA 减小了亚阈值漏电流对输出线性度的影响。



（a）　传统的 CTIA　　（b）　改进后的 CTIA

图 3　传统与改进后的 CTIA

2.2　延时单元

传统 PFM ADC 的复位时间由反相器链产生，大约在 0.5～1.0 ns。由于 DI 输入级结构简单，反相器链产生的延时内能够实现复位。采用 CTIA 输入级的 PFM ADC，由于采用非理想运放，复位时间不足时，会产生振荡现象[9]和复位不完全。

复位不完全是由于运放的有限带宽造成的。由于复位时间过短，无法完全将 CTIA 的输出复位至参考电压 V_{ref}。CTIA 的振荡现象发生在开关截止时，积分电容上的截止电流是因复位时间过短而无法完全衰减导致的，所以复位时间还需要满足 CTIA 的稳定条件[9]。反相器链产生的复位时间约在 0.5～1.0 ns，不足以满足 CTIA 输入级对于稳定性和完全复位的需求。针对本电路，至少需要 50 ns 的复位时间，采用反相器链需要消耗大量的功耗，所以本文设计了新的延时逻辑来代替反相器链，以产生足够的复位时间。

延时逻辑如图 4 所示，分为四个工作阶段：(1)积分启动：通过 V_{ctrl} 信号控制 CTIA 开始积分。(2)复位：比较器的输出信号 V_{comp} 在比较器完成翻转后，产生一个上升沿来驱动 DFF_1，将 V_{switch} 置为高电平，V_{rst} 通过 V_{switch} 和 V_{ctrl} 进行控制，对 CTIA 进行复位。(3)延长复位时间：通过一对相反的时钟信号 CLK 和 CLK_n，控制 DDF_2，DFF_3，N 个延时触发器，DDF_{2N+4} 和 DDF_{2N+5} 来传输 V_{switch} 信号，经过 $N+1$ 个时钟周期后，通过与门对 DFF_1 清 0，V_{switch} 被置为低电平，控制 CTIA 结束复位，开始积分。该结构能够实现 $N+1$ 到 $N+1.5$ 个时钟周期的复位延时，存在 0.5 个时钟周期的误差。提高时钟频率能够有效地减小复位延时的误差，但也意味着在实现延时相同的情况下，需要更多的延时触发器，占用更大的面积。同时，提高时钟频率也会产生更大的功耗。

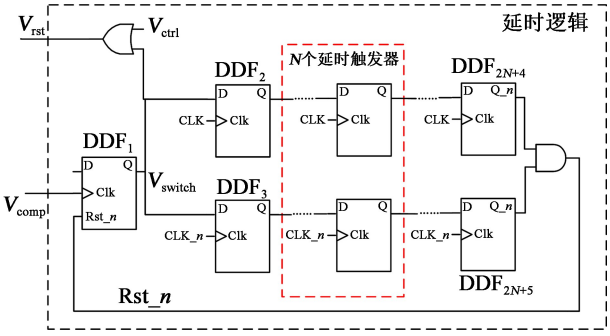


图 4　延时逻辑电路

延长复位时间会影响输出码值与输入光电流关系的线性度，复位需要根据线性度误差公式来确定。理想情况下，输出码值与光电流的关系表示为

$$N_1=\frac{T_{int}I_d}{(V_{ref}-V_{th})C_{int}} \tag{1}$$

式中，I_d 为输入光电流，T_{int} 为积分时间，C_{int} 为积分电容。加入了复位延时 A 的输出码值与光电流的关系如式(2)：

$$N_2=\frac{T_{int}I_d}{A\times I_d+(V_{ref}-V_{th})C_{int}} \tag{2}$$

线性误差的公式为

$$E_{line}=\frac{N_1-N_2}{N_1}=\frac{A}{A+(V_{ref}-V_{th})C_{int}/I_d} \tag{3}$$

根据式(3)，I_d 越大，线性度误差越大。当输入光电流达到 PFM ADC 的最大可测量光电流 I_{dmax} 时，线性误差达到最大值。I_{dmax} 公式如(4)：

$$I_{dmax}=\frac{(V_{ref}-V_{th})C_{int}\times 2^N}{T_{int}} \tag{4}$$

式中，N 为 PFM ADC 的计数器位数，将式(4)代入式(3)得到最大线性度误差公式：

$$E_{line,max}=\frac{A\times 2^N}{A\times 2^N+T_{int}} \tag{5}$$

考虑到最大线性度误差、功耗和面积的影响，最终选定采用 $N=0$ 个延时触发器，复位时间为 1～1.5 个时钟周期，设置时钟频率为 25 MHz，延时逻辑产生的延时 A 约为 40～60 ns。

2.3　两档增益与增益自选择逻辑

传统 PFM ADC 的理论最大动态范围为

$20\log(2^N)$，N 为 PFM 计数器的位数。采用两档增益的 PFM ADC 的动态范围如下：

$$DR = 20\log\left(\frac{(C_{high}+C_{low})}{C_{high}}\right)+20\log(2^N) \quad (6)$$

式中，C_{high} 是小积分电容，C_{low} 是大积分电容，2^N 为计数器的最大翻转次数。采用两档增益的 PFM ADC 的动态范围相较于传统 PFM ADC 提升了 $20\log((C_{high}+C_{low})/C_{high})$，同时不增加积分时间内计数器的最大翻转次数，不产生额外的功耗。

采用两档增益时，通常采用全局增益控制信号。但是在夜间低照度情况下，采用高增益模式，突然遇到强光时，PFM ADC 的计数器会溢出，导致图像的某些部分产生饱和，影响成像质量。为了解决这一问题，采用了增益自选择技术，使得每个像素能够根据输入光电流的大小来自动选择增益。

增益自选择电路如图 5 所示，由一个三态门、两个 D 触发器和 SRAM 组成。分为五个工作阶段。(1)复位：将 V_{sel} 置为低电平。(2)预积分：开启三态门，采用高增益进行预积分，当光电流大于阈值光电流时，仿真波形图如图 6(a)所示，延时单元的输出 V_{rst} 至少产生一个上升沿，CTIA 至少完成一次积分功能和复位操作，V_{rst} 驱动 DFF_1，将 V_{self} 置为高位。当光电流小于阈值光电流时，仿真波形图如图 6(b)所示，V_{rst} 不产生上升沿，CTIA 只完成一次积分操作，在预积分结束后由控制信号复位，V_{self} 保持为低电平。(3)增益选择：PFM ADC 停止工作，CLK_self 输入一个上升沿，将 V_{self} 传输至 DFF_3 的 V_{sel} 端。

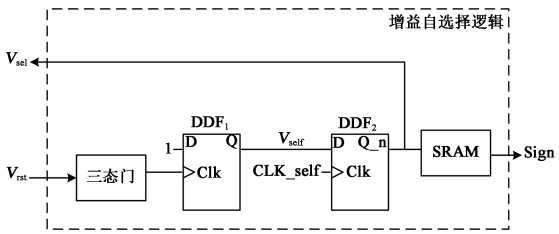
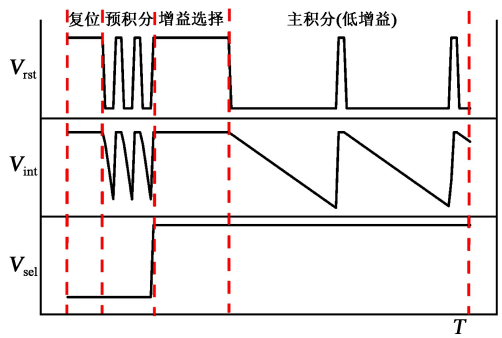
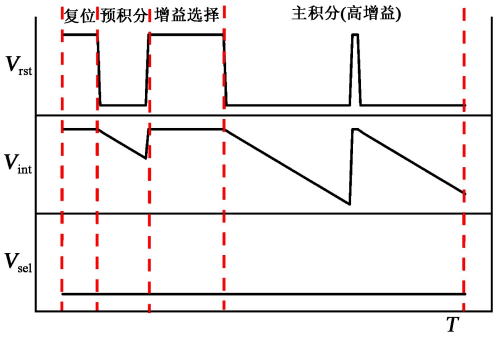


图 5 增益自选择逻辑电路



(a) 大光电流



(b) 小光电流

图 6 增益自选择逻辑电路时序图

当 V_{sel} 为高电平时，采用低增益，当 V_{sel} 为低电平时，仍采用高增益。(4)主积分阶段：关闭三态门，PFM ADC 重新开始工作。(5)增益选择结果读出：主积分阶段完成后，增益选择结果和 PFM ADC 的计数器的码值被存入像素内的 SRAM，增益选择结果作为 PFM ADC 的最高位输出。通过码值的最高位判断使用的增益。

3 仿真结果与版图

3.1 动态范围分析

本段对采用理想 DI 输入级的 PFM ADC 和所设计电路的动态范围进行分析。前者的输出码值与输入光电流的关系通过式(7)和(8)进行计算和仿真：

$$\eta_{DI} = \frac{R_{det}}{R_{det}+\xi V_T/I_p} \quad (7)$$

$$N_{DI} \approx \frac{T\times I_p\times \eta_{DI}}{C_{int}\times(V_{ref}-V_{th})} \quad (8)$$

式中，η_{DI} 为 DI 输入级的注入效率，R_{det} 为探测器电阻，V_T 为 26 mV，ξ 为典型值，I_p 为光电流，C_{det} 为探测器电容，T 为积分时间。设置 $T=20$ ms，$V_{ref}=1.3$ V，$V_{th}=0.8$ V，$C_{int}=10$ fF，$R_{det}=37.5$ GΩ，$C_{det}=1$ pF，$\xi=2$，延时单元的时钟频率为 25 MHz，复位时间约为 40～60 ns，计数器位数 $N=13$，C_{high} 为 10 fF，C_{low} 为 120 fF，对本文所设计电路和采用理想 DI 输入级的 PFM ADC 进行仿真，两者的光电流与输出码值关系如图 7 所示。可测得最小电流为完成一次计数时的输入光电流，可测得最大光电流为 N 位计数器满量程时的输入光电流。相较于传统 PFM ADC，本文所设计的电路可测得的最小光电流更小，同时可测得的最大光电流更大。传统 PFM ADC 的测量范围为 800 fA～2.1 nA，动态范

围为 68 dB，理论动态范围为 $20\log(2^{13})=78.2$ dB，采用 DI 输入级造成了 10.2 dB 的动态范围损失。本文所设计的电路测量范围为 270 fA～27.5 nA，动态范围达到 100.1 dB，动态范围相较于传统 PFM ADC 提升了 32.1 dB。

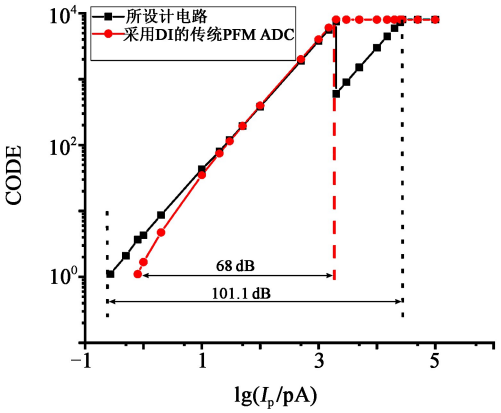


图 7　所设计电路和采用理想 DI 的传统 PFM ADC 的光电流与数字码值关系

3.2　线性度分析

设置仿真参数与 3.1 相同。本文所设计电路的光电流与输出码值的关系如图 8 所示，输入光电流范围为 270 fA～27.5 nA，当输入光电流小于阈值电流 2 nA 时，选择高增益进行转换，线性误差为 0.47%。当输入光电流大于阈值电流 2 nA 时，采用低增益进行转换，线性误差为 0.38%。根据式(1)，采用低增益转换，即接入大积分电容，相较于高增益转换，输出码值 code 与光电流的曲线斜率会降低，图 8 的仿真结果与理论分析相符合。

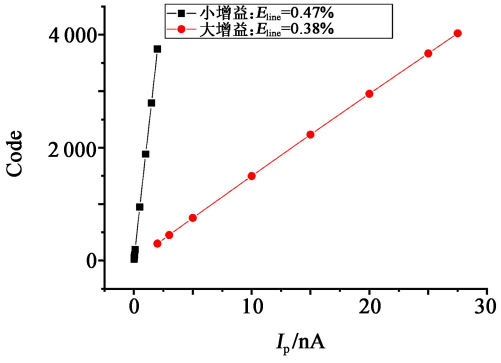


图 8　光电流与数字码值关系图

3.3　功耗分析

本节对比分析本文所设计电路与采用一档增益的 CTIA 输入级 PFM ADC 的功耗。后者采用 10 fF 的积分电容，图 9 是两者的功耗仿真图，设置仿真参数与 3.1 节相同，输入光电流范围为 250 fA～27.5 nA，工作温度为 300 K。当输入光电流最大，计数器达到满量程时，翻转的频率最大，此时的功耗为 PFM ADC 的最大功耗。采用一档增益，当输入 27.5 nA 光电流 I_p 时，翻转频率约为 5 MHz，最大功耗 P_{max} 为 13.75 μW。本文所设计的电路由于采用两档增益和增益自选择逻辑，当输入光电流为 27.5 nA 时，翻转频率约为 400 kHz，最大功耗为 10.54 μW，功耗降低 23.3%。

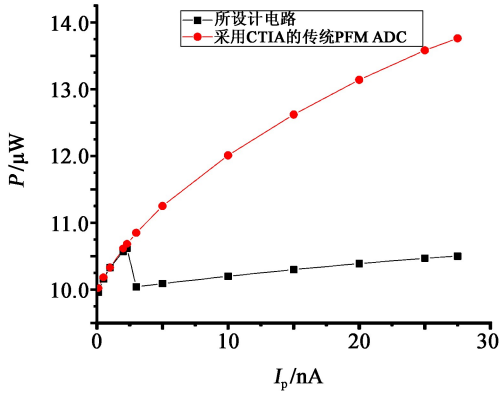
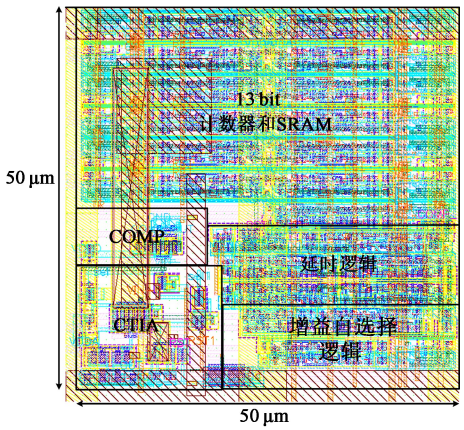


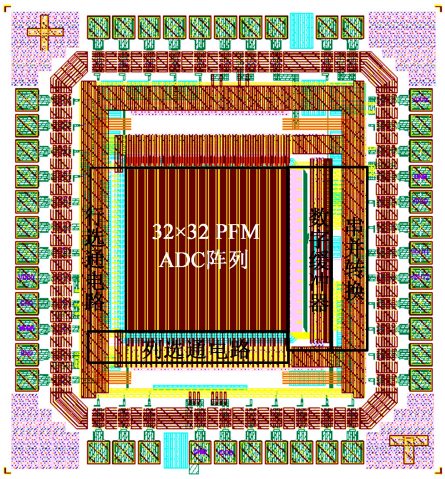
图 9　采用两档增益与一档增益的 CTIA 输入级 PFM ADC 的功耗

3.4　版图

单元电路的版图如图 10(a)所示，采用 180 nm 工艺进行设计，版图面积为 50 μm×50 μm，包含 13 bit 计数器和 SRAM、增益自选择逻辑、比较器、延时逻辑和 CTIA 输入级。同时基于本文所设计的单元电路设计了阵列规模为 32×32，中心距为 50 μm 的读出电路，版图如图 10(b)所示，包含行选通电路、列选通电路、32×32 PFM ADC 阵列以及串并转换和数字缓冲器。



(a)　单元电路版图



(b) 32×32 读出电路版图

图 10 单元电路版图和 32×32 读出电路版图

4 结论

针对短波红外焦平面的大动态范围需求，设计了一种改进型 PFM ADC，采用 180 nm 工艺进行设计，功耗低于 10.53 μW，动态范围达到 100.1 dB。改进型 PFM ADC 由于采用两档增益、CTIA 输入级和增益自选择电路，在相同的计数器位数下，相较于采用理想 DI 输入级的传统 PFM ADC，其动态范围提升 32.1 dB。所设计的电路相较于一档增益的 CTIA 输入级 PFM ADC，最大功耗降低了 23.3%。最后基于改进型 PFM ADC，设计了规模为 32×32 的像素级数字化读出电路，中心距为 50 μm。后续通过电路优化和工艺制程的提升，能够应用于更小中心距、更大规模的短波红外焦平面。

参考文献：

[1] Malchow D, Battaglia J, Brubaker R, et al. High speed short wave infrared (SWIR) imaging and range gating cameras[J]. Proc. SPIE, 2007, 6541: 654106.

[2] Dhar N K, Elizondo L A, Dat R, et al. Advanced imaging systems programs at DARPA MTO[J]. Proc. of SPIE, 2013, 8868(3): 2.

[3] Johnson J F. Hybrid infrared focal plane signal and noise model[J]. IEEE Trans. on Electron Devices, 1999, 46(1): 96-108.

[4] Kayahan H, Ömer C, Yazici M, et al. A new digital readout integrated circuit (DROIC) with pixel parallel A/D conversion with reduced quantization noise [J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 63: 125-132.

[5] Fabrice G, Arnaud P, Michal T, 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[J]. Proc. SPIE, 2010, 7660: 76603T.

[6] Zhang Jiqing, Yao Libin, Chen Nan, et al. High dynamic range digital ROIC for LW infrared FPAs[C]// Sixth Symp. on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications, International Society for Optics and Photonics, 2020, 11455: 1145583.

[7] 袁 媛，李敬国，胡 月，等. 一种高灵敏度数字化 TDI 型红外焦平面读出电路[J]. 激光与红外，2021，51(7)：933-937.
Yuan Y, Li J G, Hu Y, et al. A high sensitivity digital TDI infrared focal plane readout circuit[J]. Laser and Infrared, 2021, 51(7): 933-937.

[8] 卓 毅，岳冬青，李敬国，等. 短波高光谱红外焦平面系统电路设计[J]. 激光与红外，2018，48(11)：1382-1385.
Zhuo Y, Yue D Q, Li J G, et al. A hyperspectral SWIR FPA ROIC design[J]. Laser and Infrared, 2018, 48(11): 1382-1385.

[9] Huang Zhangcheng, Huang Songlei, Zhang Wei, et al. Study on low noise multichannel-weak-signal Readout circuit[C]// Proc. of 2010 The 3rd Inter. Conf. on Power Electronics and Intelligent Transportation System (Volume 6), 2010.

作者简介：

张思韬(1996—)，男，上海市人，硕士研究生，主要研究方向为短波红外焦平面数字化读出电路；

黄松垒(1984—)，男，福建省莆田市人，博士，副研究员，从事超大规模集成电路设计方向的研究；

方家熊(1939—)，男，安徽省黄山市人，研究员，中国工程院院士，研究方向为红外传感器。