

一种单一增益下实现红外探测器大动态范围读出方法研究

汪鸿祎^{1,2,3}, 张思韬^{1,2,4}, 王绪泉^{1,2,3}, 张永刚^{1,2}, 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, 上海 201210)

摘要: 目前红外探测器采用传统读出方法很难通过一次积分实现其本身的动态范围。为实现红外探测器的大动态范围不换挡读出, 引入脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation, PFM)结构, 同时为保证弱信号时的注入效率, 结合 CTIA 输入级, 对红外探测器不换挡大动态范围读出方法进行研究。提出一种 CTIA 输入级脉冲频率调制(PFM)读出方法, 在系统级层面搭建实验系统并结合短波红外 InGaAs 单元探测器进行数字量化实验。详细分析了强信号时由系统结构延迟时间引起的转换线性度问题, 并建立非理想条件下的数字量化转换模型。实验结果显示, 提出的 CTIA 输入级 PFM 红外探测器读出方法动态范围达到 97 dB, 为红外探测器不换挡大动态范围读出提供了一种可行方案, 并为数字化读出电路设计奠定理论基础。

关键词: 脉冲频率调制; CTIA 输入级; 大动态范围; 铟镓砷; 数字化读出

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

A study on a method to achieve large dynamic range readout of infrared detectors with a single gain

WANG Hong-Yi^{1,2,3}, ZHANG Si-Tao^{1,2,4}, WANG Xu-Quan^{1,2,3}, ZHANG Yong-Gang^{1,2},
HUANG Song-Lei^{1,2*}, FANG Jia-Xiong^{1,2*}

(1. State Key Laboratories of Transducer Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: The current infrared detectors are difficult to achieve their own dynamic range by primary integration using traditional readout methods. In order to achieve large dynamic range readout of infrared detectors without changing gears, this paper introduces Pulse Frequency Modulation (PFM) and adopts the CTIA input stage structure to ensure the injection efficiency when the signal is weak, and investigates the method of large dynamic range readout of infrared detectors without changing gears. A CTIA input-level pulse frequency modulation (PFM) readout method was proposed to build an experimental system at the system level and conducted digital quantization experiments with short-wave infrared InGaAs cell detectors. The conversion linearity problem caused by the delay time of system structure at strong signal was analyzed in detail, and a digital quantization conversion model under non-ideal conditions was established. The experimental results show that the dynamic range of the proposed CTIA input stage PFM IR detector readout method reaches 97 dB, which provides a feasible solution for large dynamic range readout of IR detectors without changing gears,

收稿日期: 2022-01-19, 修回日期: 2022-07-07

Received date: 2022-01-19, revised date: 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(62175250)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62175250)

作者简介(Biography): 汪鸿祎(1998—), 女, 博士研究生, 主要研究领域为红外传感器读出电路设计. E-mail: wanghongyi@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: huangsl@mail.sitp.ac.cn, jxfang@mail.sitp.ac.cn

and lays a theoretical foundation for digital readout circuit design.

Key words: pulse frequency modulation, CTIA input stage, high dynamic range, InGaAs, digital readout circuit

引言

随着红外成像技术的应用发展,对于微光条件下的探测以及高低背景等复杂环境中的高质量成像的需求越来越迫切^[1],如微光夜视红外相机,汽车夜间辅助驾驶等应用场景,这就给红外探测器的动态范围以及抗干扰性能等提出了较高要求。读出动态范围越大,意味着探测器的读出电路可以很好地处理、输出复杂环境下的目标、背景等的图像信息^[2]。

红外探测器读出系统的动态范围由探测器本身动态范围和其读出电路动态范围共同决定。探测器的动态范围由器件本身材料性质所决定,现在红外探测器的动态范围可涵盖6个数量级以上也即120 dB^[3]。读出电路的动态范围上限取决于电路的输出电压摆幅,下限取决于电路噪声电平。目前的读出电路(ROIC)加工工艺一般采用标准CMOS工艺(3.3 V/5 V),最大输出电压摆幅一般不超过3 V,即使经过降噪处理,最小噪声也约为0.3 mV,则读出电路的最大读出动态范围不超过80 dB,远小于探测器本身动态范围120 dB。可见,读出电路的动态范围严重限制了红外探测器系统的大动态范围读出。

典型的红外探测器读出电路的动态范围主要受电路的积分时间、积分电容、以及输出饱和电压等限制,积分电容存储的电荷量正比于电容与输出饱和电压的乘积。电路输出电压摆幅受到工艺限制且随着工艺发展而逐渐下降。积分电容的大小受单元电路版图面积和有限的CMOS工艺单位面积电容率限制,随着像元尺寸不断缩小积分电容很难做大,动态范围受到严重压缩。可见传统的读出方法很难在一次积分的条件下实现红外探测的大动态范围不换挡读出^[4]。

为扩展红外探测器的读出动态范围,一些大动态范围读出的方法被提出,主要采用多档增益选择,以及多次曝光、图像融合等技术^[5]。这些方法的根本思路是基于换挡的思想,根据不同的场景进行切换,通过有限的读出动态范围分别对弱信号及强信号场景进行探测,以实现高低背景工作的能力,实现系统的大动态范围读出。可见基于换挡的思

想未从根本上突破动态范围的限制,同时由于需要根据场景进行切换,存在信号处理时间较长,很难适应高帧频成像要求的场景,复杂的结构也不利于较大规模焦平面成像电路的发展要求。同时多次曝光技术也会带来高数据率和数据量较大的问题^[6]。为了实现红外探测器不换挡前提下的大动态范围读出,本文引入一种新型的脉冲频率调制结构(PFM),将对电压的量化转化为数字域的处理,可以以较小的积分电容实现超大的电荷处理能力,改变了传统动态范围的提高受积分电容容量的限制,给红外探测器大动态范围不换挡读出提供了一种新的解决思路^[7]。

PFM脉冲频率调制结构在长波及甚长波等红外探测器读出结构中可见应用,国内外关于图像传感器大动态范围读出的研究部分也具有较好的结果。昆明物理研究所基于PFM结构提出一种两步量化ADC的框架,电路仿真读出动态范围为108 dB^[8]。法国sofradir和美国MIT林肯实验室都有将PFM结构应用于红外探测器数字化读出技术的相关报道^[9-11]。但是目前关于PFM结构的应用多采用直接注入(Direct Injection, DI)输入级,在弱信号探测时注入效率下降将造成动态范围的损失。对于低噪声及弱背景等情况,红外探测器多采用电容反馈跨阻放大器(Capacitive Trans-Impedance Amplifier, CTIA)输入级结构^[12]。由于其具有偏置稳定,注入效率高,带宽大等优点,CTIA也是目前红外焦平面读出电路最常用的输入级电路之一。为适应红外探测器在弱信号场景下的探测需求,提高光信号注入效率,本文提出一种采用电容反馈跨阻放大器(CTIA)输入级结构的脉冲频率调制型读出方法,在系统级层面搭建CTIA和PFM结构,并采用短波红外InGaAs单元探测器进行光电流数字量化实验,对红外探测器的大动态范围不换挡读出技术进行研究。

1 PFM脉冲频率调制读出方法

脉冲频率调制(PFM)电路是一种根据输入信号来对输出脉冲频率进行调控的一种方法,输出信号的频率随输入信号的幅值而变化。传统的PFM采用DI结构作为输入级,由积分电容、复位结构以及

比较器几个部分组成,其结构如下图 1(a)所示。光电流在电容 C_{int} 上进行积分,转换为电压的变化。积分电压连接在比较器的同相输入端,同时在比较器反相输入端连接一固定的参考电压 V_{ref} ;光电流积分作用使积分电容两端电压产生变化,当电压低于比较器参考电压 V_{ref} 时,比较器输出翻转。此时输出的翻转信号反馈至复位电路作为控制,使得复位电路导通,电容上存储的电荷被清除,至此完成一次积分电容的积分与复位。如此周而复始,比较器输出端便产生一系列的脉冲,如图 1(c)所示。脉冲的频率 f_{pulse} 由输入信号强度线性调控:

$$f_{pulse} = \frac{I_p}{(V_{rst} - V_{ref}) \cdot C_{int}} \quad (1)$$

为保证在弱信号场景下的注入效率,提高读出系统的动态范围,本文提出一种采用电容反馈跨阻抗放大器(CTIA)输入级的 PFM 脉冲频率调制读出方法,结构如下图 1(b)中所示;光电流在输入级放大器的差模输入节点处引起的微小变化经过高增益运放后放大,通过反馈电容 C_{int} ,输出电压的急剧变化耦合到输入节点,使光生电荷流入反馈电容形成积分效应。由于采用高开环增益的运算放大器和电容的反馈作用,积分电容输入端电压接近于复位参考电压 V_{rst} ,只要改变探测器的偏置就可以使探测器工作在零偏压状态。CTIA 输出端 V_{int} 连接比较器输入端,由于输入光电流的积分效应,使得输出端电压下降,当低于参考电压 V_{ref} 时引起比较器翻转;比较器输出的脉冲通过反馈回路控制复位结

构,对 CTIA 输入级中的反馈电容 C_{int} 进行充放电控制,进而产生与输入光强相关的脉冲输出,系统输出节点示意图如图 1(c)所示。通过计数器对输出脉冲进行计数,便可完成对入射光强的量化,实现红外探测器的数字化输出。将 CTIA 输入级结构与 PFM 结构相结合,这有利于降低探测器的噪声,同时也保证了光信号的响应线性度和注入效率。

在一定计数周期 T_{count} 内对输出的脉冲进行计数,可推算入射光功率 P_r 与数字码值 N_{pulse} 之间的对应关系为

$$N_{pulse} = \frac{P_r \cdot T_{count} \cdot \eta \cdot q \cdot \lambda}{C_{int} \cdot \Delta V \cdot h \cdot c} \quad (2)$$

其中 η 为红外探测器的量子效率, q 为电子电荷量, λ 为入射光波长, C_{int} 为积分电容值, h 为普朗克常量, c 为光速。理论上对于确定的红外探测器,当输入光波长一定,脉冲计数码值 N_{pulse} 与入射光功率 P_r 二者之间成线性关系。根据其工作原理,可得系统结构的动态范围 DR_{PFM} :

$$DR_{PFM} = 20 \lg \frac{P_{max}}{P_{min}} = 20 \lg N_{max} \quad (3)$$

表达式中 P_{max} 与 P_{min} 为读出系统能检测到的最强和最弱光功率, N_{max} 为系统最大数字量化码值。CTIA 输入级的 PFM 脉冲频率调制方法的本质是采用小积分电容对光电流进行多次积分复位,通过将光强转换为脉冲个数完成对入射光强的数字量化。该方法突破了传统红外探测器读出电路动态范围受积分电容容量的限制,且能够在不换挡的基础上

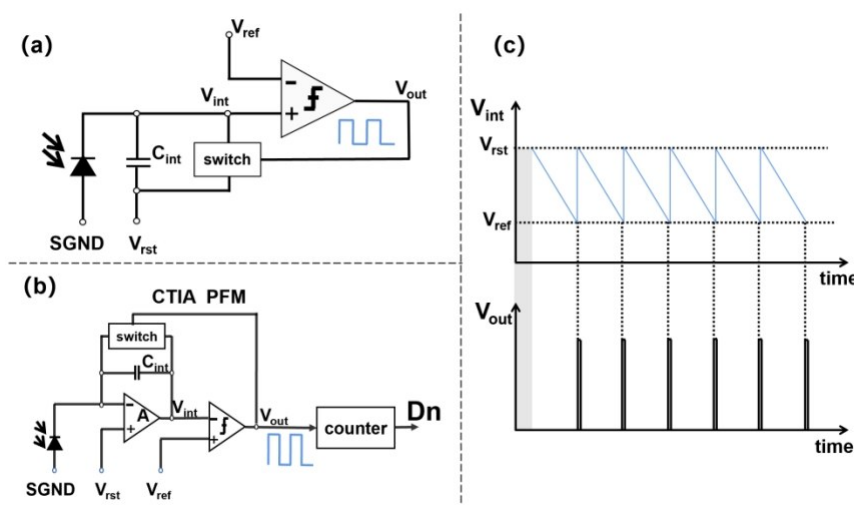


图1 PFM脉冲频率调制读出结构:(a)DI输入级的传统PFM结构,(b)采用CTIA注入级的PFM结构,(c)输出节点脉冲示意图

Fig. 1 The structure of pulse frequency modulation readout method, (a)conventional PFM structure with DI input stage, (b) PFM structure with CTIA input stage, (c) pulse output

实现较大动态范围读出,其动态范围由转换精度所决定,计数位数 N 越多,动态范围越大。

2 设计与实验

基于本文提出的 CTIA 输入级的 PFM 脉冲频率调制型红外探测器读出方法原理,采用分立元件在系统层面实现其功能结构,以验证大动态范围不换挡读出的功能。系统构成原理框图如图 2(a)所示,包括红外探测器、CTIA 输入级结构、PFM 脉冲频率调制结构、FPGA 运算模块和数码管显示模块。其中红外探测器采用直径为 1 mm 的 $\phi 1$ 型短波红外 InGaAs 单元探测器,光谱响应范围为 900~1 700 nm 波段;采用德州仪器公司的 OPA350 运算放大器和 TLV3201 比较器以及 TMUX6119 精密开关,搭建 CTIA 输入级和 PFM 结构,构成读出结构的信号转换模块。积分电容为 1nF,电容复位电压 V_{rst} 设置为 2.5 V,比较器参考电压 V_{ref} 为 1.25 V。采用 Spartan-6 系列 FPGA 设计产生各个模块的驱动并对数据进行运算处理,FPGA 运算模块对输出脉冲进行数字量化计数。为了更加直观地得到对入射光强的数字量化结果,采用数码管显示模块对数码值进行显示输出;搭建的验证系统实物如图 2(b)所示。

基于上述的 PFM 脉冲频率调制结构读出系统,配合 InGaAs 单元探测器进行了对应光强的数字量化实验,实验光路示意及装置如图 3 所示。为了获得稳定可度量的入射光强,光源采用 1342 nm 连续激光器,可调衰减片定量地对输入光强进行控制,

采用光功率计定量确定输入的光强值。

实验过程中,通过调节衰减片,控制输入光强线性递增,并记录实验系统对应的量化数字码值。为了排除环境杂散光的影响,实验在黑暗环境中进行,仅由激光器作为输入光源,并将测量数值减去背景同时计数多组求均值处理。得到数字量化实验结果的对应曲线如图 4 所示:当输入光强小于一定值时,量化结果值近似稳定;随着光强增大,量化结果值随之增大并最终趋于饱和,定义系统的动态范围为可测量的非稳定输出最小值至输出达到饱和值之间的输入光强范围;本系统可测量的最小光强为 0.2 μW ,最大非饱和光强为 14.9 mW,由实验数字量化结果可以看出,此脉冲频率调制读出方法测量动态范围达到 97 dB。理论上系统可测量程达到 2^{22} ,由实验结果得到等效的有效位数 ENOB 为 15.8 bits。计算得出系统的读出噪声约为 2LSB;系统整体功耗为 198 mW(3.3V 供电),其中 FPGA 模块功耗占据较大比重,去掉 FPGA 模块前端电路功耗为 33 mW。

3 结果分析

由图 4 实验结果可知,当光强较弱时,量化结果近似稳定,此时为系统可测最低输入光强;随着入射光强增大,数字量化结果近似线性递增,对应量化关系接近式(2)中理想线性模型趋势。当入射光强增大时,可以看出实验结果偏离理想线性模型,逐渐趋于一峰值,随后出现下降趋势。分析其原因,在非理想条件下,对于 CTIA 输入级的 PFM 结

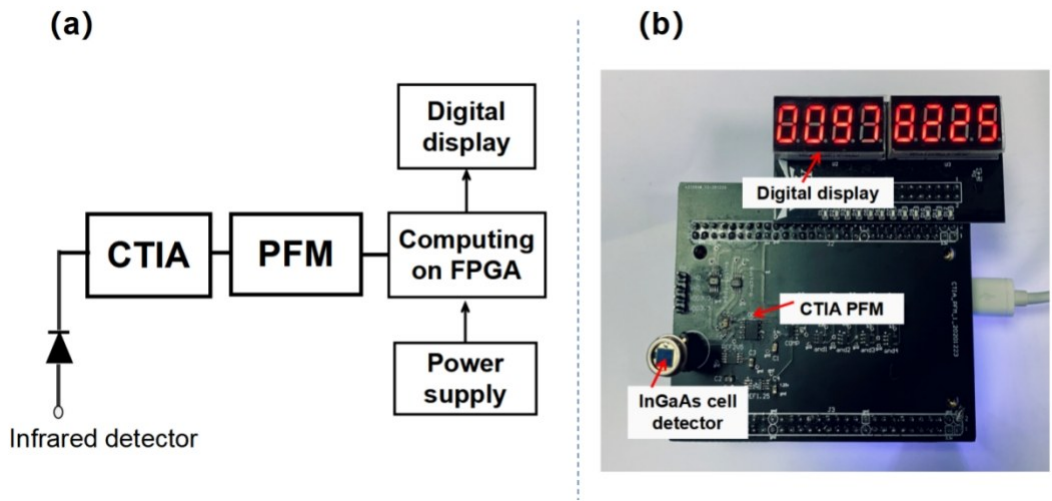


图2 CTIA 输入级的 PFM 脉冲频率调制方法实验原理 (a)实验系统结构,(b)系统实物图
Fig. 2 The principle of PFM readout method with CTIA input stage (a) experimental system structure, (b) physical diagram of the experiment

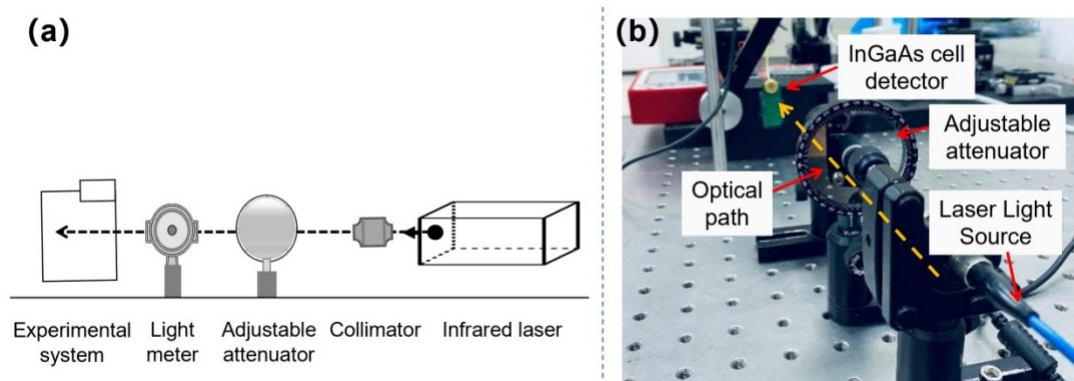


图3 PFM脉冲频率调制方法实验 (a)实验光路示意图, (b)实验实物图

Fig. 3 Experimentation of PFM readout method (a) the schematic diagram of the experimental optical path, (b) physical diagram of the experiment

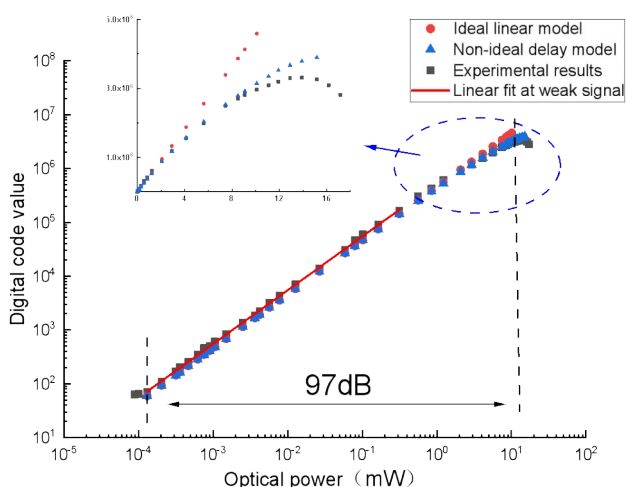


图4 CTIA输入级PFM结构数字量化实验结果

Fig. 4 The result of digital quantization experiment of the PFM with CTIA input stage

构,由于比较器的开环增益,翻转速度,电路分布电容以及复位开关延时的因素,使积分电容放电至比较器参考电压的时间和输出脉冲之间存在延迟时间 Δt 。当入射光强增大时 Δt 的影响逐渐明显,这将会影响到系统对光电流的转换精度以及光电流对输出脉冲频率调控的线性度^[13]。如图5所示,此种情况下,系统光电流与输出数字码值 N 的关系为

$$I_p = \frac{C(V_{reset} - V_{ref})}{\frac{T}{N} - \Delta t} = \frac{Q_{LSB}}{\frac{T}{N} - \Delta t} \quad (4)$$

式(4)中可以看出电容一次积分最小电荷量 Q_{LSB} 与 Δt 影响读出系统对输入光电流的转换精度。 Δt 与 Q_{LSB} 的比值越小,PFM结构对光电流的分辨力越强。

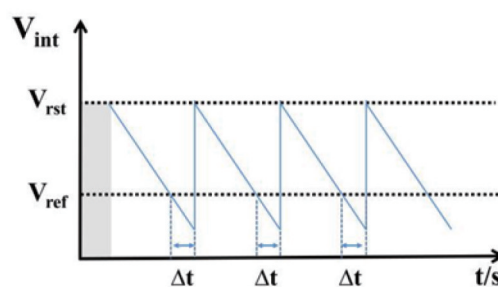


图5 PFM脉冲频率调制结构的延迟

Fig. 5 The delay time of PFM structure

对于不同的输入光电流对应的量化数字码值之间关系有

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_{p1}}{I_{p2}} \cdot \frac{1 + I_{p2} \cdot \frac{\Delta t}{Q_{LSB}}}{1 + I_{p1} \cdot \frac{\Delta t}{Q_{LSB}}} \quad (5)$$

可见延迟时间 Δt 的存在,影响了PFM脉冲频率调制读出结构的数字量化线性度,使得实验曲线偏离理想线性模型,具体可见图4中强光条件下的数字量化结果。不同光电流对应的量化偏差主要由延迟时间 Δt 和最小电荷处理量 Q_{LSB} 的比值有关,为保证相应转换线性度应有:

$$\frac{\Delta t}{Q_{LSB}} \ll 1 \quad (6)$$

最小电荷处理量 Q_{LSB} 和光电流量化偏差决定了PFM结构的读出性能,如何获得更高的光电流分辨率,平衡功耗与转换精度之间的关系以及优化量化线性度,是PFM读出结构需要重点关注的问题。

考虑系统结构延迟时间 Δt 构成,包括比较器上升时间 t_r 、下降时间 t_f ,复位开关响应时间 t_s 以及电容放电缓冲时间 t_d 组成,如图6(a)所示。其中 $t_r+t_f+t_s$ 为

受器件本身性能参数限制的固定值,当忽略放电缓冲时间 t_e 时,系统输出脉冲最高频率 f_{\max} 受分立器件性能参数限制,也即存在一个最大的数字量化码值。考虑积分电容放电缓冲时间 t_e 呈指数增长趋势,则随着光强变大,脉冲频率增大的同时也存在着系统延迟时间 Δt 的增大也即输出脉冲宽度增加。另一方面,随着光电流的增大,输出脉冲频率增加,使得脉冲低电平持续时间不断减小,当间距小于一定值时比较器来不及完全翻转,使得脉冲之间出现重叠,脉冲个数减少,如图6(b)所示。固定计数周期内对脉冲上升沿进行采集计数,则数字量化码值 N_{pulse} 将下降。

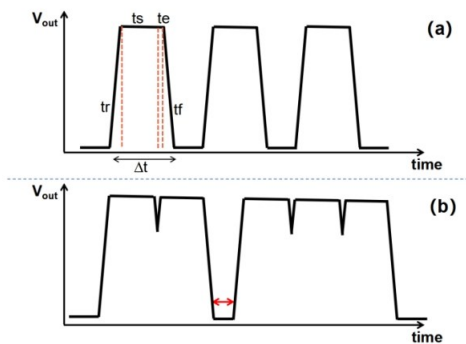


图6 非理想条件下脉冲输出:(a)延迟时间 Δt 构成;(b)强光输入时脉冲个数减少

Fig. 6 Pulse output under non-ideal conditions: (a) composition of the delay time Δt ; (b) reduced number of output pulses with strong light input

经过上述分析,影响系统动态范围的主要因素有积分电容最小电荷处理量 Q_{LSB} ,以及器件系统结构延迟时间 Δt ;前者决定了一次积分复位的最小电荷量, Q_{LSB} 越小对光电流的分辨力越强,计数精度越高;后者决定了输出脉冲的最高频率,也即动态范围的上限。在电路设计中通过设计高性能的放大器及比较器,尽量减少系统结构延迟时间,可以提高系统受限的最高脉冲频率,进一步提高动态范围。

4 总结

由于传统的红外探测器读出很难通过一次积分实现其本身的动态范围,本文提出了一种不换挡前提下实现红外探测器大动态范围的读出方法,引入脉冲频率调制结构实现读出动态范围的扩展,同时采用CTIA输入级结构保证了弱信号时的注入效

率。依据此方法在系统级层面搭建实验验证系统,并采用短波红外InGaAs单元探测器进行了光电流对应数字量化实验,读出动态范围达到97 dB。针对输入光强增大时,实验结果偏离理想线性模型的现象,详细分析了由系统结构延迟时间引起的转换线性度问题,并建立了非理想条件下的数字量化转换模型。为红外探测器在微光探测等复杂背景下的应用提供了一种单一增益的大动态范围数字读出方案,避免了传统大动态范围读出方案信号处理时间较长以及结构复杂的问题,利于提高其环境适应力,为后续实现芯片级小型化红外焦平面集成电路设计奠定基础。

References

- [1] Chen T.-S. Large dynamic range digital pixel unit[J]. *Electronic Products World*, 2018, **25**(9):4. (陈同少. 大动态范围数字化像素单元[J]. *电子产品世界*, 2018, **25**(9):4.)
- [2] Sun Jing, Xu Yan, Duan Luyin, *et al.* A review of high dynamic range (HDR) technology[J]. *Information Technology*, 2016, **40**(5):6. (孙婧, 徐岩, 段绿茵, 等. 高动态范围(HDR)技术综述[J]. *信息技术*, 2016, **40**(5):6.)
- [3] Liu Zhaohui. Study on the response characteristics of semiconductor lasers and photodetectors[D]. Xi'an University of Technology, 2019. (刘昭辉. 半导体激光器和光电探测器响应特性的研究[D]. 西安理工大学, 2019.)
- [4] Chu Peisong. Research on High Sensitivity Infrared Focal Plane Large Dynamic Range Readout Circuit[D]. University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technology Physics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (褚培松. 高灵敏度红外焦平面大动态范围读出电路研究[D]. 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2020. DOI:10.27581/d.cnki.gksjw.2020.000013.)
- [5] Tao Kunyu, Li Fuwei, Zhou Yanping, *et al.* Research on dynamic range adaptive technology for infrared focal plane imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(2):265~269. (陶坤宇, 李福巍, 周彦平, 等. 红外焦平面成像系统动态范围自适应技术研究[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(2):265~269.)
- [6] Gao Zhiyuan. Research on CMOS image sensor with large dynamic range based on multiple exposure technique[D]. Tianjin University, 2015. (高志远. 基于多次曝光技术的大动态范围CMOS图像传感器研究[D]. 天津大学, 2015.)
- [7] Bai Piji, Yao Libin. Third-generation infrared focal plane detector readout circuit[J]. *Infrared Technology*, 2015, **37**(02):89~96. (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**(02):89~96.)
- [8] Zhong S, Mao W, Zou M, *et al.* A two-step adc architecture for high dynamic range and high sensitivity image sensor[C]// Sixth Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Application. 2020.
- [9] Bisotto S, Borniol E D, Mollar D L, *et al.* A 25 μm pitch LWIR staring focal plane array with pixel-level 15-bit ADC ROIC achieving 2mK NETD[J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2010, **7834**:

- 78340J-78340J-11.
- [10] 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 2mK NETD [J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2010, 7660.
- [11] Schultz K I, Kelly M W, Baker J J, *et al.* Digital-Pixel Focal Plane Array Technology.
- [12] Li Xue, Shao Xiumei, Li Tao, *et al.* Developments of short-wave infrared InGaAs focal plane detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(01):64–71.(李雪,邵秀梅,李陶,等.短波红外 InGaAs 焦平面探测器研究进展[J].*红外与激光工程*), 2020, **49**(01):64–71.
- [13] Chen Xiao, Li Lihua, Liang Yan, *et al.* Progress of very high sensitivity infrared detector readout circuit [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **49**(1):7.(陈虢,李立华,梁艳,等.甚高灵敏度红外探测器读出电路研究进展[J].*红外与激光工程*), 2020, **49**(1):7.