

脉冲序列图像传感器的噪声和误差分析

高坤^{1,2**}, 徐江涛^{1,2}, 高志远^{1,2*}

¹天津大学微电子学院, 天津 300072;

²天津市成像与感知微电子技术重点实验室, 天津 300072

摘要 脉冲序列式图像传感器是一种高速仿生视觉图像传感器,其成像质量受噪声的影响而下降。其中,空间噪声源于比较器等器件的失配,时间噪声源于随机性噪声和同步读出机制下的单码闪烁噪声。本文基于噪声研究和传感器原理建立了噪声模型,仿真预测了不同光电流和积分压降等参数下噪声引起的时间误差率。结果表明:积分压降的增加会减小单码闪烁噪声导致的时间误差率的波动及其他噪声引起的时间误差率;光电流的增加会增大单码闪烁噪声引起的时间误差率的波动;结电容的增加会增大时间噪声引起的时间误差率。最后测试了芯片在脉冲间隔重建方式下的噪声特性,验证了上述分析的正确性。研究结果对于优化脉冲序列传感器的设计、处理噪声和重建出稳定的图像具有指导意义。

关键词 成像系统; 脉冲序列图像传感器; 噪声分析; 同步读出机制; 时间误差; 脉冲间隔波动

中图分类号 TP212

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1011003

Noise and Error Analyses of a Pulse Sequence Image Sensor

Gao Kun^{1,2**}, Xu Jiangtao^{1,2}, Gao Zhiyuan^{1,2*}

¹School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

²Tianjin Key Laboratory of Imaging and Sensing Microelectronics Technology, Tianjin, 300072, China

Abstract The pulse sequence image sensor is a high-speed bionic image sensor, and its image quality deteriorates because of the influence of noise. Spatial noise is attributed to the mismatch of the comparator and other devices, and the temporal noise arises from random noise and single-code flicker noise under the synchronous readout mechanism. This study establishes a noise model based on noise research and the sensor principle, and simulates and predicts the time error caused by noise under different parameters such as photocurrent and integral voltage drop. Results show that increasing the integral voltage drop will reduce the fluctuation of the time error rate caused by single-code flicker noise and the size of the time error rate caused by other noise sources. Further, increasing the photocurrent will increase the fluctuation of the time error rate caused by single-code flicker noise and increasing the junction capacitance will increase the time error rate caused by temporal noise. Finally, the noise characteristics of a chip are evaluated in the pulse interval reconstruction mode and the aforementioned analysis is validated. The findings of this study have guiding significance for optimizing the design of pulse sequence sensors, handling noise, and reconstructing stable images.

Key words imaging systems; pulse sequence image sensor; noise analysis; synchronous readout mechanism; time error; pulse interval fluctuation

1 引言

随着无人驾驶、无人机、姿态追踪和机器视觉

等新兴视觉应用的发展,高时间分辨率成像的需求日益增加,因此期望相机有尽可能高的帧频来更精准地采集时间节点上的信息。随着存储、传输技术

收稿日期: 2021-04-08; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(61774110)

通信作者: *gaozhiyuan@tju.edu.cn; **gaok@tju.edu.cn

的发展及集成工艺的进步,成像系统的帧频不断提升,随之引发了传统图像传感器输出数据量和功耗的持续增加,制约着帧频的进一步提升。

动态视觉传感器(DVS)能以较低的输出数据量来捕获高速运动物体,获得了研究人员的广泛关注^[1-2]。DVS检测输入光强的变化,达到触发阈值后异步输出事件,其采用地址事件表征(AER)^[3-4]的方式输出数据,存在多个事件对其读出电路同时提出需求的情况,因此需要仲裁模块对事件进行仲裁输出。复杂的运动场景中会出现较多的事件触发,仲裁模块来不及仲裁时将会丢失场景信息^[5]。此外,DVS仅捕捉光强变化的场景,而放弃了背景信息,丧失了信息的完备性^[6]。为了解决上述问题,脉冲序列图像传感器应运而生^[7-8],其借鉴了生物视觉信息异步脉冲化和多细胞并行化的特征,用时间域的连接脉冲信号表示场景信息,极大地降低了数据量。该传感器通过高速扫描将每个像素的数据快速输出,在捕捉高速场景的同时保留了背景信息,具有高速、数据量低和信息完备的特点,在机器视觉和动态场景捕获等方面具有很大的应用价值^[9]。

图像传感器的一个重要指标是光强的量化精度,而脉冲序列图像传感器受空间噪声和时间噪声^[10-11]的影响,其脉冲不能在精准的时间触发,量化精度下降。国内外研究人员对图像传感器中的噪声进行了大量的研究^[12-13],但脉冲序列图像传感器有其特殊的像素结构和工作方式,因此需要对其噪声及引起的误差进行研究。此外,脉冲序列图像传感器除了受空间噪声和时间噪声带来的误差影响外还存在一种由本身异步复位同步读出机制引起的误差。脉冲传感器的误差主要和光强的量化方式及脉冲数据的读出方式有关,其中,光强量化方式有脉冲频率调制(PFM)和脉冲间隔调制(PWM)两种,读出方式有异步AER通信和同步读出这两种。研究人员对采用PFM、PWM量化光强和采用异步通信方式下的脉冲传感器的误差进行了研究^[14-15],但同步读出机制下的误差研究少有展开分析。脉冲序列图像传感器工作在同步读出的机制下,该机制下的误差将会影响传感器的量化精度,即使在均匀光下,也会导致脉冲间隔出现单个码值的波动,进而引起还原图像中像素的波动和闪烁,其表现类似时域中的一种噪声,本文将其称为单码闪烁噪声,该单码闪烁噪声会给数据的处理、图像和视频的重建带来影响。

上述的空间噪声、时间噪声和单码闪烁噪声都将会导致传感器触发脉冲间隔的偏差,影响传感器脉冲数据的进一步处理,降低了视频和图像的成像质量。因此,本文对脉冲序列图像传感器存在的噪声特性进行分析并建立了噪声模型,利用模型仿真预测了不同参数下噪声造成的脉冲触发时间的误差,然后对传感器异步复位同步读出机制下的单码闪烁噪声进行了分析,研究了该噪声对脉冲间隔数据的影响,并提出了一些相关的降噪和处理意见。最后通过芯片测试,验证了噪声分析和脉冲间隔重建方式下模型仿真对各参数下噪声影响预测的正确性。

2 脉冲序列图像传感器工作原理

脉冲序列图像传感器通过单比特数据表示光强信息,其像素进行异步复位、同步读出,其像素结构如图1所示,包括光电二极管、比较器、自复位模块和读出模块。像素工作时,光电二极管积分产生光电流,其两端电压下降。当二极管电压 V_{pd} 达到阈值 V_{ref} 后比较器触发,触发的脉冲信号被存储到复位模块的寄存器中。当自复位模块检测到比较器触发的脉冲信号后产生复位信号将光电二极管复位到初始状态,并开始新的光信号积分。在读出过程中,当以一帧时长为周期的扫描信号锁定该像素时,读出模块将寄存器中的数据输出到列总线上,接着寄存器清零。像素在上述操作方式下进行感光并输出脉冲序列,其中1和0分别代表像素触发和未触发,而1出现的频率和两个1之间的间隔与光强的大小相关。脉冲序列中相邻触发脉冲之间的间隔称作脉冲间隔,是脉冲触发所需的帧数。

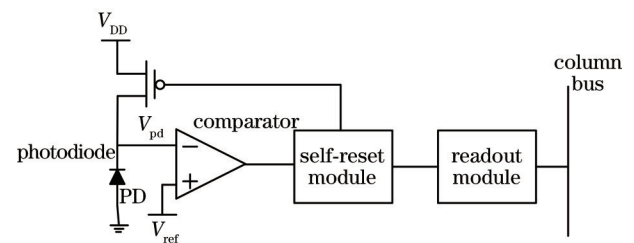


图1 脉冲序列图像传感器像素结构

Fig. 1 Pixel structure of pulse sequence image sensor

理想条件下,像素积分均匀光后相邻触发脉冲的间隔时长 t 可表示为

$$t = \frac{C_{pd}(V_{rst} - V_{ref})}{I_p}, \quad (1)$$

式中: C_{pd} 为光电二极管的结电容; V_{rst} 为复位后的电压; V_{ref} 为阈值参考电压; I_p 为光电流。脉冲序列图像传感器输出连续的脉冲数据, 需要对脉冲数据进行处理才能重建出拍摄的场景图像。像素工作时, 以一帧扫描的时长作为读出周期进行数据的同步读出, 故脉冲触发的时长可以利用触发脉冲的间隔进行计算,

$$t = N \times T_f, \quad (2)$$

式中: N 为触发脉冲之间的帧间隔数。帧周期 T_f 确定时, 积分产生的光电流和时间 t 成反比, 间隔 N 和光电流也成反比。利用脉冲间隔可进行图像场景的重建, 表示为

$$G = \frac{1}{N} \times G_{max}, \quad (3)$$

式中: G 为还原的灰度, 表征了光强的大小, 和光电流成正比; G_{max} 为最小的脉冲间隔值对应的灰度。

3 脉冲序列图像传感器的噪声分析

本节对脉冲序列图像传感器的空间噪声、时间噪声和单码闪烁噪声分别进行分析, 研究了它们给脉冲触发时间带来的误差及其对重建图像带来的影响。

3.1 空间噪声分析

传统有源 CMOS 图像传感器的空间噪声源自

$$V_{OS1} = (V_{GS1,2} - V_{TH1,2}) \times \frac{\Delta(W/L)_2 - \Delta(W/L)_1}{2(W/L)_{1,2}} + (\Delta V_{TH1} - \Delta V_{TH2}) + \frac{g_{m3,4}}{g_{m1,2}} \times \left[(V_{GS3,4} - V_{TH3,4}) \times \frac{\Delta(W/L)_4 - \Delta(W/L)_3}{2(W/L)_{3,4}} + (\Delta V_{TH3} - \Delta V_{TH4}) \right], \quad (5)$$

式中: $g_{m,i}$ 为第 i 个晶体管的跨导; Δ 表示相应参数的偏差; $(W/L)_i$ 表示第 i 个晶体管的宽长比;

$\Delta V_{TH,i} = A_{VTH} / (WL)^{\frac{1}{2}}$, 其中 A_{VTH} 是工艺参数。

此外, 脉冲序列图像传感器通过 PMOS 管进行光电二极管的硬复位, 各像素的复位管会引入一个失调电压 V_{OS2} , 该失调主要由晶体管阈值的失配和宽长比失配造成^[18]。考虑比较器和复位管失调电压的共同影响, 将会引入一个总的失调电压 $V_{tal} = V_{OS1} + V_{OS2}$ 。引入此失调后, 均匀光下像素触发的时间间隔计算式为

$$t_{Inv2} = \frac{C_{pd}(V_{rst} - V_{ref} + V_{tal})}{I_p}. \quad (6)$$

3) 暗电流的非一致性。除了上述偏差, 暗电流 I_d 的存在将会在光电流上引入一个电流偏差, 这将

像素电路和列读出电路^[16], 而脉冲序列图像传感器输出的脉冲信号经过缓存和读出模块输出到总线, 两者都是数字模块, 在传输信号的过程中噪声的影响可以忽略不计, 故本文仅对像素电路中的噪声进行分析。脉冲序列图像传感器的空间噪声来源于电路中光电二极管的偏差、比较器的失配和复位管的失配, 以及暗电流的非一致^[17], 下面分别分析它们对脉冲触发时间的影响。

1) 光电二极管的失配。由于电容存在偏差, 光电二极管中存储的光电荷是不一致的, 导致像素实际的触发时间存在偏差。电容偏差引入后, 像素实际的触发间隔时间为

$$t_{Inv1} = \frac{(C_{pd} + \Delta C_{pd})(V_{rst} - V_{ref})}{I_p}, \quad (4)$$

式中: ΔC_{pd} 是光电二极管的偏差。

2) 比较器和复位管的失配。比较器作为脉冲序列图像传感器像素结构中的重要部分, 由于工艺的偏差其晶体管会产生失配, 导致比较器阈值电压存在一个失调电压 V_{OS1} , 致使比较器翻转时间提前或滞后。 V_{OS1} 在实际电路中来源于比较器差分输入晶体管的阈值电压和尺寸的失配^[18], 失调电压 V_{OS1} 可根据文献^[13]中的分析计算, 表示为

会导致像素触发时间间隔的变化:

$$t_{Inv3} = \frac{C_{pd}(V_{rst} - V_{ref})}{I_p + I_d}. \quad (7)$$

因此, 均匀光下, 考虑空间噪声的影响后, 像素触发的间隔时长为

$$t_{Inv3} = \frac{(C_{pd} + \Delta C_{pd})(V_{rst} - V_{ref} + V_{tal})}{I_p + I_d} = \frac{(1 + \theta_c) \times (1 + \theta_{os})}{(1 + \theta_d)} \times \frac{C_{pd}(V_{rst} - V_{ref})}{I_p}, \quad (8)$$

式中: $\theta_c = \frac{\Delta C_{pd}}{C_{pd}}$; $\theta_{os} = \frac{V_{tal}}{V_{rst} - V_{ref}}$; $\theta_d = \frac{I_d}{I_p}$ 。

由式(8)和式(1)计算出像素实际触发间隔时长和理想条件下触发间隔时长的误差, 表示为

$$t_e = \frac{(1 + \theta_c) \times (1 + \theta_{os}) - 1 - \theta_d}{(1 + \theta_d)} \times \frac{C_{pd}(V_{rst} - V_{ref})}{I_p} \quad (9)$$

空间噪声的影响下触发间隔时间的相对误差率为

$$\sigma_s = \frac{(1 + \theta_c) \times (1 + \theta_{os})}{(1 + \theta_d)} - 1 \quad (10)$$

均匀光下,像素的复位电压和参考电压固定时,每个像素单元的噪声系数 θ_c 和 θ_{os} 不随时间改变,因此空间噪声又称为固定模式噪声(FPN)。 θ_d 的大小和光强相关,随光强增大而减小,低光强下暗电流的影响较大,随着照射光强的增大,暗电流影响逐渐减小。空间噪声在脉冲序列图像传感器中主要表现为光电流和暗电流相应的非均匀性,可基于一段时间的实际测量获取均匀光和暗环境下的系数矩阵来均衡非一致性。

3.2 时间噪声分析

不同于传统 APS,脉冲序列图像传感器不存在源极跟随器和读出电路引起的噪声,分析时间噪声时仅需考虑像素中的散粒噪声和热噪声。

1) 散粒噪声。散粒噪声主要是 PN 结载流子的随机产生引起的,包括光电流散粒噪声和暗电流散粒噪声。光电流的散粒噪声是由电子-空穴对的随机产生引起的,暗电流散粒噪声是由于耗尽区的热激发所导致的,故总的散粒噪声计算为

$$V_{shot} = \sqrt{V_p^2 + V_d^2} = \frac{\sqrt{q(I_p + I_d)t_{int}}}{C_{pd}} \quad (11)$$

结合式(1)和式(11),总的散粒噪声可以写成

$$V_{shot} = \sqrt{\frac{q(V_{rst} - V_{ref})}{C_{pd}}}, \quad (12)$$

式中: q 是电子带的电荷量。由式(12)可知,总的散粒噪声和 I_p 、 I_d 及积分时间无关,仅和像素的结电容及积分压降的范围($V_{diff} = V_{rst} - V_{ref}$)相关。

2) 热噪声。像素触发后由复位模块发出信号进行光电二极管的复位,此时复位管导通,通道的电阻将会产生热噪声,复位结束后在光电二极管上表现为一个与电容相关的噪声,根据其表现形式,又称为 KTC 噪声。

$$V_{noise} = \sqrt{\frac{KT}{C_{pd}}}, \quad (13)$$

式中: K 为玻尔兹曼常数; T 为开尔文温度。总的时

间噪声为

$$V_T = \sqrt{\frac{q(V_{rst} - V_{ref}) + KT}{C_{pd}}}, \quad (14)$$

故由时间噪声引起的触发时间的相对误差率为

$$\theta_T = \frac{V_T}{V_{rst} - V_{ref}} \quad (15)$$

由式(14)和(15)可知,增大结电容可以减少时间噪声;减小 V_{diff} 会在一定程度上减小时间噪声,但会增加相对误差率。考虑空间噪声和时间噪声的共同作用,像素实际的触发间隔为

$$t_{inv} = \frac{(C_{pd} + \Delta C_{pd})(V_{rst} - V_{ref} + V_{tal} + V_T)}{I_p + I_d} = \frac{(1 + \theta_c) \times (1 + \theta_{os} + \theta_T)}{(1 + \theta_d)} \times \frac{C_{pd}(V_{rst} - V_{ref})}{I_p}, \quad (16)$$

式中: θ_T 由时间噪声引入,随时间随机变化,即时间噪声是一种随机噪声。由式(16)可知,考虑噪声时实际脉冲触发时间是理想条件下触发时间乘上一个系数,因此在进行噪声处理时可以处理该系数,通过对其进行对数变换变成加性噪声,然后进行引导滤波处理达到降噪目的。

3.3 同步读出机制下单码闪烁噪声的分析

由 2.1 节可知,均匀光下,光电二极管在比较器触发后复位,触发信号在接下来最近的读出时间点被读出。像素数据被周期性扫描读出,假设初始读出时刻为 t_0 ,其读出点则为 $t_0, t_0 + 1, t_0 + 2, t_0 + 3, \dots$,即读出周期为一个帧周期(T_f)。假设第 m 个脉冲触发的时刻为 t_m ,其读出时刻为 T_m, t_m 和 T_m 都是经 T_f 量化后的结果,即以 T_f 为单位的时间,本节后面的变量和数值同样如此,则

$$T_m = \lceil t_m \rceil, \quad (17)$$

式中:“ $\lceil \rceil$ ”表示向最近的读出点取值。 $t_0 = 0.5$ 时,像素扫描读的时刻为 $0.5, 1.5, 2.5, 3.5, \dots$,假若触发时刻处在 $0.5 \sim 1.5$ 之间,则读出时刻为 1.5 。像素点同步读出,无论是否触发每一帧都会读出一数据,将读出时间点对应到数轴上,起始积分点 t_0 记作原点,“ $\lceil \rceil$ ”就可看成向上取整操作。图 2 是均匀曝光下像素的实际触发时长为 1.4 的触发情况,展示了脉冲的触发时刻、读出时刻、实际触发时长和读出脉冲的间隔情况,可以看出触发数据的读出和式(17)一致,此外,即使在均匀光条件下实际获取的脉冲间隔数据也是不均等的。式(2)利用脉冲间隔计算的积分时长总是读扫描周期的整数倍,因此和实际触发时长之间存在误差,该误差是由同步读

出机制引入的。随着积分的进行,同步读出机制引入的时间误差将会影响读出脉冲的间隔,使脉冲间隔出现时域上的波动,利用脉冲间隔重建的图像中

像素将会出现时域上的波动,其影响犹如时域上的一种噪声,因此将脉冲读出机制下的非理想因素当成一种噪声研究,即单码闪烁噪声。

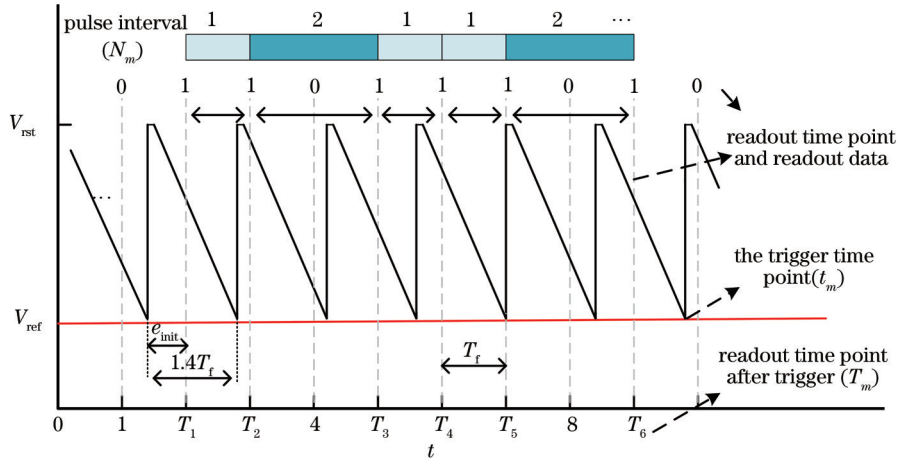


图 2 触发时刻、读出时刻和脉冲间隔的关系

Fig. 2 Relationship between trigger time, readout time, and pulse interval

下面通过对脉冲间隔波动规律的进一步分析来研究该噪声的特性。第 m 个触发间隔 N_m 可以使用第 m 个和第 $m+1$ 个触发脉冲的读出时刻进行计算:

$$N_m = T_{m+1} - T_m \quad (18)$$

将实际触发时长 k 和第一次读出时间的误差记为初始误差 e_{init} , 如图 2 所示, 则有

$$e_{init} = \lceil k \rceil - k, \quad (19)$$

式中: k 是量化后的值, 单位为 T_i ; $\lceil k \rceil$ 表示首次触发读出时间。根据上取整函数运算的性质可知 $e_{init} \in (0, 1)$ 。传感器工作时, 实际触发时刻 t_m 计算为

$$t_m = k \times m, \quad (20)$$

结合式(17)~(20)及上取整和下取整的关系, N_m 可表示为

$$N_m = \lceil k \rceil - \left\{ \lfloor e_{init} \times (m+1) \rfloor - \lfloor e_{init} \times m \rfloor \right\}, \quad (21)$$

均匀曝光条件下, $\lceil k \rceil$ 是个常数。下面定义一个正整数集合, 表示为

$$\begin{cases} J = \{j_1, j_2, \dots, j_\theta\} \\ j_\theta = e_{init} \times m_0 \end{cases}, \quad (22)$$

式中: m_0 是正整数。由向下取整函数的性质可知, 当 j_θ 是集合 J 的最小值时, 对应的 $m = m_0$ 就是 N_m 的最小周期, 即 N_m 随着 m 周期性变化。当 $e_{init} \times (m+1) = j_\theta$ 时, 利用式(21)计算出的 N_m 的结果为 $\lceil k \rceil - 1$; 紧接的 m 使式(21)中的 $e_{init} \times m = j_\theta$ 成立, 此时的 N_m 等于 $\lceil k \rceil$ 。综上所述, 在 N_m 的每个周期内, 其最后的两个值分别是 $\lceil k \rceil - 1$ 和 $\lceil k \rceil$ 。周期内其他的取值取决于 $e_{init} \times (m+1)$, $e_{init} \times m$ 和最近的位置关系。 $e_{init} \in (0, 1)$, 由式(21)计算出 $N_m \in (\lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil)$, 其在周期内的取值及条件为

$$N_m = \begin{cases} \lceil k \rceil - 1 & \lfloor e_{init} \times m \rfloor < e_{init} \times m < \lfloor e_{init} \times m \rfloor + 1 \\ \lceil k \rceil & \lfloor e_{init} \times (m+1) \rfloor < e_{init} \times m < \lfloor e_{init} \times (m+1) \rfloor + 1 \end{cases} \quad (23)$$

式(23)中没有将相等的情况包含进去, 前面已经介绍过这两种情况。式(23)中 $N_m = \lceil k \rceil - 1$ 成立的条件是 $e_{init} \times m$ 和 $e_{init} \times (m+1)$ 分布在 $\lfloor e_{init} \times m \rfloor$ 的两侧, 将其称为异侧条件, 同样的将 $N_m = \lceil k \rceil$ 成立的条件称为同侧条件。 N_m 随着 m 周期性变化, 下面在不同的初始误差 e_{init} 下对 N_m 的周期特性进行分析。 N_m 可由式(21)计算, 其周期由式(22)计算。当

$e_{init} = 0$ 时, N_m 的值为常数 $\lceil k \rceil$ 。当 $e_{init} = 0.5$ 时, $m = 2$ 是其最小的正周期, N_m 取值为 $\lceil k \rceil - 1$ 和 $\lceil k \rceil$ 的循环。为了便于表述, 将 $m = 1$ 时 N_m 的取值记作稳定码(S码), 另一个记作波动码(F码)。

当 $0 < e_{init} < 0.5$ 时, N_m 的 S 码和 F 码分别为 $\lceil k \rceil$ 和 $\lceil k \rceil - 1$ 。 e_{init} 在 $0 \sim 0.5$ 之间时, N_m 存在以下两种情况。第一种, 波动在一个周期中仅出现一次, $\lceil k \rceil - 1$

仅在末尾出现。如 $e_{\text{init}} = 0.1$ 时, $m = 10$ 是 N_m 的最小周期, 其在一个周期内的取值为 $\lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil$ 。第二种, 波动在一个周期中出现若干次, 但波动码 $\lceil k \rceil - 1$ 并不会连续出现, 因为由式 (23) 可知, 当 $e_{\text{init}} < 0.5$ 时, 异侧的条件不会连续出现。如 $e_{\text{init}} = 0.3$ 时, $m = 10$ 是 N_m 的最小周期, 其在一个周期内的取值为 $\lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil$ 。

当 $0.5 < e_{\text{init}} < 1$ 时, N_m 的 S 码和 F 码分别为 $\lceil k \rceil - 1$ 和 $\lceil k \rceil$ 。不同的 e_{init} 同样存在以下两种情况, 波动在一个周期中仅出现一次或出现若干次。如 $e_{\text{init}} = 0.9$ 时, $m = 10$ 是 N_m 的最小周期, 其在一个周期内的取值为 $\lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil$ 。当波动在一个周期中出现若干次时, 其波动码 $\lceil k \rceil$ 同样不会连续出现, 因为根据式 (23) 可知, 当 $e_{\text{init}} > 0.5$ 时, 同侧条件不会连续出现。如 $e_{\text{init}} = 0.6, m = 5$ 是 N_m 的最小周期, 其在一个周期内的取值为 $\lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil - 1, \lceil k \rceil$ 。

综上所述, 除了 $e_{\text{init}} = 0$ 对应的照度外, N_m 的每个周期都有 F 码出现, S 码和 F 码数值仅相差 1, 且 F 码不连续出现, 这种码值的波动会造成重建图像的时域波动, 像素的闪烁。

3.4 噪声对脉冲序列图像传感器重建图像的影响

由上文分析可知, 空间噪声和时间噪声都会导致脉冲触发时间的误差, 进而引起脉冲间隔的变化, 影响重建图像的质量。同步读出机制下的单码闪烁噪声同样导致了脉冲间隔的波动, 且具有一定的周期性, 造成重构视频中像素灰度的波动, 引发像素点和像素块的闪烁, 从而使重建图像和视频的质量下

降。为了便于说明同步读出机制下脉冲间隔波动的影响, 将式 (3) 中的参数设定为 400, 式 (3) 还原灰度时最终的灰度有一个取整运算且是 8 bit 来记录灰度, 脉冲间隔和还原灰度值的对应关系如图 3 所示。当脉冲间隔值波动时利用式 (3) 还原的灰度将会出现波动, 且随着光强的增加 (间隔值的减小) 脉冲间隔波动一个码值后还原出灰度的波动将增大, 如间隔值 9 和 10 还原的灰度的差值为 4, 而间隔值 2 和 3 还原的灰度的差值为 65。脉冲间隔还原时, 间隔数还代表还原的帧数, 如间隔 2 表示同一像素连续两帧还原的灰度值是 200。因此, 随着光强的增加脉冲间隔波动除了引起还原灰度值波动的幅度增加外, 其波动的频率也会增加, 还原出的灰度视频中会出现像素点和像素块的闪烁, 严重影响重建场景的成像质量。为了直观地看出各噪声对图像的影响, 模型重建了受噪声影响的图像, 如图 4 所示。其中, 图 4(a) 展示了空间噪声的影响, 图 4(b) 展示了时间

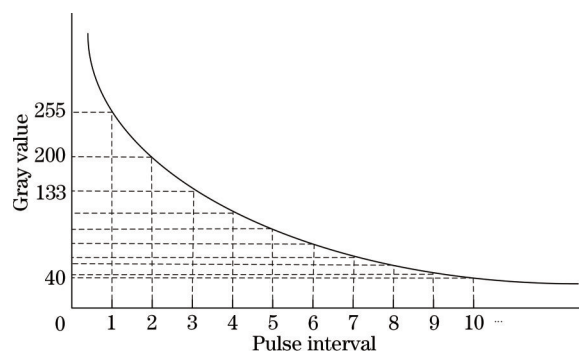


图 3 脉冲间隔和重建灰度的特性曲线
Fig. 3 Characteristic curve of pulse interval and reconstructed gray scale

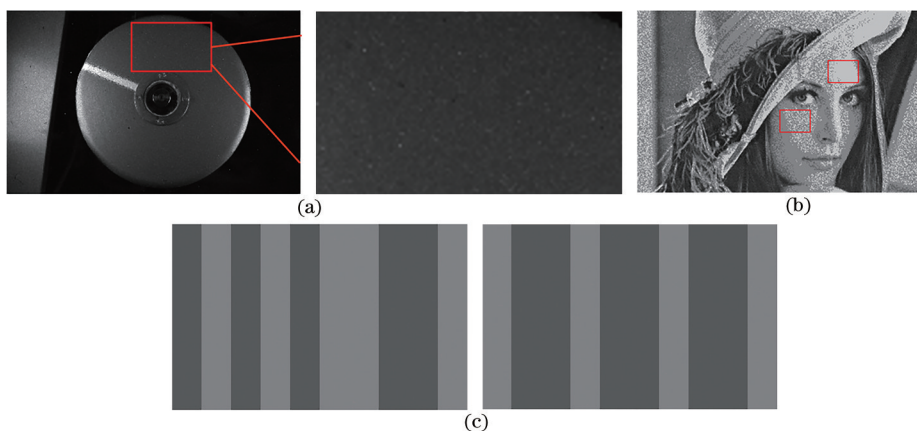


图 4 不同噪声影响下的图像。(a) 受空间噪声影响的图像; (b) 受时间噪声和单码闪烁噪声影响的图像; (c) 同一条输入条状图下重建的第 50 帧和 100 帧灰度图

Fig. 4 Images under the influence of different noises. (a) Image affected by spatial noise; (b) images affected by temporal noise and single-code flicker noise; (c) 50th frame and 100th frame grayscale images reconstructed under same input bar chart

噪声和单码闪烁噪声对重构图像的影响,重构的 Lena 图像中会出现闪烁点和闪烁块。为了直观地展示闪烁,将由 10 条值临近灰度条组成的图像输入模型,重构出的第 50 帧和第 100 帧图像如图 4(c) 所示,可以看出,异步复位同步读出的机制下,传感器在均匀光下重构出的视频会有闪烁的现象。

4 传感器噪声模型仿真和芯片测试

4.1 基于噪声模型的仿真

本节基于传感器噪声的研究和传感器原理建立了包含第 3 节各类噪声的系统模型,通过噪声模型仿真预测噪声引起的时间误差在不同参数下的变化,下面分别对空间噪声、时间噪声和单码闪烁噪声进行仿真。

首先通过噪声模型仿真空间噪声在不同电压积分范围 V_{diff} 和不同光强 I_p 下脉冲触发的时间误差,表 1 列出了噪声模型中的相关参数,其中 V_{diff} 是经过蒙特卡罗分析进行 300 次迭代后失调电压的标准差。图 5(a) 是模型仿真空间噪声给触发时间带来的相对误差率随 V_{diff} 的变化曲线,可以看

出,在不同的光强下随着 V_{diff} 的增大误差呈现不同的变化。在弱光下,复位管和比较器等导致的空间噪声影响微弱,被暗电流的影响掩盖,随着 V_{diff} 的增加误差为负且数值增大。在光电流占主要影响时,空间噪声带来的相对误差率随 V_{diff} 的增大而变小,最后趋于平缓,说明随着 V_{diff} 的增大空间噪声的影响减小并趋于稳定,因此光强确定后可以找到一个 V_{diff} 的均衡点,满足灵敏度和相对误差率的平衡。图 5(b) 是空间噪声引起的时间误差率随光强的变化曲线。不同的电压积分压降下,弱光下相对误差率变化较剧烈,这是暗电流影响较大导致的;随着光强的增加相对误差略有增加并逐渐稳定下来,但不同的电压积分范围下误差稳定时的光强不同。

表 1 噪声模型中的相关参数

Table 1 Related parameters in the noise model

Parameter	Value	Parameter	Value
C_{pd} / fF	10	V_{ref} / V	1.0-3.125
I_d / pA	1	θ_c	0.005
V_{rst} / V	3.3	V_{sat} / mV	16

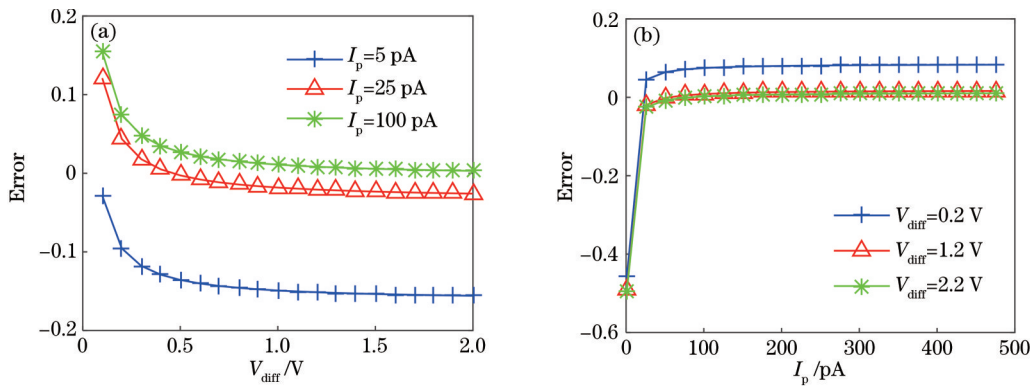


图 5 空间噪声对应的时间误差率随 V_{diff} 、 I_p 的变化。(a) 时间误差与 V_{diff} 的关系;(b) 时间误差与 I_p 的关系

Fig. 5 Time error rate corresponding to spatial noise varies with V_{diff} and I_p . (a) Relationship between time error and V_{diff} ; (b) relationship between time error and I_p

下面通过噪声模型对时间噪声进行预测仿真,图 6 是 300 K 温度下时间噪声引起的触发时间误差率与 V_{diff} 和 C_{pd} 的关系,由图 6 可知,增大结电容可以减少时间噪声引起的误差率,减小时间噪声的影响,但这会增加电容的失配;减小 V_{diff} 时,时间噪声的影响会在一定程度上增加。

然后,在不添加噪声的情况下运行传感器像素模型对异步复位同步读出机制下的单码闪烁噪声进行研究,仿真预测不同积分阈值压降范围和不同光强下误差的变化趋势,结果如图 7 所示。图 7(a) 和图 7(b) 分别是 $V_{diff} = 2 V$ 和 $V_{diff} = 1.5 V$ 时输出时

间误差率与光强的关系曲线。由图 7 可知,同步读出机制导致的时间误差波动随光强的变化而周期性波动,随着光强的增加,波动逐渐增加,随着 V_{diff} 的减小,同光强增加类似,波动也会随之变大,符合 3.4 节的分析。

最后,本文基于添加了噪声的传感器模型对空间噪声和时间噪声给脉冲间隔带来的影响进行仿真预测,在不同的输入光电流下得到 500 帧脉冲间隔数据,然后使用均匀光下获得的 500 帧脉冲间隔数据进行累加平均以消除时间噪声的影响,以平均后的矩阵的标准差来表征空间噪声对脉冲触发间

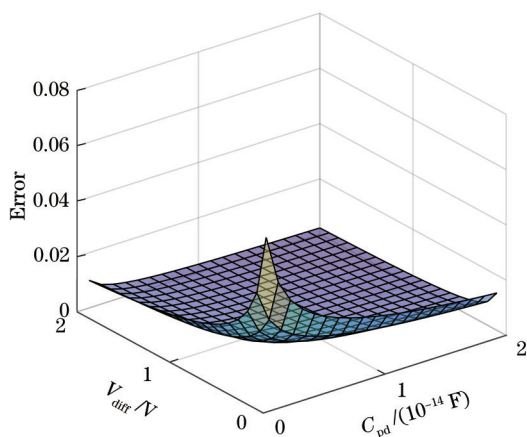


图 6 时间噪声引起的误差与 V_{diff} 、 C_{pd} 的关系

Fig. 6 Relationship between error caused by temporal noise and V_{diff} 、 C_{pd}

隔的影响;接着将任意相邻的两帧图像作差获得新的矩阵,然后以新矩阵的标准差来表征时间噪声对脉冲间隔的影响。图 8 展示了不同的触发阈值参数

V_{diff} 下,FPN 和时间噪声给脉冲间隔带来的误差随输入光电流强度的变化曲线。随着输入光电流的增大获取的脉冲间隔变小,即出发频率变大,由图 8(a)可知 FPN 将会进一步对一帧间隔数据产生影响,这也和传感器异步复位同步读出的机制相关。随着光电流的增加,时域内的噪声对脉冲间隔产生较大的影响,触发频率增加且异步复位同步读出导致的单码闪烁噪声影响占主要部分,导致了图 8(b)曲线的波动,而 V_{diff} 的减小相当于光强的增大,它们的影响是一致的。此外可以看出空间噪声在弱光环境下对图像采集的脉冲间隔数据的影响较大,且由于异步复位同步读出机制的存在随着光强的增加该影响会进一步的增加,而时间噪声的影响相对稍弱,但是当曝光大于一定的强度后时间域的噪声和异步复位同步读出机制导致的单码闪烁噪声占主要影响,它们将会进一步影响利用脉冲间隔重建图像的质量。

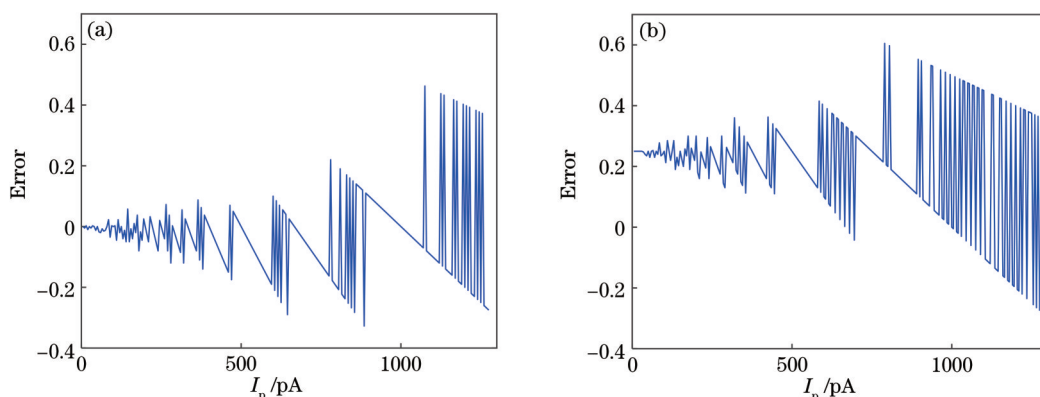


图 7 光强和同步读出机制下相对误差的关系。(a) $V_{diff}=2\text{ V}$; (b) $V_{diff}=1.5\text{ V}$

Fig. 7 Relationship between light intensity and relative error under synchronous readout mechanism. (a) $V_{diff}=2\text{ V}$; (b) $V_{diff}=1.5\text{ V}$

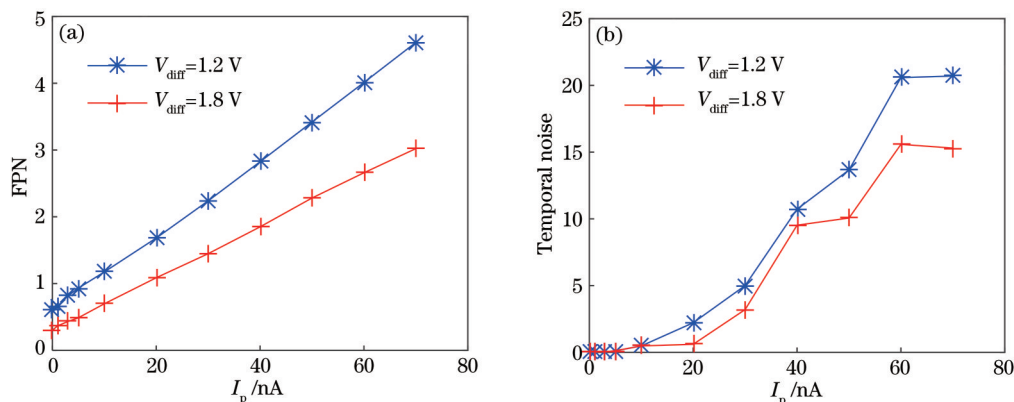


图 8 不同 V_{diff} 下 FPN 和时间噪声随光电流变化。(a) FPN 随光电流的变化; (b) 时间噪声随光电流的变化

Fig. 8 Under different V_{diff} , FPN and temporal noise change with photocurrent. (a) FPN changes with photocurrent; (b) temporal noise changes with photocurrent

4.2 芯片的测试

本节对实验室自研流片的脉冲序列图像传感器进行噪声特性测试,传感器芯片的参数如表 2 所示。传感器芯片拍摄的均匀光和动态场景下的图像如图 9 所示,可以看出噪声和非理想因素影响了实际成像的效果。下面将对测试结果进行分析,分别测试空间噪声和时间噪声对脉冲间隔的影响。测量空间噪声时,使用均匀光下获得的 500 帧脉冲间隔数据进行累加平均以消除时间噪声的影响,然后以平均后的矩阵的标准差来表征空间噪声对脉冲触发间隔的影响。在进行时间噪声测试时,本文将任意相邻的两帧图像做差获得新的矩阵,然后以

新矩阵的标准差来表征时间噪声对脉冲间隔的影响。图 10 是不同的 V_{diff} 下,空间噪声和时间噪声对脉冲间隔的影响随光强的变化曲线。由图 10(a) 可知,FPN 随着光强的增大其对脉冲间隔的影响逐渐增加,较小的 V_{diff} 对脉冲间隔的影响较大。图 10(b) 是芯片时间噪声的测试结果,随着光强的增加,时间噪声对脉冲间隔的影响变大,中间出现波动是由于传感器异步复位、同步读出机制引入的时间噪声导致,且该时间噪声随着光强的增加对脉冲间隔的影响增强,随着 V_{diff} 的增加,时间噪声对脉冲间隔的影响变小,和图 8 中的模型仿真预测是一致的。

表 2 传感器芯片的相关参数

Table 2 Related parameters of the sensor chip

Parameter	Value	Parameter	Value
Fabrication process / μm	0.11	Fill factor / %	13.8
Array size	250 \times 400	V_{ref} / V	1.05-2.45
Pixel size / ($\mu\text{m} \times \mu\text{m}$)	20 \times 20	V_{rst} / V	2.4-3.3

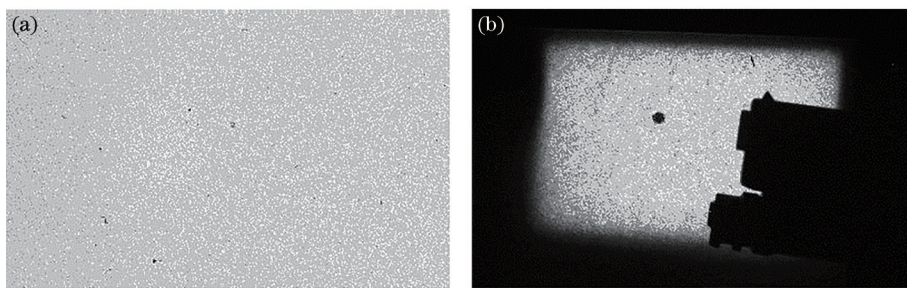


图 9 传感器拍摄的图像。(a) 500 lx 均匀光;(b) 子弹射出的瞬间

Fig. 9 Images taken by the sensor. (a) 500 lx uniform light; (b) moment the bullet was fired

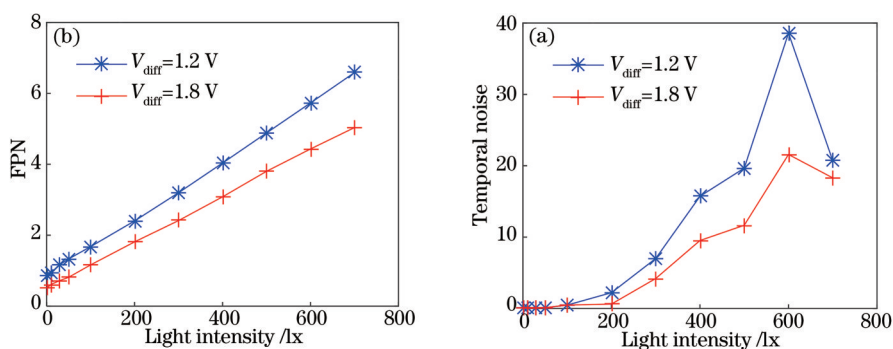


图 10 不同 V_{diff} 下,FPN 和时间噪声随光强变化曲线。(a) FPN 随光强的变化;(b) 时间噪声随光强的变化

Fig. 10 Under different V_{diff} , FPN and temporal noise change with light intensity. (a) FPN changes with light intensity; (b) temporal noise changes with light intensity

5 结 论

本文分析了脉冲序列图像传感器的空间噪声、时间噪声和传感器异步复位同步读出机制下的单码闪烁噪声,通过模型仿真和芯片测试研究了它们在不同

参数和环境下对脉冲触发时间误差的影响。空间噪声在一定条件下受制于 I_p 、 V_{diff} 。在弱光环境下随着 V_{diff} 的增加空间噪声将导致更大的时间误差率;光强增大到一定范围后,随着 V_{diff} 的增大误差率会减小并趋于稳定。时间噪声受 V_{diff} 、 C_{pd} 的制约,随 V_{diff} 的增

大而增大。 V_{diff} 与空间和时间噪声都有一定的关系,在实际应用场景中,根据对空间和时间噪声的要求,通过调整 V_{diff} 优化抑制各噪声成分,或合理采用相应算法进行噪声的抑制。传感器异步复位同步读出机制下的单码闪烁噪声将会导致脉冲间隔的波动,本文总结了时域上像素脉冲间隔序列波动出现的规律特征,分析了脉冲间隔波动对图像重建质量的影响。最后本文对脉冲间隔重建方式下的噪声进行了测试,验证了噪声分析和模型仿真预测的正确性。

参 考 文 献

- [1] Kramer J. An integrated optical transient sensor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, 2002, 49(9): 612-628.
- [2] Lichtsteiner P, Posch C, Delbruck T. A 128×128 120 dB 15 μ s latency asynchronous temporal contrast vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(2): 566-576.
- [3] Delbruck T, Lichtsteiner P. Fast sensory motor control based on event-based hybrid neuromorphic-procedural system[C]//2007 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 27-30, 2007, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE Press, 2007: 845-848.
- [4] Imam N, Manohar R. Address-event communication using token-ring mutual exclusion[C]//2011 17th IEEE International Symposium on Asynchronous Circuits and Systems, April 27-29, 2011, Ithaca, NY, USA. New York: IEEE Press, 2011: 99-108.
- [5] Leñero-Bardallo J A, Pérez-Peña F, Carmona-Galán R, et al. Pipeline AER arbitration with event aging[C]//2017 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, May 28-31, 2017, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2017: 17208024.
- [6] Brandli C, Berner R, Yang M H, et al. A 240×180 130 dB 3 μ s latency global shutter spatiotemporal vision sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2014, 49(10): 2333-2341.
- [7] Xu J T, Yang Z, Gao Z Y, et al. A method of biomimetic visual perception and image reconstruction based on pulse sequence of events[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(3): 1008-1018.
- [8] Gao J, Wang Y Z, Nie K M, et al. The analysis and suppressing of non-uniformity in a high-speed spike-based image sensor[J]. Sensors, 2018, 18(12): 4232.
- [9] Xu J T, Wang X F, Gao Z Y, et al. High-speed target tracking algorithm for the pulse-sequence-based image sensor[J]. IET Image Processing, 2021, 15(5): 1157-1165.
- [10] Pain B, Cunningham T J, Hancock B R. Noise sources and noise suppression in CMOS imagers[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5167: 111-120.
- [11] Tian H, Fowler B, Gamal A E. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2001, 36(1): 92-101.
- [12] Brouk I, Nemirovsky A, Nemirovsky Y. Analysis of noise in CMOS image sensor[C]//2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems, May 13-14, 2008, Tel-Aviv, Israel. New York: IEEE Press, 2008: 10103541.
- [13] Zhang C, Yao S Y, Xu J T. Noise in a CMOS digital pixel sensor[J]. Journal of Semiconductors, 2011, 32(11): 94-98.
张弛, 姚素英, 徐江涛. CMOS 数字像素传感器中的噪声[J]. 半导体学报, 2011, 32(11): 94-98.
- [14] Xu J T, Li D S, Yao S Y. A time error correction method applied to high-precision AER asynchronous CMOS image sensor[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2014, 75(1): 1-13.
- [15] Leñero-Bardallo J A, Carmona-Galán R, Rodríguez-Vázquez Á. A wide linear dynamic range image sensor based on asynchronous self-reset and tagging of saturation events[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 52(6): 1605-1617.
- [16] 邓若汉, 严奕, 余金金, 等. CMOS 有源像素传感器像素级噪声的分析与抑制[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(5): 050401.
Deng R H, Yan Y, Yu J J, et al. Analysis and reduction of pixel noise in CMOS active pixel sensor [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(5): 050401.
- [17] 李强, 金龙旭, 李国宁. 基于暗电流 CMOS 图像传感器固定模式噪声校正研究[J]. 液晶与显示, 2021, 36(2): 327-333.
Li Q, Jin L X, Li G N. Fixed pattern noise correction of CMOS image sensor based on dark current[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2021, 36(2): 327-333.
- [18] Xu J T, Xu L, Gao Z Y, et al. A denoising method based on pulse interval compensation for high-speed spike-based image sensor[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2021, 31(8): 2966-2980.