

引用格式: ZHAO Wenxin, LAI Xuefeng, XIA Yucheng, et al. Calibration Method for Flickering Pixels under Compound Condition Operating Points of IRFPA Detector[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(2):0204002

赵雯昕, 赖雪峰, 夏昱成, 等. 红外焦平面探测器复合条件工作点闪元标定方法[J]. 光子学报, 2024, 53(2):0204002

红外焦平面探测器复合条件工作点 闪元标定方法

赵雯昕^{1,2}, 赖雪峰¹, 夏昱成¹, 李素钧¹, 周金梅¹

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 针对闪元传统标定方法的不足, 提出一种结合灰度域图像和能量域图像进行复合条件工作点闪元标定的方法。该方法解决了单一工作点对闪元激发条件不够充分和探测器非均匀性所造成的闪元漏检等问题。实验验证表明, 单一工作点上闪元检测率平均提高了 12.49%, 与传统方法相比, 整体闪元检测率提高了 9.41%。本文所提方法有效提高了闪元的检出率。

关键词: 红外焦平面探测器; 闪元检测; 闪元标定; 复合条件工作点; 能量域图像

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20245302.0204002

0 引言

近年来随着无人机等远距目标检测需求的兴起, 基于红外波段的弱小目标检测技术因其全天时、探测距离远、不主动发射电磁波等特点成为了研究热点。但红外探测器因其自身工艺水平不足, 存在盲元、闪元等无效像元, 导致红外弱小目标检测难度加大。其中盲元分为灰度值过高的亮元和灰度值过低的坏元, 其位置相对固定, 易于标定, 通常探测器在出厂时进行标定; 而闪元又被称之为过热像元、随机盲元等, 其灰度值存在剧烈波动的情况, 在时域上表现形式多变, 呈现如 $1/f$ 噪声、爆裂噪声、阶跃噪声等噪声波形。同时闪元的位置受工艺缺陷、系统工作状态和随机噪声等因素的影响, 在应用过程中并不完全固定, 难以准确标定。

国内外学者对盲闪元的检测方法进行了相关研究。石岩等^[1]采用自适应投影匹配分解法对特征直方图进行高斯分解, 并估计出有效像元特征的分布区间从而进行判别, 这种分类准则可以有效检测出无效像元。代少东等^[2]利用场景运动过程中有效像元和盲元在局部窗口中的响应率存在的显著差异性实现盲元和闪元的即时检测和补偿, 使用流程简单, 能够有效提高盲元检测率。李丽萍等^[3]利用形态学开闭运算对尖峰信号的滤波性质来提取盲元和闪元, 算法简单, 便于实现。冷寒冰等^[4]提出了基于模糊中值滤波和时域累积的自适应盲元检测与补偿算法, 能克服温漂而导致的随机盲元。刘高睿等^[5]针对红外线列闪元分析了闪元现象在红外扫描图像中的特点, 设计了基于时序多帧最大值投影的闪元检测与补偿方法, 该算法可以保留一定的目标信息并使检测不受闪元干扰。郑晓等^[6]提出了一种基于滑动窗口的红外焦平面阵列无效像元检测算法, 使用局部中值滤波算法进行补偿, 改善了红外焦平面阵列成像质量。SONG Z 等^[7]引入了闪烁像素置信度评估策略和闪烁像素选择机制, 实现了在较短帧数内对闪烁像素的精确抑制。但上述这些方法主要针对固定工作点下的灰度图像进行闪元检测, 当探测器工作点发生变化时, 图像灰度和闪元特性会相应发生改变, 从而影响闪元的检测效果。

基金项目: 中科院重点实验室创新基金(No. YJ22K004-2023)

第一作者: 赵雯昕, zhaowenxin21@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 赖雪峰, laixuefeng@ioe.ac.cn

收稿日期: 2023-07-24; 录用日期: 2023-10-14

<http://www.photon.ac.cn>

本文从闪元产生的原因和机理出发,根据闪元典型时频特征的不同对闪元进行分类,在此基础上分析了复合条件工作点下闪元的特性以及使用原始灰度图像进行闪元检测存在的问题,提出了一种结合灰度域图像和能量域图像的复合条件工作点闪元标定方法。经过实验验证,该方法可以解决单一工作点对闪元激发条件不够充分和像元响应率不均匀所造成的闪元漏检等问题。

1 闪元的产生原因和机理

国内外学者对闪元产生的机理进行了相关研究。GROSS W等^[8]认为闪元与 $1/f$ 噪声有关,并且具有随机闪烁特性。黄杨程等^[9]认为离子注入成结中注入离子与碲镉汞相互作用引入的晶格缺陷和器件表面的缺陷引起载流子的涨落,最终导致噪声产生。李建林等^[10]认为材料器件工艺缺陷,热致损伤缺陷,信号传输路径缺陷都有可能造成无效像元的产生,此外外部环境应力或工作应力也是部分原因。周孝好等^[11]认为在器件的体内以及表面存在诸多的缺陷和杂质,这些缺陷和杂质在探测器的光电过程中将充当光生载流子的俘获、复合以及散射中心等角色,会导致载流子浓度或迁移率的涨落,最终形成探测器噪声。杨德振等^[12]认为闪元主要来源于碲镉汞等焦平面材料的离子键作用力弱,电学性能不均匀,载流子浓度不一致,成结损伤,同时探测器的 $1/f$ 噪声也会带来像元灰度的闪烁,表现为像元输出电平有时正常有时无法表征辐射强度及其强度变化量等。

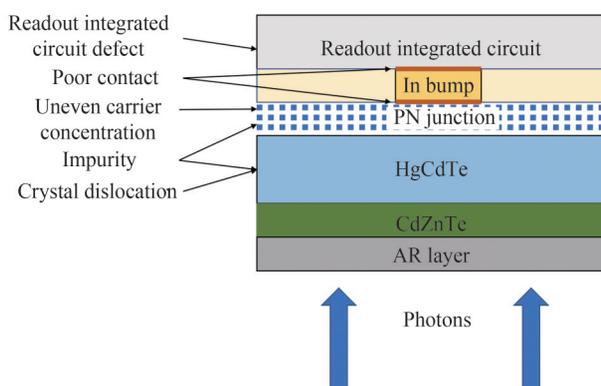


图1 HgCdTe探测器结构示意图
Fig 1 Structure diagram of HgCdTe detector

总的来说,闪元产生原因并不单一,闪元内部通常包含多种缺陷。其时序特性由缺陷和外部应力条件共同决定。复杂的缺陷机理和多变的外部应力条件导致了闪元时序特性的杂乱。根据典型时序特征的不同,将其分为四类闪元: I类为正向爆裂噪声闪元; II类为反向爆裂噪声闪元; III类为阶跃噪声闪元; IV类为 $1/f$ 噪声闪元。

I类正向爆裂噪声闪元在时域上会随机出现向上尖峰值,主要来源于半导体缺陷在禁带中产生的缺陷能级^[13],在半导体内部的电子发生跃迁时,内部的缺陷能级导致PN结内形成电位差,最终产生噪声,其对应的噪声功率谱密度函数为

$$S_f = \frac{K_B \cdot I_b}{1 + (f/f_0)^2} \quad (1)$$

式中, K_B 为取决于半导体材料中杂质情况的常数, I_b 为流过PN结的工作电流, f_0 为转折频率,在频率小于转折频率时功率谱密度曲线趋于平坦^[14]。此类闪元噪声对系统工作状态较为敏感,随PN结工作电流增大而增大。

II类反向爆裂噪声闪元在时域上会随机出现向下尖峰值,是一种特殊的RTS(Random Telegraph Signal)噪声。当电子在PN结中流动时,PN结界面上存在的缺陷会随机地俘获和释放载流子,导致载流子流在时间上的不均匀性从而产生噪声,其对应的噪声功率谱密度函数为

$$S_f = \frac{K_d \cdot \Delta I^2}{1 + (f/f_0)^2} \quad (2)$$

式中, K_d 为取决于 PN 结界面缺陷杂质情况的常数, ΔI 为缺陷所引起的电流幅度变化, f_0 为转折频率。此类闪元噪声特性与 I 类闪元相反, 当工作点的电流增大时, PN 结中沟道宽度增大, 界面缺陷对载流子流的不均匀性影响会被平均而减小, 导致其噪声随 PN 结工作电流减小而增大。

III 类阶跃噪声闪元在时域上会随机出现阶跃变化, 阶跃持续时间比 I / II 类闪元更长, 且时域上存在多个阶跃。该类闪元的缺陷只在特定外部应力条件下使信号不稳定, 产生阶跃干扰, 其对应的噪声功率谱密度函数表达式为

$$S_f = \sum_{i=1}^n E_i \cdot \tau_i \cdot Sa(\pi \tau_i f) \quad (3)$$

式中, n 为阶跃个数, E_i 为第 i 个阶跃干扰引起的噪声幅度峰值, τ_i 是对应的时间常数。此类闪元噪声与 PN 结工作电流相关性不大, 是内部缺陷和外部应力共同作用的结果。

IV 类 $1/f$ 噪声闪元在时域上呈闪烁状, 时域噪声主要表现为 $1/f$ 噪声。这种噪声主要来源于晶体的接触不良, 比如碲镉汞焦平面阵列与硅读出集成电路互连和信号传输引线键合的接触缺陷^[15], 其对应的噪声功率谱密度函数为

$$S_f = \frac{K_f \cdot I_{dc}^2}{f} \quad (4)$$

式中, K_f 为取决于接触面材料类型和几何形状的系数, I_{dc} 为 PN 结工作电流平均值^[14]。这类噪声在低频下比较突出, 频谱呈现整体下降趋势。此类闪元会受到工作点状态影响, 噪声随 PN 结工作电流增大而增大。

上述闪元对应的典型时域波形和其噪声功率谱密度图如图 2 所示。

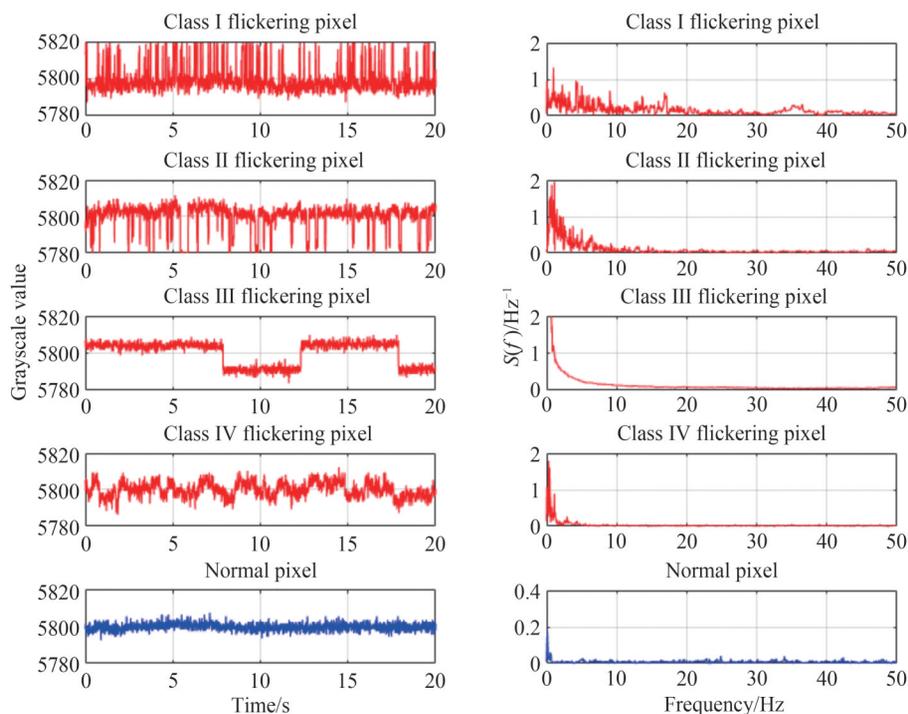


图 2 闪元与正常像元时域图和噪声功率谱密度

Fig. 2 Time domain diagram and noise power spectral density diagram of flickering pixels and normal pixel

在红外弱小目标检测时, 为了使系统工作在最佳工作状态, 需要根据目标和场景的温度变化调节积分时间。对于红外相机而言, 积分时间和探测温度的变化都会引起工作点的改变, 进而带来不同的外部应力, 致使闪元数量和位置发生变化。同一位置闪元在不同工作点下会表现出不同的特性, 单一工作点对闪元激发条件不够充分, 只有部分闪元表现出来; 多个复合条件工作点对闪元激发条件更加充分, 能够表现出更多闪元及其变化情况, 本文将在多个复合条件工作点下探究各类闪元的变化特性。

2 复合条件工作点下的闪元特性及分析

探测像元的输出灰度值和入射幅亮度之间的关系可以表示为^[16]

$$X_{i,j} = t \cdot (\eta_{i,j} \cdot L_{i,j} + h_{s(i,j)}) + h_{\text{det}(i,j)}(t) \quad (5)$$

式中, $X_{i,j}$ 表示红外探测器焦平面位置为像元 (i,j) 的输出灰度值, $\eta_{i,j}$ 表示像元 (i,j) 对目标幅亮度的响应率, $L_{i,j}$ 表示目标幅亮度, $h_{s(i,j)}$ 为红外系统的杂散辐射, $h_{\text{det}(i,j)}(t)$ 为探测器暗电流等因素引起的偏置。

为了探究工作点变化时, 闪元和正常像元的差别, 选取了典型的闪元和正常像元作为对比。图3为闪元和正常像元随温度、积分时间变化的灰度均值变化。由式(5)可得, 积分时间延长, 探测温度升高, 正常像元灰度均值增加。图3中闪元灰度均值和增长趋势都相近于正常像元, 难以利用灰度均值作为标准来检测闪元。

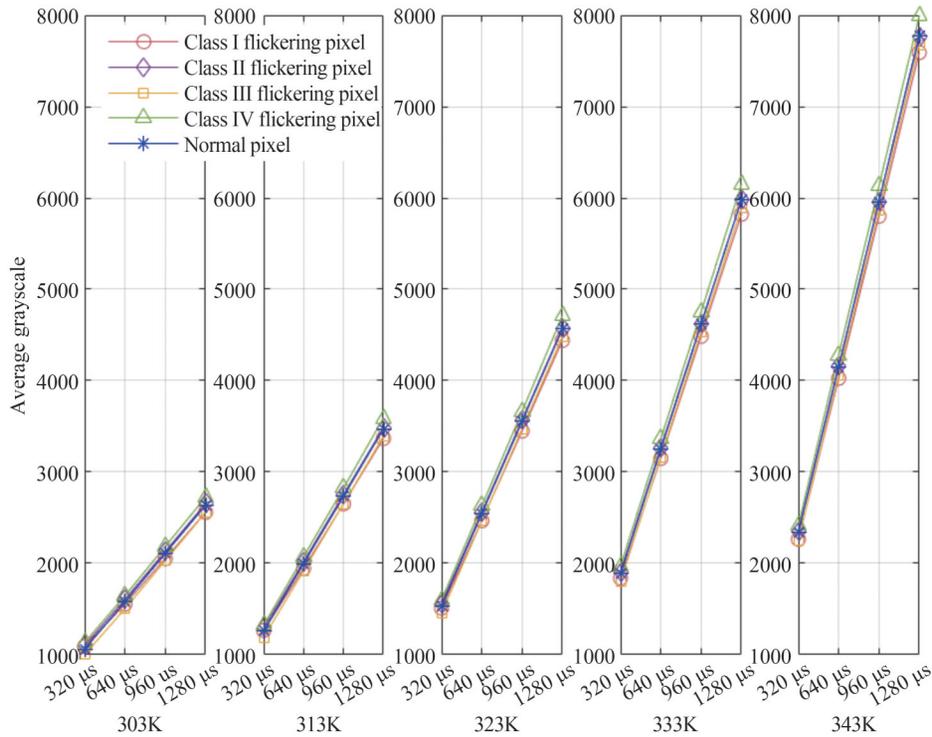


图3 正常像元与闪元不同工作点下灰度均值变化

Fig. 3 Average gray-level changes under different operating points of normal pixel and flickering pixel

从时域噪声的角度来分析像元的波动变化, 正常像元的时域噪声是光子噪声、暗电流噪声及读出噪声的共同作用, 对于原始图像的正常像元噪声而言^[17]有

$$\text{std}(X_{i,j}) = \sqrt{E_{P(i,j)} \cdot \eta_{i,j} \cdot A_D \cdot t + D_{i,j} \cdot t + N_{\text{read}}^2} \quad (6)$$

式中, $E_{P(i,j)}$ 为单位面积下的入射红外辐射光子数, 温度越高, 光子数越多, 面对均匀辐射源时, 每一个像元的 $E_{P(i,j)}$ 相等; A_D 为像元面积; $\eta_{i,j}$ 为像元响应率, 由于工艺问题, 每一个像元的 $\eta_{i,j}$ 并不完全一致; t 为积分时间。 $D_{i,j}$ 为像元在无辐射时产生信号的电子数。 N_{read}^2 为读出噪声, 与读出集成电路结构相关, 对于工作在特定积分电容下的探测器, 其读出噪声相对稳定。

由式(6)可得, 温度升高, $E_{P(i,j)}$ 增加, 光子噪声增大; 延长积分时间 t , 暗噪声和光子噪声都会增加, 正常像元的总体噪声也增加。而闪元的噪声机理相较于正常像元更为复杂。

探测温度和积分时间会改变像元内部直流电流大小、载流子浓度等因素, 这些因素与闪元本身缺陷共同作用, 使得闪元产生不同的特性。由图(3)可以看出, 在不同工作点下闪元的灰度均值变化趋势与正常像元相似, 但噪声波动又明显异于正常像元(图(2))。说明闪元依然能够进行部分光电转换, 但受其缺陷的影响, 在时域上灰度值会出现明显波动。因此, 闪元可以看作是在正常像元的响应上叠加了一个由像元缺陷

导致的独立噪声,闪元时域噪声表达式为

$$\text{std}(X_{i,j}) = \sqrt{E_{P(i,j)} \cdot \eta_{i,j} \cdot A_D \cdot t + D_{i,j} \cdot t + N_{\text{read}}^2 + \text{std}^2(\Delta x)} \quad (7)$$

式中, $\text{std}^2(\Delta x)$ 表示像元缺陷引起的噪声, $\text{std}^2(\Delta x) = \int_0^\infty S_f df$, 其中 S_f 随不同工作点变化。

为了更好地探究闪元随工作点变化的趋势, 本文对比各类典型闪元在不同工作点下的时域均值噪声变化和波形图变化, 如图 4、图 5 所示。

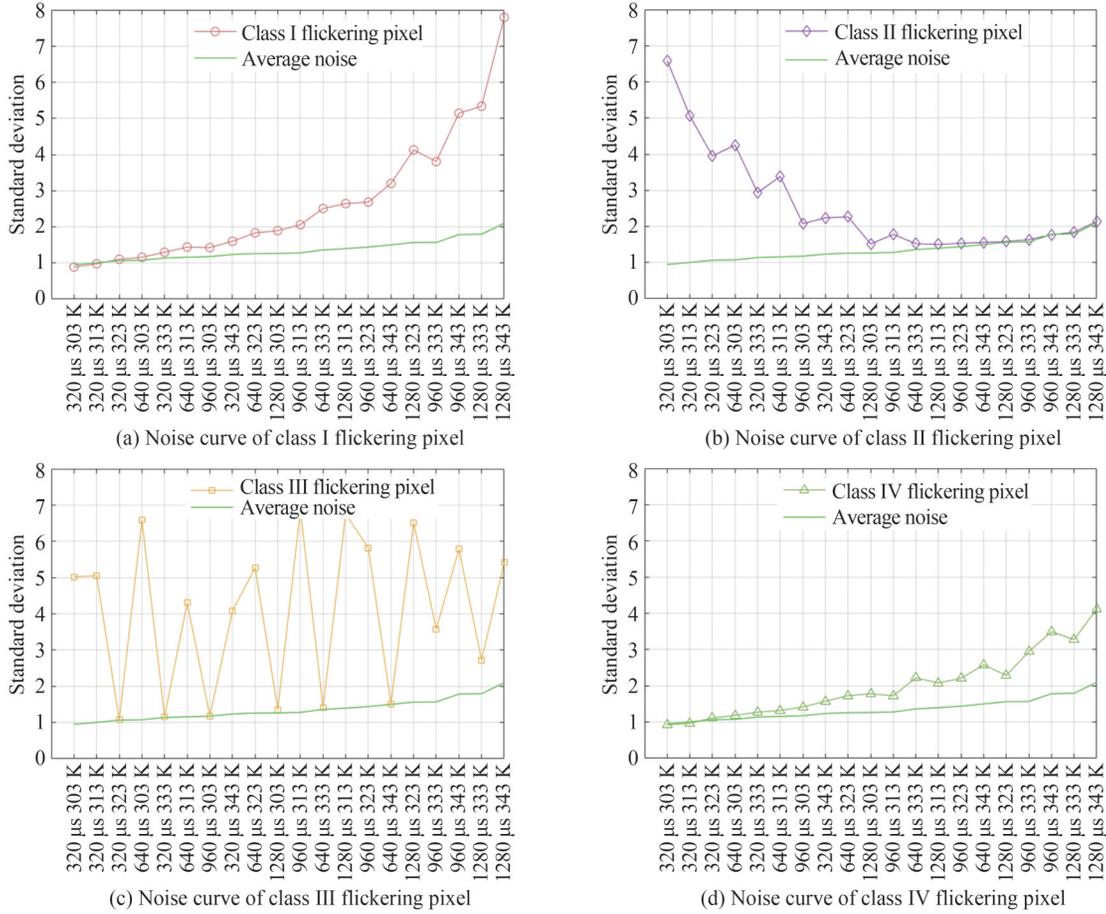


图 4 复合条件工作点下闪元噪声变化曲线, 工作点以噪声均值大小排列

Fig. 4 Noise curves of flickering pixel under compound condition operating points, the operating points arranged according to the average temporal noise

总体而言, 各类闪元在复合条件工作点下的特性不尽相同。对于 I 类闪元而言, 其产生的正向爆裂噪声随图像时域噪声均值增加而逐渐增加, 这是由于 PN 结对应的工作电流变化引起的, 当工作电流较大时, I 类闪元噪声更突出。对于 II 类闪元而言, 它在复合条件工作点上特性与 I 类闪元正好相反, 其噪声随图像时域均值增加而逐渐减小, 当 PN 结工作电流较小时, PN 结界面缺陷对其影响更大, II 类闪元噪声更突出。对于 III 类闪元而言, 在部分工作点上响应正常, 而在某些工作点上会出现阶跃噪声。说明 III 类闪元缺陷与 PN 结工作电流相关性不大, 主要在特定应力下被触发, 特定应力使得闪元信号传输路径参数出现变化, 从而形成随机阶跃噪声。对 IV 类闪元而言, 由于晶体接触不良的 $1/f$ 噪声也受到 PN 结工作电流的影响, 其噪声趋势变化和 I 类闪元相似, 随图像时域噪声均值增加而逐渐增加。除了上述典型闪元类型以外, 还存在混合了多种缺陷的闪元, 其表现特性更为杂乱。

基于上述情况, 在单一工作点下闪元的触发条件不够充分, 存在漏检可能。I 类和 IV 类闪元在温度低、积分时间短的工作点下易被触发, II 类闪元在温度高、积分时间长的工作点下易被触发, III 类闪元触发条件较为随机。因此, 闪元标定应考虑在多工作点下提供尽可能充分的激发条件, 以便对闪元进行充分标定。

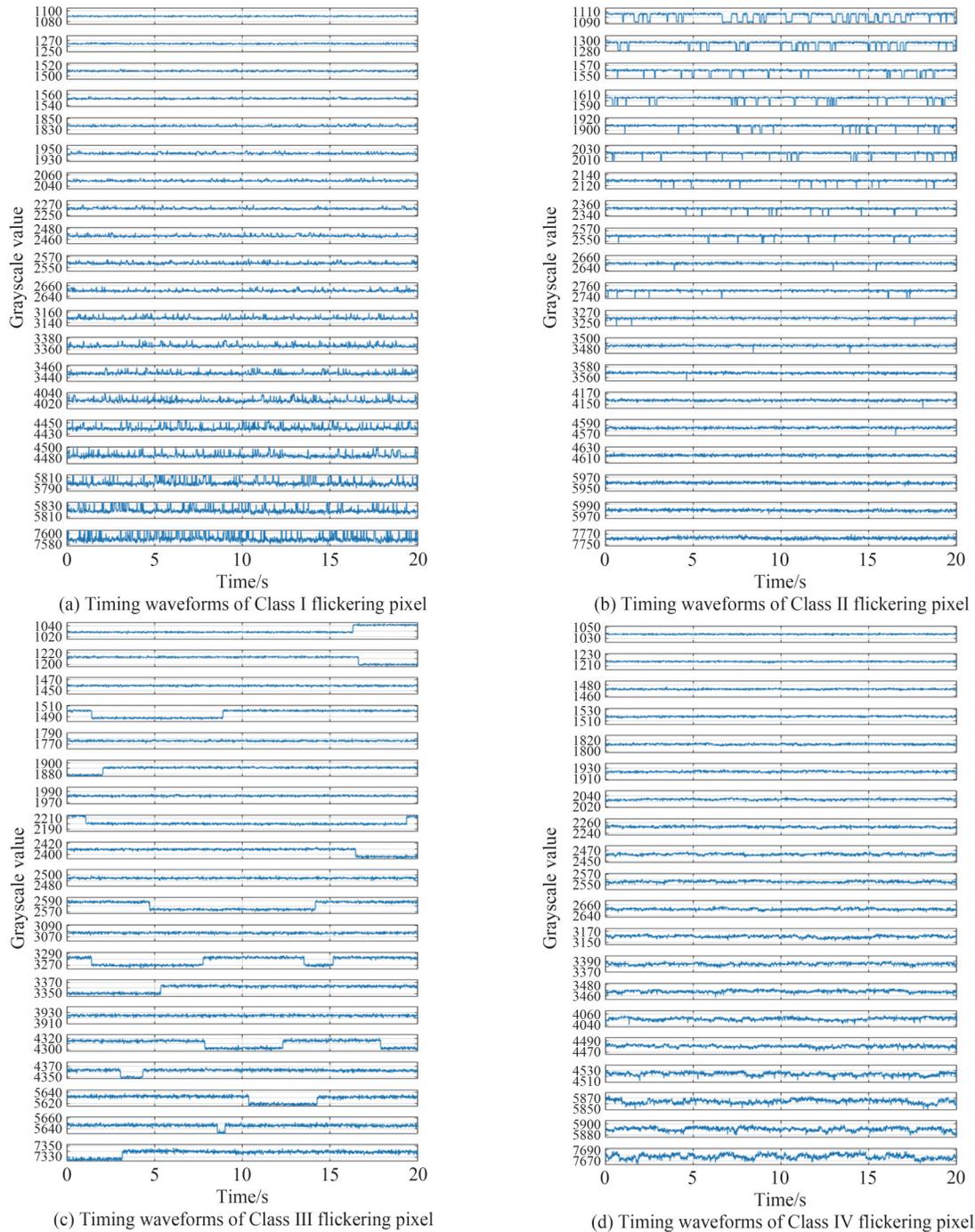


图5 复合条件工作点闪元时序波形图,工作点以噪声均值大小排列

Fig. 5 Timing waveforms of flickering pixel under compound condition operating points, the operating points arranged according to the average temporal noise

3 闪元标定方法及分析

在GB/T 17444-2013定义下^[18]:利用中波 293K 温度(长波利用 308K 温度)的面源黑体进行测试,如果噪声电压大于 2 倍的平均噪声电压,则认为是过热像元。除了国标以外,其他国家的公司等也给出了一些标定的方法。法国 Sofradir 公司认为噪声等效温差大于平均值 2 倍、响应率超出平均值 $\pm 30\%$ 、漏电流超出平均值 30% 的像元为无效像元;德国 AIM 公司将噪声等效温差大于平均值 2 倍、响应率小于平均值 50% 或者大于 1 倍、噪声电压大于平均值 5 倍的像元定义为无效像元^[19]。上述标定方法包含了盲元与闪元两类无效像元,盲元主要通过响应率来进行标定,而闪元主要通过噪声电压、噪声等效温差等进行标定。在多种方法对比下,时域

噪声能对波动变化进行较好的量化,且易于工程上实现。本文选择时域噪声均值的2倍作为闪元检测值。

对于固定的工作点而言,原始图像的均值时域噪声为恒值,定义为 S ,表达式为

$$S = \frac{1}{n \cdot m} \left(\sum_{i,j=1}^{n,m} \text{std}(X_{i,j}) \right) \quad (8)$$

式中, m 、 n 分别为探测面阵的行列数。

在固定工作点下,面阵探测器中正常像元 $A_D, D_{i,j}, N_{\text{read}}^2$ 均相似,令 $R = E_{P(i,j)} \cdot A_D \cdot t$, $Q = D_{i,j} \cdot t + N_{\text{read}}^2$ 。在固定工作点下,正常像元对应的 R 、 Q 相近,可视为固定值。而如上文所述,闪元可以看作在正常像元上叠加了噪声,所以闪元在灰度域中的时域噪声可以由式(7)简化为

$$\text{std}(X_{i,j}) = \sqrt{R \cdot \eta_{i,j} + Q + \text{std}^2(\Delta x)} \quad (9)$$

原始图像中闪元时域噪声与图像时域噪声均值比值为

$$q = \frac{\sqrt{R \cdot \eta_{i,j} + Q + \text{std}^2(\Delta x)}}{S} \quad (10)$$

可以看出,原始图像中 $\eta_{i,j}$ 偏大的高响应率闪元更容易满足检测条件而被检出;而对于 $\eta_{i,j}$ 偏小的低响应率闪元则较难被检出。因此,利用原始图像进行闪元检测容易对响应率较低的闪元造成漏检。

能量域图像相较于原始灰度图像,能够降低图像的非均匀性,同时响应值不受积分时间的影响^[20],适合应用于复合条件工作点下的红外检测场景。

将式(5)变换为灰度值关于幅亮度的函数

$$L_{i,j} = \frac{X_{i,j}}{t \cdot \eta_{i,j}} - \frac{h_{\text{det}(i,j)}}{t \cdot \eta_{i,j}} - \frac{h_{s(i,j)}}{\eta_{i,j}} \quad (11)$$

式中, $X_{i,j}$ 为原始图像的像元灰度值; $L_{i,j}$ 为像元的接收到的辐亮度值,可以将 L 看作原始图像 X 经过变换后得到的能量域图像。

在能量域图像上,闪元的时域噪声表达式为

$$\begin{aligned} \text{std}(L_{i,j}) &= \text{std} \left(\frac{X_{i,j}}{t \cdot \eta_{i,j}} - \frac{h_{\text{det}(i,j)}}{t \cdot \eta_{i,j}} - \frac{h_{s(i,j)}}{\eta_{i,j}} \right) \\ &= \frac{1}{t} \cdot \sqrt{\frac{R}{\eta_{i,j}} + \frac{Q + \text{std}^2(\Delta x)}{\eta_{i,j}^2}} \end{aligned} \quad (12)$$

能量域图像的噪声均值为

$$S' = \frac{1}{n \cdot m} \left(\sum_{i,j=1}^{n,m} \text{std}(L_{i,j}) \right) = \frac{S \cdot A}{t} \quad (13)$$

式中, $A = \frac{\frac{1}{n \cdot m} \left(\sum_{i,j=1}^{n,m} \frac{1}{\eta_{i,j}} \cdot \text{std}(X_{i,j}) \right)}{\frac{1}{n \cdot m} \left(\sum_{i,j=1}^{n,m} \text{std}(X_{i,j}) \right)}$ 。

能量域图像中闪元噪声与均值噪声比值为

$$q' = \frac{\sqrt{\frac{R}{\eta_{i,j}} + \frac{Q + \text{std}^2(\Delta x)}{\eta_{i,j}^2}}}{A \cdot S} \quad (14)$$

在能量域图像中,当 $\eta_{i,j}$ 偏大时,闪元较难被检出;当 $\eta_{i,j}$ 偏小时,闪元更容易被检出。

同一闪元在能量域图像和原始图像的比值结果对比为

$$\frac{q'}{q} = \frac{\frac{\sqrt{\frac{R}{\eta_{i,j}} + \frac{Q + \text{std}^2(\Delta x)}{\eta_{i,j}^2}}}{A \cdot S}}{\frac{\sqrt{R \cdot \eta_{i,j} + Q + \text{std}^2(\Delta x)}}{S}} = \frac{1}{A} \cdot \frac{1}{\eta_{i,j}} \quad (15)$$

如式(15)所示, $\eta_{i,j}$ 较小时, 闪元易在能量域图像检出; $\eta_{i,j}$ 较大时, 闪元易在原始图像检出。能量域图像弥补原始图像中由于响应率较低造成的漏检; 原始图像弥补能量域图像中由于响应率较高造成的漏检, 二者结合进行闪元标定解决了由于探测器非均匀性造成的闪元漏检, 这样可以使得闪元标定更加充分, 提高其检测概率。

本文将利用能量域图像和原始灰度域图像分别在多个工作点进行标定检测, 以对应工作点的 2 倍时域噪声均值作为阈值, 将检测结果做并集处理获得闪元表。流程示意图如图 6, 算法实现如表 1。

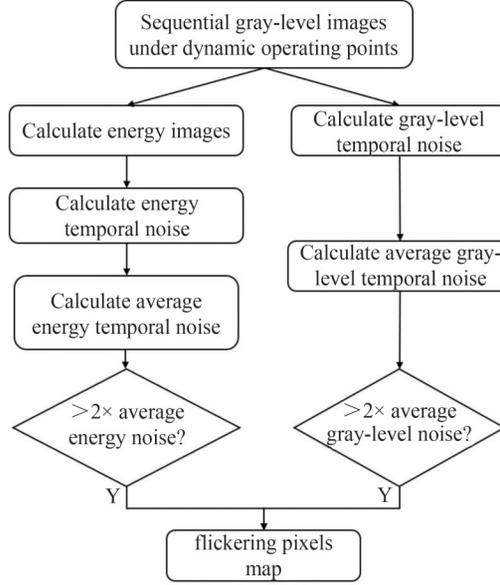


图 6 检测方法示意图

Fig. 6 Diagram of detection method

表 1 闪元标定算法

Table 1 The calibration method for flickering pixels

Input: Sequential gray-level images: X (width, height, temperature, integration time, samples)

Initialization: Coefficient of energy image calculation: h_{det}, h_s, η ; Integration time: t ; Threshold: cth

for i -th temperature

 for i -th integration time

 Calculate sequential energy images L : $L = \frac{X}{t \cdot \eta} - \frac{h_{det}}{t \cdot \eta} - \frac{h_s}{\eta}$

 sigmaX = std ($X(:, :, i, j, :)$, 0, 5);

 sigmaL = std ($L(:, :, i, j, :)$, 0, 5);

 meansigmaX = mean(sigmaX, 'all');

 meansigmaL = mean(sigmaL, 'all');

 mapL = zeros (width, height);

 mapX = zeros (width, height);

 mapL (find(sigmaX > cth * meansigmaX)) = 1;

 mapX (find(sigmaL > cth * meansigmaL)) = 1;

 map = find((mapL + mapX) > 0);

 flickerallmap (:, :, i, j) = map;

 end

end

flickermap = find (sum (flickerallmap) > 0);

Output: flickermap

4 实验与验证

利用 320×256 中波 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 碲镉汞红外焦平面探测器和法国 HGH 公司面源黑体(DCN 1000H4)进行实验验证。以五个不同探测温度(303 K, 313 K, 323 K, 333 K, 343 K), 4 个不同积分时间(3 200 μs , 640 μs , 960 μs , 1 280 μs)组成 20 个不同工作点, 在 20 个工作点下对均匀辐射黑体进行成像。

在不同工作点下, 闪元数量、位置均不同, 表 2 为在各工作点下检测闪元的数量变化。正常像元的噪声随温度和积分时间增加, 均值噪声增加, 闪元的检测标准在提高。但闪元的噪声并不是成比例增长, II 类闪元噪声会随工作点噪声均值增加而减小, 部分 I 类、IV 类闪元增长幅度小于检测标准的提高幅度, 这些闪元会被逐渐增长的噪声所淹没, 难以被检测出来。所以表 2 整体呈现了检测出的闪元数量随着积分时间、探测温度的增加而减少。对单一的工作点而言, 会产生很多漏检。本文方法在各单一工作点的检测数量均高于灰度图像检测, 平均提高了 12.49%。

表 2 各工作点下的检测闪元数量
Table 2 Number of flickering pixel detected at each operating point

| Integration time Temperature | 320 μs | | | 640 μs | | | 960 μs | | | 1 280 μs | | |
|---------------------------------|-------------------|-----|---------------|-------------------|-----|---------------|-------------------|-----|---------------|---------------------|-----|---------------|
| | A | B | Increase rate | A | B | Increase rate | A | B | Increase rate | A | B | Increase rate |
| 303 K | 195 | 210 | 7.69% | 176 | 192 | 9.09% | 162 | 172 | 6.17% | 121 | 135 | 11.57% |
| 313 K | 185 | 195 | 5.41% | 158 | 169 | 6.96% | 127 | 135 | 6.30% | 102 | 114 | 11.76% |
| 323 K | 174 | 187 | 7.47% | 125 | 136 | 8.80% | 93 | 104 | 11.83% | 86 | 106 | 23.26% |
| 333 K | 141 | 157 | 11.35% | 96 | 108 | 12.50% | 75 | 92 | 22.67% | 72 | 87 | 20.83% |
| 343 K | 133 | 145 | 9.02% | 72 | 87 | 20.83% | 69 | 84 | 21.74% | 48 | 55 | 14.58% |

Note: A is the detection result of traditional methods, B is the detection result of our method

为探究复合条件工作点下本文方法的标定效果, 利用多种方法进行复合条件工作点闪元标定, 结果如表 3 所示。利用波动幅度差检测更关注出现的极端数据, 对于波动频率高, 但波动幅度小的闪元容易出现漏检, 其检出数量最少。噪声等效温差检测结合响应幅度和像元噪声进行检测, 但需要不同温度下的两组数据, 还受到探测器非均匀性的影响, 其检出数量高于波动幅度检测, 低于灰度图像时域噪声检测和本文方法。灰度图像时域噪声检测以噪声方差作为判断标准, 但也受到探测器综合响应非均匀性的影响, 易对像元响应率低的闪元造成漏检, 其检出数量高于前两种方法, 低于本文方法。本文方法通过能量域图像和灰度图像检测结果相结合来克服探测器非均匀性的问题以减少漏检, 其检出数量最多。相较于灰度图像, 本文检测方法检测出的闪元总数目整体增加了 9.41%。

表 3 各类方法在复合条件工作点下的检测结果对比
Table 3 Comparison of detection results of various methods under compound condition operating points

| Method | Number |
|---|--------|
| 2 times the average fluctuation amplitude | 391 |
| 2 times the average noise equivalent temperature difference | 505 |
| 2 times the average gray-level temporal noise | 521 |
| Our method | 570 |

图 7 为能量域图像独立检测出的闪元和原始灰度图像独立检测出的闪元对应的像元响应率大小。能量域图像单独检测出的闪元的像元响应率值均小于原始灰度图像独立检测出的闪元像元响应率, 说明当 $\eta_{i,j}$ 较小的闪元能在能量域图像检出; $\eta_{i,j}$ 较大的闪元能在原始图像检出。能量域图像弥补了低像元响应率而导致的漏检, 与灰度图像检测相结合能够克服像元响应率非均匀性的影响, 符合上文推论。

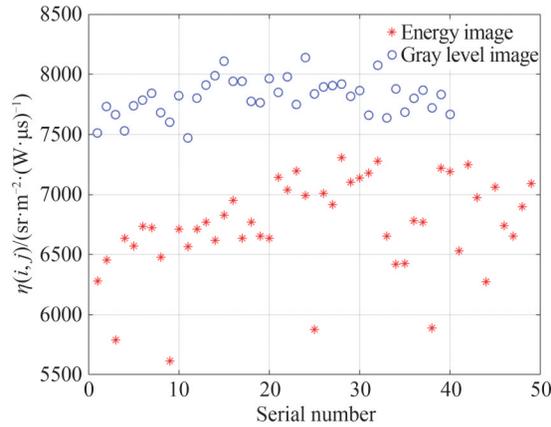


图7 能量域图像独立检出闪元和灰度图像独立检出闪元对应的 $\eta_{i,j}$ 分布

Fig. 7 The $\eta_{i,j}$ corresponding to the independent detection of flickering pixel in the energy image and the independent detection of flickering pixel in the gray-level image

5 结论

红外探测器因其自身工艺水平不足,存在闪元等无效像元,加大了红外弱小目标检测难度。在红外系统实际使用过程中系统工作点的改变会引起闪元位置和数量的变化。单一工作点对闪元激发条件不够充分,其标定结果无法应对实际红外弱小目标检测场景中探测温度、积分时间的不断变化。

在总结闪元产生的原因和机理的基础上,根据闪元时频特性的不同将其分为四类典型闪元,分别为 I 类正向爆裂噪声闪元、II 类反向爆裂噪声闪元、III 类阶跃噪声闪元和 IV 类 $1/f$ 噪声闪元,并分析了各类闪元在多个复合条件工作点变化特性。四类典型闪元由于产生原因不同,在工作点变化时,特性变化也不同。I 类正向爆裂噪声闪元和 IV 类 $1/f$ 噪声闪元其噪声随工作点时域噪声增加而缓慢增加; II 类反向爆裂噪声闪元其噪声随工作点时域噪声增加而缓慢减小; III 类阶跃噪声闪元在某些工作点会产生随机阶跃噪声。除了典型闪元以外还存在着混合多种缺陷的闪元,其特性更为复杂。

利用原始灰度图像对闪元进行检测,像元响应率较大的闪元易于检出,但像元响应率较小的闪元易被漏检;而能量域图像能够在校正图像非均匀性的同时响应值不受积分时间的影响,易于检测出像元响应率较小的闪元,弥补了这一问题。二者检测结果相结合,可使闪元标定更加充分。

本文在多工作点下结合原始灰度图像和能量域图像进行闪元检测,解决了单一工作点对闪元激发条件不够充分和像元响应率不均匀所造成的闪元漏检问题。经过实验验证,单一工作点下闪元检测率平均提高了 12.49%,整体闪元检测率相较于传统方法提高了 9.41%。

参考文献

- [1] SHI Yan, MAO Haicen, ZHANG Tianxu, et al. New approach of IRFPA non-effective pixel discrimination based on pixel's characteristics histogram analysis[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2005, (2): 119-124.
石岩,毛海岑,张天序,等.一种新的基于特征直方图分解的红外焦平面阵列无效像元判别方法[J].红外与毫米波学报, 2005, (2): 119-124.
- [2] DAI Shaosheng, ZHANG Tianqi. A new algorithm of blind pixels processing for IRFPA [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2008, 30(3): 376-378.
代少升,张天祺.一种新的红外焦平面阵列盲元处理算法[J].压电与声光, 2008, 30(3): 376-378.
- [3] LI Liping, YUAN Qigang, ZHU Hua, et al. A new algorithm of blind pixel detection for infrared focal array[J]. Infrared Technology, 2014 (2): 106-109.
李丽萍,袁祁刚,朱华,等.一种新的红外焦平面阵列盲元检测算法[J].红外技术, 2014 (2): 106-109.
- [4] LENG Hanbing, GONG Zhendong, XIE Qingsheng, et al. Adaptive blind pixel detection and compensation for IRFPA based on fuzzy median filter[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 821-826.
冷寒冰,宫振东,谢庆胜,等.基于模糊中值的IRFPA自适应盲元检测与补偿[J].红外与激光工程, 2015, 44(3): 821-826.
- [5] LIU Gaorui, SUN Shenli, LIN Changqing, et al. Analysis and suppression method of flickering pixel noise in images of infrared linear detector[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2018, 37(4): 21-26.

- 刘高睿,孙胜利,林长青,等. 红外行列探测器闪元噪声分析与抑制方法[J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(4): 21-26.
- [6] ZHENG Xiao, GE Zhixiong, LAI Yong'an. Algorithm for blind-pixel detection of IRFPA based on sliding window[J]. Infrared Technology, 2019, 41(8): 735-741.
郑晓,葛志雄,赖永安. 基于滑动窗口的红外焦平面阵列盲元检测算法研究[J]. 红外技术, 2019, 41(8): 735-741.
- [7] SONG Z, ZHANG D, ZHANG S. Scene-based blind and flickering pixel dynamic correction algorithm[C]. 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing, IEEE, 2019.
- [8] GROSS W, HIERL T, SCHULZ M. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays[J]. Optical Engineering, 1999, 38(5):862-869.
- [9] HUANG Yangcheng, LIU Dafu, LIANG Jinhui, et al. Low frequency noise study on short wavelength HgCdTe photodiodes[J]. Acta Physica Sinica, 2005, (5):2261-2266.
黄杨程,刘大福,梁晋穗,等. 短波碲镉汞光伏器件的低频噪声研究[J]. 物理学报, 2005, (5):2261-2266.
- [10] LI Jinlin, XIE Gang, LIU Lian, et al. Characteristics and causes of non-effective pixels of HgCdTe FPA [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(2): 20200202.
李建林,谢刚,刘炼,等. 碲镉汞焦平面阵列无效像元(盲元)特征与成因[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(2): 20200202.
- [11] ZHOU Xiaohao, XIA Hui, WANG Ziyan, et al. Research progress on p-type doping mechanism and low frequency noise of long wave HgCdTe devices[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2021, 51(2): 027302.
周孝好,夏辉,王子言,等. 长波碲镉汞p型掺杂机理和器件低频噪声研究进展[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(2):027302.
- [12] YANG Dezhen, YU Songlin, FENG Jinjun. Dynamic real-time restoration algorithm of defective pixels based on spatio-temporal statistics feature[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(3): 20210798.
杨德振,喻松林,冯进军. 基于时空统计特征的缺陷像元动态实时修复算法[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(3): 20210798.
- [13] XIE Duan, ZHAO Jian, WANG Danghui, et al. New checking method of optocoupler burst noise based on singularity of noise[J]. Semiconductor Technology, 2008, 33(5): 404-408.
谢端,赵健,王党会,等. 基于噪声奇异性的光耦器件爆裂噪声检测新法[J]. 半导体技术, 2008, 33(5): 404-408.
- [14] GAO Jingzhan. Detection of weak signals[M]. Tsinghua University Press, 2004.
高晋占. 微弱信号检测[M]. 清华大学出版社, 2004.
- [15] TAKAGI K, MIZUNAMI T, SUZUKI J I, et al. 1/f noise in metal contacts and granular resistors [J]. IEEE Transactions on Components Hybrids & Manufacturing Technology, 2003, 9(2):141-144.
- [16] SUN Zhiyuan, CHANG Songtao, ZHU Wei. Radiation calibration method for infrared system with large aperture and broad dynamic range[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 137-143.
孙志远,常松涛,朱玮. 大口径、宽动态范围红外测量系统辐射定标方法[J]. 光学学报, 2014, 34(7):137-143.
- [17] MA Ning, LIU Sha, LI Jiangyong. Analysis of spatial and temporal noise of infrared thermal imager [J]. Laser & Infrared, 2017, 47(6): 717-721.
马宁,刘莎,李江勇. 红外热像仪的空间噪声和时间噪声分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(6): 717-721.
- [18] GB/T 17444-2013 Infrared focal plane array parameter test method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
国家技术监督局. GB/T 17444-2013. 红外焦平面阵列特性参数测试技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [19] CHEN Xing. Research on the related technology of HgCdTe infrared focal plane detector reliability [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Techcial Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
陈星. 碲镉汞红外焦平面可靠性相关技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [20] BAI Le, LAI Xuefeng, HAN Weiqiang, et al. An infrared image nonuniformity correction method adapted to dynamic adjustment of integration time[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1):0110002.
白乐,赖雪峰,韩维强,等. 适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法[J]. 光子学报, 2020, 49(1):0110002.

Calibration Method for Flickering Pixels under Compound Condition Operating Points of IRFPA Detector

ZHAO Wenxin^{1,2}, LAI Xuefeng¹, XIA Yucheng¹, LI Sujun¹, ZHOU Jinmei¹

(1 *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

(2 *University of Chinese Academy of Sciences, School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, Beijing 100049, China*)

Abstract: In recent years, there has been a growing demand for long-distance target detection, leading to an increased focus on dim and small target detection technology based on the infrared band. However, this technology is often plagued by false alarms caused by flickering pixels in the Infrared Focal Plane Array (IRFPA). The occurrence of flickering pixels is multifaceted, resulting from a combination of internal defects and external conditions. In practical applications of infrared systems, the detector's operating point is typically adjusted dynamically based on the target and scene, thereby altering the time-frequency characteristics of the flickering pixels. During the calibration process, a single operating point is insufficient to stimulate all flickering pixels, resulting in only a partial display of flickering pixels. Furthermore, gray-level image detection is affected by detector non-uniformity, making it difficult to detect flickering pixels with low responsivity and leading to instances of missed detection.

Flickering pixels can be attributed to various internal defects, including defects in the readout integrated circuit, poor contact, uneven carrier concentration, impurities, crystal dislocation, and so on. Additionally, external stress variations also contribute to the occurrence of flickering pixels. The temporal characteristics of flickering pixels are jointly determined by internal defects and external stress conditions. The complex mechanisms of these defects and the variable external stress conditions result in the chaotic behavior in flickering pixels. By summarizing the causes and mechanisms of flickering pixels, four distinct categories have been identified based on their specific time-frequency characteristics: Class I -Forward burst noise flickering pixel, Class II -Opposite burst noise flickering pixel, Class III -Step noise flickering pixel, and Class IV $-1/f$ noise flickering pixel. These four categories exhibit different trends of variation under compound operating point conditions.

The noise in Class I primarily originates from defect energy levels generated by semiconductor defects within the bandgap. This type of noise is highly sensitive to the system's operating state and increases with the PN junction's working current. The noise slowly increases with the increase of temporal noise at the operating point. On the other hand, Class II noise refers to flickering pixels, which are a specific type of Random Telegraph Signal (RTS) noise. As the channel width in the PN junction increases, the impact of interface defects on the non-uniformity of carrier current diminishes, leading to increased noise as the working current of the PN junction decreases. The noise slowly decreases with the increase of temporal noise at the operating point. Class III noise is generated under particular external stress conditions and has limited correlation with the PN junction's working current. It arises from the combined effect of internal defects and external stress, resulting in random step noise at specific operating points. In Class IV noise, poor crystal contact is the primary factor, influenced by the operational state. This type of noise is more pronounced at low frequencies, with an overall downward trend in its spectrum. Similar to Class I noise, the noise slowly increases with the increase of temporal noise at the operating point.

Apart from typical flickering pixels, there are also flickering pixels with a mixture of various defects, displaying more complex characteristics. Due to these complexities, calibrating flickering pixels under a single operating point is challenging.

In comparison, compound condition operating points provide more comprehensive excitation conditions, enabling a higher occurrence of flickering pixels. The calibration of flickering pixels is more efficient and allows for an increased detection rate under compound condition operating points. Additionally, energy images can correct image non-uniformity, while the response value remains unaffected by the integration time. Combining energy images with gray-level images helps overcome missed detections caused by detector non-uniformity. Therefore, a calibration method for flickering pixels

is proposed to address the limitations of traditional calibration methods. This method employs twice average energy temporal noise and twice average gray-level temporal noise as thresholds to detect flickering pixels under compound condition operating points. The detection results are then merged to obtain the flickering pixels map. This article verifies the proposed method through experiments conducted using the HgCdTe IRFPA detector (320×256) and the French HGH company's surface source blackbody (DCN 1 000H4). The experimental results show that the average detection rate of flickering pixels at a single operating point has increased by 12.49%, while the overall detection rate of flickering pixels has improved by 9.41% compared to traditional methods. The calibration method effectively addresses the issues of insufficient excitation conditions for flickering pixels at a single operating point and miss detection of flickering pixels caused by detector non-uniformity, thereby improving the detection rate of flickering pixels.

Key words: IRFPA detector; Flickering pixels detection; Flickering pixels calibration; Compound condition operating points; Energy image

OCIS Codes: 040.3060; 120.1880; 110.3080; 110.2970