

# 红外线列探测器闪元噪声分析与抑制方法

刘高睿<sup>1,2,3</sup>, 孙胜利<sup>1,2\*</sup>, 林长青<sup>1,2</sup>, 吕凭乐<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院空天目标红外探测与识别技术重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**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.考虑到闪元仍然保留了一定的信息获取能力,采用一维中值滤波的方法单独对闪元位置进行背景抑制,对闪元补偿后的图像进行常规目标检测.实验验证表明,经背景抑制后,闪元位置平均目标信杂比可以达到常规位置的 96%,目标信息得到较好的保留.常规目标检测方法不再受到闪元噪声的干扰.

**关键词:**闪元噪声;红外线列探测器;多帧最大值投影;弱小目标

**中图分类号:**TP216, TP751.1 **文献标识码:** A

## Analysis and suppression method of flickering pixel noise in images of infrared linear detector

LIU Gao-Rui<sup>1,2,3</sup>, SUN Sheng-Li<sup>1,2\*</sup>, LIN Chang-Qing<sup>1,2</sup>, LYU Ping-Yue<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of AeroSpace Moving Target Detection and Recognition based on Infrared Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

**Abstract:** In this paper, the characteristics of the flickering pixel phenomenon in the infrared scanning image are analyzed. The detection and compensation method of the flickering pixel based on the time series multi-frame maximum projection is designed. Considering that the flickering pixels still retain a part of the information acquisition ability, the one-dimensional median filter is used to suppress the background for the position where flickering pixels exist. Traditional methods of target detection are carried out for the image after flickering pixels compensated. Experiment results show that after background suppression, the target average signal to clutter ratio in the flickering pixel location can reach 96% of the normal position, and the target information is well preserved. The traditional method of target detection is no longer interfered by flickering noise.

**Key words:** flickering pixel noise, infrared linear detector, multi-frame maximum projection, low signal-noise ratio(SNR) small target

**PACS:** 42.30.Tz, 07.07.Df

## 引言

闪元是红外探测器固有特性,对红外探测目标检测性能影响很大.在线列探测器扫描图像中,闪元

的存在将影响一整列(或行)的数据,在目标检测过程中造成虚警,因而需要对其进行检测和抑制.闪元不同于盲元,在一定的时间内,闪元输出电平波动较大,有时又趋于正常.闪元仍然保留着一定的信

收稿日期:2017-10-16,修回日期:2018-04-12

基金项目:中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-63)

**Foundation items:** Supported by Innovative Special Foundation of Shanghai Institute of Technical Physics(CX-63)

**作者简介(Biography):** 刘高睿(1989-),男,山东德州人,博士研究生,主要从事遥感图像处理,目标检测,模式识别方面的研究工作  
E-mail: kingrain@mail.ustc.edu.cn

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: palm\_sun@mail.sitp.ac.cn

Received date: 2017-10-16, revised date: 2018-04-12

息获取能力,所以如果采取盲元的处理方式可能导致目标漏检。

非均匀性与盲元现象在红外探测器中较为普遍,相关的研究也相对完善<sup>[1]</sup>。闪元噪声不是很普遍,并且没有明确的定义,目前只有少量学者对此做了研究。Keith C. GENDREAU 等<sup>[2]</sup>将使用过程中 100% 的时间都表现为坏元的像元称为热像元 (hot pixels),将少于 100% 频率表现为坏元的像元称为闪元 (flickering pixels)。Werner Gross 等<sup>[3]</sup>通过像元响应曲线,发现闪元具有随机的闪烁特性,并认为闪元与  $1/f$  噪声有关。Kristin Ackerson<sup>[4]</sup>对闪元 (blinking pixels) 的特点做了分析,发现闪元在多帧平均值中与正常像元难以区分,但其标准差值会持续偏大。冷寒冰<sup>[5]</sup>等发现在非制冷长波 IRFPA 中存在的三类随机盲元,与本文“闪元”总体性质一致。

现有文献中有关于闪元检测的方法主要是辐射定标法<sup>[1,6,9]</sup>和基于场景<sup>[7,10]</sup>的方法。辐射定标法可以有效检测出坏元,但只能通过定期观测黑体的方式进行,因而不能实时获取最新产生的闪元噪声。场景检测法是通过分析实时观测的图像,获得最新的闪元。可以弥补辐射定标法的固有缺陷。基于场景的方法较少,李凌霄<sup>[7]</sup>、冷寒冰<sup>[5]</sup>将闪元归结为随机盲元,实现了焦平面探测器中闪元的检测与抑制,对于本文线列扫描探测器不适用。郑为<sup>[10]</sup>在非均匀校正阶段进行盲、闪元的抑制,但在本文的测试中未达到条带非均匀性抑制效果,并且盲元与闪元未得到有效抑制。由于闪元的成因机理还存在诸多需要研究的基础性问题,并且闪元可能会随着时间逐步增多,因此从探测器源头消除比较困难,在图像端通过基于场景的处理的方式抑制其影响成为一种重要途径。

本文对短波红外线列探测器扫描图像进行研究,在进行了条带非均匀性校正的基础上,结合弱小目标特征,分析了扫描图像中闪元噪声的特点,设计了一种基于场景的闪元噪声检测与抑制方法。在实现了闪元有效检测与补偿的同时,避免了闪元位置上弱小目标的漏检。

## 1 红外线列探测器扫描图像闪元现象特性分析

红外线列探测器以推扫方式实现大视场范围高分辨率成像,图像每一列(或行)是由同一像元成像所得,在非均匀性校正之前,其表现出明显的条带噪声,即条带非均匀性。其图像以及像元标准差和均值

如图 1 所示。由图像可以看出,灰度均值曲线可以明显地表现出条带的强弱变化,标准差反映出像元的波动程度,其中第 351 号为盲元,本文采用矩匹配<sup>[12-13]</sup>法进行非均匀性校正,采用邻域像元的响应均值对固定盲元进行补偿。

经过矩匹配条带非均匀校正之后,如图 2 所示,图像中残存一种时变噪声,有时输出电平波动较大,产生连续或离散条带,有时又趋于正常。这两列噪声对应于图 1 中的第 76 号和 78 号两个像元,从图 1 (b) 中分析可以看出,与标准差和均值都偏差较大的第 351 号盲元不同,在非均匀校正前的原始图像中,此像元的均值与正常像元类似,标准差稍有偏大。由于已经进行了非均匀噪声抑制及盲元的补偿,并且体现出条带特征,可以断定这种噪声是由于像元本身的不稳定性造成的,而非场景中的物体,因此可以定义其为闪元噪声,其对应的坏元称之为闪元。

闪元噪声以不连续亮条或亮点的形式出现在红外扫描图像中,严重干扰了图像质量,对弱小目标的检测和定位造成极大的影响。

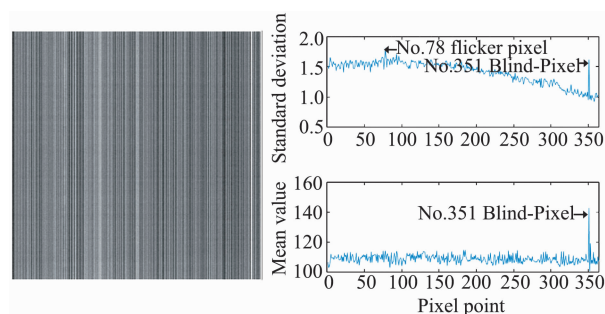


图 1 条纹非均匀噪声 (a) 非均匀灰度图像, (b) 像元均值和标准差曲线

Fig. 1 Stripe non-uniformity noise (a) Gray scale images, (b) column mean gray value

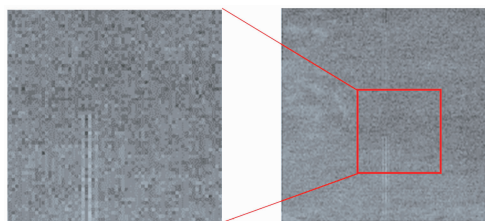


图 2 原扫描红外图像矩匹配法非均匀校正结果  
Fig. 2 The processing result of the moment matching on the original scanning thermal image

为了研究闪元噪声对弱小目标检测的影响,本文按照文献<sup>[15]</sup>方法对弱小目标进行建模仿真,将仿真的目标加入实际的夜间地对空扫描红外云层背

景图像中. 含有目标的红外扫描图像经非均匀校正后如图 3 所示, 可以看出, 在远距离红外目标成像中, 目标能量较弱, 其面积小于像元覆盖的瞬时视场, 在像面上只占有一个像素.

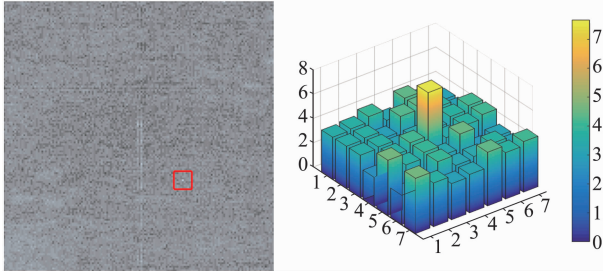


图 3 红外目标图像仿真结果及目标区域灰度分布  
Fig. 3 Simulation result of Infrared target image and Grayscale distribution of point target

对于弱小目标检测而言, 首先需要进行背景抑制. 对于背景灰度变化均匀的场景,  $3 \times 3$  中值滤波算法是一种简单高效的方法. 其计算方法如式(1)所示. 算法对每个像素进行操作,  $P(i, j)$  为当前所处理的像素值,  $PX$  为其  $3 \times 3$  邻域所有像素值集合,  $\text{med}(\ast)$  为对集合内的值取中值操作, 设定动态或静态阈值  $Th$ , 大于阈值  $Th$  的点即为前景点, 处理结果如图 4 所示.

$$P(i, j) - \text{med}(PX) > Th$$

$$PX = \{P(i-1, j-1), P(i, j-1), \dots, P(i+1, j+1)\} \quad (1)$$

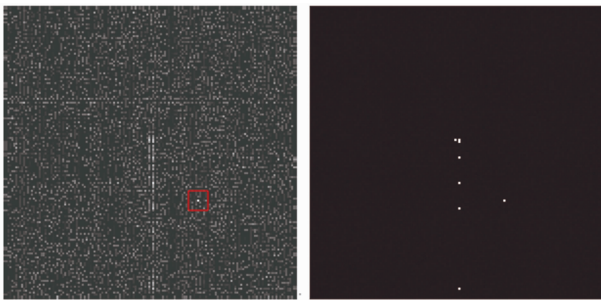


图 4 红外目标图像中值滤波检测结果 (a) 二值化前 (b) 二值化后  
Fig. 4 The detection results of the median filter algorithm. (a) Before using threshold value. (b) after using threshold value

由图 4 可以看出,  $3 \times 3$  中值滤波的方法检测出大量闪元噪声, 这些噪声点与目标形态相近, 在图像中难以将其区分. 这会给后续的目标多帧关联噪声抑制带来很大的计算冗余, 并且排成一列的闪元噪声点与目标运动轨迹也非常相近, 容易造成虚警. 在

实验验证部分, 本文还测试了其他几种目标检测算法, 包括 TDLMS 滤波、双边滤波、显著性检测, 经过几种方法处理后, 残差图像在闪元位置都容易产生噪声残留, 影响目标检测.

为了进一步分析闪元与正常像元的响应差别, 将闪元与正常像元在场景中的响应生成曲线, 曲线如图 5 所示. 由图像可以看出, 当正常像元响应平稳时, 闪元产生了一定的波动, 但整体的变化趋势与正常像元类似, 没有出现较为剧烈的响应偏差. 表明闪元不是无效像元, 它仍然获取了场景信息. 结合行列扫描探测器成像特点, 其每一列数据都是由同一个像元得来, 因此闪元在列方向上具有较强的相关性, 采用列方向(扫描方向)上的一维的目标检测方法将会有利于闪元列的背景抑制以及弱小目标提取.

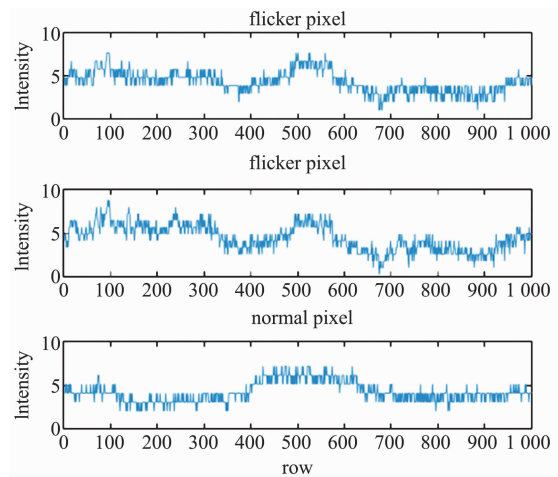


图 5 闪元与正常像元在场景中的响应曲线  
Fig. 5 The response curve of flicker and normal pixel in scene

为了分析一维滤波对闪元列背景的抑制效果, 将目标设定在闪元位置, 在图像列方向上进行一维滤波的操作, 其中包括一维中值滤波、一维均值滤波、一维高斯滤波, 其结果如图 6 所示. 在图示中表示了滤波器参数及处理之后目标信杂比 (SCR), 可见几种一维滤波操作都对闪元列的背景产生了抑制, 避免了二维滤波在闪元位置产生的杂波, 并实现了目标的增强.

从各种方法处理的背景抑制图像的目标信杂比 (SCR) 可以看出, 背景抑制效果最好的为一维中值滤波, 其处理过程如式(2)所示.

$$I(i, j) = P(i, j) - \text{med}(PX)$$

$$PX = \{P(i, j-1), P(i, j), P(i, j+1)\} \quad (2)$$

分析经过一维中值滤波处理后闪元列和正常像

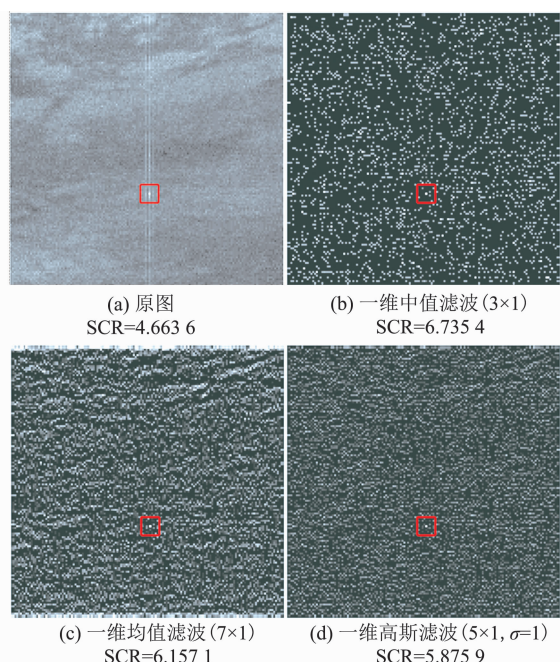


图6 一维滤波程序运行结果

Fig.6 The detection results of one-dimensional filter

元列残差的直方图分布,并对直方图做高斯曲线拟合,如图7所示.从统计结果来看,闪元列与常规列残差都符合高斯分布,闪元列的标准差( $\sigma$ )要大于常规列,这是由于闪元本身的不稳定性造成的.由于不同闪元的白噪声分布参数不同,并且随时间的变化同一闪元的噪声分布也可能会产生相应的变化,相比于固定阈值,采用恒虚警目标检测(CFAR)<sup>[16]</sup>更有利于提高检测算法的鲁棒性.由于残差杂波服从高斯分布,首先按照式(3)将闪元列数据进行标准化得到 $I_N(i,j)$ ,此时闪元列数据 $I_N(i,j)$ 服从标准正态分布 $N(0,1)$ ,设定虚警概率 $P_{fa}$ ,可获得一个阈值 $Th = \Phi^{-1}(1 - P_{fa})$ ,当 $I_N(i,j) \geq Th$ 时判定目标存在,否则目标不存在.

$$I_N(i,j) = \frac{I(i,j) - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}$$

$$\hat{\mu} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I(i,j)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (I(i,j) - \hat{\mu})^2 \quad (3)$$

在存在闪元的情况下,多种的优质的二维空域目标检测方法会在闪元位置检测出虚假目标.虽然一维滤波可以实现闪元噪声抑制及目标检测功能,但仅能用于简单背景下,使用条件受到极大的限制.本文考虑首先进行闪元的检测与抑制,然后采用适合于场景的目标检测方法进行目标检测,对原始闪

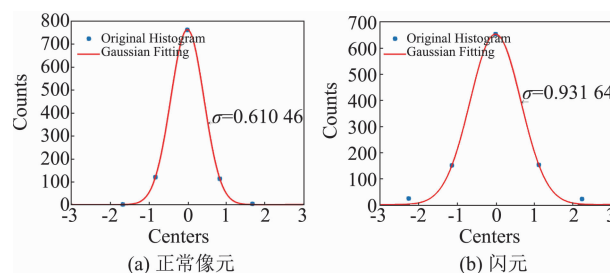


图7 残差图像直方图统计与高斯分布拟合

Fig.7 The original histogram of residual image and Gaussian Curve Fitting

元列,单独采用一维滤波的方法进行目标检测,最后将两种检测结果进行融合.这样可有效减少闪元对目标检测算法的影响,并且仍然保留闪元列的目标探测能力.

## 2 闪元检测与补偿方法

在上面分析了二维的目标检测算法会在闪元位置检测出大量虚假目标,为了放大这一特征,本文设计了多帧序列最大值投影的方法.多帧最大值投影可以使各个单帧的闪元噪声同时投影到一张图上,最终使不稳定的闪元噪声得以稳定出现在投影图像上.方法如式(4)所示,设 $I(i,j,t)$ 为经过二维中值滤波方法背景抑制之后的图像序列,对多帧背景抑制图像求取时域最大值操作获得 $Z(i,j)$ .

$$I(i,j,t) = P(i,j,t) - \text{med}(PX)$$

$$PX = \{P(i-1,j-1), P(i,j-1), \dots, P(i+1,j+1)\}$$

$$Z(i,j) = \max(I(i,j,t)), t = 1, 2, 3 \dots N \quad (4)$$

经过多帧最大值投影之后,如图8(a)上所示,相比单帧背景抑制图像8(a)下,闪元得到了明显放大,对图像各列求取均值,如图8(b)所示,闪元均值特性在多帧投影图上得到明显提升,有利于闪元检测.

下面介绍闪元检测与抑制的具体方法,如式(5).首先在列方向上对投影图像 $Z(i,j)$ 求取均值获得 $ZM(i)$ ,其结果如图8(b)(上)所示.因为投影帧 $Z(i,j)$ 中每个像元的数据是独立同分布的,根据中心极限定理,其列均值 $ZM(i)$ 符合高斯分布,对 $ZM(i)$ 进行直方图统计并进行高斯分布拟合(如图9)可以看出,数据很好的符合了高斯分布,其确定系数(R-square)可达到0.95左右.采用最大似然估计可以获得高斯分布的参数估计,即 $\hat{\mu} = \text{mean}(ZM)$ , $\hat{\sigma} = \text{std}(ZM)$ .其中 $\text{mean}(\ast)$ 表示取均值,

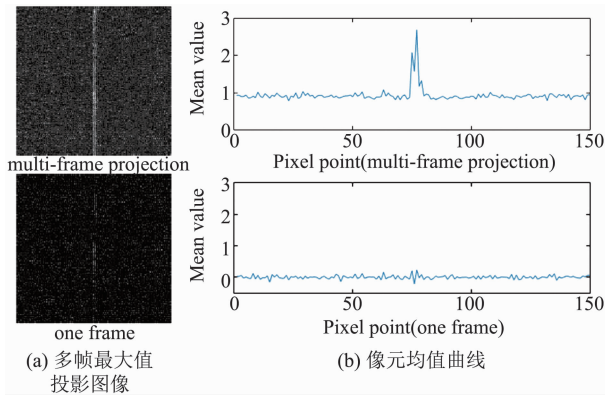


图 8 (a) 多帧最大值投影图像, (b) 像元均值曲线  
Fig. 8 (a) The processing result of time series multi-frame maximum projection, (b) column mean gray value

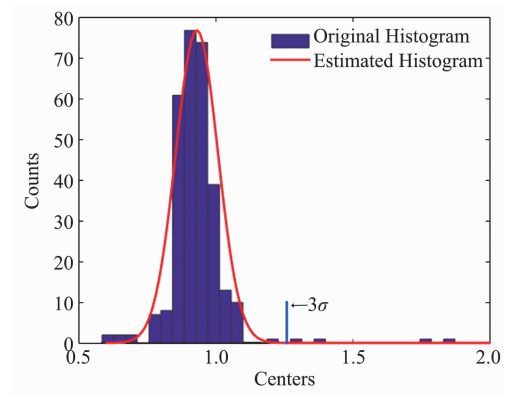


图 9 列均值直方图统计及高斯曲线拟合  
Fig. 9 The original histogram of Mean value and Gaussian Curve Fitting

$std(*)$  表示取标准差.

采用估计得到的参数对数据  $ZM(i)$  进行标准化获得  $ZM\_N(i)$ , 则正常像元对应的  $ZM\_N(i)$  值符合标准正态分布  $N(0, 1)$ , 根据  $3\sigma$  原则, 可以认为正常像元只在  $[-3, 3]$  区间上存在非零值. 落在区间以外的像元为非正常像元. 经过多帧投影操作之后, 由图 9 可以看出, 闪元均处于  $3\sigma$  位置的右侧, 将阈值  $Th$  设定在 3 可将闪元检测出来. 在非均匀校正后的图像中, 对闪元列进行补偿, 如式 (6) 所示.

$$ZM(i) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Z(i, j)$$

$$ZM\_N(i) = (ZM(i) - \text{mean}(ZM)) / \text{std}(ZM)$$

$$\text{flash pixel} : ZM\_N(i) > Th \quad (5)$$

$$P(i, j) = \text{mean}(PX) \quad (ZM\_N(i) > Th) \quad (6)$$

$$PX = \{P(i-1, j), P(i+1, j)\} \quad (7)$$

经过以上分析, 闪元可以采用多帧序列最大值投影的方法得到检测, 采取邻域均值可对闪元列做出补偿. 在目标检测过程中, 闪元位置需单独采用一维滤波的方法进行目标检测, 以防漏检. 最后将二维目标检测结果的闪元列用一维目标检测的闪元列替换, 实现融合, 得到目标检测结果. 具体流程如图 10 所示.

### 3 实验验证

为了验证提出方法对闪元噪声抑制的性能以及对低信噪比弱小目标保留的准确性, 利用  $1 \times 360$  短

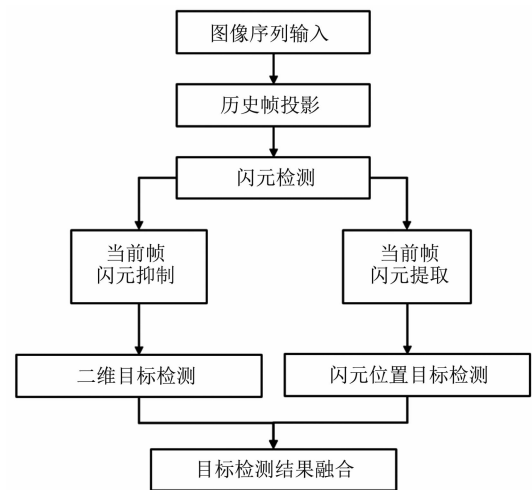


图 10 闪元检测与补偿流程  
Fig. 10 Flicker pixels detection and compensation process

波红外线列探测器生成不同场景下扫描图像序列, 在目标仿真过程中, 将目标设定在闪元位置及普通位置. 在目标检测过程中, 将式 (4) 中的参数  $N$  设定为 9, 即实时保存 8 帧历史帧及 1 帧当前帧, 如图 11 所示, 在上下不同场景下, 目标出现于闪元列中, 受到了闪元噪声的干扰, 经过算法处理之后, 目标仍然可以得到准确的保留.

统计 100 组经算法背景抑制后图像中目标的信噪比, 部分结果见表 1, 闪元位置目标信杂比平均值可达常规背景 96%, 目标信息可以得到有效保留.

表 1 经算法背景抑制后闪元位置与常规位置目标信噪比

Table 1 The target SCR in the flicker pixel location and the normal position after background suppression

| 目标位置 | 目标信杂比(SCR) |      |      |      |      |      |      |      | 均值   |
|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 闪元位置 | 7.03       | 6.92 | 6.92 | 8.14 | 7.03 | 7.03 | 6.92 | 5.47 | 6.94 |
| 常规位置 | 7.09       | 6.92 | 9.77 | 6.92 | 6.48 | 7.20 | 5.48 | 6.92 | 7.09 |

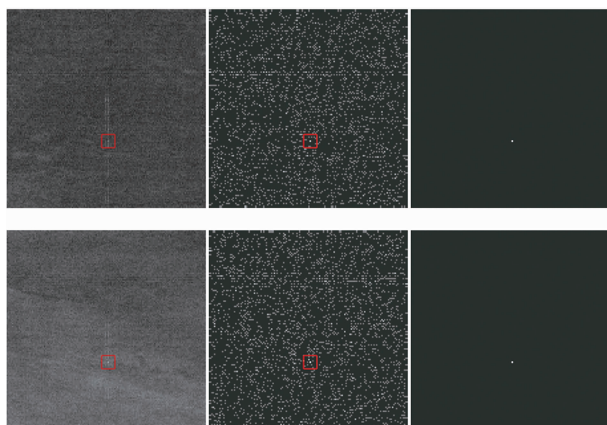


图 11 一维中值滤波程序运行结果

Fig. 11 The detection results of one-dimensional median filter

图 12 为提出算法的分步骤运行结果,可以看到,在闪元位置和普普通位置,目标都得到了很好的检测。

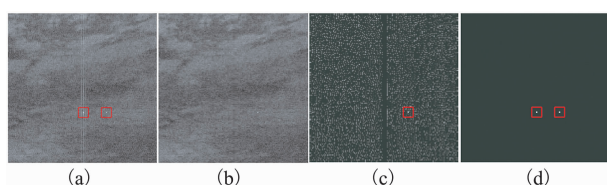


图 12 算法检测结果 (a) 仿真图像, (b) 闪元噪声抑制结果, (c) 二维目标检测结果, (d) 目标检测结果融合

Fig. 12 The detection results of the proposed algorithm (a) Simulation image, (b) the result of flicker noise suppression, (c) the detection result of two-dimensional median filter, (d) the fused image of target detection

还采用了 TDLMS 滤波、双边滤波 (Bilateral filter)、显著性检测 (LACRFR)<sup>[14]</sup> 等方法来替代二维中值滤波方法进行目标检测,闪元抑制之前如图 13 上排所示,闪元噪声对这些方法都会产生大量干扰,闪元抑制之后如图 13 中排所示,闪元区域都不再有杂波干扰. 检测结果如图 13 下排,其中图 13 下排 (a) 为一维中值滤波检测结果,图 13 下排 (b)、(c)、(d) 为其他算法与一维滤波算法融合结果,说明本文算法即具有较好的扩展性,又有利于保留闪元本身的目标探测能力。

#### 4 结论

闪元是红外探测器固有特性,在红外线列探测器扫描图像中,闪元噪声以条状形式存在,对目标检测性能影响很大,多种检测方法在闪元位置产生大量虚警. 本文首先采用矩匹配方法进行了图像的非均匀校正,并采用了邻域均值对固定盲元补偿进行

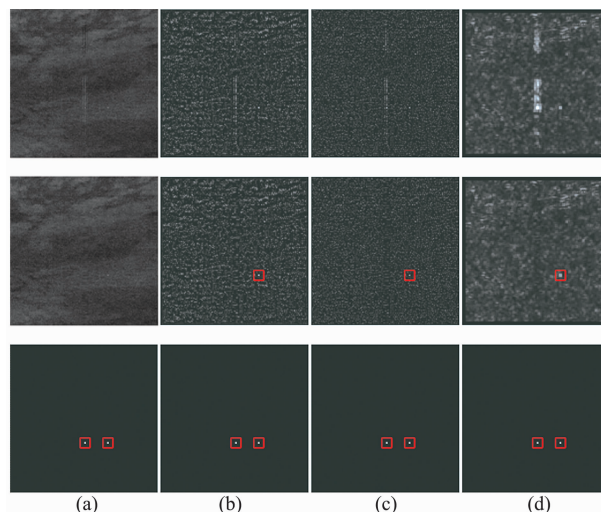


图 13 检测结果 (a) 仿真图像及闪元补偿图像, (b) TDLMS 检测结果, (c) Bilateral filter 检测结果, (d) LACRFR 检测结果

Fig. 13 The detection results of the proposed algorithm (a) Simulation image and image after flash pixel compensation, (b) the detection results of TDLMS, (c) the detection results of Bilateral filter, and (d) the detection results of LACRFR

了补偿. 然后分析了闪元现象在红外扫描图像中的特点,认为其响应与场景仍然是相关的,不会产生较大范围的突变. 由此设计了基于时序多帧最大值投影的闪元检测与补偿方法. 考虑到闪元仍然保留了一定的信息获取能力,采用了一维中值滤波的方法单独对闪元位置进行背景抑制,对闪元补偿后的图像进行二维目标检测. 最终将闪元位置目标检测结果与一般位置目标检测结果相融合. 通过实验验证表明:经背景抑制后,闪元位置目标信杂比可以达到常规位置的 96%,目标信息得到较好的保留. 常规目标检测方法不再到受闪元噪声的干扰。

#### References

- [1] SHI Yan, MAO Hai-Cen, ZHANG Tian-Xu, *et al.* New approach of IRFPA non-effective pixel discrimination based on pixel's characteristics histogram analysis [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, (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. *红外与毫米波学报*) 2005, **24**(2): 119-124.
- [2] Gendreau K C, Mushotzky R, Fabian A C, *et al.* ASCA observations of the spectrum of the X-ray background [J]. *Publications-Astronomical Society of Japan*, 1995, **47**(2): L5-L9.
- [3] Gross W, Hierl T, Schulz M J. Correctability and long-term stability of infrared focal plane arrays [J]. *Optical Engineering*, 1999, **38**(5): 862-869.

(下转第 432 页)