

## 基于互补梯度增强的红外线列扫描图像小目标检测

楼晨风<sup>1,2,3</sup>, 张湧<sup>1,2\*</sup>, 刘亚<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>中国科学院红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083;<sup>2</sup>中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;<sup>3</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 针对红外弱小目标难以识别、存在虚警的问题, 根据红外线列探测器的噪声特性与小目标的梯度对称性, 提出一种通过在图像梯度空间下构建多尺度堆叠增强重积分图(MSERI)来检测红外小目标的方法。估计不同的小目标尺寸, 从多个方向计算图像的单向梯度图, 利用估计尺寸寻找单向梯度图中各梯度值的互补梯度, 对图像进行增强, 之后对增强后的单向梯度图进行积分以还原图像并堆叠不同方向的积分图像, 综合不同估计尺寸的堆叠图以获得增强结果。最后根据增强结果中的图像像素邻域的杂波峰-峰值计算自适应调节阈值, 分割得到红外小目标。实验表明, 所提方法在多种场景下均具有较好的检测能力与较低的虚警率, 且运行速度优于其他性能类似的算法。

**关键词** 图像处理; 红外线列图像; 小目标检测; 图像梯度; 多尺度

中图分类号 TP751.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2104001

## Small Target Detection of Infrared Linear Array Image Based on Complemented Gradient Enhancement

Lou Chenfeng<sup>1,2,3</sup>, Zhang Yong<sup>1,2\*</sup>, Liu Ya<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of Infrared Detection and Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>2</sup>Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;<sup>3</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Aiming at the problem that the detection of weak and small infrared targets could be affected by false alarm, according to the noise characteristics of infrared line array sensor and the gradient symmetry of small target, a method of constructing multi-scale stacked enhanced re-integrated image (MSERI) in image gradient space is proposed to detect small infrared target. First, different sizes of small targets are estimated, and the unidirectional gradient images of the original image are calculated from multiple directions. Then, the complementary gradient of the gradient values in the unidirectional gradient image are found to enhance the gradient image. Then, the enhanced gradient image is integrated to restore the image, and the integrated images in different directions are stacked as a image. And, the maximum enhanced value is taken from the stacked images with different estimated sizes as the enhanced result. Finally, according to the peak to peak value of clutter in the neighborhood of pixels from enhanced result, the adaptive threshold is calculated to segment small infrared targets. The experimental results show that the method has better detection ability and lower false alarm rate in various scenarios, and the running speed is better than algorithms with similar performance.

**Key words** image processing; infrared linear array image; small target detection; image gradient; multiscale

**OCIS codes** 100.3008; 040.1880; 040.3060

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-04-27; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 上海市现场物证重点实验室基金资助项目(2017xcwzk08)

通信作者: \*zybxy@sina.com

## 1 引言

红外成像系统具有抗干扰性强、可夜间工作等优点,因而在工业、安防和国防等领域获得了广泛的应用。其中,弱小红外目标信杂比低,特征较弱,因而实时检测红外小目标是研究的热门方向。

对于红外小目标的单帧检测,可以基于马尔可夫随机场设计各种目标特征算子<sup>[1-3]</sup>,通过统计目标和其部分邻域的灰度差异来识别目标,此类方法对于检测体积极小的目标具有较好的效果,但当目标尺寸发生变化时,算法性能易退化。利用局部对比度(LCM<sup>[4]</sup>),即利用目标和目标邻域的对比如差异构造特征,是近年来较为流行的方法,如 ILCM(Improved LCM)<sup>[5]</sup>、NLCM(Novel LCM)<sup>[6]</sup>、WLCM(Weighted LCM)<sup>[7]</sup>等,为检测不同尺寸的红外小目标,还发展了 MPCM(Multiscale-Patch based CM)<sup>[8]</sup>、TLLCM(Tri-Layer LCM)<sup>[9]</sup>等方法,联合使用多种目标尺寸以改善识别效果。利用目标边缘特征估计的方法<sup>[10-11]</sup>可检测不同尺寸的目标,但对目标形状缺乏约束,在复杂背景下易出现虚警。进而,发展出利用目标边缘梯度特性的方法,例如检测数个方向固定的梯度作为特征的 DECM(Derivative Entropy-Based CM)<sup>[12]</sup>和根据图像梯度场方向检测目标的 LDAM(Local Difference Adaptive Measure)<sup>[13]</sup>方法,它们对于尺寸固定的红外小目标有较好的效果,但难以适用于不同尺寸的目标。除 LCM 算法及其变体外,亦有使用目标自相关特征<sup>[11]</sup>,利用背景建模分离目标<sup>[14-17]</sup>、利用深度学习检测目标<sup>[18-20]</sup>、利用像素联通特征识别目标<sup>[21]</sup>、利用频域信息提取目标<sup>[22]</sup>、利用引导滤波器<sup>[23]</sup>增强图像等方法。

由于现有方法难以同时解决不同尺寸小目标的检测和背景虚警抑制的问题,本文立足于线列红外探测器的噪声特性,利用校正噪声时产生的梯度图和红外小目标的梯度对称性,定向增强梯度空间下红外小目标的特征并将其重积分为增强图像,最后综合多方向多目标尺度下的增强图,使用自适应阈值算法分割得到红外小目标。实验表明,该方法可有效识别各种红外小目标,对高对比度的背景具有较强的抑制能力,同时在运算速度上相较于类似性能算法具有一定的优势。

## 2 重积分校正与目标增强约束

### 2.1 线列探测器的两点校正与误差

线列探测器是一种一维探测器,可利用空间

扫描获得二维图像。与普通面阵红外探测器图像不同,在线列探测器产生的图像中,单行像素值由传感器的同一像元输出,因而,若探测器未经校正,则图像中易存在如图 1 所示的带状噪声。为减少此类噪声,一般使用两点校正法对图像进行初步校正。

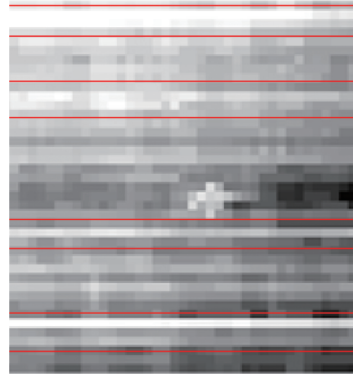


图 1 线列探测器图像中存在的带状噪声

Fig. 1 Belt noise in image shot by linear sensor array

两点校正法中假定:在确定的曝光时间与增益系数条件下,探测器的光电响应与光强呈线性关系,即

$$O_i = A_i I + C_i + o(I), \quad (1)$$

式中, $i$  为探测器像元序号, $A_i$  和  $C_i$  是与探测器像元  $i$  响应特性相关的系数, $O_i$  为像元  $i$  的输出响应, $I$  为光强, $o(I)$  为与光强相关的高阶误差。利用线性变换,不同像元  $i$  的输出响应  $O_i$  在同一光强  $I$  下可映射为同一像素值  $p$ ,可表示为

$$p = K_i O_i + B_i, \quad (2)$$

式中, $K_i$  和  $B_i$  为与探测器像元  $i$  相关的校正系数。在工程中,通过设置两组参考光强与对应的参考像素值,即可获得校正系数,校正所用的各组参考光强与参考像素值被称为校正点。然而,由于高阶误差  $o(I)$  的存在,当实际光强与校正点所用的光强差距较大时,带状噪声往往不能被完全消除。

### 2.2 基于图像梯度的重积分校正

红外小目标,是指红外图像中面积较小、缺乏纹理与形状细节的目标,其在图像频域中以高频信息为主,容易被带状噪声掩盖,如图 1 所示,其噪声与目标值接近。图像背景则以低频信息为主,不易与小目标混淆。因此,在检测红外小目标时,为抑制噪声,可适当降低图像背景建模的准确性。本文假定:在待处理图像区域中,真实图像背景是均匀的,对应像素值为常数,且红外小目标不处于图像第一列像素。该假定的表达式可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{M} = \mathbf{M}_{\text{background}} + \mathbf{M}_{\text{noise}} + \mathbf{M}_{\text{target}} \\ M(:,1) = M_{\text{noise}}(:,1) + M_{\text{background}}(:,1), \\ \forall i,j, M_{\text{background}}(i,j) = V_{\text{background}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{M}$  为图像矩阵, 可加性拆分为背景 ( $\mathbf{M}_{\text{background}}$ )、噪声 ( $\mathbf{M}_{\text{noise}}$ ) 与目标 ( $\mathbf{M}_{\text{target}}$ ) 三部分;  $M(i,j)$  为图像中坐标为  $(i,j)$  的像素值,  $M(:,j)$  为  $\mathbf{M}$  中第  $j$  列图像,  $V_{\text{background}}$  为假定中背景部分的常数值。另一方面, 图像  $\mathbf{M}$  可以沿  $j$  的递增方向计算单向梯度, 计算结果  $\mathbf{M}_{\text{dx}}$  称为  $\mathbf{M}$  的单向梯度图, 可表示为

$$M_{\text{dx}}(i,j) = \begin{cases} M(i,j) - M(i,j-1), j > 1 \\ 0, j = 1 \end{cases} \quad (4)$$

进而, 将  $\mathbf{M}_{\text{dx}}$  重新沿  $j$  的递增方向进行累加, 可获得图像  $\mathbf{M}_{\text{RI}}$ , 累加过程可表示为

$$M_{\text{RI}}(i,j) = \sum_{j'=1}^j M_{\text{dx}}(i,j') \quad (5)$$

文中称  $\mathbf{M}_{\text{RI}}$  为  $\mathbf{M}$  的重积分图, 实质上,  $M_{\text{RI}}(i,j)$  是  $\mathbf{M}$  中坐标为  $(i,j)$  的图像灰度与首列灰度之差。  $M_{\text{RI}}(:,1) = 0$ , 意味着各探测器像元在  $M_{\text{RI}}(:,1)$  上被映射为同一像素值 0。根据(3)式,  $\mathbf{M}_{\text{RI}}$  实质上是依据均匀背景假设, 对(2)式中的  $B_i$  进行修正, 从而将图像第一列像素校正为  $V_{\text{background}} = 0$  所得图像。  $\mathbf{M}_{\text{RI}}$  以当前场景的第一列为校正点, 相较于使用固定校正点的两点校正, 受高阶误差  $o(I)$  的影响更小, 如图 2 所示, 易见图 2(b) 的画面质量优于图 1, 且红外小目标得到了凸显。

相较于在高分辨率图像中直接计算灰度差, 利用(4)式和(5)式递归计算  $M_{\text{RI}}(i,j)$ , 可以避免存储整幅图像, 也更适合使用现场可编程门阵列 (FPGA) 进行流水线处理。

当实际图像不满足均匀图像的背景假设时, 非均匀背景易使重积分图中产生较宽的阴阳条带。例如, 与图 2(c) 相比, 图 2(d) 中图像上半部分较图像下半部分更亮。但相较于原始图像中由传感器像元不一致引起的带状噪声, 背景往往属于低频信号, 因此由非均匀背景引起的条纹尺寸更大, 与红外小目标的区分度更高, 最终对红外小目标检测的影响较小。因此, 可以使用重积分校正作为行列红外图像的预处理算法。

### 2.3 增强单向梯度图的背景约束条件

在单向梯度图中, 红外小目标往往呈点状, 具有空间对称性。例如, 图 3(a) 中红外小目标的梯度图为图 3(b) 中的对称形态。在图 3(b) 中, 背景区域起伏较小, 对应的单向梯度值接近 0, 而小目标的左边缘和右边缘的单向梯度值为近似相反数, 其正值用

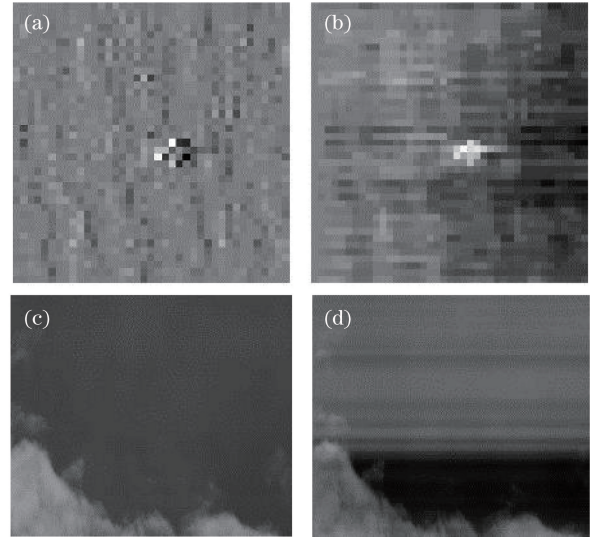


图 2 重积分图。(a) 图 1 的单向梯度图; (b) 图 1 的重积分图; (c) 含有少量云的红外图像; (d) 图 2(c) 的重积分图

Fig. 2 Re-integrated images. (a) Unidirectional gradient image of Fig. 1; (b) re-integrated image of Fig. 1; (c) infrared image with cloud; (d) re-integrated image of Fig. 2(c)

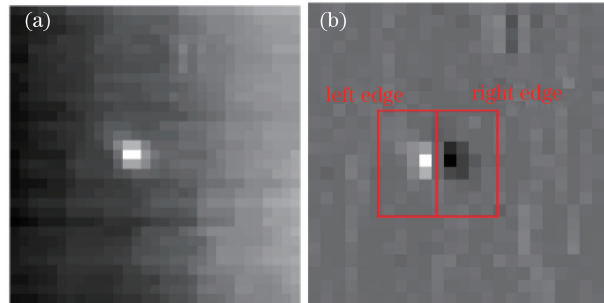


图 3 典型红外小目标。(a) 原始图像; (b) 单向梯度图

Fig. 3 Typical infrared small target. (a) Original image; (b) unidirectional gradient image

白色表示, 负值用黑色表示, 且白色块与黑色块的中心距离与小目标的横向尺寸相同, 从而构成了明显的特征。通过充分地利用重积分校正的计算流程, 增强单向梯度图中小目标左右边缘之间的反差, 进而增强红外小目标。

对于原始图像  $\mathbf{M}$  中的第  $i$  行像素  $M(i,:)$ , 假设红外小目标存在于第  $j_0 \sim (j_0 + s)$  列的像素上, 利用某种增强算法作用于单向梯度图并进行重积分, 以获得增强重积分图像  $M_{\text{ERI}}(i,:)$ 。理想的算法除了增强红外小目标外, 应当对背景影响较小, 即  $M_{\text{ERI}}(i,:)$  应满足的背景约束条件为

$$M_{\text{RI}}(i,j) \approx M_{\text{ERI}}(i,j), \quad j < j_0 \text{ or } j > j_0 + s \quad (6)$$



设  $M_{\text{Edx}}$  为  $M_{\text{ERI}}$  的单向梯度图, 则(6)式可变换为

$$\sum_{j'=1}^j M_{\text{dx}}(i, j') \approx \sum_{j'=1}^j M_{\text{Edx}}(i, j'), \quad j < j_0 \text{ or } j > j_0 + s. \quad (7)$$

为确保满足(7)式的约束条件, 定义矩阵  $L$  来记录增强后的单向梯度图与原单向梯度图的累计差异, 由此可表示为

$$L(i, j) = \begin{cases} L(i, j-1) + M_{\text{Edx}}(i, j) - M_{\text{dx}}(i, j), & j > 1 \\ 0, & j = 1 \end{cases}. \quad (8)$$

对于图像中的背景区域,  $L(i, j)$  的绝对值应较小, 这意味着增强后图像的背景区域变化较小。因此, 进行重积分时, 当列坐标  $j'$  经小目标区域回归背景区域后, 图像增强算法可依据  $L(i, j')$  的变化对  $M_{\text{Edx}}$  进行修正, 最终使  $M_{\text{ERI}}$  的值尽快回归至  $M_{\text{RI}}$ 。

### 3 方 法

#### 3.1 增强重积分图

为检测图 3(b)中所示的红外小目标梯度特征, 首先假定图像  $M$  中红外小目标的横向尺寸为  $d$ 。设图像共  $j_{\text{max}}$  列, 则对于  $M_{\text{dx}}(i, j)$ , 当  $d < j < j_{\text{max}} - d$  时,  $M_{\text{dx}}(i, j)$  左右两侧距离为  $d$  的像素  $M_{\text{dx}}(i, j-d)$ 、 $M_{\text{dx}}(i, j+d)$  与  $M_{\text{dx}}(i, j)$  的互补性  $C_L(i, j)$ 、 $C_R(i, j)$  可表示为

$$\begin{cases} C_L(i, j) = |M_{\text{dx}}(i, j) + M_{\text{dx}}(i, j-d)| \\ C_R(i, j) = |M_{\text{dx}}(i, j) + M_{\text{dx}}(i, j+d)| \end{cases}. \quad (9)$$

$$M_{\text{Edx}}(i, j) = \begin{cases} M_{\text{dx}}(i, j) - [D_R(i, j)]^{(k)} \cdot M_{\text{dx}}(i, j+d) - \frac{L(i, j-1)}{d}, & \text{when } C_L(i, j) > C_R(i, j) \\ M_{\text{dx}}(i, j) - [D_L(i, j)]^{(k)} \cdot M_{\text{dx}}(i, j-d) - \frac{L(i, j-1)}{d}, & \text{when } C_L(i, j) \leq C_R(i, j) \\ M_{\text{dx}}(i, j), & \text{when } j \leq d \text{ or } j > j_{\text{max}} - d \end{cases}. \quad (11)$$

(11)式的设计具有以下优点:

1) 对于含有红外小目标的区域而言,  $[D_R(i, j)]^{(k)} \cdot M_{\text{dx}}(i, j+d)$  或  $[D_L(i, j)]^{(k)} \cdot M_{\text{dx}}(i, j-d)$  项的绝对值较大, 因此小目标得到显著增强。

2) 对于平稳的背景区域而言,  $-\frac{L(i, j-1)}{d}$  项可令  $M_{\text{ERI}}$  中对应坐标的像素值逐渐回归为  $M_{\text{RI}}$  中对应坐标的像素值。

3) 对于背景中大尺寸物体的边缘区域而言, 尽

若  $C_L(i, j) \leq C_R(i, j)$ , 则称左侧像素与  $M_{\text{dx}}(i, j)$  互补。若  $C_L(i, j) > C_R(i, j)$ , 则称右侧像素与  $M_{\text{dx}}(i, j)$  互补。根据互补像素的不同,  $M_{\text{dx}}(i, j)$  的互补像素与自身的反差值  $D_L(i, j)$  或  $D_R(i, j)$  可表示为

$$\begin{cases} D_L(i, j) = |M_{\text{dx}}(i, j) - M_{\text{dx}}(i, j-d)| \\ D_R(i, j) = |M_{\text{dx}}(i, j) - M_{\text{dx}}(i, j+d)| \end{cases}. \quad (10)$$

在  $M_{\text{dx}}$  中, 一对反差值较高且互补的像素很大可能为红外小目标的左右边缘。因此, 应当检测此类像素, 并对此类像素的反差进行进一步增强, 如图 4 所示。

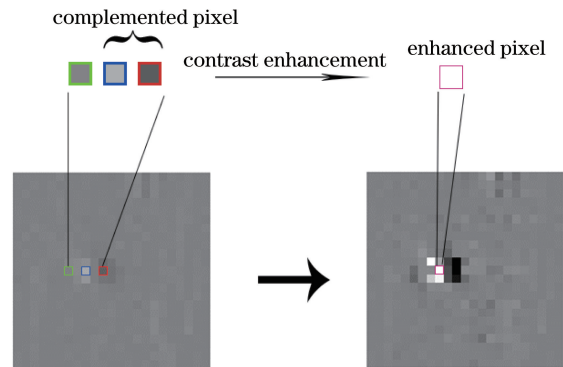


图 4 利用互补像素增强梯度示意图

Fig. 4 Diagram about enhancing unidirectional gradient image via complemented pixel

据此, 提出了一种  $M_{\text{Edx}}$  的设计, 称为图像  $M$  的增强梯度图(EGI), 参数  $k$  用于调节目标增强的幅度, 取  $k=0.5$ , 可表示为

管  $[D_L(i, j)]^{(k)}$  或  $[D_R(i, j)]^{(k)}$  的值较大, 但合适的  $d$  取值可使  $M_{\text{dx}}(i, j)$  的互补像素处于非边缘区域, 这意味着  $M_{\text{dx}}(i, j+d)$  或  $M_{\text{dx}}(i, j-d)$  的值接近于 0, 因此该方法不会过多地增强图像边缘。

利用  $M_{\text{Edx}}$  替代(5)式中  $M_{\text{dx}}$ , 可由  $M_{\text{Edx}}$  积分获得  $M_{\text{ERI}}$ ,  $M_{\text{ERI}}$  称为图像  $M$  的增强重积分图(ERI)。在  $d=3$  的条件下, 图 5 展现了图 3 中红外小目标的增强效果。其中图 5(a)与图 3(a)为同一图像, 为方便对比, 图 5(a)与图 5(d)的输出动态范



围相同,可见图 5(d)有效增强了红外小目标,目标信杂比增益(SCRG)为 3.69。若计算  $M_{\text{Edx}}$  时不考虑(7)式的约束条件[即在(11)式中假定  $L(i,j)=0$ ],

所得的增强梯度图与增强重积分图如图 5(e)和图 5(f)所示,可见图 5(f)中的目标尾部出现了反常拖影,这一现象反映了(7)式约束条件的必要性。

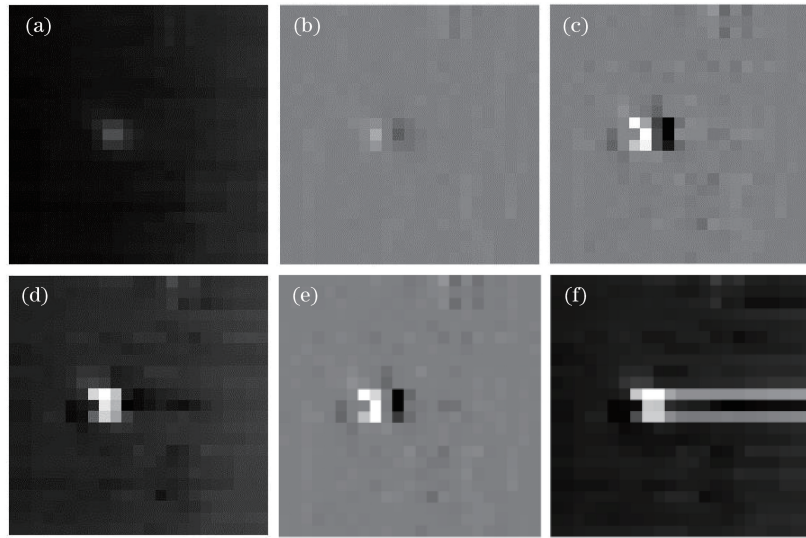


图 5 图 3 中红外小目标增强结果。(a)原始图像;(b)单向梯度图;(c)增强梯度图;(d)增强重积分图;(e)增强梯度图(不含 L);(f)增强重积分图(不含 L)

Fig. 5 Enhanced results of infrared small target in Fig. 3. (a) Original image; (b) unidirectional gradient image; (c) EGI; (d) ERI; (e) EGI (without L); (f) ERI (without L)

### 3.2 堆叠增强图

在增强重积分图中,红外小目标固然获得了一定的增强,但同属高频信号的背景噪声并未得到充分抑制,如图 5(d)的噪声标准差相较图 5(a)增加了约 49%。另一方面,2.2 节中提到,图像中非均匀的背景易导致阴阳条带,因此,通过堆叠多方向上的增强重积分图可以抑制噪声与阴阳

条带。

为尽可能反映实际背景的特性,在建立背景模型时,应当参考更多的像素,而非仅仅使用原始图像最左侧的像素。若将图像的 4 个边缘均视作背景,则可以按照如图 6 所示的流程对目标进行增强,增强后的图像被称为堆叠增强重积分图(SERI),简称堆叠增强图。

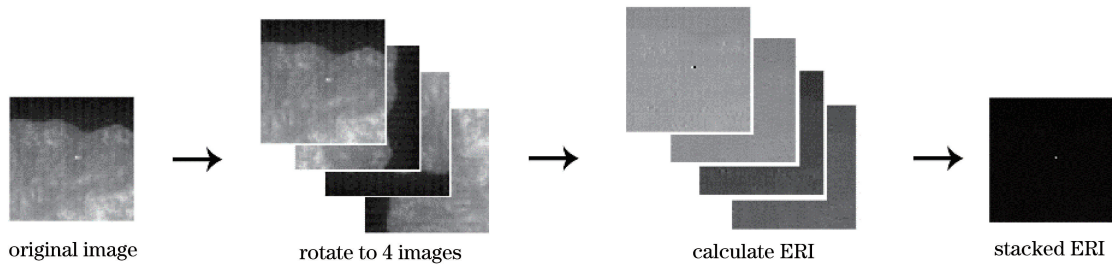


图 6 堆叠增强图计算流程

Fig. 6 Diagram of generating stacked ERI

定义图像顺时针旋转操作  $R(\cdot)$  与图像翻转操作  $F(\cdot)$ ,其表达式为

$$R(M) = F(M^T), \quad (12)$$

$$F(M)(i,j) = M(i, j_{\max} - j + 1), \quad (13)$$

式中:  $M^T$  为  $M$  的转置;  $F(M)(i,j)$  代表  $M$  经翻转操作  $F$  后,坐标为  $(i,j)$  的像素值;  $j_{\max}$  为  $M$  的列数。由此,  $M$  经顺时针旋转  $\theta$  角度( $\theta$  可取  $\pi/2, \pi, 3\pi/2$ )后所得的  $M_\theta$ ,可表示为

$$\begin{cases} M_{\pi/2} = R(M) \\ M_{\pi} = R[R(M)] \\ M_{3\pi/2} = R\{R[R(M)]\} \end{cases} \quad (14)$$

归一化函数  $N(\cdot)$  可表示为

$$N(A,B) = \frac{A - \min(A) \cdot O}{\max(A) - \min(A)} + \frac{B - \min(B) \cdot O}{\max(B) - \min(B)}, \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  为大小相同的矩阵; 当变量为矩阵时,  $\min(\cdot), \max(\cdot)$  分别为取矩阵中的最小值与最大值的函数;  $\mathbf{O}$  为大小与  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$  相同, 且所有元素值均为 1 的矩阵。依次利用(14)式旋转图像, 利用(11)式计算旋转图像对应的 EGI, 利用(5)式将各 EGI 累加为 ERI, 最终, 堆叠增强图  $\mathbf{M}_{\text{SERI}}$  可表示为

$$\mathbf{M}_{\text{SERI}} = N \{ N \{ \mathbf{M}_{\text{ERI}}, R[R(\mathbf{M}_{\pi \text{ERI}})] \}, N \{ R \{ R \{ R(\mathbf{M}_{\pi/2 \text{ERI}}) \}, R(\mathbf{M}_{3\pi/2 \text{ERI}}) \} \}, \quad (16)$$

式中  $\mathbf{M}_{\theta \text{ERI}}$  代表  $\mathbf{M}_{\theta}$  的 ERI。

图 6 中的原图是以山脉为背景的红外小目标图像, 当  $d=1$  时, 其堆叠增强图的 SCRG 达 8.77, 背景得到显著抑制。

### 3.3 多尺度堆叠增强图

为广泛检测尺度不同的红外小目标, 在堆叠增强图的基础上提出一种称为多尺度堆叠增强重积分(MSERI)的方法, 以检测图像  $\mathbf{M}$  中的红外小目标, 步骤为

- 1) 分别取  $d=2, 4, 8, 16$ , 计算对应的  $\mathbf{M}_{\text{SERI}_d}$ ;
- 2) 取不同  $\mathbf{M}_{\text{SERI}_d}$  中各坐标对应像素的最大值,

组成  $\mathbf{M}_{\text{MSERI}}$ , 可表示为

$$M_{\text{MSERI}}(i, j) = \max_{d=2, 4, 8, 16} M_{\text{SERI}_d}(i, j); \quad (17)$$

- 3) 定义  $M_{\text{MSERI}}(i, j)$  的自适应分割阈值  $\tau(i, j)$ , 可表示为

$$\tau(i, j) = k_{\text{Thd}} \cdot T(i, j) + \max\{B[M_{\text{FSERI}}(i, j)]\}, \quad (18)$$

$$T(i, j) = \max\{B[M_{\text{FSERI}}(i, j)]\} - \min\{B[M_{\text{FSERI}}(i, j)]\}, \quad (19)$$

$$\forall M_{\text{MSERI}}(a, b) \in B[M_{\text{MSERI}}(i, j)], |a - j| = s, |b - j| \leq s, \quad \text{or } |a - i| \leq s, |b - j| = s, \quad (20)$$

并以此分割红外小目标。在(18)式中,  $k_{\text{Thd}}$  为先验的阈值参数, 取值范围为  $1 \sim 5$ , 实验中取  $k_{\text{Thd}} = 2$ ; (19)式定义了  $M_{\text{MSERI}}(i, j)$  邻域内的背景复杂度  $T(i, j)$ , 其中,  $B[M_{\text{MSERI}}(i, j)]$  为由  $\mathbf{M}_{\text{MSERI}}$  中满足(20)式的像素构成的背景像素集合, 如图 7 中黑色像素所示; (20)式与图 7 中,  $s$  为背景像素边界距中心像素的距离, 该参数会影响可检测红外小目标的最大尺寸, 实验中取  $s = 15$ 。

## 4 实验与分析

使用复杂度各异的 5 个场景, 对比本文方法、MRF<sup>[1]</sup>、MDTDLMS-RDLCM (Multi-Directional Two-D Least Mean Square-Ratio-Difference Joint

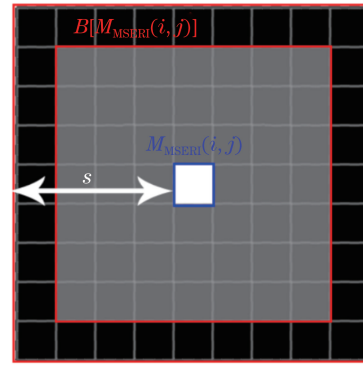


图 7 背景像素集合

Fig. 7 Aggregate of pixels in background

LCM)<sup>[10]</sup>、NIPPS<sup>[14]</sup> 和 MPCM<sup>[8]</sup> 方法的空中目标检测性能。MRF 是一种较经典的检测方法, MDTDLMs-RDLCM 是近年来提出的一种局域对比度方法, MPCM 是近年来提出的一种多尺度局域对比度方法, NIPPS 是近年来较流行的基于秩分解的检测方法。其中, NIPPS 方法由原作者自行实现, 其余方法由本文作者复现, 实验对比中所用参数为原本默认参数。图 8 为各种方法的目标检测效果图, 其中场景 a、b、c 为由线列长波红外探测器拍摄的真实红外图像, 目标为固定翼飞机。场景 d、e<sup>[24]</sup> 源于公开红外数据集。表 1 和表 2 展现了各种算法使用默认参数时在不同场景下的检测率( $R_{\text{DR}}$ )与虚警率( $R_{\text{FA}}$ ), 检测率与虚警率的定义可表示为

$$R_{\text{DR}} = \frac{N_{\text{D}}}{N_{\text{T}}}, R_{\text{FA}} = \frac{N_{\text{F}}}{N_{\text{P}}}, \quad (21)$$

式中,  $N_{\text{D}}$  为算法正确检测的目标数,  $N_{\text{F}}$  为算法误检的非目标像素数,  $N_{\text{T}}$  为样本中真实存在的目标数,  $N_{\text{P}}$  为待测图像的总像素数。

综合图 8 与表 1 和表 2, 可见本文方法与 NIPPS 方法均具有较好的检测率和较佳的虚警抑制能力, 且在不改变算法参数的前提下对不同场景的适应能力较强。MRF 与 MDTDLM-RDLCM 在高背景亮度的场景 b、c 中易受干扰, MPCM 方法在对比度高、目标特征弱的场景 a、b、c 下检测率较低。

由于许多方法不能在场景 a、b、c 中区分目标与虚警, 故本文方法利用检测率与虚警率统计得到各种算法在场景 d、e 中的接收者特性(ROC)曲线, 结果如图 9 所示。场景 d 为较为经典的空中背景红外目标图, 其云层背景较简单, 检测难点在于云层与目标的亮度接近; 场景 e 为复杂地面背景下的红外目标图, 目标亮度高, 检测难点在于背景具有复杂的高频纹理。MRF 方法主要依赖形态特征, 在背景简单的场景 d 下表现较佳, 局域对比度类方法受图像对

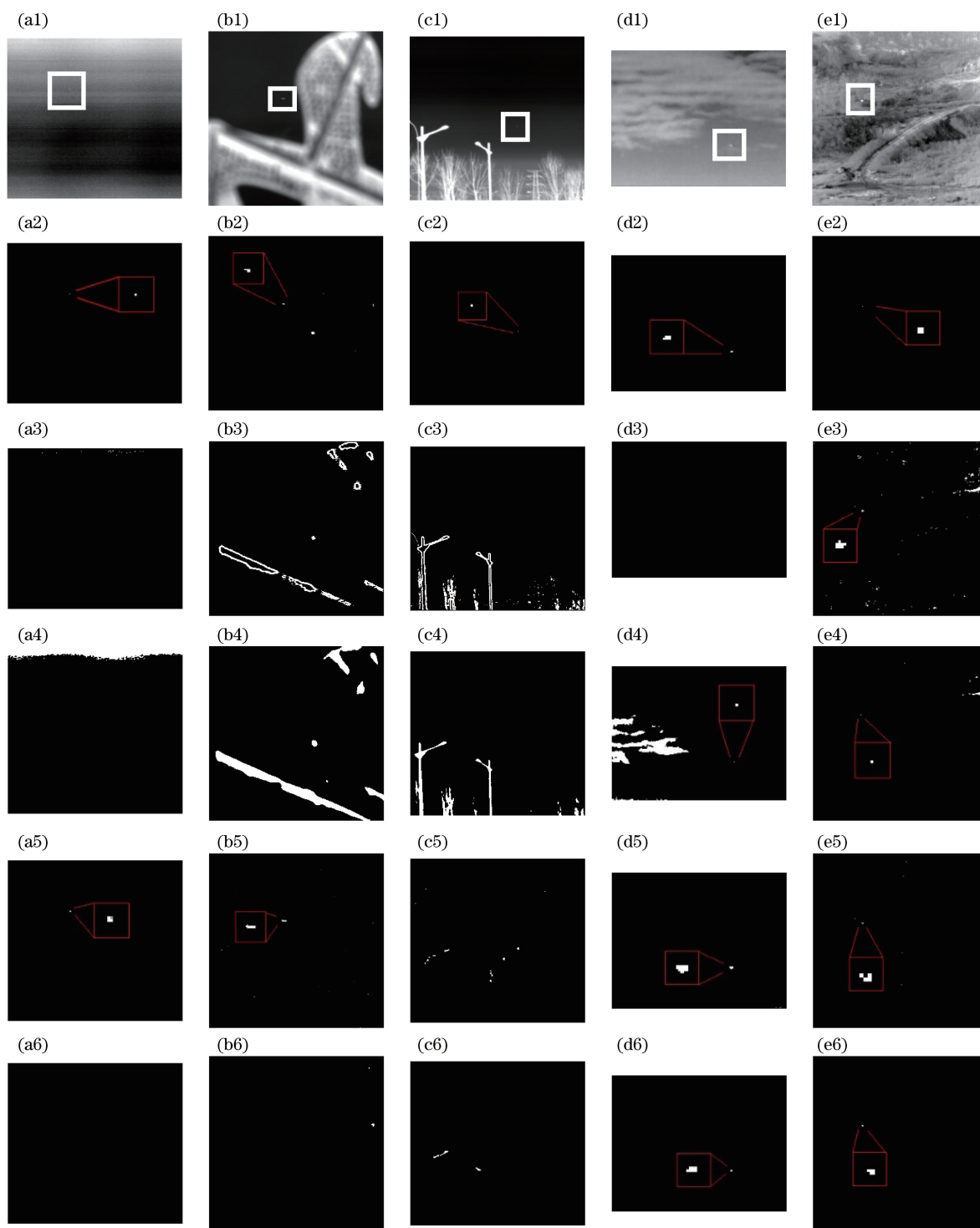


图 8 多场景下各算法检测性能对比。(a1)(b1)(c1)(d1)(e1)场景 a、b、c、d、e；(a2)(b2)(c2)(d2)(e2)本文方法；(a3)(b3)(c3)(d3)(e3) MRF；(a4)(b4)(c4)(d4)(e4) MDTDLMS-RDLCM；(a5)(b5)(c5)(d5)(e5) NIPPS；(a6)(b6)(c6)(d6)(e6) MPCM

Fig. 8 Comparison of several algorithms in multiple sequences. (a1)(b1)(c1)(d1)(e1) Sequence a/b/c/d/e；(a2)(b2)(c2)(d2)(e2) proposed method；(a3)(b3)(c3)(d3)(e3) MRF；(a4)(b4)(c4)(d4)(e4) MDTDLMS-RDLCM；(a5)(b5)(c5)(d5)(e5) NIPPS；(a6)(b6)(c6)(d6)(e6) MPCM

比度影响,在目标亮度高的场景 e 下表现较佳,本文方法与 NIPPS 方法的性能则相对较为稳定。在图 9 中,本文方法的 ROC 曲线更偏向左上角,可见

本文方法具有较好的目标检测能力,相较于 NIPPS 方法亦有一定的优势。

表 3 统计了实验所述方法于 Matlab2015 环境



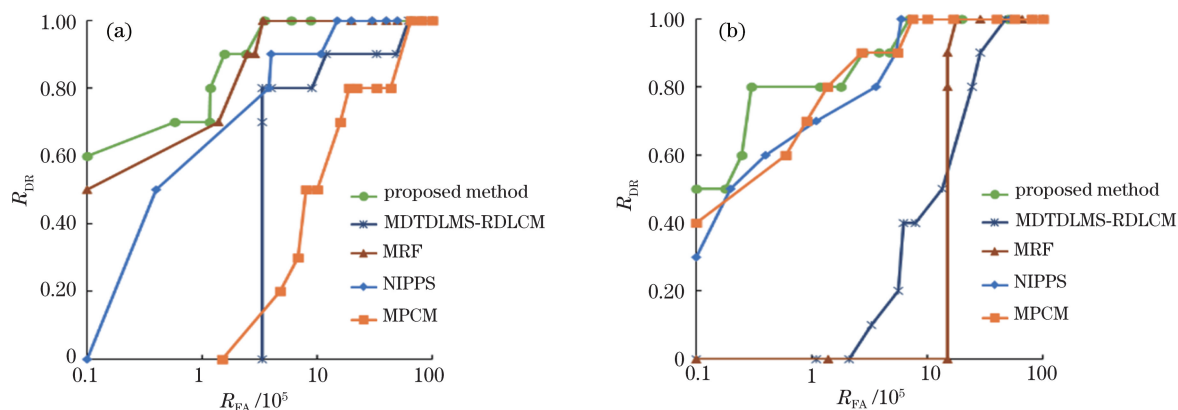


图 9 各种算法的 ROC 曲线。(a)场景 d;(b)场景 e

Fig. 9 ROC curves of different algorithms. (a) Sequence d; (b) sequence e

下,使用 i7 4980hq 处理器处理单张 256 pixel × 256 pixel 图像的耗时。由表 3 可得,本文方法运行速度显著优于性能较为相近的 NIPPS 方法。

表 1 不同方法的检测率

Table 1 Detection rates of several target detection methods

Sequence	Proposed method	MRF	MDTDLMS-RDLCM	NIPPS	MPCM
a	<b>0.80</b>	0.00	0.00	<b>0.80</b>	0.20
b	<b>1.00</b>	0.20	0.00	<b>1.00</b>	0.40
c	<b>1.00</b>	0.20	0.00	0.80	0.40
d	<b>1.00</b>	0.90	<b>1.00</b>	<b>1.00</b>	0.80
e	<b>0.96</b>	0.79	0.95	0.91	0.92

表 2 不同方法的虚警率

Table 2 False alarm rates of several target detection methods unit:  $10^{-5}$

Sequence	Proposed method	MRF	MDTDLMS-RDLCM	NIPPS	MPCM
a	<b>0.00</b>	13.5	>100	0.16	0.16
b	0.94	>100	>100	<b>0.60</b>	1.73
c	<b>0.11</b>	>100	>100	5.61	6.89
d	3.51	<b>3.40</b>	62.00	5.27	22.00
e	<b>4.70</b>	16.70	37.7	9.96	6.33

表 3 不同方法下单张 256 pixel × 256 pixel 图像的运行时间  
Table 3 Running time of a image with 256 pixel × 256 pixel under several target detection methods unit: s

Method	Proposed method	MRF	MDTDLMS-RDLCM	NIPPS	MPCM
Time	0.86	0.39	2.61	6.10	<b>0.09</b>

## 5 结 论

根据线列红外探测器的噪声特性以及红外小目

标的梯度对称特性,提出一种在单向梯度图上对红外小目标进行增强需要满足的约束条件,并基于此提出了一种多方向多尺度地增强红外小目标并进行目标检测的方法,最后使用线列红外探测器采集得到的图像。结合公开红外数据集,对本文方法与近年流行的其他方法进行了测试与对比。实验结果表明,本文方法的检测率与虚警率均较优,在简单与复杂背景的场景下均表现稳定,其运行速度亦优于一些性能接近的方法。

## 参 考 文 献

- [1] de Sun X, Fang G Z. Infrared small targets detection based on MRF model [J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 420-424.
- [2] Liu F Y, Hu Y, Rao P, et al. Modified point target detection algorithm based on Markov random field [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(2): 212-218.  
刘丰轶, 胡勇, 饶鹏, 等. 一种改进的 MRF 点目标检测算法 [J]. 红外与毫米波学报, 2018, 37(2): 212-218.
- [3] Gao C Q, Wang L, Xiao Y X, et al. Infrared small-dim target detection based on Markov random field guided noise modeling [J]. Pattern Recognition, 2018, 76: 463-475.
- [4] Chen C L P, Li H, Wei Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 574-581.
- [5] Han J H, Ma Y, Zhou B, et al. A robust infrared small target detection algorithm based on human visual system [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(12): 2168-2172.
- [6] Qin Y, Li B. Effective infrared small target detection utilizing a novel local contrast method [J]. IEEE

- Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13 (12): 1890-1894.
- [7] Liu J, He Z Q, Chen Z L, et al. Tiny and dim infrared target detection based on weighted local contrast[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(11): 1780-1784.
- [8] Wei Y T, You X G, Li H. Multiscale patch-based contrast measure for small infrared target detection [J]. Pattern Recognition, 2016, 58: 216-226.
- [9] Han J H, Moradi S, Faramarzi I, et al. Alocal contrast method for infrared small-target detection utilizing a tri-layer window[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(10): 1822-1826.
- [10] Han J H, Liu S B, Qin G, et al. Alocal contrast method combined with adaptive background estimation for infrared small target detection [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2019, 16(9): 1442-1446.
- [11] Bae T W, Zhang F, Kweon I S. Edge directional 2D LMS filter for infrared small target detection [J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(1): 137-145.
- [12] Bai X Z, Bi Y G. Derivative entropy-based contrast measure for infrared small-target detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2452-2466.
- [13] Li L, Li Z Z, Li Y S, et al. Small infrared target detection based on local difference adaptive measure [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020, 17(7): 1258-1262.
- [14] Dai Y M, Wu Y Q, Song Y, et al. Non-negative infrared patch-image model: robust target-background separation via partial sum minimization of singular values[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 81: 182-194.
- [15] Gu Y, Liu J, Shen H H, et al. Infrared dim-small target detection based on an improved multiscale fractal feature[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(6): 1375-1386.  
谷雨, 刘俊, 沈宏海, 等. 基于改进多尺度分形特征的红外图像弱小目标检测 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(6): 1375-1386.
- [16] Zhang T F, Peng Z M, Wu H, et al. Infrared small target detection via self-regularized weighted sparse model[J]. Neurocomputing, 2021, 420: 124-148.
- [17] Han J H, Liu C Y, Liu Y C, et al. Infrared small target detection utilizing the enhanced closest-mean background estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 14: 645-662.
- [18] Xie J R, Li F M, Wei H, et al. Enhancement of single shot multibox detector for aerial infrared target detection [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39 (6): 0615001.  
谢江荣, 李范鸣, 卫红, 等. 用于空中红外目标检测的增强单发多框检测器方法 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0615001.
- [19] Liu F, Guo M, Wang X J. Small target detection based on cross-scale fusion convolution neural network [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0610012.  
刘峰, 郭猛, 王向军. 基于跨尺度融合的卷积神经网络小目标检测 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58 (6): 0610012.
- [20] Wang W F, Jin J, Chen J M. Rapid detection algorithm for small objects based on receptive field block[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(2): 021501.  
王伟锋, 金杰, 陈景明. 基于感受野的快速小目标检测算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 021501.
- [21] Han Z H, Liu J H, Xu F. Infrared dim target detection based on statistical characteristics and bridge method [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 060401.  
韩志华, 刘晶红, 徐芳. 基于统计特征和桥梁方法的红外弱小目标检测算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 060401.
- [22] Wang E D, Jiang P, Li X P, et al. Infrared stripe correction algorithm based on wavelet decomposition and total variation-guided filtering[J]. Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2019, 16(1): 1-12.
- [23] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [24] Hui B W, Song Z Y, Fan H Q, et al. A dataset for dim-small target detection and tracking of aircraft in infrared image sequences [DB/OL]. (2019-10-28) [2021-01-20]. <http://www.csdata.org/en/p/387/>.