

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003071

基于强度-梯度映射与多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法*

卢 晨¹ 凌兴宏²

(1. 苏州工业园区服务外包职业学院 信息工程学院 苏州 215123; 2. 苏州大学 计算机科学与技术学院 苏州 215021)

摘 要:为了能够在复杂环境下准确定位出弱小目标,依据目标的高斯形状特性,设计了强度-梯度映射耦合多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法。首先,根据红外图像在4个不同方向的强度均值,对经典的中值滤波进行改进,以有效抑制复杂背景中的噪声。再基于弱小目标的中心像素,获取整个红外图像的强度信息。将红外图像沿着半径方向分割为4个子块,并建立每个子块的极坐标系,以计算其对应的梯度值。依据最大与最小梯度值的比率,得到整个红外图像的梯度信息。再将强度与梯度信息实施融合,得到背景抑制图像,以增强红外弱小目标。最后,利用强度-梯度映射中的非零像素均值来计算阈值,对背景抑制图像实施分割,准确定位弱小目标。测试数据显示,与已有的红外弱小目标检测方案相比,所提算法具备更高的检测准确性,可完整地识别出目标,呈现出更为理想的ROC(receiver operating characteristic)曲线。

关键词: 红外弱小目标检测; 高斯形状; 强度-梯度映射; 多方向中值滤波; 背景抑制; 阈值分割

中图分类号: TP391; TN21 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1060; 520.6040

Infrared dim small target detection algorithm based on intensity gradient mapping and multi-direction median filter

Lu Chen¹ Ling Xinghong²

(1. School of Information Engineering, Suzhou Industrial Park Institute of Services Outsourcing, Suzhou 215123, China;
2. School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215021, China)

Abstract:In order to locate the weak and small target accurately in the complex environment, according to the Gaussian shape characteristics of the target, the infrared dim small target detection algorithm based on intensity gradient mapping coupled with multi direction Median filter is designed in this paper. Firstly, according to the average intensity of infrared target in four different directions, the classical median filter was improved to effectively suppress the noise in complex background. Then, based on the central pixel of the small and weak target, the intensity information of the whole infrared image is obtained. The infrared image was divided into four sub blocks along the radius direction, and the polar coordinate system of each sub block was established to calculate its corresponding gradient value. According to the ratio of the maximum to the minimum gradient, the gradient information of the whole infrared image was obtained. Then, the intensity and gradient information were fused to get the background suppression image for enhancing the infrared dim target. Finally, the non-zero pixel mean value in intensity gradient mapping was used to calculate the threshold value for segmenting the background suppression image and locating the small and weak target accurately. The test data show that compared with the existing infrared dim small target detection technology, under the complex background interference, this algorithm has higher detection accuracy which can identify the target completely, and it presents a more ideal ROC curve.

Keywords: infrared dim small target detection; Gaussian shape; intensity gradient mapping; multi-direction median filtering; background suppression; threshold segmentation

0 引言

由于红外目标在成像过程中会遭遇较大的背景杂波影响,使得真实目标的对比度和尺寸都很小,缺乏足够的可用信息,对其实现精确识别具有较大的挑战^[1-2]。因此,红外弱小目标检测仍然是一个难度较大且值得研究的问题。

近年来,为了有效从背景中识别出红外目标,人们提出了多种方法,如潘胜达等^[3]通过双层对角灰度差对比度分析机制,充分利用小目标局部对比度的先验信息,提高目标对比度的同时抑制背景杂波及噪声,再利用自适应阈值分割法获取待检测的真实目标,测试结果显示了其方案的准确率。然而,该方案仅利用了红外图像的对比度信息来完成识别,不能充分将红外图像背景中的伪目标像素消除,在杂波与噪声干扰下,无法精确区分弱小目标与复杂背景^[4]。Deng 等^[5]提出一种改进的时空全变分背景预测模型,然后从相应的序列图像中减去预测背景,得到差异图像,再根据差异图像与时间对比度滤波的乘积就可以检测出真实的目标,仿真数据显示了其方法的稳定性与准确率。但是,其改进的背景预测模型忽略了真实目标与其领域像素的差异,且其只利用了一个方向的强度值,不能充分抑制背景中的强噪声等干扰内容,使其虚警率较高。Qin 等^[6]借助局部阶统计量和均值滤波的方法去除像素级的高亮度噪声,以有效平滑红外图像,再利用面核对红外图像进行滤波以增强目标像素,通过自适应阈值运算来提取候选目标像素,随后,基于随机游走器算法,构建了新的局部对比度描述子,以实现杂波抑制和目标增强,选择候选目标像素作为中心像素来设置局部区域,并计算所有局部区域的局部对比度描述子映射,最后通过阈值运算对其处理,实现目标检测。但是,背景噪声在红外图像中通常是密集分布的,导致均值滤波的降噪效果不佳,严重影响了随机游走器算法的平滑效果,限制了其检测率。

为了从复杂背景中准确定位出弱小目标,本文从强度和梯度方向对小目标的两个局部特性进行特征化处理,以抑制背景杂波和检测红外小目标。由于热成像系统在远距离的光学点扩展函数,红外小目标的形状类似于各向同性高斯强度函数。对于强度特征,真实目标的亮度值大于其局部相邻像素的亮度值。另外,对于二维高斯函数,该函数的几乎所有梯度都指向其中心。类似地,红外小目标的对应梯度大致指向目标中心。这两个特性分别被认为是局部强度和局部梯度性质。由于均匀背景,因此可以使用局部强度特性来抑制均匀背景。而对于边缘较强的背景,它们的梯度方向一般是一致的,因此,这些梯度在分布上不同于目标的

梯度。因此,结合这两种红外图像的特征,可以有效地抑制背景杂波和增强目标。最后,在多种不同的干扰背景下,测试了所提算法的检测准确率。

1 红外弱小目标检测算法

本文所设计的强度-梯度映射耦合多方向中值滤波的红外弱小目标检测算法过程如图 1 所示。借助红外图像的多个方向的强度均值来增强中值滤波的去噪能力。然后,根据红外目标与背景之间的特征差异,计算红外图像的强度与梯度信息,形成融合映射,充分抑制背景内容,有效增强红外弱小目标。再根据融合映射的非零像素均值,基于分割算法,准确检测出真实的弱小目标。

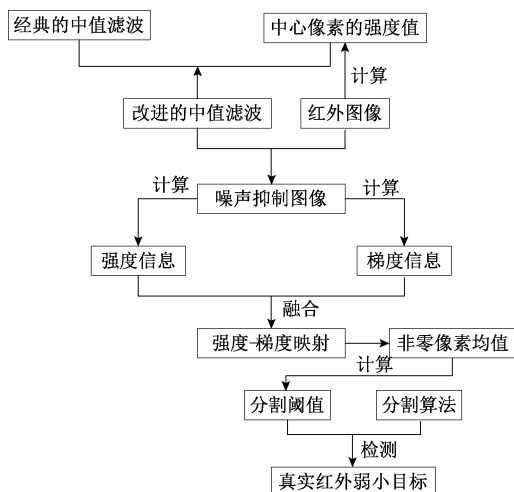


图 1 本文红外目标的检测过程

Fig. 1 The detection process of infrared target in this paper

1.1 基于改进的中值滤波的背景噪声抑制

在形成红外图像的过程中,会遭遇多种噪声影响,给弱小目标的准确定位带来较大的影响,为了解决噪声的干扰,本文借助滤波方法来消除噪声^[7]。在当前多种噪声滤波方案中,中值滤波具有效率高、噪声抑制能力等优点^[8]。设红外图像 $f(x, y)$ 的尺寸为 $M \times N$,由文献^[8]可知, $f(x, y)$ 对应的中值滤波函数为^[7-8]:

$$\text{Med}[f(x, y)] = \begin{cases} \frac{P_{\frac{M \times N + 1}{2}}}{2}, & M \times N \notin \text{Even} \\ \frac{1}{2} [P_{\frac{M \times N}{2}} + P_{\frac{M \times N + 1}{2}}], & M \times N \in \text{Even} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_i 为红外图像中的第 i 个像素值;Med代表中值滤波操作。

式(1)作为经典的去噪方法,在多数条件下都可获得较好的降噪效果。但是,如果 $k(x, y)$ 中的噪声是处于密集分布状态,那么式(1)的噪声抑制能力不

足。为了确保能够较好地过滤红外背景中的噪声,本文采用图像中心像素在 4 个方向上的强度值来优化式(1),从而得到新的噪声抑制技术。首选,设置一个方形窗口,如图 2 所示,再计算该窗口的中心像素在 4 个方向上的强度中值。随后,将其中的最大强度值赋予中心像素:

$$g(i, j) = \max(z_1, z_2, z_3, z_4) \quad (2)$$

$$\begin{cases} z_1 = \text{Med}[k(i, j - N), \dots, k(i, j), \dots, k(i, j + N)] \\ z_2 = \text{Med}[k(i - N, j), \dots, k(i, j), \dots, k(i + N, j)] \\ z_3 = \text{Med}[k(i + N, j - N), \dots, k(i, j), \dots, k(i - N, j + N)] \\ z_4 = \text{Med}[k(i - N, j - N), \dots, k(i, j), \dots, k(i + N, j + N)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k(i, j)$ 代表中心像素; z_1, z_2, z_3, z_4 是图 2 中的 4 个方向上的强度值; $g(i, j)$ 是噪声抑制后的像素点; N 为窗口的尺寸。

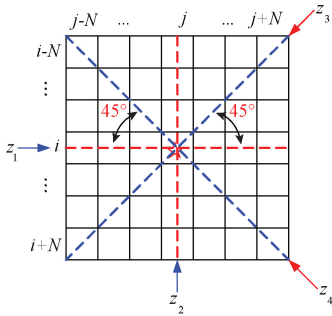
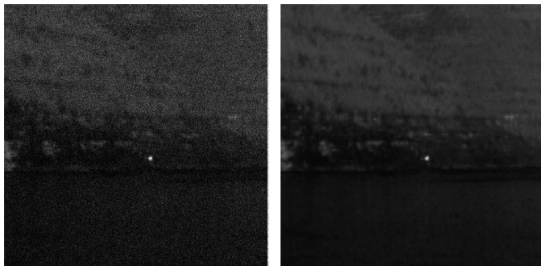


图 2 噪声滤波模板

Fig. 2 Noise filter template

为了体现改进后的中值滤波对应的噪声抑制能力,图 3(a)所示为红外图像样本。再借助上述过程对其处理,结果如图 3(b)所示。根据输出数据显示,改进后的中值滤波表现出理想的噪声抑制能力。



(a) “地面”红外图像
(a) "Ground" infrared image
(b) 降噪图像
(b) Noise reduction image

图 3 红外图像的去噪效果

Fig. 3 Denoising effect of infrared image

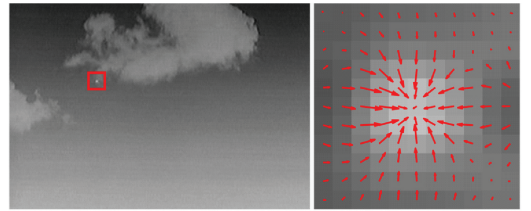
1.2 强度-梯度映射的计算

根据文献[9]可知,红外弱小目标可以通过一个高斯强度函数来描述^[9]:

$$I(x, y) = \gamma \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \right) \quad (4)$$

式中: γ 是目标像素的峰值; σ_x, σ_y 分别是水平、垂直方向上的标准偏差参数。

一般而言,红外小目标通常在图像中占据少数像素,缺乏纹理和颜色信息;然而,红外弱小目标通常被认为比周围的背景更亮^[10]。因此,局部强度信息对于检测小目标是有价值的。利用局部强度信息可以抑制较暗或均匀的背景,因为它们的强度值很小或几乎相同。本文算法把这个性质称为局部强度性质。另外,考虑到二维高斯函数的梯度向量几乎都指向其中心,所以,弱小目标的梯度向量也是大致指向目标中心的,如图 4(a)所示。此外,具有强边缘的背景的梯度方向通常是一致的。此属性被视为局部渐变属性。因此,局部梯度特性也可用于检测小目标,如图 4(b)所示,其中的某些背景(如树)没有局部强度属性。此外,由蓝色边框或红色边框标记的背景是局部定向的,没有局部渐变特性。



(a) 弱小目标的梯度方向

(a) Gradient direction of small and weak targets



(b) 强边缘背景的梯度方向

(b) Gradient direction of strong edge background

图 4 红外图像的梯度方向

Fig. 4 Gradient direction of infrared image

基于上述特性发现,强度和梯度信息对识别真实目标具备较大的作用。为此,本文首先计算局部强度特性。给定一个尺寸为 $n \times n$ 的图像块,其局部周边区域内的平均值表示为:

$$\bar{f} = \frac{1}{1 - N_m} (f_0 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij}) \quad (5)$$

式中: N_m 是图像块中的像素总量; $f_{i,j}$ 代表 (i, j) 处像素点的灰度值; f_0 为图像块的中心像素的灰度值。

根据式(5)可得图像块的局部强度值 I 为:

$$I = \max[0, f_0 - \bar{f}] \quad (6)$$

对于弱小目标而言,其灰度值通常大于其周围像素的灰度值,因此, $I > 0$ 。因此,中心像素值小于局部平均值的杂波可以被抑制。得到 I 后,将图像块沿径向分为四部分,以图像块的中心为原点建立极坐标系。则每个部分可表示为:

$$\psi_i = \left\{ (\gamma, \theta_i) \left| \frac{\pi(i-1)}{2} < \theta_i \leq \frac{\pi i}{2} \right. \right\} \quad (7)$$

式中: ψ_i 表示图像块中的第 i 个部分; (γ, θ_i) 为极坐标系中的一个像素点。

由于红外弱小目标的梯度并没有那么严格地指向其中心,因此使用了相对宽松的约束来表示指向中心的梯度:

$$\phi_{\psi_i} = \left\{ g_{\psi_i}(m, \alpha, \gamma, \theta_i) \left| \frac{\pi(i-1)}{2} + \pi < \alpha_i \leq \frac{\pi i}{2} + \pi, (\gamma, \theta_i) \in \psi_i \right. \right\} \quad (8)$$

式中: ϕ_{ψ_i} 代表 ψ_i 内符合约束的所有梯度集合; $g_{\psi_i}(m, \alpha, \gamma, \theta_i)$ 是集合 ϕ_{ψ_i} 内的梯度向量; m, α 代表 $g_{\psi_i}(m, \alpha, \gamma, \theta_i)$ 的幅度与方向。

图 5 所示为一个在 ψ_1 内的两个梯度 g_1 和 g_2 。根据式(8)可知,只有当 ψ_1 内的梯度方向满足约束条件 $\pi < \alpha \leq 1.5\pi$ 时,此时对应的梯度值才会被选择。因此, $g_1 \in \phi_{\psi_1}$, 而 $g_2 \notin \phi_{\psi_1}$ 。

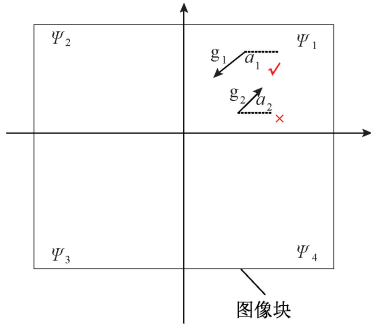


图 5 g_{ψ_i} 的解释示意图

Fig. 5 Explanation diagram of g_{ψ_i}

根据式(8)在每个区域内计算 g_{ψ_i} 幅度的均方值:

$$G_i = \frac{1}{N_j} \sum_{j=1}^{N_j} \|g_{\psi_i}^j\|^2 \quad (9)$$

式中: N_j 代表集合 ϕ_{ψ_i} 中的 g_{ψ_i} 数量。

根据式(9)计算所有的 G_i 值;再从中确定最大值与最小值:

$$G_{\max} = \max_{1 \leq i \leq 4} G_i \quad (10)$$

$$G_{\min} = \min_{1 \leq i \leq 4} G_i \quad (11)$$

根据 $G_{\max}$ 与 $G_{\min}$, 可计算出整个图像的梯度值 G :

$$G = \begin{cases} \sum_{i=1}^4 G_i, & \frac{G_{\min}}{G_{\max}} > k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: G 代表图像的局部梯度值; k 是比例阈值,通过实验确定。

由于红外图像中的小目标具有各向同性高斯形状,其梯度方向在各个方向上分布均匀^[9]。然而,背景杂波通常是局部的。因此,利用 $G_{\max}$ 与 $G_{\min}$ 的比值可以有效抑制局部方向杂波。随后,对强度映射 I 与梯度映射 G 实施归一化处理,输出 I' 与 G' 。再对二者进行融合,得到联合映射:

$$IG_{i,j} = I_{i,j} \times G_{i,j} \quad (13)$$

式中: $IG_{i,j}$ 是梯度-强度映射。

以图 6(c) 为目标,根据上述过程,计算其对应的强度与梯度映射,结果如图 6 所示。由图 6 发现,真实的弱小目标被显著增强。

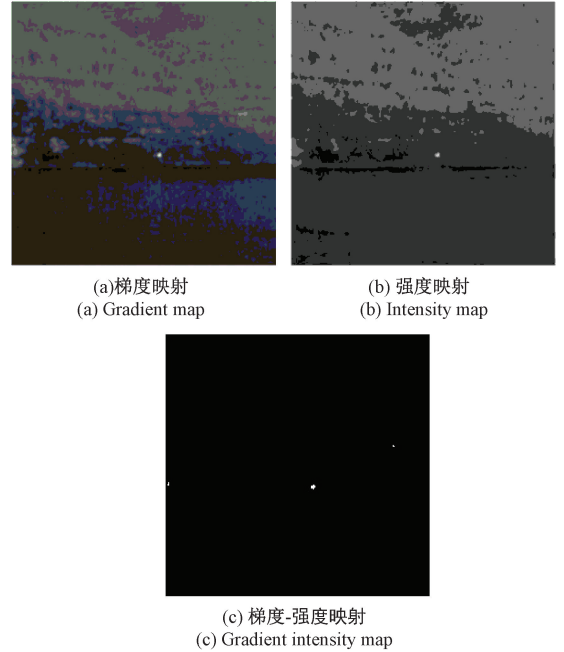


图 6 强度-梯度映射的计算

Fig. 6 Calculation of intensity gradient map

1.3 基于分割算法的真实弱小目标检测

从图 6(c) 发现,虽然初始红外图像经过滤波和梯度-强度映射处理后,其中的背景和噪声被有效抑制,但是仍然存有一些误判内容,给目标的准确检测带来一定的干扰。为此,本文引入阈值分割算法^[11-13]来准确定位目标。首先,设定一个 3×3 的滑动窗口来计算红外图像的局部能量值^[14]:

$$L(i, j) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 [f(x, y)]^2 \quad (14)$$

基于真实目标与背景的能量差异,根据强度-梯度映

射中的非零像素均值来确定阈值 T :

$$T = \overline{IG_{i,j}} \quad (15)$$

借助式(15)的阈值和文献[14]的算法,对梯度-强度映射实施处理,如图7所示。从图7可知,真实目标已全部分割出来,且没有误检和漏检现象。

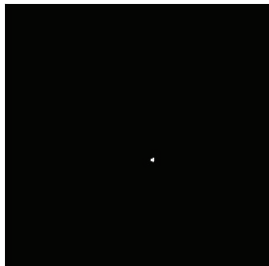


图7 弱小目标的检测结果

Fig. 7 Detection results of small and weak targets

2 测试结果与分析

为了测试本文方法的准确度,基于 MATLAB 语言来完成实验。本次实验环境为 DELL、Intel Core i5 处理器、4 GB 的内存。同时,为了体现所提方法的先进性,将文献[5-6]设定为两个对比组。根据所提算法的过程可知,在计算红外图像的梯度映射过程中,参数 k 对定位准确性影响较大,需要对其进行优化。其余参数为噪声模板的滑动窗口 $N \times N = 5 \times 5$ 、阈值分割的窗口大小为 3×3 。

2.1 参数 k 的优化

首先,选择 50 幅不同背景的红外图像,包括海洋、云层和地面等,图8所示为部分样本,其中目标的最大尺寸约为 10×8 像素;随后,借助本文算法对其进行检测,并采用 ROC 曲线^[15-17]来表征其结果。ROC 曲线描述了真阳性和假阳性之间的相对关系:

$$\begin{cases} P_d = \frac{D}{M} \\ P_f = \frac{F}{M} \end{cases} \quad (16)$$

式中: D 代表正确检测的像素数量; M 是弱小目标总的像素数量; F 是虚警数量。

在不同的 k (0.05, 0.1, 0.2, 0.4) 值下,得到不同的检测结果,形成的 4 种 ROC 曲线,如图9所示。由 P_d - P_f 曲线发现,当 $k=0.2$ 时,其对应的 P_d 值始终要高于其他 3 个 k 值。而且,当 k 达到 0.4 时,其 P_d 值大幅下降,原因是 k 值过大,会抑制了部分形状不像高斯函数的目标。因此,在本次实验中,取 $k=0.2$ 。

2.2 弱小目标检测结果

3 种算法对图8的样本的检测结果如图10~12所

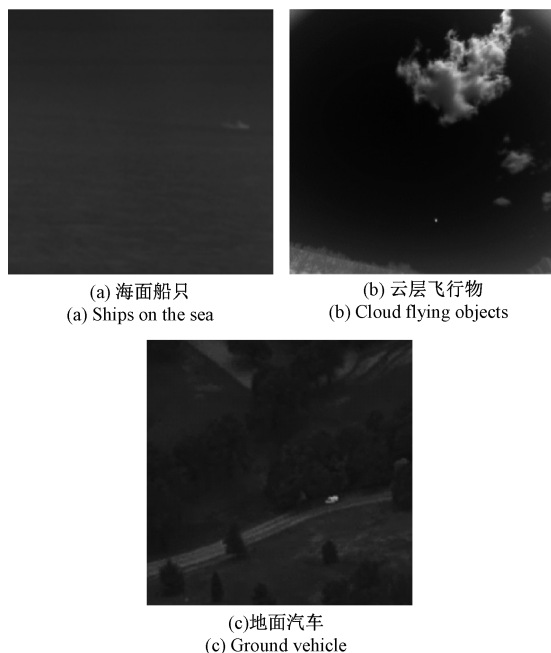


图8 部分测试红外图像

Fig. 8 Partial test infrared image

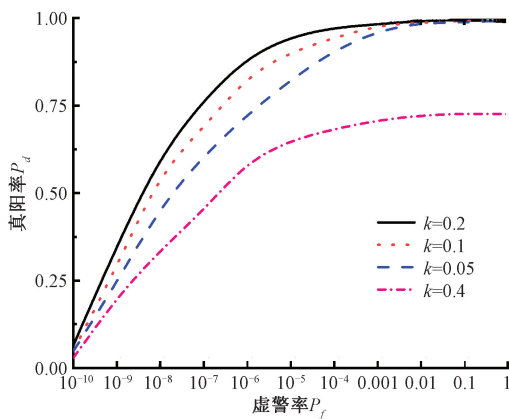


图9 不同 k 值下的 ROC 曲线测试

Fig. 9 ROC curve test under different k values

示。由图10~12发现,对于这3种不同干扰背景下的真实目标检测方案而言,所提算法呈现出更高的准确性,真实弱小目标被完整的定位出来,轮廓清晰,且含有很少的误检内容。文献[6]方法也有较高的识别准确性,真实目标也能完整地检测出来,但是存在一定的误检内容,尤其是对图12(a)误检内容较多,出现了很多的“道路”信息,如图12(c)所示。文献[5]方法的检测准确度不理想,误检内容更多,如图12(d)所示,存在“山坡”、“与‘道路’”等信息。原因是所提技术利用多方向中值滤波器来有效清除红外图像中的噪声,且考虑了真实目标与背景的局部强度与梯度差异,构建强度-梯度映射,以显著增强弱小目标,同时,借助该映射

中的非零像素均值来计算阈值,从而实现弱小目标的准确定位。文献[6]技术只是采用了普通的均值滤波来完成去噪,降噪效果不佳,严重影响了随机游走器算法的平滑效果,没有考虑红外背景噪声呈现的密集分布特性,使其对部分强噪声的去噪能力不足,影响了随

机游走器算法的平滑效果,从而限制了检测准确率。文献[5]算法采用的背景预测模型忽略了真实目标与其领域像素的差异,无法有效增强目标,且其只利用了一个方向的强度值,不能充分抑制背景中的强噪声等干扰内容,使其误检率较大。

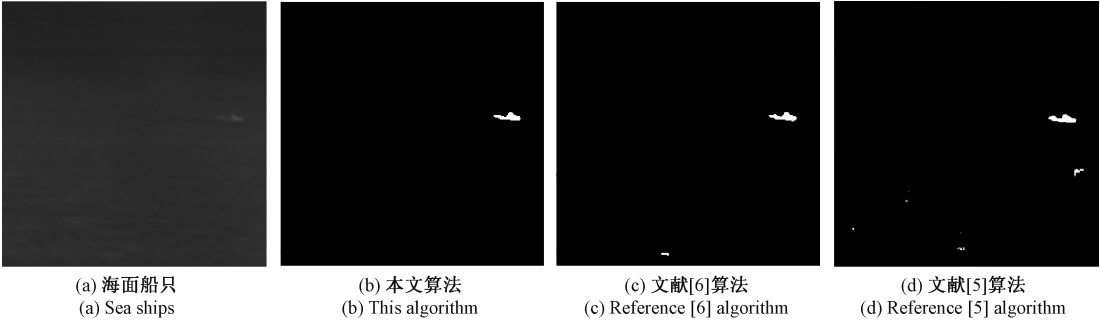


图 10 “海面船只”图像的检测结果
Fig. 10 Detection results of “sea boat” image

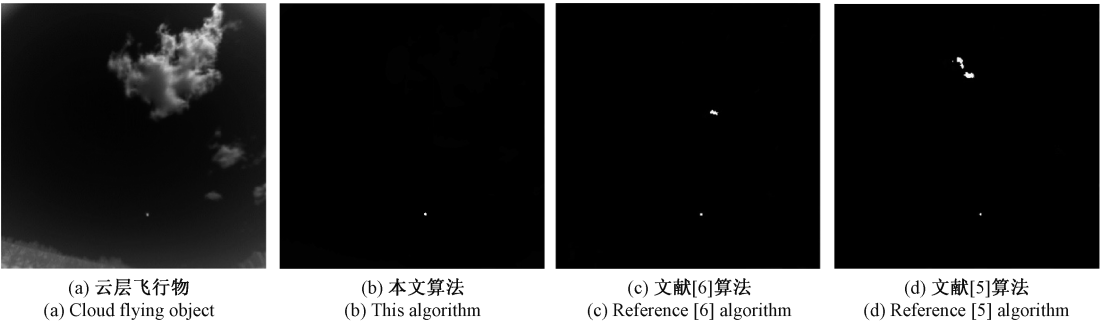


图 11 “云层飞行物”图像的检测结果
Fig. 11 Detection results of “cloud flying object” image

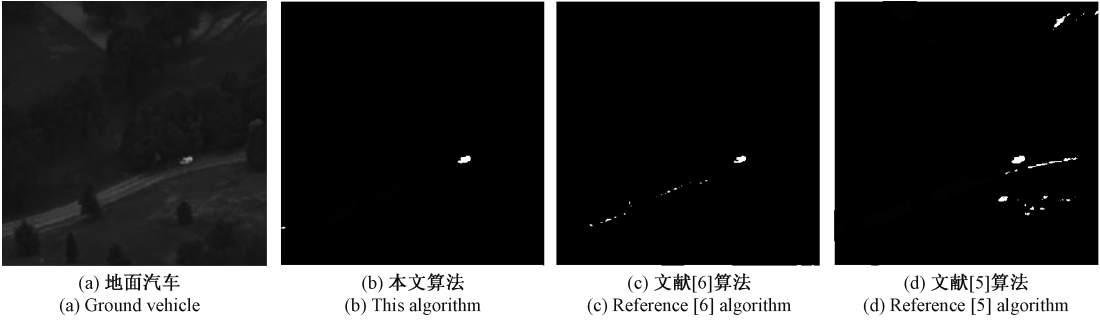


图 12 “地面汽车”图像的检测结果
Fig. 12 Detection results of “ground vehicle” image

2.3 量化测试结果

为了客观评价本文方法和两个对比组的识别准确性,借助信杂比增益^[18-19](signal to clutter ratio gain, GSCR)与背景抑制因子(background suppression factor, BSF)^[20]来实施测试:

$$\begin{cases} GSCR = \frac{(S/C)_{out}}{(S/C)_{in}} \\ BSF = \frac{C_{in}}{C_{out}} \end{cases} \tag{17}$$

式中: S 代表真实目标的信号幅度; C 为背景的标准偏差;out、in 分别代表输出、输入信号。

以图 10~12 所示的 3 个样本为对象,基于式 (17) 可获取 3 种方法对应的 *GSCR*、*BSF* 值,统计数据如表 1 所示。基于输出数据发现,对于 3 种不同背景的红外图像,本文方案的 *GSCR* 与 *BSF* 值是最大的,要优于其他两个对比组,分别是 6.512、3.117、1.667 以及 7.738、2.629、8.590。

表 1 不同方案的 GSCR 与 BSF 统计结果

Table 1 GSCR and BSF statistical results of different schemes

算法	指标	图 10	图 11	图 12
本文	<i>GSCR</i>	6.152	3.117	1.667
	<i>BSF</i>	7.738	2.629	8.590
文献[5]	<i>GSCR</i>	2.988	2.328	1.064
	<i>BSF</i>	5.562	1.907	6.339
文献[6]	<i>GSCR</i>	4.305	2.743	1.387
	<i>BSF</i>	6.701	2.394	7.095

3 结 论

红外弱小目标检测仍然受到目标尺度变化和强杂波的影响。基于红外弱小目标近似为二维高斯函数的特点,本文研究了红外弱小目标的局部强度和梯度特性。通过红外中心像素的 4 个不同方向的强度均值来优化中值滤波的去噪能力,使其可抑制噪声。在分别计算红外图像的强度与梯度信息,通过对二者实施融合,形成强度-梯度映射,有效增强红外弱小目标。并基于分割算法来处理联合映射,从而准确定位弱小目标。对实际数据的实验表明,该方法不仅具有抑制杂波的能力,而且对不同的目标尺寸具有良好的准确性和鲁棒性。

在未来的研究中,本文尝试将所提方法与目标的运动信息结合起来,力求在这一领域有进一步的改进。

参考文献

[1] 张代华. 基于虚警识别与空-频域显著性映射的红外弱小目标检测算法[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(27): 258-265.

ZHANG D H. Infrared dim and small target detection algorithm based on false alarm recognition and space frequency domain significance mapping [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(27): 258-265.

[2] 闻新, 谢天夏, 闫钧华. 改进结构相似度的红外两波段图像目标配准[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(12): 3112-3120.

WEN X, XIE T H, YAN J H. Target registration of infrared two band image based on improved structure similarity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,

2017, 38(12): 3112-3120.

[3] 潘胜达, 张素, 赵明. 基于双层局部对比度的红外弱小目标检测方法[J]. 光子学报, 2020, 49(1): 110003-0110003.

PAN SH D, ZHANG S, ZHAO M. Detection method of infrared dim and small target based on double-layer local contrast [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(1): 110003-0110003.

[4] 闻凯. 基于复杂融合特征与灰度-纹理直方图描述子的红外弱小目标检测追踪算法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(34): 83-91.

WEN K. Infrared dim and small target detection and tracking algorithm based on complex fusion features and gray texture histogram descriptors [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(34): 83-91.

[5] DENG L Z, ZHANG J K, ZHU H. Infrared moving point target detection using a spatial-temporal filter [J]. Infrared Physics and Technology, 2018, 95(10): 122-127.

[6] QIN Y, BRUZZONE L, GAO C Q. Infrared small target detection based on facet Kernel and random walker[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2019, 57(9): 7104-7118.

[7] 孙丹, 王莉莉. 基于空-频域映射与虚警抑制的弱小目标检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 31-39.

SUN D, WANG L L. Weak and small target detection algorithm based on space-frequency mapping and false alarm suppression [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(1): 31-39.

[8] SHANEH M, MAHYARI A G. Impulse noise reduction based on improved median-filter [J]. International Journal of Electronics, 2012, 99(11): 1489-1496.

[9] QI S X, MA J M, TAO C. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 495-499.

[10] QI S X, M D L, MA J. Robust method for infrared small-target detection based on Boolean map visual theory[J]. Applied Optics, 2015, 53(18): 3929-3940.

[11] ZHU H J, ZHUANG Z H, ZHOU J L. Segmentation of liver cyst in ultrasound image based on adaptive threshold algorithm and particle swarm optimization [J]. Multimedia Tools & Applications, 2017, 76(7): 8951-8968.

[12] 马炬, 邹金慧. 基于三维块匹配与改进 Top-hat 的红外图像目标检测方法[J]. 探测与控制学报, 2019,

- 41(6): 83-87.
- MA H, ZHOU J H. 3D block-matching filtering and improved Top-hat method for infrared image target detection[J]. Journal of Detection and Control, 2019, 41(6): 83-87.
- [13] 刘辉, 何勇, 何博侠. 基于多特征融合与 ROI 预测的红外目标跟踪算法[J]. 光子学报, 2019, 48(7): 102-117.
- LIU H, HE Y, HE B X. Infrared target tracking algorithm based on multi feature fusion and ROI prediction[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(7): 102-117.
- [14] 吴涛, 何文忠, 陈晓露. 基于局部特征的单帧红外小目标检测算法[J]. 激光与红外, 2017, 46(3): 368-371.
- WU T, HE W ZH, CHEN X L. Single frame infrared small target detection algorithm based on local features [J]. Laser and Infrared, 2017, 46(3): 368-371.
- [15] HUANG D, HUANG S. Dim and small target detection based on characteristic spectrum [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2018, 46(11): 1915-1923.
- [16] 李梦莹. 复杂背景下的红外小目标检测算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018: 56-65.
- LI M Y. Research on infrared small target detection algorithm in complex background [D]. Changchun: Jilin University, 2018: 56-65.
- [17] 聂进焱. 基于局部对比度增强的红外小目标检测算法研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018: 49-60.
- NIE J Y. Research on infrared small target detection algorithm based on local contrast enhancement [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2018: 49-60.
- [18] ZHAO Y, PAN H B, DU C P. Principal curvature for infrared small target detection[J]. Infrared Physics and Technology, 2015, 69(7): 36-43.
- [19] 潘良, 邱建林. 基于时空高阶累积量与各向异性背景抑制的红外弱小目标检测算法[J]. 电子测量与仪器

学报, 2018, 32(11): 118-124.

PAN L, QIU J L. Infrared dim target detection algorithm based on high-order cumulant and anisotropic background suppression[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(11): 118-124.

- [20] 何玉杰, 李敏, 张金利. 基于低秩三分解的红外图像杂波抑制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2069-2078.

HE Y J, LI M, ZHANG J L. Clutter suppression of infrared image based on low rank three decomposition [J]. Optical Precision Engineering, 2015, 23(7): 2069-2078.

作者简介



卢晨, 2006 年于苏州大学获学士学位, 2009 年于苏州大学获硕士学位, 现为苏州工业园区服务外包职业学院讲师, 主要研究方向为图像处理、计算机视觉、软件工程。

E-mail: luc@siso.edu.cn

Lu Chen received his B. Sc. degree from Soochow University in 2006, and M. Sc. degree from Soochow University in 2009. Now he is a lecturer in Suzhou Industrial Park Institute of Services Outsourcing. His main research interests include image processing, computer vision and software engineering



凌兴宏, 1986 年于哈尔滨科学与技术大学获得学士学位, 2000 年于吉林工业大学大学获得硕士学位, 2004 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为苏州大学副教授, 主要研究方向为图像处理、模式识别、机器学习、人工智能。

E-mail: LingXhg1968sudx@aliyun.com

Ling Xinghong received B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 1986, M. Sc. degree from Jilin University of Technology in 2000, and Ph. D. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2010. Now he is an associate professor at Soochow University. His main research interests include image processing, pattern recognition, machine learning, artificial intelligence.