

引用格式: ZHU Yong, XIAO Qin, LI Zhengzhou, et al. Infrared Small Target Detection Method Based on Maritime Scene Perception[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(12):1210002

朱勇,肖沁,李正周,等. 基于海面场景感知的红外小目标检测方法[J]. 光子学报, 2022, 51(12):1210002

基于海面场景感知的红外小目标检测方法

朱勇¹,肖沁¹,李正周¹,刘国金¹,秦天奇²

(1 重庆大学 微电子与通信工程学院,重庆 400044)

(2 四川航天电子设备研究所,成都 610100)

摘要:逆光条件下弹载红外图像的密集鱼鳞波、海面亮带以及岛屿杂波严重影响了远距离红外小目标的检测性能。本文通过感知非平稳海面杂波成份存在的区域及起伏状态构建海面场景信息,采取与背景杂波相适应的信号处理方法精细检测小目标。首先,结合结构张量和Hough变换检测海天岛屿区,利用Bernaola-Galavan分割算法和方差加权信息熵表征的复杂度感知鱼鳞波、海面亮带等杂波成份,构建出海天区、平稳海区、波动海区、岛屿区的场景信息。然后,针对边缘性结构强的海天线和岛屿,提出基于方向性差异的杂波抑制算法压制杂波;在平稳海区使用顶帽变换压制杂波;在鱼鳞波、海面亮带的波动海区,提出融合灰度梯度杂波抑制算法抑制背景。最后,海天岛屿区、波动海区采用恒虚警阈值检测目标,而平稳海区采用局部峰值判决策略检测目标。相比现有先进信号检测法,实验结果表明所提方法能有效适应不同海面背景杂波,提高复杂背景下小目标检测准确性和鲁棒性。

关键词:海面背景;场景感知;杂波抑制;目标检测;小弱目标

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20225112.1210002

0 引言

海面远距离红外目标是典型的小弱信号,缺乏纹理和结构等有效信息。在逆光条件下,红外成像往往具有密集鱼鳞波、高强度海面亮带等强动态背景杂波。再则,海面中的岛屿、岛岸变现为红外图像中高亮度背景。因此,红外目标常常表现为淹没于强背景杂波中弱小目标信号。有效提高海面复杂背景下小目标检测性能和压制杂波干扰虚警极具挑战性,是目标检测识别领域的难点和热点问题。

先跟踪后检测(Track Before Detect, TBD)和先检测后跟踪(Detect Before Track, DBT)是检测小弱目标的两种主要策略。TBD算法假设背景杂波为时空不相关的高斯白噪声,利用轨迹连续性进行多帧关联识别目标信号。然而,鱼鳞波、海面亮带杂波不满足高斯白噪声模型,TBD检测小弱目标出现大量虚警。DBT算法首先白化处理红外图像,对超过门限判断的测量点再进行多帧关联来检测红外小弱目标,主要有背景预测、目标稀疏重构、基于深度学习算法和基于人类视觉注意系统(Human Visual System, HVS)算法等四种。形态学顶帽变换(Top-hat)^[1]、最大中值滤波(Max-median)^[2]、二维最小均方滤波器(Two Dimensional Least Mean Square Filter, TDLMS)^[3-4]是常见的背景预测算法,对背景平稳、强度均匀的平稳海区效果较好,但对于边缘性强、非平稳的鱼鳞波估计能力较差,杂波抑制存在大量残留。目标稀疏重构方法将小目标和背景分别视作稀疏分量和低秩分量,如红外块图像(Infrared Patch-image, IPI)模型^[5]、加权图像块张量(Reweighted Infrared Patch-tensor Model, RIPT)模型^[6]、部分张量核范数和(Partial Sum of Tensor Nuclear Norm, PSTNN)^[7]和局部对比先验低秩(Low Rank Model with Local Contrast Prior, LRMLCP)模型^[8]等。然而,不仅重构稀疏矩阵分量和低秩矩阵分量的难度大,而且当杂波强度波动范围大

基金项目:国家自然科学基金(No. 61675036),国防预研基金(No. 6140415020312)

第一作者:朱勇(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为目标信号检测。Email: zhu_yong@cqu.edu.cn

导师(通讯作者):李正周(1974—),男,教授,博士,主要研究方向为微弱目标检测识别、雷达信号检测与跟踪。Email: lizhengzhou@cqu.edu.cn

收稿日期:2022-04-26;录用日期:2022-09-23

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

且纹理复杂时会出现目标信号与高亮干扰混杂,导致检测性能降低。基于深度学习的目标检测方法发展迅速,如注意局部对比网络(Attentional Local Contrast Network, ALCNet)^[9]、由目标提取模块和语义约束模块组成的TBCNet^[10]、融合视觉显著性的全卷积神经网络(Full Convolutional Neural Network and Visual Saliency, VS-FCNN)^[11]等,其检测性能主要取决于训练样本和特征提取,在某些应用场景甚至表现出较传统方法更强的适应能力。然而,由于计算资源和训练样本获取等条件的限制,基于深度学习的小目标检测算法难以部署和实现,发展相对缓慢,因此本文研究传统算法来提高小目标检测的性能,仍具有重要的意义。基于HVS算法利用视觉显著选择性快速捕捉到与背景具有较大差异的感兴趣区域,如局部对比度测量(Local Contrast Measure, LCM)^[12]、三层局部对比度测量(Tri-layer Local Contrast Measure, TLLCM)^[13]、平均绝对灰度差(Average Absolute Gray Difference, AAGD)^[14]、绝对方向平均差(Absolute Directional Mean Difference, ADMD)^[15],有目的地突出真实目标的同时降低噪声干扰。然而,鱼鳞波和高亮度海面亮带边缘往往也符合高局部对比度特性,导致目标与虚警常常混淆在一起,虚警率增高的同时也会造成目标漏检,场景适应性较差。

近年来,利用区域场景信息提升小弱目标检测性能也逐渐成为共识和重要研究方向,即在估计和划分背景区域的基础上采用不同信号处理方法进行针对性的目标检测,比如,在提取海天线的基础上依次将背景分为天空区、海天区和海区。针对海天区红外小目标,区域自适应杂波抑制^[16]利用多级滤波对海天区背景抑制;峰值局部奇点和高斯差分联合(Peak Local Singularity and Difference of Gaussian, PLSDG)^[17]利用峰值局部奇点判决目标;互小波能量组合(Mutual Wavelet Energy Combination, MWEC)^[18]采用灰度侵蚀形态滤波抑制海天区背景。然而,这些方法对海天背景杂波分区和信号处理方法较为粗糙,区域自适应杂波抑制^[16]未对海区目标检测,导致漏检;PLSDG^[17]未感知海面复杂程度,对海区只采用高斯差分滤波器,会在具有尖锐边缘的海面亮带处产生较多的虚警;MWEC^[18]不但人为划分海区,还难以抑制起伏不定的鱼鳞波。

针对以上场景感知和目标检测方法存在的不足,本文通过感知非平稳海面背景杂波组成成份存在的区域及起伏状态,通过构建海面场景信息来采取与背景杂波相适应的信号处理方法精细检测小目标,之后将各个区域检测结果归一化到同一强度范围并整合得到小目标检测结果。

1 海面场景感知区域提取方法

远距离目标可能存在于海天区、岛屿区和海面区,感知出各类海陆杂波可能存在的区域是采取针对性方法抑制背景的基础。图1为本文海面小目标检测算法计算流程。

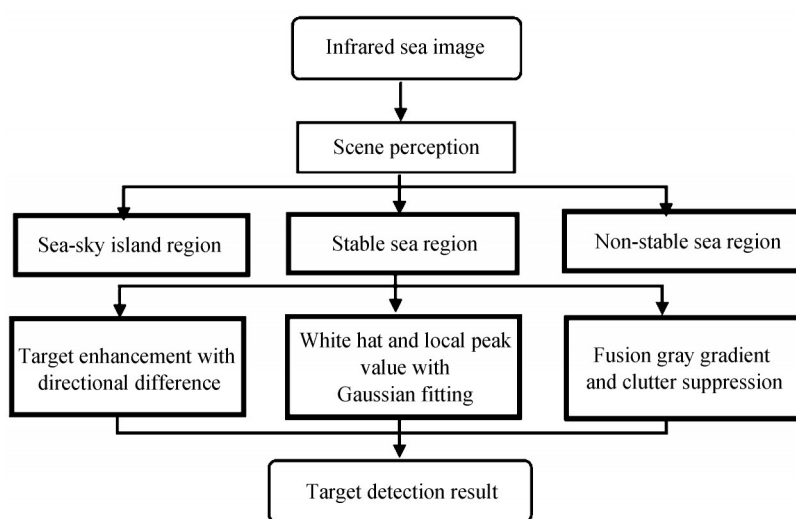


图1 检测算法流程

Fig.1 Diagram of detection method

1.1 海天线提取方法

海天线分隔了天空和海面,是非常重要空间位置信息。海天线往往表现为一条较为粗厚的直线段,但因背景会出现不连续甚至扭曲部分。本文采用基于结构张量二进制大特征值和Hough变换的自动地平线检测方法检测海天线。利用结构张量将局部梯度转化为可感知粗厚边缘特性的大特征值图。红外图像 I 的结构张量 S_T 定义为

$$S_T(x, y) = G_\sigma \otimes \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 & \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 I}{\partial x \partial y} & \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{xy} & S_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, G_σ 为标准差 σ 的高斯滤波器, \otimes 为卷积算子, I 为红外图像, $\partial I/\partial x$ 和 $\partial I/\partial y$ 分别为在 x, y 方向上的偏导数。结构张量 S_T 的两个特征值具有不同含义,大特征值表征了局部图像区域内梯度方向的主导趋势和相干程度,可以较好地刻画粗而不平的边缘并忽略细小琐碎的细节;而小特征值用于定位角度对粗厚的边缘贡献不大。大特征值和小特征值的分别定义为

$$\lambda_{\text{large}} = \frac{1}{2} \left(S_{xx} + S_{yy} + \sqrt{(S_{xx} - S_{yy})^2 + 4S_{xy}^2} \right) \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{small}} = \frac{1}{2} \left(S_{xx} + S_{yy} - \sqrt{(S_{xx} - S_{yy})^2 + 4S_{xy}^2} \right) \quad (3)$$

将结构张量大特征值归一化到 $[0, 1]$ 范围并进一步求出简单有效的边缘检测器结构张量二进制大特征值 B_s ,其定义为

$$B_s(x, y) = \begin{cases} 1 & \lambda_{\text{large}}(x, y) \geq \tau \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中,

$$\tau = \overline{\lambda_{\text{large}}} + \zeta \times \sigma(\lambda_{\text{large}}) \quad (5)$$

式中, $\overline{\lambda_{\text{large}}}$ 和 $\sigma(\lambda_{\text{large}})$ 分别为 B_s 显著图的均值和标准差, ζ 为经验调整系数。

海天线近似认为是 B_s 图中最长的粗直线,并且往往贯穿整张图像。以图像水平向右为 x 的正方向、竖直向下为 y 的正方向建立坐标轴,在 $x-y$ 平面上拟合海天线,即

$$y = kx + b = \left(-\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) x + \frac{\rho}{\cos \theta} \quad (6)$$

式中, k, b 分别为海天线所在直线的斜率和截距, θ 是海天线法线与 y 轴的夹角, ρ 为坐标中心,即图像左上角到海天线的距离,这些参数对应的海天线描述为图2(a)。将 B_s 图中坐标为 (x, y) 的每个边缘像素点映射为 (θ, ρ) 所表示的Hough空间中一条正弦参数曲线,映射方法表示为

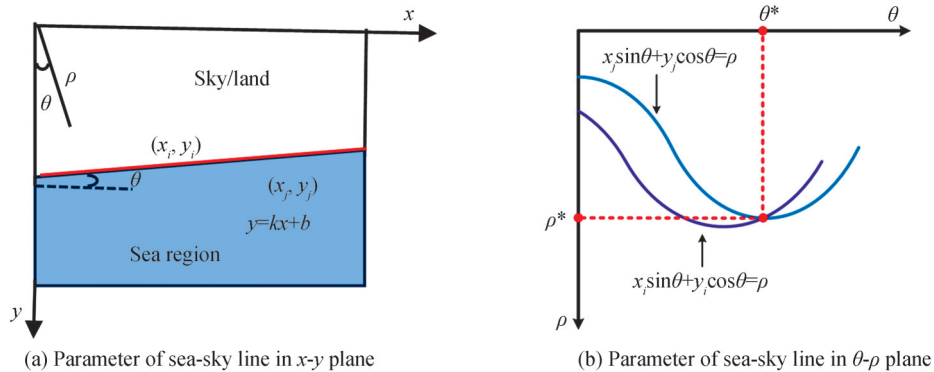


图2 海天线提取的Hough变换图

Fig.2 Hough transform diagram for sea-sky line extraction

$$H(\rho, \theta) = \sum_{x=1}^W \sum_{y=1}^H \left(1 - \delta(B_s(x, y)) \right) \delta(x \sin \theta + y \cos \theta - \rho) \quad (7)$$

式中, $\delta(\cdot)$ 为狄拉克函数, W 、 H 分别为红外海洋图像宽和高。如图 2(b), Hough 变换是计算二维曲线相交于 (θ, ρ) 的累加器。在 $\theta - \rho$ 平面上累加数 $H(\theta, \rho)$ 的最大值决定了通过 $x - y$ 平面上最多边缘点的一条直线的参数, 因此, 利用最大累加数 $H^*(\theta^*, \rho^*)$ 从经 Hough 变换后直线集合中确定出潜在的海天线。图 3 为海天线检测示例, 该方法能很好地适应有海天岛屿和无海天岛屿的场景。

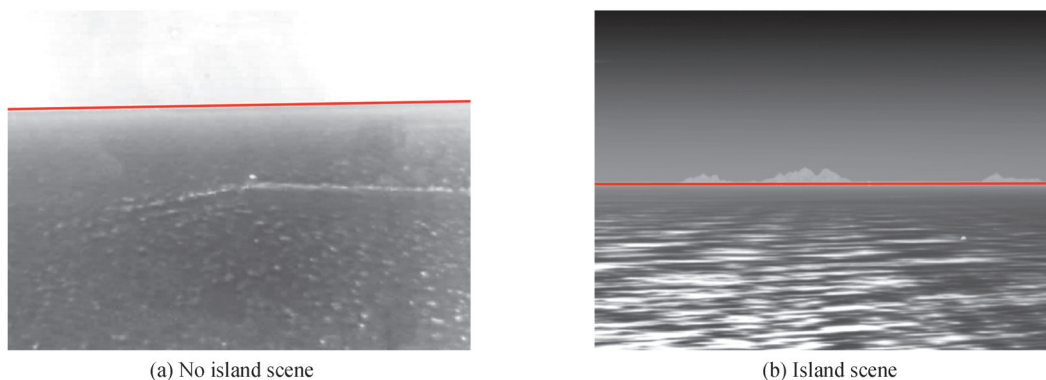


图 3 海天线检测示例

Fig.3 Sample of sea-sky line detection

1.2 海天岛屿区提取方法

海天区往往是包含海天线在内的一小块固定高度的区域, 且其强度与海天线的强度相差较小。运用求解海天线用到的结构张量 S_T 来表征差分特征值 D_E , 其定义为

$$D_E(x, y) = \exp(\lambda_{\text{large}}(x, y) - \lambda_{\text{small}}(x, y)) \quad (8)$$

使用最大类间方差法对 D_E 进行阈值分割, 对大于阈值的二值化的差分特征值图进行连通分量标记操作, 保留符合以下规则的连通域:

$$A = \{(x, y) | |y - y_0| \leq \alpha \cdot H, x \leq W, (x, y) \in \Omega\} \quad (9)$$

式中, H 、 W 分别为图像的高和宽, α 为均衡因子, y_0 为海天线的纵向位置, Ω 为二值化差分特征值图中的连通域。 A 的最小纵坐标 y_{\min} 和最大纵坐标 y_{\max} 之间区域则为海天区位置。

同时, 弹载红外成像系统下, 远距离的岛屿往往出现在海天线附近。海天区可能存在岛礁杂波, 这势必给目标检测造成大量虚警。采用 K-means 对海天区进行聚类, 海天区最多有天空、岛屿和海面三种, 故将聚类中心点数设置为 3。图 4 为海天线和海天岛屿区感知示例, 图 4(b) 为海天区的岛屿和海面相连聚类结果, 再利用海面呈规则的长条分离出岛屿, 如图 4(c)。因此, 该类海天区提取方法不仅能成功分离无岛屿的海天区, 还能有效地感知出岛屿的海天区。

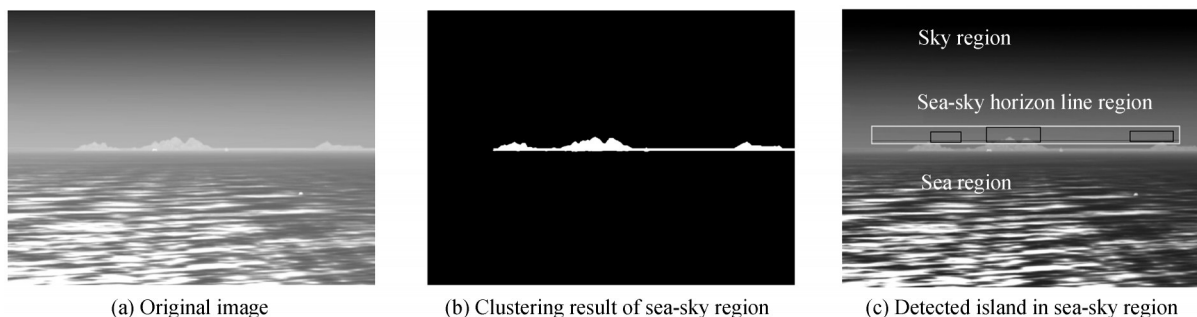


图 4 海天岛屿区感知示例

Fig.4 A sample of IR sea-sky island region perception

1.3 非平稳海区提取方法

海面既可能有平稳海面,也可能出现起伏波动较大的鱼鳞波、海面亮带等非平稳信号。感知海面起伏状态,分离出平稳海区和波动海区对于小目标检测尤为重要。采用Bernaola-Galavan分割算法(Bernaola-Galavan Segmentation Algorithm, BGSA)^[19]来分离区域,将非平稳序列分为多段具有不同均值且差异较大的相对平稳的区域。

对于海面区域的每个像素,求其垂直方向梯度 $G_v(x, y)$ 为

$$G_v(x, y) = 0.5 \times (I(x, y - r_1) - I(x, y) + I(x, y - r_2) - I(x, y)) \quad (10)$$

式中,参数 r_1, r_2 是经验性选择的间隔行数。计算每一行 $G_v(x, y)$ 在纵向的投影累加和为

$$G_s(y) = \sum_{x=0}^W G_v(x, y) / W \quad (11)$$

梯度累加和 $G_s(y)$ 是一个以纵坐标 y 为自变量的非平稳曲线。采用BGSA对 $G_s(y)$ 计算 y 点左邻域和右邻域的均值,即左子信号集的均值 $\mu_{\text{left}}(y)$ 和右子信号集的均值 $\mu_{\text{right}}(y)$ 以及衡量均值差异的统计量 T_y :

$$T_y = \left| \frac{\mu_{\text{left}}(y) - \mu_{\text{right}}(y)}{S_D(y)} \right| \quad (12)$$

式中, $S_D(y)$ 是 y 点联合方差,其表达式为

$$S_D(y) = \left[\frac{(N_{\text{left}}(y) - 1) \times S_{\text{left}}(y)^2 + (N_{\text{right}}(y) - 1) \times S_{\text{right}}(y)^2}{(N_{\text{left}}(y) + N_{\text{right}}(y) - 2)} \right]^{\frac{1}{2}} \times \left(\frac{1}{N_{\text{left}}(y)} + \frac{1}{N_{\text{right}}(y)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

式中, $S_{\text{left}}(y)$ 和 $S_{\text{right}}(y)$ 分别为左、右子信号集的标准偏差, $N_{\text{left}}(y)$ 和 $N_{\text{right}}(y)$ 分别为左右两边的点数。计算 T_y 的最大值 $T_{\text{max}} = \pi$ 的统计显著性,即

$$p(\tau) = \text{Prob}(T \leq \tau) \quad (14)$$

式中, $\text{Prob}(T \leq \tau)$ 表示在随机过程中取得 T 值小于等于 τ 的概率。 $p(\tau)$ 可以模拟为

$$p(\tau) \approx \left\{ 1 - B_{[\nu/(\nu + \tau^2)]}(\Delta\nu, \Delta) \right\}^{\gamma} \quad (15)$$

式中, $\gamma = 4.19 \ln N - 11.54$, N 为非平稳子序列长度, $\nu = N - 2$, $\Delta = 0.4$, B 为不完全 β 函数。若显著性值超过给定阈值 P_0 (一般 P_0 为0.9~0.95),则在该点将 $G_s(y)$ 分割成两段均值存在显著差异的子序列,而该点是均值突变点。

通过以上处理,非平稳海面梯度信号被分成了具有不同均值的相对平稳子序列。图5为平稳海区和波动海区共存的海区梯度曲线BGSA分割结果图,图5(b)中蓝色曲线为 $G_s(y)$,紫色曲线为BGSA分割结果。

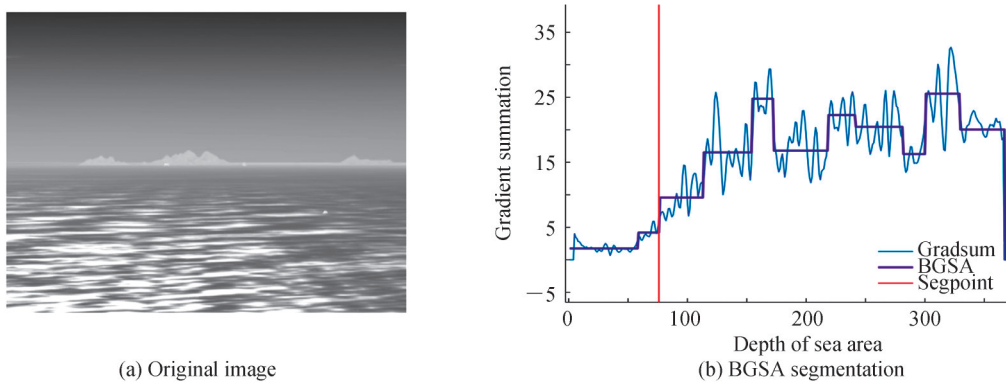


图5 海区梯度曲线BGSA分割结果图

Fig.5 BGSA segmentation map of gradient curve of sea region

然后,采用方差加权信息熵 V_{wie} 表征经过BGSA分割过的每个海区图像块的复杂度,可表示为

$$V_{\text{wie}}(k) = - \sum_{g=0}^L (g - \bar{g})^2 \cdot p_g \log p_g \quad (16)$$

式中, L 为最大灰度等级, p_g 为图像灰度值 g 的概率, \bar{g} 代表图像的均值。

若海区的平均复杂度 $\overline{V_{wic}} \geq T_{cmp}$, 海面存在波动区域, 否则为全平稳海区, 其中 T_{cmp} 为复杂度阈值。对于判定存在波动区域的海面, 计算 BGSA 分割得到每个段区的梯度累加均值 $\overline{G_s}$, 然后求取海面的梯度累加均值 $\overline{G_s}$ 的平均值 S_{eg} , 并以该平均值作为判断平稳海区和波动海区的阈值。

$$S_{eg} = \left(\sum_{k=1}^{N_{um}} \overline{G_s}(k) \right) / N_{um} \quad (17)$$

式中, N_{um} 为 BGSA 分割后的总段区数, $\overline{G_s}(k)$ 为第 k 个段区的梯度累加和均值。

2 海面小目标检测方法

通过场景感知方法构建出海天岛屿区、平稳海区、波动海区等海面场景信息的基础上, 进一步采取与背景杂波相适应的信号处理方法精细检测小目标。

2.1 海天岛屿区小目标检测方法

海天岛屿区的海天线和岛屿, 尤其是岛屿具有很强的结构性边缘, 采用最大中值滤波、最大均值滤波会出现大量背景残差, 增加虚警概率和降低检测概率。针对该问题, 提出了一种基于方向性差异的目标增强算法 (Target Enhancement with Directional Difference, TEDD)。先利用原图 I 与各向异性扩散结果 I_{smooth} 的差值获得局部增强强度图, 进而根据目标的各向同性使用八个滤波模板抑制边缘。

各向异性扩散在平滑图像的同时能保持细节, 各向异性扩散滤波是一个迭代过程, 当区域像素为边缘像素时, 扩散减弱, 迭代过程为

$$I_{smooth} = I^{n+1} \quad (18)$$

$$I^{n+1} = I^n + \gamma (C_N \nabla_N (I^n) + C_S \nabla_S (I^n) + C_E \nabla_E (I^n) + C_W \nabla_W (I^n)) \quad (19)$$

式中, I^n 经过 n 次迭代后的结果, 迭代次数越大, 滤波效果越好, 本文实验 n 取 40; γ 是四个扩散方向的平衡系数, γ 越小, 滤波效果越差, 本文实验 γ 为 15。 $\nabla_N, \nabla_S, \nabla_E, \nabla_W$ 是式中北、南、东、西四个方向的梯度算子。 C_N, C_S, C_E, C_W 是热传导系数。

$$\begin{cases} \nabla_N(I) = I(x, y-1) - I(x, y) \\ \nabla_S(I) = I(x, y+1) - I(x, y) \\ \nabla_E(I) = I(x-1, y) - I(x, y) \\ \nabla_W(I) = I(x+1, y) - I(x, y) \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{cases} C_N = 1 / (1 + (\nabla_N / K)^2) \\ C_S = 1 / (1 + (\nabla_S / K)^2) \\ C_E = 1 / (1 + (\nabla_E / K)^2) \\ C_W = 1 / (1 + (\nabla_W / K)^2) \end{cases} \quad (21)$$

式中, K 是热传导系数平衡因子, 其值越大图像就越平滑, 本文实验 K 为 0.15。

使用一个中心元素为零, 其余元素为 1 的模板 T 来对锐化后的图像进行滤波。

$$I_{EIM} = H(H(I - I_{smooth}) \otimes T) \quad (22)$$

式中, I_{EIM} 代表了局部增强强度图; T 是滤波器, 大小为 $(2n_1 + 1) \times (2n_1 + 1)$; $H(\cdot)$ 是阶跃函数。

考虑到目标与背景的梯度指向的差异性, 构造了 $0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4$ 等八个方向的定向卷积核来提取方向导数加权的绝对平均差值 (Absolute Average Difference weighted by Directional Derivatives, AADDD)^[20]。方向滤波模板如图 6。

方向滤波结果 I_{DF} 为 $I_{D_0}, I_{D_1}, I_{D_2}, \dots, I_{D_7}$ 最小值, 即

$$I_{DF} = \min \{ \max(I_{D_0}, 0), \max(I_{D_1}, 0), \max(I_{D_2}, 0) \dots \max(I_{D_7}, 0) \} \quad (23)$$

式中, $I_{D_0}, I_{D_1}, I_{D_2}, \dots, I_{D_7}$ 是八个卷积核与图像的卷积结果。

基于方向性差异的背景抑制显著图 I_{TEDD} 表示为最小方向响应加权的局部增强强度滤波结果, 即

$$I_{TEDD} = I_{EIM} \otimes I_{DF} \quad (24)$$

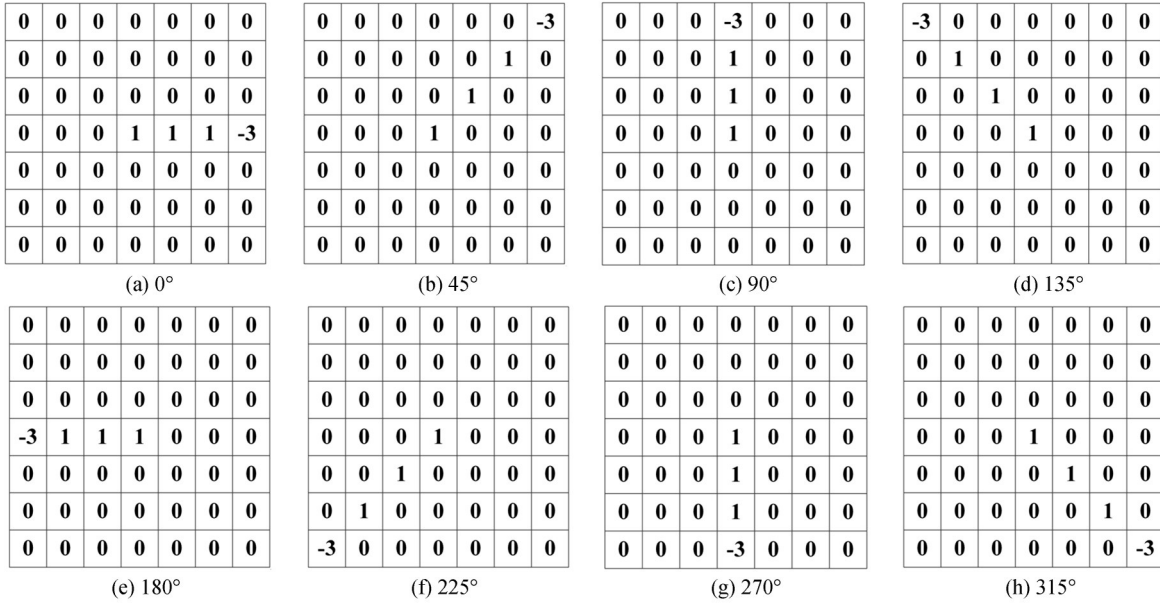


图6 八个方向的定向卷积核

Fig.6 Directional convolution kernels at eight direction

对显著图 I_{TEDD} 采用自适应恒虚警阈值分割检测目标, 阈值定义为

$$T_h = \overline{I_{\text{TEDD}}} + \delta \times \sigma_+ \quad (25)$$

式中, $\overline{I_{\text{TEDD}}}$ 和 σ_+ 是显著图 I_{TEDD} 的平均值和标准差, δ 是阈值调整常数。显著图大于阈值的区域则为目标。

2.2 平稳海区小目标检测方法

平稳海区的灰度强度起伏性较低, 可采用白顶帽(White Top-Hat, WTH)^[21]滤波和局部峰值判决。白顶帽变换处理方式为

$$W_{\text{TH}} = I - I \circ B_{oi} \quad (26)$$

$$I \circ B_{oi} = (I \oplus \Delta B) \ominus B_b \quad (27)$$

$$\Delta B = B_o - B_i \quad (28)$$

式中, $I \circ B_{oi}$ 为开运算, \oplus 和 \ominus 分别为膨胀和腐蚀操作, 结构元素如图7。

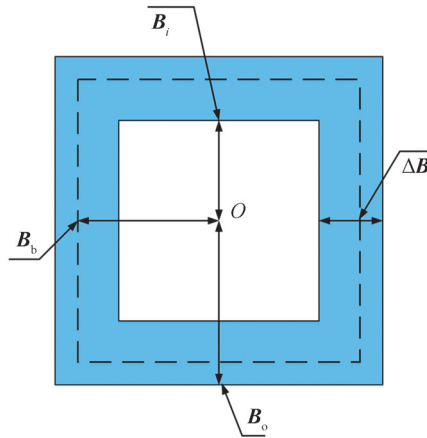


图7 结构元

Fig.7 Structural element

对滤波后的信号采用自适应恒虚警阈值 T_h 对 $W_{\text{TH}}(x, y)$ 提取可疑目标, 它们可能是真实目标, 也可能是虚警。小目标强度分布是近似高斯形状, 表现为局部峰值特性。因此, 本文采用高斯曲面拟合法提取峰值系数和偏态系数来判断为小目标。小目标二维高斯曲面方程为

$$\tilde{I}(x, y) = A_m \times \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (29)$$

式中, $A_m, (x_0, y_0), \sigma_x$ 和 σ_y 分别为高斯函数幅值、高斯曲面中心点、 x 方向均方差和 y 方向均方差。求出 $A_m, \sigma_x, \sigma_y, x_0, y_0$ 便可拟合高斯曲面。对式(29)两边取对数可得

$$\ln \tilde{I}(x, y) = ax^2 + by^2 + cx + dy + e \quad (30)$$

式中,

$$a = -\frac{1}{2\sigma_x^2}, b = -\frac{1}{2\sigma_y^2}, c = \frac{x_0}{\sigma_x^2}, d = \frac{y_0}{\sigma_y^2}, e = \ln A_m - \frac{x_0^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_0^2}{2\sigma_y^2} \quad (31)$$

将可疑目标邻域半径为5像素的所有数据 $I(x, y)$ 作为样本并利用最小二乘求解,使得估计值的残差平方和 Q 最小,即

$$Q = \arg \min_{\{a, b, c, d, e\}} \left(\sum (ax^2 + by^2 + cx + dy + e - \ln \tilde{I}(x, y))^2 \right) \quad (32)$$

在求解出 a, b, c, d, e 等变量的基础上,根据式(31)可得拟合曲面的参数 $\sigma_x, \sigma_y, x_0, y_0, A_m$ 。沿着拟合的二维高斯曲面的 0° 和 90° 剖面,提取这两个一维分布峰度系数 K_0 和 K_{90} ,以及偏态系数 S_0 和 S_{90} ,分别表示为

$$K_0 = \frac{E\left[\left(I^0(x, y) - \bar{I}^0(x, y)\right)^4\right]}{\sigma_0^4}, K_{90} = \frac{E\left[\left(I_i^{90}(x, y) - \bar{I}^{90}(x, y)\right)^4\right]}{\sigma_{90}^4} \quad (33)$$

$$S_0 = \frac{E\left[\left(I^0(x, y) - \bar{I}^0(x, y)\right)^3\right]}{\sigma_0^3}, S_{90} = \frac{E\left[\left(I^{90}(x, y) - \bar{I}^{90}(x, y)\right)^3\right]}{\sigma_{90}^3} \quad (34)$$

式中, I^0, \bar{I}^0 和 σ_0 分别为样本在 0° 剖面的灰度值,灰度均值以及标准差; $I^{90}, \bar{I}^{90}, \sigma_{90}$ 分别为样本 90° 剖面的灰度值,灰度均值以及标准差。若 $K_0 = K_{90} = 3$ 且 $S_0 = S_{90} = 0$,表明可疑目标为真实目标。

2.3 波动海区小目标检测

波动海区存在大片鱼鳞波、海面亮带,亮度强、边缘突出。根据目标与周围背景在灰度和梯度两个维度的差异性,提出了一种融合灰度梯度算法(Fusion Gray Gradient Clutter Suppression Method, FGGCSM)抑制背景。小目标往往在表现为局部灰度值极大,可采用2D-DoG算子进行压制同质背景而增强小目标,预处理图像 I_{Dog} 为

$$I_{\text{Dog}} = I \otimes D_o \quad (35)$$

$$D_o(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_1^2}} - \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma_2^2}} \quad (36)$$

式中, σ_1 和 σ_2 分别为激励参数和抑制参数。

根据式(2)和式(3)计算的两个特征值 λ_{large} 和 λ_{small} ,当 $\lambda_{\text{large}} \approx \lambda_{\text{small}} \approx 0$,表明位于平滑区域;当 $\lambda_{\text{large}} \gg \lambda_{\text{small}} \approx 0$,表明为边缘区域;当 $\lambda_{\text{large}} \geq \lambda_{\text{small}} > 0$,所处位置为候选目标点。因此可以利用大特征值和小特征值对2D-DoG预处理后图像进一步抑制背景。假设 λ_{large}^* 和 λ_{small}^* 是预处理图像的两个特征值, R 为结构张量的调和均值,定义为

$$R(x, y) = \frac{\lambda_{\text{large}}^*(x, y) \times \lambda_{\text{small}}^*(x, y)}{\lambda_{\text{large}}^*(x, y) + \lambda_{\text{small}}^*(x, y) + \varphi} \quad (37)$$

式中, φ 是一个极小趋于0的整数,用于预防分母为0。由式(37)可知,在均匀背景和边缘处 R 约等于0,突出了目标区域, R 具有调和图像对比度能力。

与此同时,小目标形状呈现类似各向同性的高斯模型^[22],其梯度方向均匀地分布在各个方向并朝向中心;相反,海杂波边缘的梯度方向是具有一致性,即由高亮度指向低亮度^[23]。因此,构造四个方向的滤波模板来模拟目标特定的梯度内指向性,模板如图8,表示为

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

图8 四个滤波模板

Fig.8 Four filter templates

对于给定的坐标 (x_0, y_0) ,先将以目标为中心的邻域划分为四个象限,在第一、第二、第三、第四象限分别获取四个模板滤波的结果 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 ,然后计算每个象限区域对应的局部平均梯度幅值 G_{mi} ,即

$$G_{mi} = \frac{1}{N_i^S} \sum_{m=1}^{N_i^S} \|H(C_i(x, y))\|^3 \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (38)$$

式中, N_i^S 为所求象限 $C_i(x, y)$ 大于0的数量, $H(\cdot)$ 是阶跃函数。

由于小目标各向同性,其 G_{mi} 之间的差异性不很大;杂波边缘处的梯度指向同一个方向,必会造成其它的平均梯度幅值很小。将各个方向的平均梯度幅值进行两两相乘,并取均值响应作为最终局部梯度度量 F_{lgm} ,即

$$F_{lgm}(x, y) = \text{mean}(G_{mi}(x, y) \times G_{mj}(x, y)) \quad i \in \{1, 2, 3, 4\}, j = \{2, 3, 4\}, i < j \quad (39)$$

综上,调和对比度 R 增强了小目标局部高亮度特性,而 F_{lgm} 描述了目标梯度内指向属性。联合两特征则能进一步抑制杂波边缘而增强目标信号:

$$F_{rsm}(x, y) = R(x, y) \times F_{lgm}(x, y) \quad (40)$$

采用恒虚警阈值对 $F_{rsm}(x, y)$ 进行分割,提取目标。

3 实验结果与分析

本节分析了用于测试的海面红外小目标图像特性,对比测试验证了基于海面场景感知的红外小目标检测算法性能。

3.1 测试数据集与评价指标

采用弹载红外成像系统获得的6个复杂海面场景红外小目标序列图像为测试数据集,如图9所示,红色圆圈标记出目标。图9(a)是位于海天区和起伏海面小目标。图9(b)是零散的海面亮带和鱼鳞波下的小目标。图9(c)是鱼鳞波中携带强尾浪的小目标。图9(d)表示淹没在大量高亮度鱼鳞波下的小目标。图9

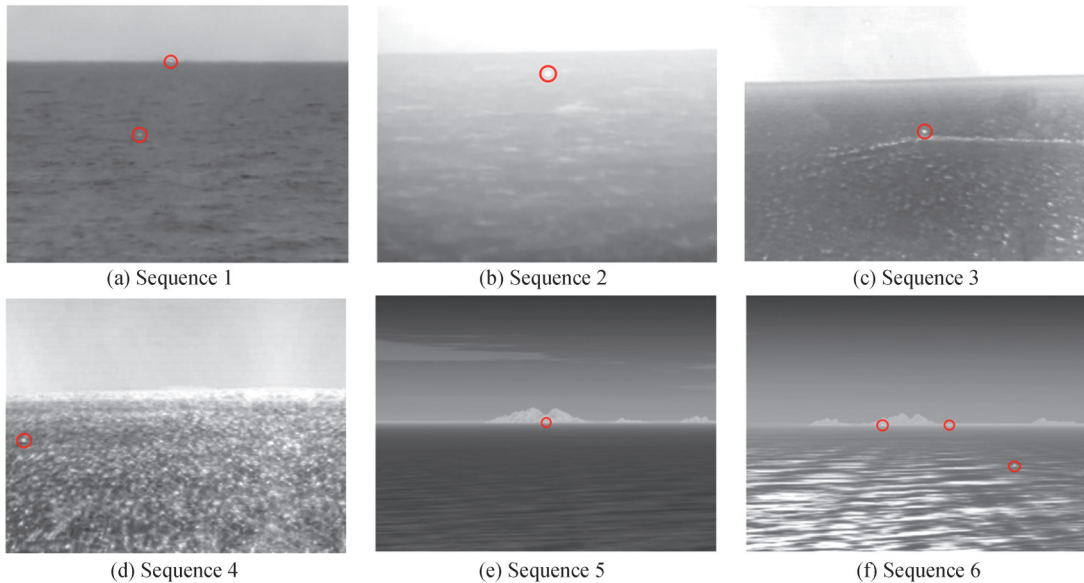


图9 红外测试图像序列的代表帧

Fig.9 Representative frames of infrared test image sequences

(e)是位于岛礁区小目标。图9(f)为位于海天岛屿区和高强度海面亮带区的小目标。

采用信杂比(Signal-to-Clutter Ration, SCR)^[5]来表述目标的检测难易程度。信杂比越小,目标就越弱,目标检测难度越大。局部信杂比的量化规则为

$$S_{cr} = \frac{|m_t - m_b|}{\sigma_b} \quad (41)$$

式中, m_t 为目标区域的平均像素值, m_b 和 σ_b 为目标周围邻域像素值的均值和标准差。表1为不同目标分组序列的详细信息,各个序列信杂比在[0.25,3]之间。

表1 测试数据的详细信息
Table 1 Detail information of the test data

No	Image size /pixel	Target quantity	Target size/pixel	Minimum SCR	Maximum SCR
1	480 × 640	1 650	43~82	0.927 7	3.079 0
2	240 × 320	710	51~86	0.690 3	2.020 2
3	480 × 640	940	48~99	1.089 5	3.038 7
4	480 × 640	600	53~87	0.598 6	2.169 7
5	768 × 1024	980	45~89	0.466 2	1.616 8
6	768 × 1024	2 400	56~108	0.253 4	2.416 1

采用信杂比增益(Signal-to-Clutter Ration Gain, SCRG)和背景抑制因子(Background Suppression Factor, BSF)来评价背景杂波抑制能力^[8,11,18,24],表示为

$$S_{crg} = \frac{S_{crf}}{S_{cro} + \epsilon}, \quad B_{sf} = \frac{\sigma_o}{\sigma_f + \epsilon} \quad (42)$$

式中, S_{cro} 和 S_{crf} 分别为原图和滤波图像的局部SCR值, σ_o 和 σ_f 分别为滤波前后的背景标准差, ϵ 一个小正数,以避免出现分母为0的情况。 S_{crg} 和 B_{sf} 越大则背景抑制能力越好,采用平均信杂比增益 $\overline{S_{crg}}$ 和平均背景抑制因子 $\overline{B_{sf}}$ 来对比序列图像的抑制能力。

$$\overline{S_{crg}} = \frac{1}{N_{target}} \sum_{i=1}^{N_{target}} S_{crg}(i), \quad \overline{B_{sf}} = \frac{1}{N_{frame}} \sum_{j=1}^{N_{frame}} B_{sf}(j) \quad (43)$$

式中, N_{target} 为目标的数量, $S_{crg}(i)$ 为第*i*目标所对应的信杂比增益; N_{frame} 为总图像数, $B_{sf}(j)$ 为第*j*帧图像背景抑制因子。

采用检测率(Detection Rate, DR)和虚警率(False Alarm Rate, FAR)来评估目标检测算法的性能为

$$D_r = \frac{N_{tp}}{N_{target}}, \quad F_{ar} = \frac{P_{nfp}}{P_{nimage}} \quad (44)$$

式中, N_{tp} 为正确检测出的目标数量, N_{target} 为实际目标数量; P_{nfp} 为检测结果中虚假目标的总像素数, P_{nimage} 为测试序列图像的总像素数。计算并画出接收器操作特性(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线,曲线面积越大,算法准确性越高;越靠近坐标左上方,检测目标能力越强。

3.2 参数讨论

1)复杂度阈值 T_{cmp} 判断红外海面背景图像是否存在波动海面。设置不同的复杂度阈值,测试对应阈值下非平稳海区的感知性能。图10为不同复杂度阈值下,场景感知的波动海面图像在测试数据集中的占比与真实波动海面图像在数据集中的占比情况。当 T_{cmp} 约为230时,红色曲线所表示场景感知检测出波动海面图像数量与真实的波动海面图像数量接近。基于该实验结果, T_{cmp} 设置为230。

2)不同锐化模板 T 的尺寸选择对背景抑制产生影响。为了使基于方向性差异的目标增强算法(TEDD)算法更好应用于海天岛屿区的目标检测,测试不同的模板 T 的尺寸处理序列1、序列5、序列6的存在小目标的海天岛屿区。表2为所选序列海天岛屿区的信杂比增益(SCRG),当尺寸为4时TEDD算法取得了较好、较稳定的SCRG。因此,本文海天岛屿采用的TEDD算法的锐化模板 T 尺寸设置为4。

3)融合灰度梯度算法(FGGCS)算法抑制波动海区背景时,邻域半径 r 会影响背景抑制效果。测试不同

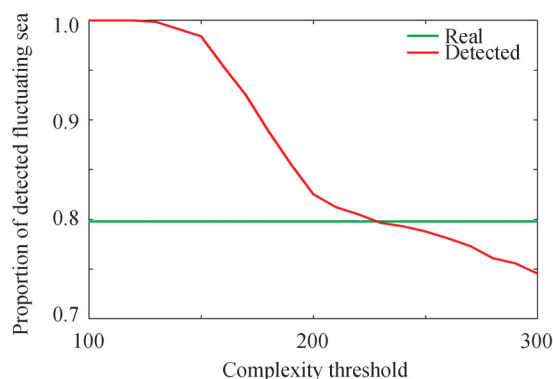


图10 不同复杂度阈值下的检测出波动海面占比

Fig.10 Proportion of detected fluctuating sea surface corresponding to different complexity threshold

表2 不同尺寸处理海天岛屿区的 $\overline{S}_{\text{crg}}$ Table 2 $\overline{S}_{\text{crg}}$ of sea-sky island region corresponding to different n_1

Index	Parameter n_1	Island in sequence 1	Island in sequence 5	Island in sequence 6
$\overline{S}_{\text{crg}}$	3	24.837 6	20.422 3	18.265 3
	4	24.357 8	20.705 7	21.441 0
	5	24.150 2	18.275 2	21.061 9

邻域半径 r 取值下的FGGCSM处理存在波动海区的序列1、序列2、序列3、序列4和序列6,如表3。当 r 为3时,FGGCSM算法取得了较好、较稳定的 $\overline{S}_{\text{crg}}$ 。因此,本文波动海区采用邻域半径 r 设置为3。

表3 不同 r 处理非平稳海区的 $\overline{S}_{\text{crg}}$ Table 3 $\overline{S}_{\text{crg}}$ of non-stationary sea region corresponding to different r

Index	Parameter r	Fluctuating sea in sequence 1	Fluctuating sea in sequence 2	Fluctuating sea in sequence 3	Fluctuating sea in sequence 4	Fluctuating sea in sequence 6
$\overline{S}_{\text{crg}}$	2	36.069 9	27.871 8	15.234 7	5.533 4	27.867 4
	3	39.183 6	21.060 5	16.992 4	13.024 9	28.095 3
	4	35.052 9	10.046 6	7.000 9	12.631 2	31.946 8
	5	25.257 2	6.968 1	2.531 3	7.647 1	29.321 1

3.3 场景感知结果与分析

图11为6个测试序列的场景感知结果,其中红色粗线为海天线,绿色标记区域为海天岛屿区,黑色标记区域为岛屿,蓝色粗线标记的位置为波动海面起始位置,它分隔了海面平稳区和海面波动起伏区。若图中无蓝色粗线,则表示该图为全平稳海面。

准确感知出海天线的图像数与单个序列图像总数的比例为海天线检测率;在单个序列图中准确感知出波动海面起始位置的图像数与单个序列图像含有波动海面的图像总数的比例为波动海面识别率;在单个序列图中准确感知出海天区岛屿图像占比为岛屿检测率。表4为6个测试序列场景感知准确率,其中序列1和序列4整个序列图像场景变动较小,海天线、波动海面和岛屿区检测概率达到0.99;序列2检测出少量波动海面起始位置跳动几行的情况,波动海面识别率约为0.98;序列3存在个别图像将海区感知为全波动海面区域,波动海面识别率约为0.98;序列5和序列6检测海天线过程中会出现将岛屿底边沿视作海天线的情况,海天线检测率分别为0.97和0.96。同时,序列5偶尔会误判出波动海面,无波动海面识别约为0.97。实际场景中海面分为三种情况:全平稳海面、全波动海面、平稳和波动共存海面,由图11可知本文算法都成功感知出这三种情况。由以上信息知,海天线检测率、波动海面识别率以及岛屿检测率均大于95%,证明了提出的海面场景感知区域提取方法具有一定适用性。

3.4 目标检测结果与分析

实验采用了7种具有代表性的方法进行对比测试,分别是Max-median、DoG、PSTNN、TLLCM,

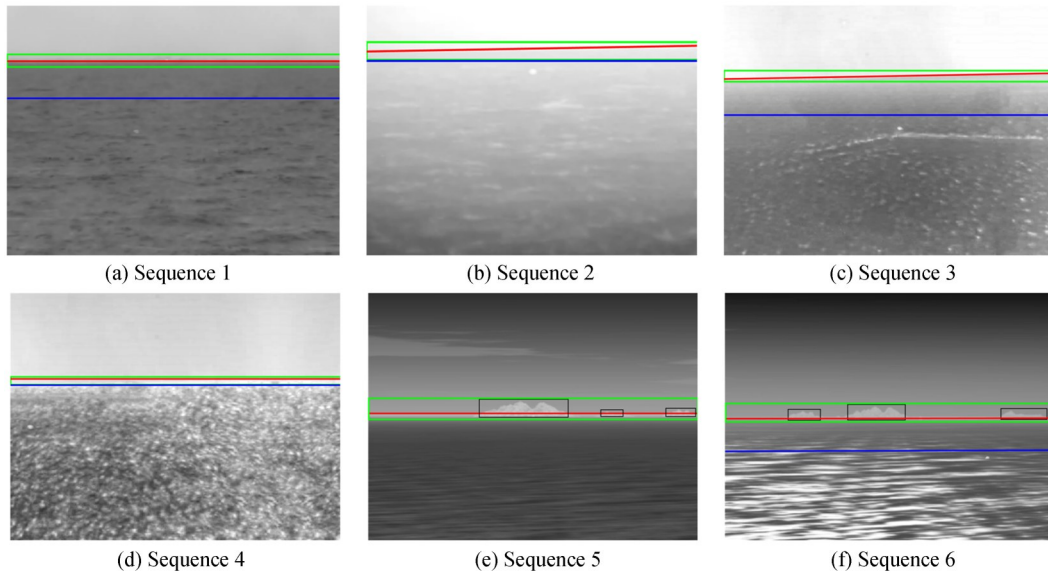


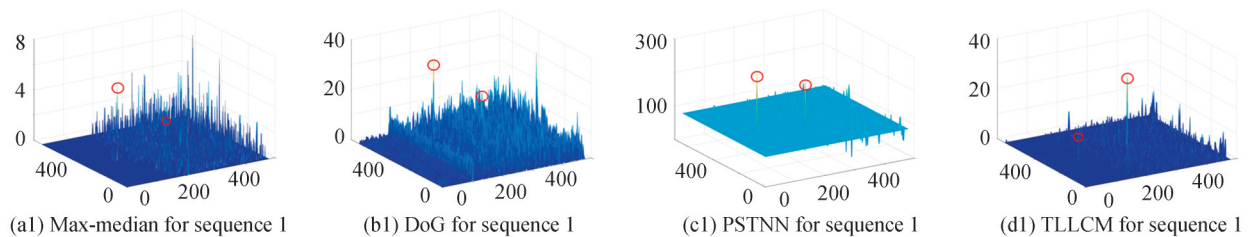
图 11 测试序列场景感知结果
Fig.11 Results of scene perception in test sequences

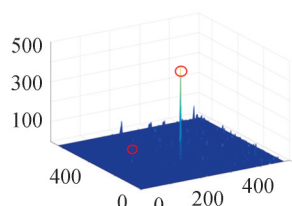
表 4 海面场景感知准确率

Table 4 Accuracy rate of maritime scene perception

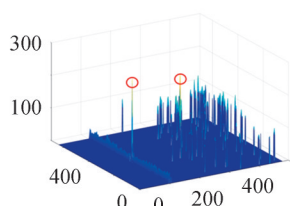
Image number	Detection rate of sea sky line	Detection rate of fluctuating sea	Detection rate of island
1	0.99	Existence/0.99	No/0.99
2	0.99	Existence/0.98	No/0.99
3	0.99	Existence/0.98	No/0.99
4	0.99	Existence/0.99	No/0.99
5	0.97	No/0.97	Existence/0.99
6	0.96	Existence /0.99	Existence/0.99

ADMD、PLSDG、MWEC。图 12 为各种算法对图 9 背景抑制结果。Max-median 算法估计非平稳的背景能力很差,会发生漏检,如图 12(a)。DoG 算法凸显目标效果弱,海天交界区会出现线状虚警,如图 12(b)。PSTNN 处理后残留杂波强度高于目标,如图 12(c4)、图 12(c5)和图 12(c6)。ADMD 和 TLLCM 很难抑制图像序列 3 和图像序列 4 的大量鱼鳞波,如图 12(d3)、图 12(d4)、图 12(e3)和图 12(e4),而且序列 1 和序列 6 中海杂波降低了 TLLCM 和 ADMD 对海天区目标检测,如图 12(d1)、图 12(d6)、图 12(e1)和图 12(e6)。PLSDG 和 MWEC 这两种分区检测算法增强了不同区域的目标,但在强结构边缘的海天线、高对比度岛屿、尖锐边缘的海面亮带和高亮度鱼鳞波区域存在较多杂波残留,产生大量虚警,如图 12(f)和图 12(g)。对于复杂海面背景,本文算法对强结构边缘的海天岛屿区和高亮度鱼鳞波、海面亮带等太阳光闪烁海杂波的波动海面获得最佳的背景抑制效果,增强了不同区域的目标信杂比,大幅度降低了诸如岛屿、海面亮带和鱼鳞波造成的虚警,减少了漏检发生。

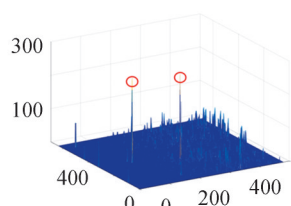




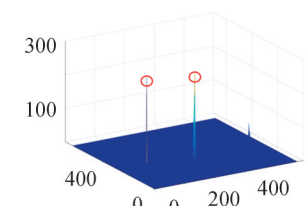
(e1) ADMD for sequence 1



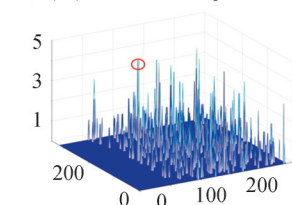
(f1) PLSDG for sequence 1



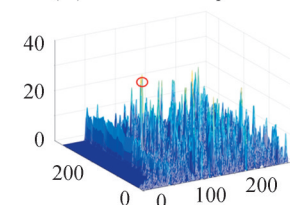
(g1) MWEC for sequence 1



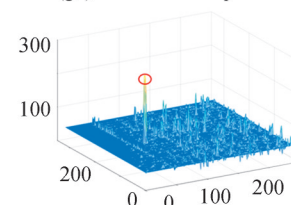
(h1) Proposed method for sequence 1



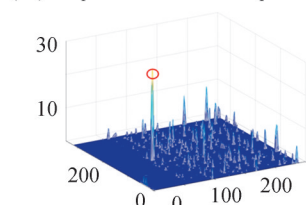
(a2) Max-median for sequence 2



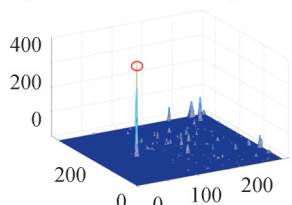
(b2) DoG for sequence 2



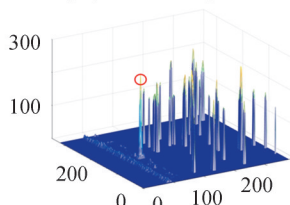
(c2) PSTNN for sequence 2



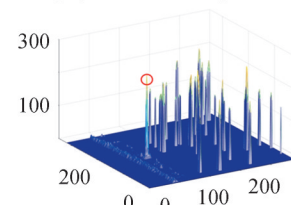
(d2) TLLCM for sequence 2



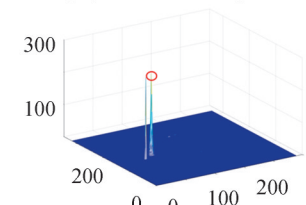
(e2) ADMD for sequence 2



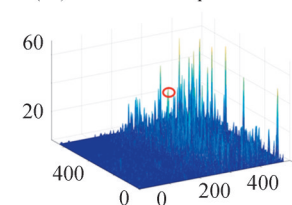
(f2) PLSDG for sequence 2



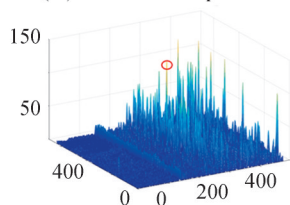
(g2) MWEC for sequence 2



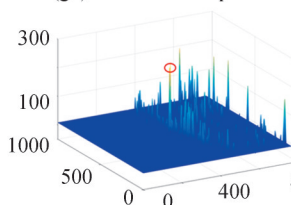
(h2) Proposed method for sequence 2



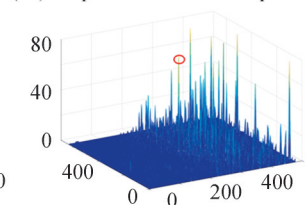
(a3) Max-median for sequence 3



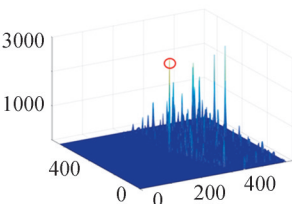
(b3) DoG for sequence 3



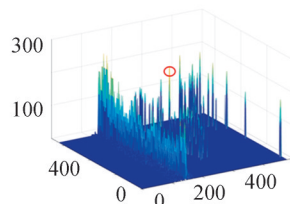
(c3) PSTNN for sequence 3



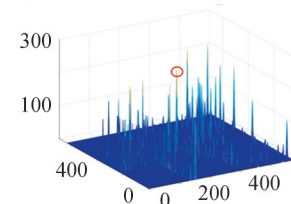
(d3) TLLCM for sequence 3



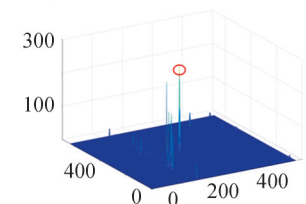
(e3) ADMD for sequence 3



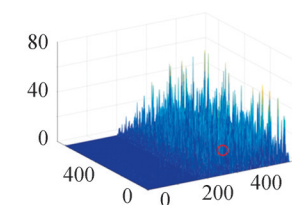
(f3) PLSDG for sequence 3



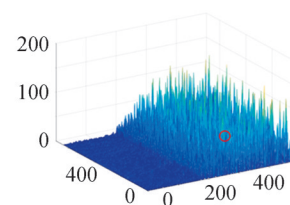
(g3) MWEC for sequence 3



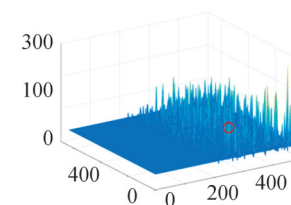
(h3) Proposed method for sequence 3



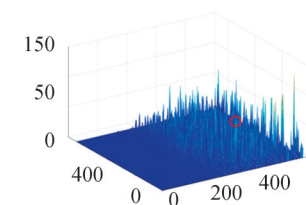
(a4) Max-median for sequence 4



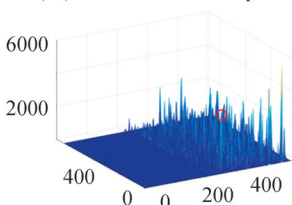
(b4) DoG for sequence 4



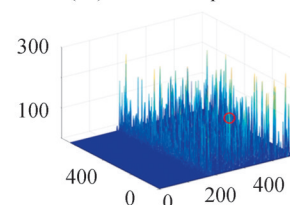
(c4) PSTNN for sequence 4



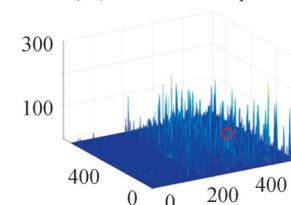
(d4) TLLCM for sequence 4



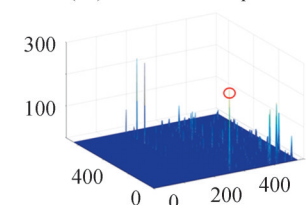
(e4) ADMD for sequence 4



(f4) PLSDG for sequence 4



(g4) MWEC for sequence 4



(h4) Proposed method for sequence 4

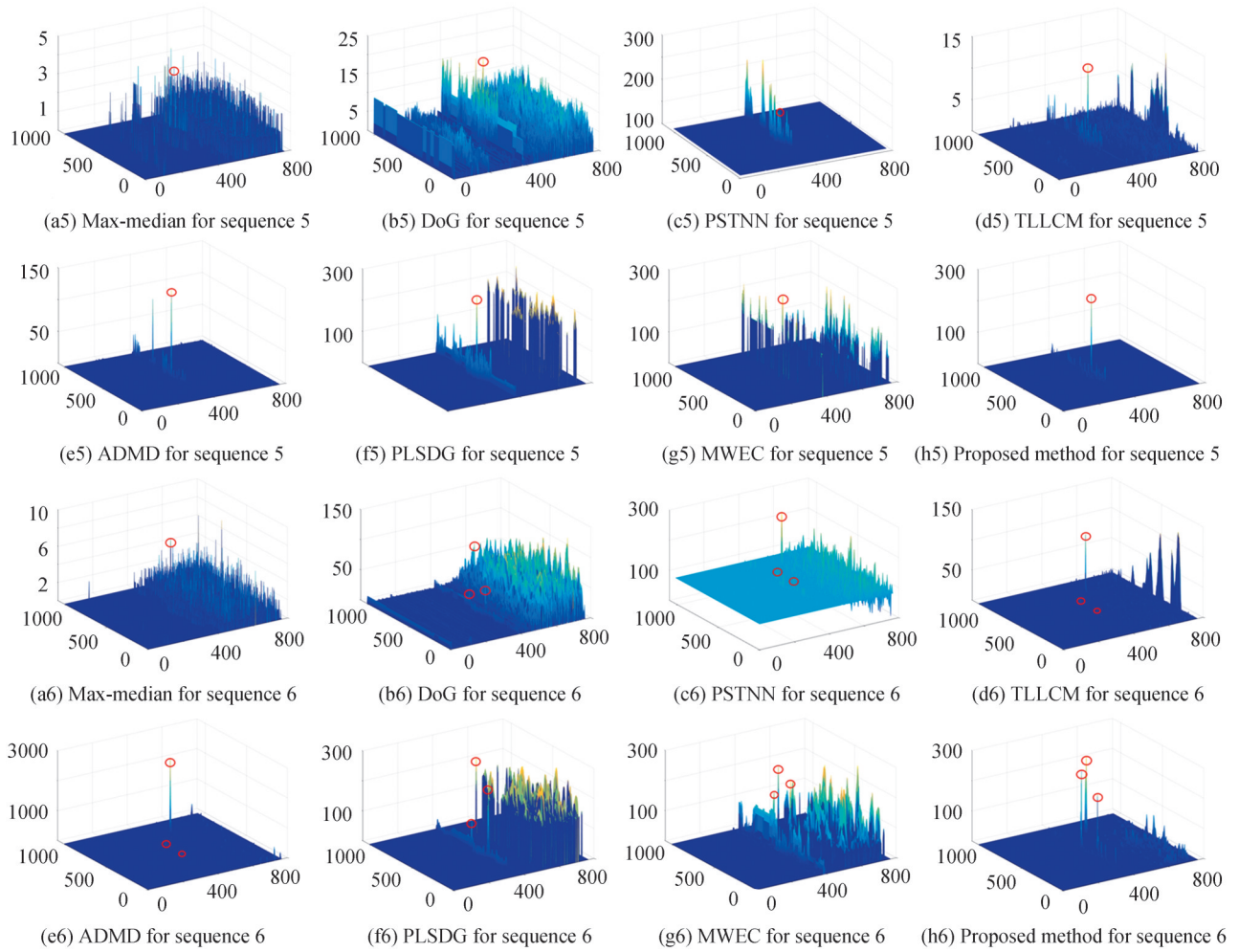


图 12 不同小目标检测方法的背景抑制结果

Fig.12 Background suppression for different small target detection method

表 5 是各个序列图像下各种算法的 $\overline{S_{\text{erg}}}$, 其中本文算法 $\overline{S_{\text{erg}}}$ 最高, 表明所提方法增强目标效果最佳。表 6 是不同方法的 $\overline{B_{\text{sf}}}$, 其中本文算法对序列 1、序列 2、序列 3、序列 4 和序列 5 取得了最大 $\overline{B_{\text{sf}}}$; 对于序列 6, ADM 的 $\overline{B_{\text{sf}}}$ 略大于本文算法, 但目标能量被削弱而漏检, 如图 12(e6)。为了验证各算法的运算复杂度, 统计各算法处理 6 个弹载红外序列下平均运行时间, 如表 7。本文算法时耗为 6.075 s, 比 DoG 和 ADMD 耗时较长, 但却比 TLLCM 等耗时少很多。结合表 5 和表 6 处理结果, 本文算法背景抑制目标检测性能最优, 运行时间在可接受范围内。实验采用的计算机主频为 2.4 GHz 的英特尔酷睿 i5-1135G7 处理器, 内存为 16 GB, 测试软件为 MATLAB R2016a。

表 5 不同检测算法下的 $\overline{S_{\text{erg}}}$
Table 5 $\overline{S_{\text{erg}}}$ with different detection algorithms

Method	Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4	Sequence 5	Sequence 6	Average
Max-median	4.307 4	4.946 6	2.043 7	0.944 0	2.409 9	1.721 9	2.728 9
DoG	5.028 8	3.492 2	3.139 2	1.210 3	2.997 4	3.540 3	3.224 2
PSTNN	7.783 3	16.026 4	11.029 2	3.878 1	6.703 4	6.274 7	8.615 9
TLLCM	6.921 1	18.229 3	10.514 3	5.666 3	10.970 2	7.100 6	9.900 3
ADMD	4.989 9	20.148 7	11.178 7	5.996 6	15.702 1	10.315 6	11.388 6
PLSDG	8.134 8	15.127 6	7.807 5	5.735 8	12.286 1	14.256 8	10.558 1
MWEC	10.086 9	16.710 6	8.728 7	4.284 8	9.293 8	12.118 8	10.203 9
Proposed	38.155 6	22.138 8	16.258 0	12.915 2	19.778 4	24.749 6	22.332 6

表6 不同检测算法下的 $\overline{B_{sf}}$
Table 6 $\overline{B_{sf}}$ with different detection algorithms

Method	Sequence 1	Sequence 2	Sequence 3	Sequence 4	Sequence 5	Sequence 6	Average
Max-median	6.003 1	6.762 5	9.240 7	3.676 8	4.398 1	4.936 2	5.8362 3
DoG	4.207 5	2.549 9	7.728 1	2.738 2	2.063 3	1.742 7	3.5049 5
PSTNN	20.072 8	19.231 0	12.981 5	8.046 0	8.448 3	13.533 9	13.718 9
TLLCM	18.143 3	18.066 6	12.573 8	8.318 5	10.912 9	14.977 8	13.832 2
ADMD	45.594 7	31.018 1	18.672 7	9.608 5	20.398 7	44.421 9	28.285 8
PLSDG	10.176 6	12.562 9	8.308 8	6.017 7	5.269 2	9.259 1	8.599 1
MWEC	22.333 2	16.745 0	14.651 2	6.928 2	8.363 1	12.188 0	13.534 8
Proposed	187.155 0	35.328 8	29.391 8	23.264 1	27.071 5	39.500 6	56.952 0

表7 不同检测算法平均运算时间(s)
Table 7 Average running time of different detection algorithm (s)

Method	Max-median	DoG	PSTNN	TLLCM	ADMD	PLSDG	MWEC	Proposed
Time consumption	9.326 2	0.901 6	19.928 8	23.229 2	1.169 8	5.534 8	21.683 9	6.075 2

图13是各个算法对测试图像序列的工作性能曲线。在序列1~4和序列6中,本文算法相较于其它算法能在相同虚警概率时取得更大的检测率。同时,本文算法工作性能曲线中检测率值能迅速增加到1,最接近纵轴,工作性能曲线包围面积最大。对于序列5,当 $2.152 \times 10^{-5} \leq \text{FAR} \leq 3.448 \times 10^{-5}$ 时,ADMD的检测率略微大于本文算法。同时,对比算法在各个序列中性能变化大,稳定性弱。综上表明,本文算法对具有海天线、岛屿、鱼鳞波、海面亮带的复合杂波背景目标检测更加具有鲁棒性。

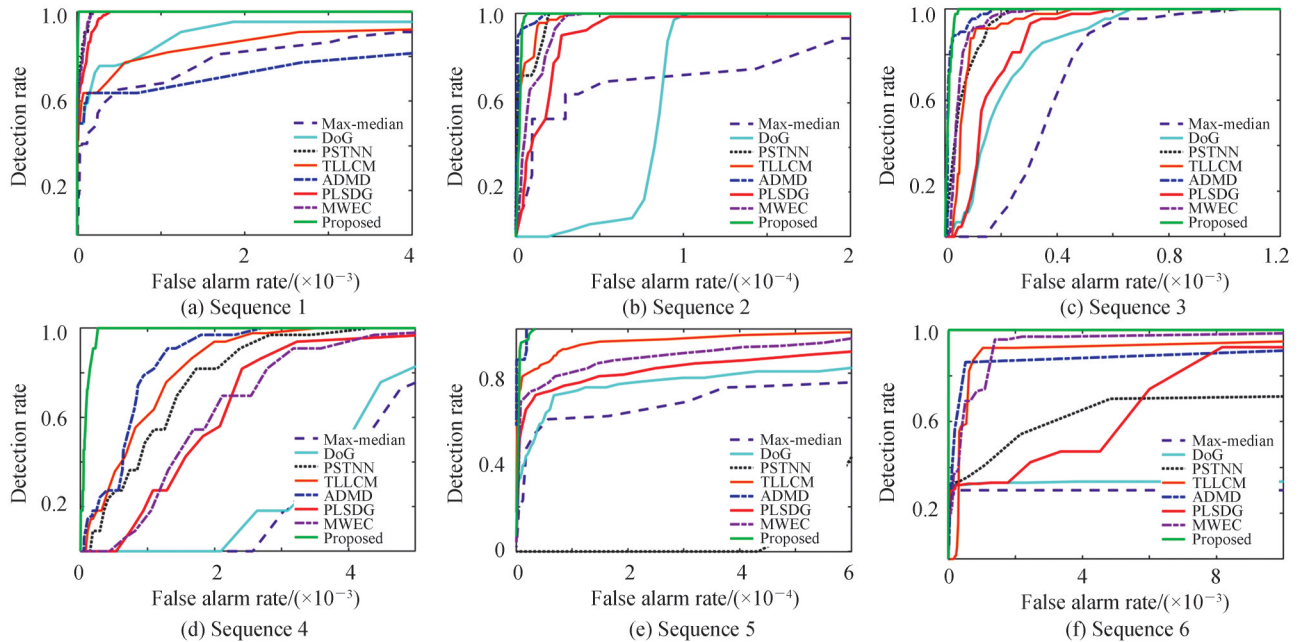


图13 不同检测方法的工作性能曲线

Fig.13 Receiver operation curves of different detection methods

4 结论

针对含有岛屿、海天线、鱼鳞波及海面亮带等多种杂波的复杂海面背景小目标检测难题,提出了基于海面场景感知的红外小目标检测方法。与仅检测海天线且只将海面场景划分为天空和海区的方法相比,本方

法能感知海面背景杂波组成存在的区域及起伏状态,构建出了海天岛屿区、平稳海区、波动海区等更为精细的场景信息。对于不同的杂波区域,采用与杂波成份适应的信号处理压制杂波和增强目标信杂比。实验数据表明,相比于五种全局处理方法和两种分区处理方法,本文方法取得了最强的杂波抑制能力和最佳的小目标检测性能,能适应多种复杂杂波背景。

另外,本文方法属于DBT的单帧检测方法,存在少量虚警,如海天交界处可能残留个1至3个的虚警点,后续需采用基于时空线索的多帧目标联合判决进一步提高检测能力。

参考文献

- [1] ZHANG F, LI C, SHI L. Detecting and tracking dim moving point target in IR image sequence [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2005, 46(4): 323-328.
- [2] HOU Wang, SUN Xiaoliang, SHANG Yang, et al. Present state and perspectives of small infrared targets detection technology [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(1): 1-10.
侯旺, 孙晓亮, 尚洋, 等. 红外弱小目标检测技术研究现状与发展趋势[J]. *红外技术*, 2015, 37(1): 1-10.
- [3] CAO Y, LIU R M, YANG J. Small target detection using two-dimensional least mean square (TDLMS) filter based on neighborhood analysis [J]. *International Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2008, 29(2): 188-200.
- [4] ZHANG Yixuan, LI Ling, XIN Yunhong. Infrared small target detection based on adaptive double-layer TDLMS filter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(9): 0910001.
张艺璇, 李玲, 辛云宏. 基于自适应双层 TDLMS 滤波的红外小目标检测[J]. *光子学报*, 2019, 48(9): 0910001.
- [5] GAO C, MENG D, YANG Y, et al. Infrared patch-image model for small target detection in a single image [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(12): 4996-5009.
- [6] DAI Y, WU Y. Reweighted infrared patch-tensor model with both nonlocal and local priors for single-frame small target detection [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(8): 3752-3767.
- [7] ZHANG L, PENG Z. Infrared small target detection based on partial sum of the tensor nuclear norm [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(4): 382.
- [8] HE Wei, AN Bowen, PAN Shengda. Infrared small target detection method based on low rank model with local contrast prior [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1110002.
何巍, 安博文, 潘胜达. 局部对比度先验下基于低秩模型的红外小目标检测方法[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1110002.
- [9] DAI Y, WU Y, ZHOU F, et al. Attentional local contrast networks for infrared small target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(11): 9813-9824.
- [10] ZHAO M, CHENG L, YANG X, et al. TBC-Net: A real-time detector for infrared small target detection using semantic constraint [J]. *arXiv preprint arXiv:2001.05852*, 2019.
- [11] LIU Junming, MENG Weihua. Infrared small target detection based on fully convolutional neural network and visual saliency [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(7): 0710003.
刘俊明, 孟卫华. 融合全卷积神经网络和视觉显著性的红外小目标检测[J]. *光子学报*, 2020, 49(7): 0710003.
- [12] CHEN C, LI H, WEI Y, et al. A local contrast method for small infrared target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2013, 52(1): 574-581.
- [13] HAN J, MORADI S, FARAMARZI I, et al. A local contrast method for infrared small-target detection utilizing a tri-layer window [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 17(10): 1822-1826.
- [14] MORADI S, MOALLEM P, SABAHI M. A false-alarm aware methodology to develop robust and efficient multi-scale infrared small target detection algorithm [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 89: 387-397.
- [15] MORADI S, MOALLEM P, SABAHI M. Fast and robust small infrared target detection using absolute directional mean difference algorithm [J]. *Signal Processing*, 2020, 177: 107727.
- [16] WANG X, ZHANG T. Clutter-adaptive infrared small target detection in infrared maritime scenarios [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 067001-067013.
- [17] MA D, DONG L, XU W. A method for infrared sea-sky condition judgment and search system: robust target detection via PLS and CEDoG [J]. *IEEE Access*, 2020, 9: 1439-1453.
- [18] KONG X, LIU L, QIAN Y, et al. Automatic detection of sea-sky horizon line and small targets in maritime infrared imagery [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 76: 185-199.
- [19] BERNAOLA G, IVANOV P, AMARAL L, et al. Scale invariance in the nonstationary of human heart rate [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(16): 168105.
- [20] AGHAZIYARATI S, MORADI S, TALEBI H. Small infrared target detection using absolute average difference weighted by cumulative directional derivatives [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 101: 78-87.

- [21] BAI X, ZHOU F. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(6): 2145-2156.
- [22] QI S, MA J, TAO C, et al. A robust directional saliency-based method for infrared small-target detection under various complex backgrounds [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 10(3): 495-499.
- [23] LIU D, CAO L, LI Z, et al. Infrared small target detection based on flux density and direction diversity in gradient vector field[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(7): 2528-2554.
- [24] ZHAO Gaopeng, LI Lei, WANG Jianyu. Dim small target single-frame detection based on structure tensor analysis [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(1): 0110001.
赵高鹏,李磊,王建宇.基于结构张量分析的弱小目标单帧检测[J]. *光子学报*, 2019, 48(1): 0110001.

Infrared Small Target Detection Method Based on Maritime Scene Perception

ZHU Yong¹, XIAO Qin¹, LI Zhengzhou¹, LIU Guojin¹, QIN Tianqi²

(1 *School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

(2 *Sichuan Institute of Aerospace Electronic Equipment, Chengdu, Sichuan 610100, China*)

Abstract: Maritime infrared small target detection plays a very important role in the field of safeguarding marine security and marine rescue. The long-distance ship target degenerates into a small spot in an infrared image, which has the characteristics of small size, weak intensity, serious lack of texture information, and is easily disturbed by noise. Meanwhile, the background clutters in infrared images presented by missile-borne infrared imaging system under backlighting conditions, such as sea-sky horizon line, island clutters, dense sea glints and sea surface bright band-like zone with high grayscale seriously affect the detection performance of long-distance infrared small targets, which can easily lead to target missed detection and false alarms. Only using one strategy to filter an infrared image may result very poor performance of small weak target detection. The reason for this situation is that the high-intensity clutter will interfere with the small target detection in the low-intensity clutter regions and the targets will interact with each other in the detection process. Therefore, using different strategies to filter different local regions of an infrared image is an effective target signal detection scheme. This paper mainly focuses on the key technologies that develop a high detection performance solution of infrared small targets under the complex maritime background. In this paper, the maritime scene perception information is constructed by sensing the regions where the non-stationary sea surface background clutters components exist and their fluctuation states, and the signal processing method adapted to the background clutter is adopted to refine the detection of small targets. Aiming at the characteristics of marine infrared imaging, the background clutters of the non-stationary maritime surface are perceived and the information of infrared marine scene is constructed. Firstly, the large eigenvalue of the structure tensor and Hough transform of an infrared image are used to detect the sea-sky horizon line. The connected region labeling algorithm operates the binary difference eigenvalues map to obtain the sea-sky island region. Bernaola-Galavan segmentation algorithm and the complexity represented by variance weighted information entropy are used to perceive the background clutter components such as sea glints and sea surface bright band-like zone. Therefore, the scene information of sea-sky island region, flat sea region, fluctuation sea region and island region is constructed. Secondly, aiming at the characteristics of clutter components, adaptive signal processing is used to suppress clutter and enhance the signal-to-clutter ratio of target. A clutter suppression and target enhancement algorithm based on directional difference is proposed to suppress the background and highlight target signal for sea-sky region and island region with strong edge structure. Top-hat transform is used to suppress clutter in flat sea area. In the fluctuation sea region of sea glints and sea surface bright band-like zone, a fusion gray gradient clutter suppression method is proposed to suppress the background, greatly reducing the interference caused by sea clutters. Finally, after clutter suppression, target extraction is carried out by targeted methods. The detection results of each region are normalized to the same intensity range and integrated. Constant false alarm threshold segmentation strategy is used to detect targets in sea-sky region, island region and fluctuating sea region. Whereas, the local peak decision strategy is used to

detect the targets for flat sea region. Compared with the existing advanced infrared image small target signal detection methods, the experimental results show that the proposed single-frame detection method based on maritime scene perception can effectively adapt to different maritime background clutters, and can not only effectively increase the signal-to-clutter ratio gain and the background suppression factor, but also improve the accuracy and robustness of small target detection in complex backgrounds.

Key words: Maritime background; Scene perception; Clutter suppression; Target detection; Small weak target

OCIS Codes: 100.2000; 120.1880; 110.3080; 280.4788; 040.6808