

文章编号:1007-2780(2017)04-0316-09

## 基于杂波抑制的海平线红外弱小目标检测

杨会玲<sup>1,3\*</sup>, 吴玉宏<sup>2</sup>, 孙慧婷<sup>1</sup>, 杜博军<sup>2</sup>, 何 昕<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学 苏州市虚拟现实智能交互应用技术重点实验室, 江苏 苏州 215000;

2. 中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137000;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:**针对红外图像中海天交接处目标能量较弱,难以获得精确检测的问题,本文提出一种基于杂波抑制的海平线弱小目标检测方法。该方法通过对红外图像特征分析,检测海平线像素特征,去除障碍物干扰,确定海平线区域;对海平线区域采用改进的均值差滤波与背景建模,去除海平线杂波;杂波滤除后,计算两个区间自适应阈值作为滞后阈值,从而检测出海平线弱小目标像素。实验结果表明,本文提出的算法能够有效去除海平线杂波,确定海平线区域,有效提取海平线像素,从而准确检测出海平线弱小目标,具有较高的检测率与较低的虚警率,验证了该算法的有效性。

**关键词:**区域分割;杂波抑制;滞后阈值;红外弱小目标检测

**中图分类号:**TP394.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173204.0316

## Small dim infrared target detection of horizon region based on clutter rejection

YANG Hui-ling<sup>1,3\*</sup>, WU Yu-hong<sup>2</sup>, SUN Hui-ting<sup>1</sup>, DU Bo-jun<sup>2</sup>, HE Xin<sup>3</sup>

(1. *Virtual Reality Key Laboratory of Intelligent Interaction and Application Technology of Suzhou, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215000, China;*

2. *Center of Arms Experiment of Baicheng, Baicheng 137000, China;*

3. *Chinese Academy of Science, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** This paper proposed a method based on clutter rejection for small dim infrared target detection from horizon region. Firstly, the horizon pixels were detected by analyzing the features of infrared image and removing obstruction of islands, seaside or buildings, so as to determine the horizon region. Secondly, the horizon region was processed with improved mean subtraction filter and building back-

**收稿日期:**2016-11-07; **修订日期:**2017-01-04.

**基金项目:**江苏省建设系统科技项目(No. 2016ZD87);苏州市科技发展计划(重点实验室)项目(No. SZS201609);江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. KYLX15\_1311);苏州科技大学研究生创新项目(No. SKCX15\_050)

Supported by Science and Technology Project of Jiangsu Construction System (No. 2016ZD87); Foundation of Key Laboratory in Science and Technology Development Project of Suzhou (No. SZS201609); Jiangsu Province Ordinary University Graduate Student Research Innovation Project (No. KYLX15\_1311); Suzhou University of Science and Technology Innovation Project (No. SKCX15\_050)

\* 通信联系人, E-mail: wjyhl@126.com

ground models to remove the horizon line clutter. Finally, it calculated the adaptive threshold of two region as the hysteresis threshold, so the dim target pixel could be determined. The experimental results show that the proposed method can effectively remove horizon line clutter to detect horizon pixels, and accurately detect the small dim infrared targets. It produces low false alarms and high detection rate, which validate the method.

**Key words:** region segmentation; clutter rejection; hysteresis threshold; small dim infrared targets detection

## 1 引言

红外搜索与跟踪系统(infrared search and track system, IRTS)主要用于搜索、获取以及跟踪海上或空中目标,例如用于探测高速飞行器、隐形飞机、导弹、船等目标<sup>[1]</sup>。但是,对于海天交接图像,红外目标在图像中能量较弱,形状较小,难以获得精确检测。且图像中云层、水平面反光点与海平线等杂波加深了红外目标检测的难度。现阶段,对天空与海面复杂背景下红外弱小目标的检测有大量研究,但是,若目标处于海天交接的海平线区域时,则无法利用天空或海面目标提取方法检测红外弱小目标,从而使得提取过程更加复杂,本文主要研究海平线区域的红外目标检测方法。

由于海平线区域处于海天交接区域,所以背景较为复杂,在提取海平线附近红外目标时,需抑制背景杂波。常用的背景抑制算法通常为空域滤波法<sup>[2]</sup>,例如均方滤波、中值滤波、均值滤波和形态学滤波等,这些算法逻辑清晰,实现容易,但是当目标的信噪比低时,分割出的疑似目标中有许多虚假目标,容易削弱检测率,增加虚警率<sup>[3-5]</sup>。从时域方面去除杂波的方法有傅里叶变换与 Hough 变换

等<sup>[6-7]</sup>,通过变换提取强背景杂波信号的参数,复制出原始杂波后将其去除,循环处理直到浮现弱小目标,由于此类算法需要处理空间及时间三维信号,数据量大,且杂波抑制效果较差<sup>[8]</sup>。

上述方法对于单一性质的背景具有较好的处理效果,但对于海平线背景则无法有效地探测红外弱小目标,于是,本文提出一种自适应海平线背景杂波抑制的弱小目标提取方法,该方法通过对背景的几何分析,将背景分为不同的杂波区间,即天空区间、海平线区间及海面区间,只对图像的海平线区域进行处理,对海平线区域进行均值滤波,根据海平线像素对海平线背景进行建模。将滤波后的海平线区域与背景模型相减去除海平线结构性杂波,进而通过滞后阈值法确定目标像素,完成目标检测。

## 2 海平线区域分割

图像的背景可以根据海平线将图像分割成3个区间,从而确定海平线区域,分割步骤如图1所示,根据探测器预测海平线,提取海平线像素,进一步确定海平线像素的内围像素,根据内围像素优化海平线并进行区域分割。

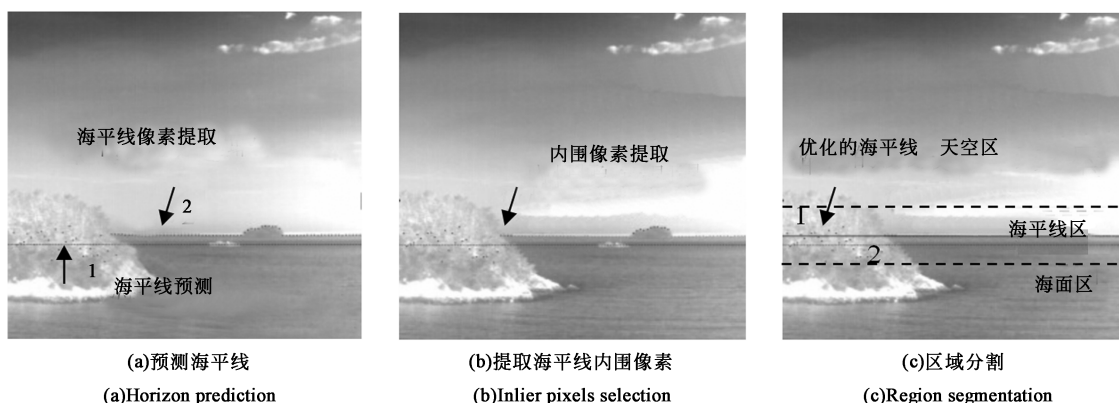


图1 区域分割步骤

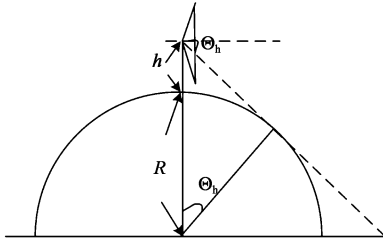
Fig.1 Process of region segmentation

假设红外摄像头的高度为  $h$ , 观测角度为  $\alpha$ , 地球半径为  $R$ , 如图 2 所示, 海平线投影可以根据观测角度  $\theta_h$  确定,  $\theta_h$  的计算公式如公式 (1) 所示, 假设红外摄像头的视场角为  $\beta$ , 则天空区域的角度  $\theta_{sk}$  即可利用公式 (2) 计算, 若观测角度  $\alpha$  小于  $\theta_h - \frac{\beta}{2}$ , 则红外摄像头只能拍摄到海面区域,  $\theta_{sk}$  为  $0^\circ$ 。得出天空区域角度后, 即可得出海面区域的角度  $\theta_{se}$ :  $\theta_{se} = \beta - \theta_{sk}$ 。所以, 最终所预测的海平线  $H_p$  即可利用公式 (3) 计算。

$$\theta_h = -\arccos\left(\frac{R}{R+h}\right), \quad (1)$$

$$\theta_{sk} = \begin{cases} 0 & \alpha < \theta_h - \beta/2 \\ \beta & \alpha > \theta_h + \beta/2 \\ \alpha - \theta_h + \beta/2 & \text{else} \end{cases}, \quad (2)$$

$$H_p = \text{imageheight} \times \frac{\tan \theta_{sk}}{\tan \theta_{sk} + \tan \theta_{se}}. \quad (3)$$



(a)观测的几何特征

(a)Geometry feature of detection

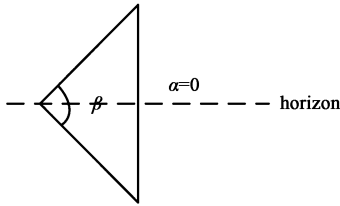
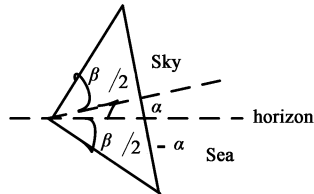
(b)观测角为  $0^\circ$  时确定海平线(b)Horizontal line determination when elevation angle is  $0^\circ$ (c)观测角为  $\alpha$  时确定海平线(c)Horizontal line determination when elevation angle is  $\alpha$ 

图 2 海平线确定方法

Fig.2 Determination method of horizontal line

图 1(a)中线 1 即为预测海平线, 为了减少计算复杂度, 可以将预测海平线进行抽样<sup>[9]</sup>, 对于每个样本位置, 利用高斯函数得出样本位置的一列方向梯度, 可以根据方向梯度选择距离预测海平线位置最近的具有最大方向梯度的像素即为海平线像素。在海天交接红外图像中, 海平线可能被冰山、海滨、云等物体遮挡, 在提取海平线像素时需将遮挡物像素去除, 通过对上步所提取的像素进行最小二乘法线性拟合<sup>[10-12]</sup>, 比较拟合前后的像素值得出真正的海平线像素(即内围像素)。得出内围像素后对海平线进行优化, 即标准化内围像素, 奇异值分解内围像素, 利用最小的特征值组成特征向量确定海平线方向, 优化海平线。图 1(c)中的实线 1 为所优化的海平线, 进而将图像分割成海平线区域、天空区域和海面区域。

### 3 海平线目标检测

#### 3.1 去除海平线杂波

包含目标的海平线处图像像素可以描述为:

$$f(x, y, k) = f_r(x, y, k) + f_b(x, y, k) + N(x, y, k), \quad (4)$$

式中:  $f(x, y, k)$  是图像上点  $(x, y)$  在第  $k$  帧的灰度值,  $f_r(x, y, k)$  是海平线处目标像素值,  $f_b(x, y, k)$  是海平线像素值,  $N(x, y, k)$  是随机噪声值,  $k$  为序列图像中的帧数。

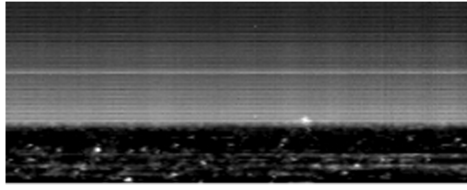
目标像素信噪比:

$$\text{SNR} = \frac{f_T - f_B}{\sigma_N}, \quad (5)$$

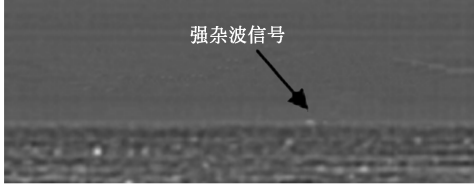
式中:  $f_T$  是海平线目标像素值,  $f_B$  是海平线像素值,  $\sigma_N$  是噪声标准差。

在处理海平线杂波之前, 首先利用改进的均值差滤波器(mean subtraction filter, 简称 MSF)对红外图像进行滤波, 均值差滤波器的根本为二维的均值滤波器, 二维均值滤波器的窗口大小一般为  $5 \times 5$  或  $7 \times 7$ 。MSF 能够简单高效地提取弱小目标, 但是, 由于传统的 MSF 会在海平线附近产生较强的能量输出, 若在后续检测时运用全局阈值检测目标<sup>[13]</sup>, 则目标像素与海平线像素难以区分, 如图 3 所示, 所以需要改进 MSF, 增强目标像素的信噪比。

改进的 MSF 方法的主要流程如图 4 所示, 将原始图像  $I(x, y)$  利用公式 (6) 所示的系数为



(a)局部海平线区域  
(a)Regional horizontal zone



(b)输出很强的杂波信号  
(b)Strong clutters response

图3 传统MSF处理后的海平线区域

Fig.3 After-processing horizontal zone of traditional MSF

$G_{3 \times 3}(x, y)$ 的高斯滤波器滤波,提高目标的信噪比<sup>[14]</sup>,得到图像  $I_{MF}(x, y)$ ,如公式(7)所示;同时,利用  $7 \times 7$  的移动平均核函数  $MA_{7 \times 7}(x, y)$ 如式(8)所示,处理原始图像估测背景图像  $I_{BG}(x, y)$ ,

$y)$ ,如公式(9)所示。将均值滤波图像与背景图像相减得到均差滤波图像  $I_{M-MSF}(x, y)$ ,如公式(10)所示。通过分析目标特征,取  $\sigma = 1.4$ ,模糊半径为1的高斯滤波模板,  $G_{3 \times 3}(x, y)$ 的取值如式(6)所示:

$$G_{3 \times 3}(x, y) = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.11 & 0.1 \\ 0.11 & 0.16 & 0.11 \\ 0.1 & 0.11 & 0.1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

当后续利用全局阈值法提取弱小目标时,改进的MSF方法能够很大程度上抑制误检测率和提高真实目标的信噪比。

$$I_{MF}(x, y) = I(x, y) * G_{3 \times 3}(x, y), \quad (7)$$

$$MA_{7 \times 7}(x, y) = \frac{1}{49} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$I_{BG}(x, y) = I(x, y) * MA_{7 \times 7}(x, y), \quad (9)$$

$$I_{M-MSF}(x, y) = I_{MF}(x, y) - I_{BG}(x, y). \quad (10)$$

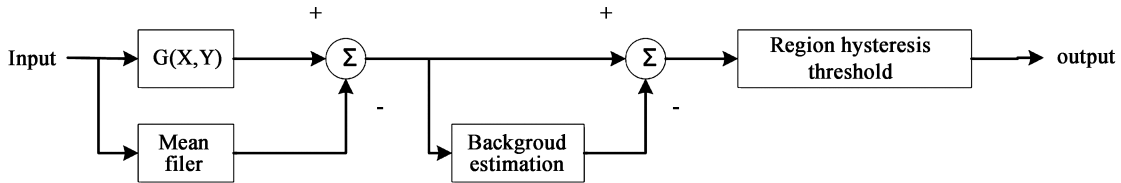


图4 改进的MSF方法流程图

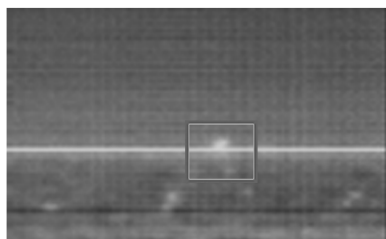
Fig.4 Procedure of improved MSF

增强目标的信噪比后,去除海平线区域的类似于海平线的结构性杂波<sup>[15]</sup>。对于红外图像的行与行之间有相似特征,特别是在海平线周围的行像素,所以可根据图像行特征对海平线区域的背景建模,即取1维的大小为  $2n+1$  的中值滤波器建立背景模型,如公式(11)所示,滤波步距  $2n+1$  是目标大小的  $5 \sim 10$  倍,在实际应用中,  $n$  取35可得到最佳背景模型。建立背景模型后,如公式(12)所示,将  $I_{M-MSF}(x, y)$  减去背景模型即可滤除海平线杂波,过程如图5所示,其中(a)图为原始图像  $I(x, y)$ , (b)图为目标区域的3D能量分布; (c)图为

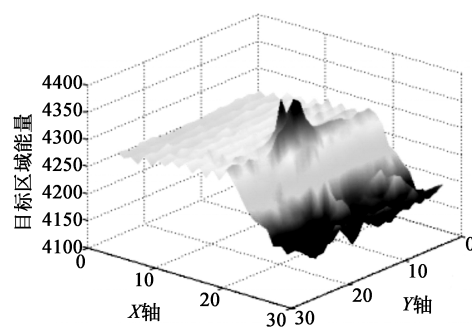
$I_{MF}(x, y)$  图像, (d)图为目标区域的3D能量分布,此时目标的信噪比为2.2; (e)图为背景建模图像  $I_{BK}(x, y)$ ; (f)图为利用改进的均值差对图像滤波后,海平线杂波去除图像  $I_{EC}(x, y)$ , (g)图为目标区域的3D能量分布,此时目标的信噪比为5.3。

$$I_{BK}(x, y) = \text{median}\{I_{M-MSF}(x-n, y), I_{M-MSF}(x-n+1, y), \dots, I_{M-MSF}(x, y), \dots, I_{M-MSF}(x+n-1, y), I_{M-MSF}(x+n, y)\}, \quad (11)$$

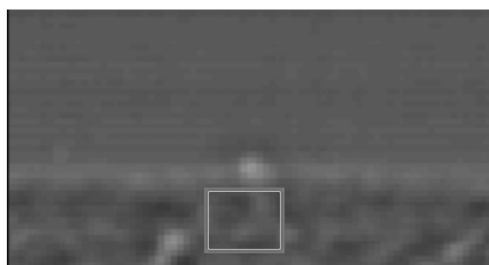
$$I_{EC}(x, y) = I_{M-MSF}(x, y) - I_{BK}(x, y), \quad (12)$$



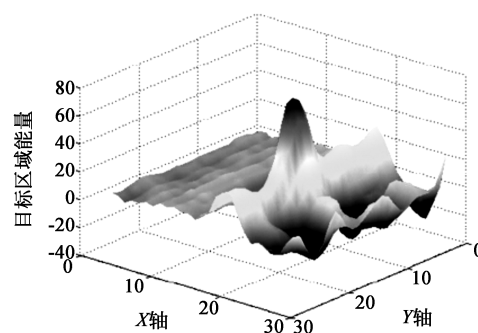
(a)  $I(x, y)$  图像  
(a)  $I(x, y)$



(b) 图(a)目标区域的 3D 能量分布  
(b) 3D energy distribution of Fig.5(a)



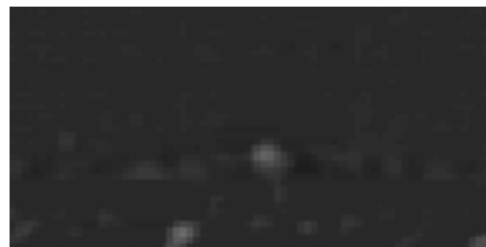
(c)  $I_{MF}(x, y)$  图像  
(c)  $I_{MF}(x, y)$



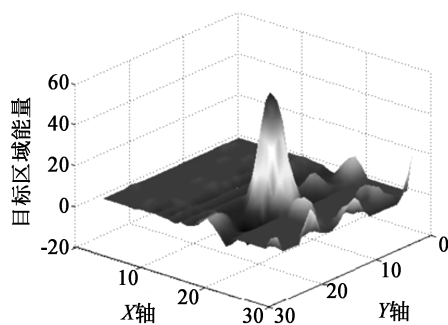
(d) 图(c)目标区域的 3D 能量分布  
(d) 3D energy distribution of Fig.5(c)



(e)  $I_{BK}(x, y)$  图像  
(e)  $I_{BK}(x, y)$



(f)  $I_{EC}(x, y)$  图像  
(f)  $I_{MF}(x, y)$



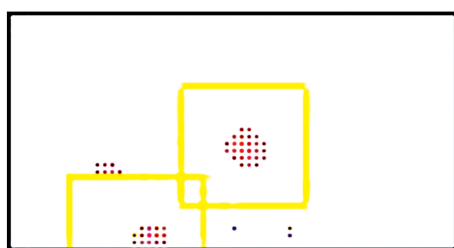
(g) 图(f)目标区域的 3D 能量分布  
(g) 3D energy distribution of Fig.5(f)

图 5 海平线杂波去除过程

Fig.5 Procedures of horizontal clutter elimination

### 3.2 目标检测

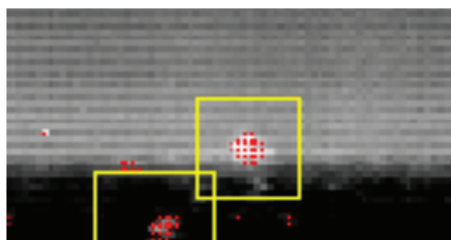
海平线杂波滤除后,需检测出真正的目标像素。本文利用滞后阈值法检测红外目标像素<sup>[16]</sup>,检测过程如图6所示。全局阈值可以自适应根据背景杂波密度确定阈值从而产生恒定阈值,直接对每个像素利用全局阈值法判断比较耗时,所以对全局阈值进行改进,即计算两个区间自适应阈值作为滞后阈值,两个阈值是有区别的,高阈值是将要提取轮廓的物体与背景区分开,决定目标与背景对比度,低阈值用来平滑边缘的轮廓。如图6(a)图所示,前一个阈值尽可能的小,同时,应根据所选的区间特征精确确定潜在目标。



(a)两区域阈值作为滞后阈值  
(a) Hysteresis threshold framework



(b)SCR 计算区域  
(b) SCR computation region



(c)检测结果  
(c) Detection results using the SCR threshold

图6 红外目标检测过程

Fig.6 Procedures of targets detection

利用8邻域法对所检测的像素进行分组,潜在目标的大小可以通过8邻域法确定,所检测区域可以分为3部分,即目标区、监视区与背景区,

如图6(b)所示,目标区的大小与阈值1的聚类区间大小相等,背景区是目标区的3~4倍,监视区是目标区的2~3倍。区域不同取值不同的阈值2—— $T_{\text{region}}$ 用来控制检测率与虚警率,通常情况下, $T_{\text{horizon}} < T_{\text{sky}} < T_{\text{sea}}$ ,经过阈值1的8邻域法确定目标所在区域,再通过阈值2判断潜在目标像素,如公式(13)所示:

$$\text{SCR}(x, y) = \frac{I_{\text{max}} - \mu_{\text{BG}}}{\sigma_{\text{BG}}} > T_{\text{region}}, \quad (13)$$

其中: $I_{\text{max}}$ 代表潜在目标处像素值, $\mu_{\text{BG}}$ 与 $\sigma_{\text{BG}}$ 分别代表背景区的均值与标准差,图6(c)显示了利用上述方法所得的检测结果。

## 4 实验结果分析

为了验证本文所提出的算法有效性,利用本文所提出的算法处理图7所示的4种不同情况下的海平线图像,图7(a)为被云层遮挡的海平线图,(b)图为被小岛遮挡1/3的海平线图,(c)图为被近处与远处小岛遮挡的海平线图,(d)图为海滨与建筑物遮挡的海平线图。



(a)云层遮挡  
(a) Occluded by cloud



(b)近处小岛遮挡  
(b) Occluded by near island



(c)近处与远处岛遮挡  
(c) Occluded by near/remote island



(d)海滨与建筑物遮挡  
(d) Occluded by near coast

图7 四种不同情况下的海平线图

Fig.7 Horizont line in different condition

海平线检测的线性拟合误差在 1 个像素之内则可判定为海平线精确检测,假设检测设备几乎没有传感器仪器噪声,为了验证本文所提出的算法的鲁棒性,在检测过程中,均匀增加角度在 $\pm 0.5^{\circ}$ 之间的传感器倾斜误差与 $\pm 3.0$ 个像素之内海平线位置噪声。表 1 为所有海平线的检测结果,检测率=检测像素数/实际像素数,从表中可以看出在无噪声情况下,本论文所提出的算法能够精确检测海平线,在有噪声情况下只有第四幅

表 1 海平线像素检测率

Tab.1 Detection rate of the horizon targets for the noise-less data and noisy data

| Picture sequence | Detection rate (without noise) | Detection rate (with noise) |
|------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 1                | 100                            | 100                         |
| 2                | 100                            | 100                         |
| 3                | 100                            | 100                         |
| 4                | 100                            | 97                          |



(a)图7(a)检测结果 (b)图7(b)检测结果  
(a) Detection results of Fig.7(a) (b) Detection results of Fig.7(b)



(c)图7(c)检测结果 (d)图7(d)检测结果  
(c) Detection results of Fig.7(c) (d) Detection results of Fig.7(d)

图 8 海平线检测结果

Fig.8 Detection results of horizon lines

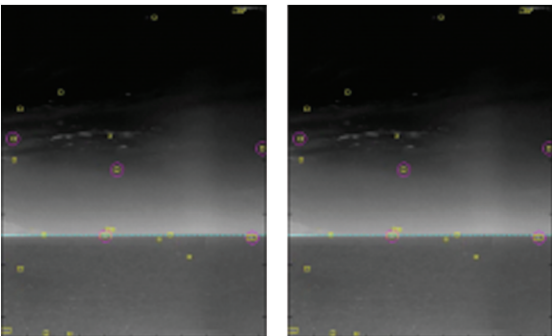
图的检测率为 97%,其他 3 幅图的检测率皆为 100%。图 8 为海平线检测结果,其中蓝色线为根据探测器所预测海平线,黑色线或白色线为精确检测的海平线,粉红色点为海平线像素,而黑色点为海平线外围像素。

利用本文所提出的算法对图 9 所示的一轮海平面观测图像进行处理,每轮观测有 3 帧图像,图像的分辨率为 $640\times 512$ ,图中黄色方框包围的像素群代表潜在目标与噪声点,粉红色圆圈包围的像素群为真正目标,表 2 为每帧图像的检测率与

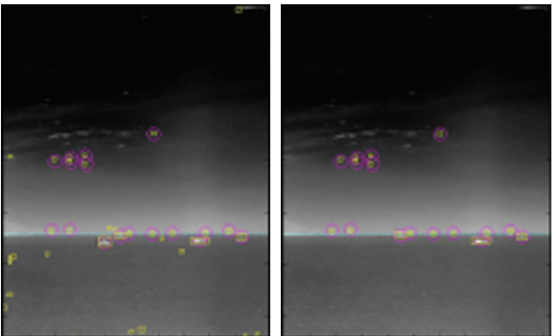
表 2 红外目标检测率与虚警率

Tab. 2 Infrared targets detection rates and false alarm rates

| frame number | detection rate/% | false alarm rate/% |
|--------------|------------------|--------------------|
| 1            | 100              | 0                  |
| 2            | 100              | 0                  |
| 3            | 100              | 0                  |



(a)第一帧图像 (b)第一帧的海平线目标提取结果  
(a)Frame 1 (b)Infrared targets detection results of frame 1



(a)第二帧图像 (b)第二帧的海平线目标提取结果  
(a)Frame 2 (b)Infrared targets detection results of frame 2

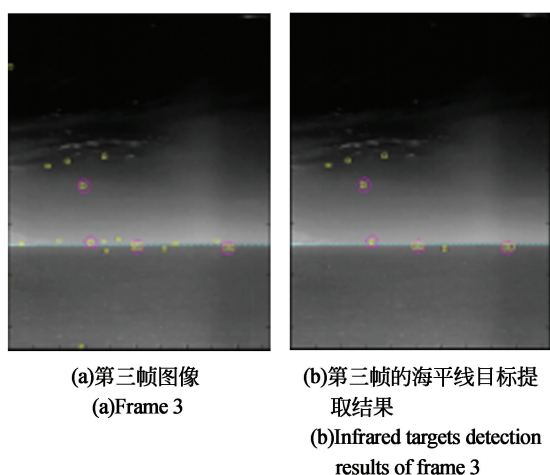


图9 一轮图像目标检测结果

Fig.9 Targets detection results of one round figures

虚警率, 检测率 = 检测目标数 / 总目标数, 虚

警率 = 错误目标数 / 总目标数。从表2可以看出本文所提出的算法能够准确检测所有目标, 所有图像检测的虚警率为0, 从图9的每帧图像的处理结果可以看出本文所提出的算法能够有效抵制噪声, 确定真正目标。

## 5 结 论

在海天交接红外图像中海平线目标提取过程中, 改进的均值差方法能够有效增强目标的信噪比, 且利用背景建模的方法能够完全去除海平线杂波, 确定目标像素时利用滞后阈值法能够正确检测目标。对海天交接红外图像的处理结果可看出本文所提出的算法能够有效抵制噪声, 准确确定海平线区域, 海平线像素检测率非常高, 从而能够有效检测出海平线弱小目标, 适用于海上红外目标检测系统。

## 参考文献:

- [1] 张云峰. 基于场景复杂度计算的红外图像平台直方图均衡[J]. 液晶与显示, 2016, 31(7): 695-702.  
ZHANG Y F. Adaptive plateau histogram equalization for infrared image based on scene complexity computation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(7): 695-702. (in Chinese)
- [2] 曾文静, 万磊, 张铁栋, 等. 复杂海空背景下弱小目标的快速自动检测[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(2): 403-412.  
ZENG W J, WAN L, ZHANG T D, et al. Fast detection of weak targets in complex sea-sky background [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 403-412. (in Chinese)
- [3] 丁鹏, 张叶, 刘让, 等. 结合形态学和 Canny 算法的红外弱小目标检测[J]. 液晶与显示, 2016, 31(8): 793-800.  
DING P, ZHANG Y, LIU R, et al. Infrared small target detection based on adaptive Canny algorithm and morphology [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(8): 793-800. (in Chinese)
- [4] 孙海江, 王延杰, 陈小林. 基于自适应梯度阈值各向异性滤波抑制红外复杂背景[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(1): 146-151.  
SUN H J, WANG Y J, CHEN X L. Suppression of infrared complex background based on adaptive gradient threshold anisotropic filtering [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 146-151. (in Chinese)
- [5] 刘运龙, 薛雨丽, 袁素真, 等. 基于局部均值的红外小目标检测算法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 814-822.  
LYU Y L, XUE Y L, YUAN S Z, et al. Infrared small targets detection using local mean [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 814-822. (in Chinese)
- [6] 王宇庆, 王索建. 红外与可见光融合图像的质量评价[J]. 中国光学, 2014, 7(3): 396-401.  
WANG Y Q, WANG S J. Quality assessment method of IR and visible fusion image [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(30): 396-401. (in Chinese)
- [7] 徐航, 张喜涛, 张军鹏. 基于局部均值差分的红外小目标图像背景抑制算法[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 2869-2873.  
XU H, ZHANG X T, ZHANG J P. Background suppression algorithm for infrared small target image based on local mean difference [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(9): 2869-2873. (in Chinese)
- [8] WANG X P, ZHANG T X. Clutter-adaptive infrared small target detection in infrared maritime scenarios [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 067001.
- [9] BAI X Z, ZHOU F G. Analysis of new top-hat transformation and the application for infrared dim small target detection [J]. *Pattern Recognition*, 2010, 43(6): 2145-2156.

- [10] PRASERTSAKUL P, KONDO T. A fingertip detection method based on the top-hat transform [C]// *Proceedings of the 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Nakhon Ratchasima: IEEE, 2014: 1-5.
- [11] KIM S. Double layered-background removal filter for detecting small infrared targets in heterogenous backgrounds [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(1): 79-101.
- [12] SANG H S, SHEN X B, CHEN C Y. Architecture of a configurable 2-D adaptive filter used for small object detection and digital image processing [J]. *Optical Engineering*, 2003, 48(8): 2182-2189.
- [13] KIM S, SUN S G, KIM K T. Highly efficient supersonic small infrared target detection using temporal contrast filter [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(2): 81-83.
- [14] KIM S, YANG Y, CHOI B. Realistic infrared sequence generation by physics-based infrared target modeling for infrared search and track [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(11): 116401.
- [15] 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.
- [16] 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.

作者简介:杨会玲(1976—),女,河南开封人,讲师,硕士,主要研究方向:光电测控技术与仪器。E-mail: wjyhl@126.com