

红外偏振舰船目标自适应尺度局部对比度检测

宫剑, 吕俊伟, 刘亮, 仇荣超, 孙超

引用本文:

宫剑, 吕俊伟, 刘亮, 等. 红外偏振舰船目标自适应尺度局部对比度检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(1): 223–233.

GONG Jian, LV Jun-wei, LIU Liang, et al. Adaptive scale local contrast detection for infrared polarization ship targets[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(1): 223–233.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202801.0223>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

采用图像块对比特性的红外弱小目标检测

Detection of infrared dim small target based on image patch contrast

光学精密工程. 2015, 23(5): 1424–1433 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152305.1424>

窗口融合特征对比度的光学遥感目标检测

Optical remote sensing object detection based on fused feature contrast of subwindows

光学精密工程. 2016, 24(8): 2067–2077 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162408.2067>

基于多尺度多特征视觉显著性的海面舰船检测

Ship detection on sea surface based on multi-feature and multi-scale visual attention

光学精密工程. 2017, 25(9): 2461–2468 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172509.2461>

基于邻域向量内积局部对比度图像增强的光学元件损伤检测

Detecting optical component damage based on neighborhood vector dot contrast image enhancement

光学精密工程. 2019, 27(12): 2668–2682 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192712.2668>

纹理粗糙度在红外图像显著性检测中的应用

Application of texture coarseness in saliency detection of infrared image

光学精密工程. 2016, 24(1): 220–228 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162401.0220>

文章编号 1004-924X(2020)01-0223-11

红外偏振舰船目标自适应尺度局部对比度检测

官 剑^{1,2*}, 吕俊伟¹, 刘 亮¹, 仇荣超¹, 孙 超³

- (1. 海军航空大学, 山东 烟台 264000;
2. 中国人民解放军 92337 部队, 辽宁 大连 116023;
3. 中国人民解放军 91104 部队, 江苏 南京 210000)

摘要:针对海天场景复杂干扰情况下多尺度检测红外偏振图像中舰船目标困难的问题,本文提出一种基于引导滤波和自适应尺度局部对比度的舰船目标检测方法。首先将强度信息作为引导信息对红外偏振图像利用引导滤波,得到目标背景对比度、局部信噪比更高的融合图像;然后基于融合图像显著的海天线垂直梯度特征,提出一种检测海天线方法,再对融合图像进行海天线加权抑制海杂波干扰;最后基于单尺度局部对比度算法与舰船目标比例特征,提出自适应尺度局部对比度方法,当尺度与目标匹配时响应最大,通过不同尺度对目标的响应结果确定最大尺度,得到舰船目标检测结果。实验结果表明,引导滤波融合方法的提高图像的目标背景对比度和局部信噪比,与典型检测方法对比,本文方法能够有效抑制干扰并能够检测海天场景不同尺度舰船目标,具有较高的鲁棒性和准确性,检测率、虚警率分别为 95.0%, 3.5%,为红外偏振图像目标检测提供了新的方法。

关键词:红外偏振;引导滤波;海天线加权;自适应尺度局部对比度;舰船目标检测

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202801.0223

Adaptive scale local contrast detection for infrared polarization ship targets

GONG Jian^{1,2*}, LÜ Jun-wei¹, LIU Liang¹, QIU Rong-chao¹, SUN Chao³

- (1. Naval aviation university, Yantai 264000, China;
 2. No. 92337 unit of PLA, Dalian 116023, China;
 3. No. 91104 unit of PLA, Nanjing 210000, China)
- * Corresponding author, E-mail: gongjian0811@outlook.com

Abstract: Aiming at the difficulty of multi-scale detection of ship targets in infrared polarization images under complex interference conditions of sea-sky scene, a ship target detection method was proposed based on guided filtering and adaptive scale local contrast method. First, by using the intensity information as the guiding information to guide and filter the infrared polarization image obtained the fusion image with higher local contrast and local signal-to-clutter ratio. Then, based on the vertical gradient characteristics of the fusion image, detecting the sea-sky line method was proposed so that sea-sky line weighting suppressed the sea clutter on the fused image. Finally, based on the single-scale local contrast method and the ship target proportional feature, the adaptive scale local contrast method

收稿日期:2019-07-08;修订日期:2019-09-09.

基金项目:十三五装备预研资助项目(No. 41415020106)

was proposed. When the scale matched the target, the response was the largest, and the maximum scale was determined by the response of the target at different scales. The experimental results show that the local contrast and local signal-to-noise ratio of the image are improved by the guided filtering fusion method. Compared with the typical detection methods, our method can effectively suppress interference and detect different scales of ship targets in sea-sky scene with high robustness and accuracy. The detection accuracy ratio and false alarm ratio are 95.0% and 3.5%, respectively, which provides a new method for infrared polarization image target detection.

Key words: infrared polarization; guided filtering; sea-sky line weighting; adaptive scale local contrast; ship target detection

1 引言

基于前视红外检测舰船目标现已广泛应用于侦查预警及探测制导等军事领域^[1]。红外偏振信息是一种独立于强度信息的另一维度信息,其作为一种新的探测手段有着较大的应用前景^[2]。红外成像依据目标背景间温度差异成像,突出表现目标轮廓等低频信息;红外偏振成像依据目标与背景的红外偏振特征差异成像,突出表现目标边缘和细节等高频信息,融合强度信息和偏振信息有效利用各自信道有利信息进行互补。图像频域分解,再通过一定规则融合是红外偏振图像融合的常见方法,Zhang 等^[3-4]根据对强度图像和偏振图像的频域分析,提出一种非下采样剪切波变换(Non-Subsampled Shearlet Transform, NSST)方法,通过构建频域映射函数融合图像。陈伟力等^[5]提出一种基于小波包(Wavelet Packet, WP)的红外偏振图像与强度图像融合方法。由于非弱小目标有着丰富的轮廓和细节信息,检测相对容易,目前研究主要集中在弱小目标检测方面。根据结构张量(Structure Tensor, ST)对不同局部结构的表示特性,赵高鹏等^[6]提出应用结构张量特征值矩阵得到响应图,通过高斯差分带通滤波器和自适应阈值分割得到目标位置。受人视觉系统对比度机制启发,Chen 等^[7]提出一种基于局部对比度的红外小目标检测方法,在小目标尺度变化及杂波背景条件下,该方法鲁棒性较强。针对复杂背景下实时检测红外舰船目标需求,漆昇翔等^[8-9]设计了一种小面卷积核(Facet Kernel, FK)确定目标区域,通过 L0 梯度最小化滤波分割

目标。

在红外偏振图像中,高频信息中的边缘与海杂波、噪声等干扰混叠,频域分解难度较大,且如何准确检测图像尺寸差异较大舰船目标也是亟待解决的问题。为此,本文提出一种基于引导滤波的方法通过融合强度信息抑制海杂波和噪声影响,根据目标与海天线的几何关系,应用海天线加权方法抑制较强海杂波干扰,最后提出一种自适应尺度局部对比度方法检测舰船目标。

2 红外偏振图像及红外强度图像分析

2.1 偏振态数学表示

任意偏振态可以用斯托克斯(Stokes)矢量进行表达^[10],Stokes 矢量是一个 4×1 的矩阵定义为:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{I} \quad \mathbf{Q} \quad \mathbf{U} \quad \mathbf{V}]^T, \quad (1)$$

其中: \mathbf{I} 表示辐射强度, \mathbf{Q} 表示水平和垂直线性偏振成分, \mathbf{U} 表示 $+45^\circ$ 和 -45° 偏振成分, \mathbf{V} 表示右旋或左旋偏振成分,在自然场景下,通常忽略该分量。任意偏振态可以用 4 个斯托克斯参量进行描述。

那么入射辐射 Stokes 矢量 $\mathbf{S}_i = [\mathbf{I}_i \quad \mathbf{Q}_i \quad \mathbf{U}_i \quad \mathbf{V}_i]^T$ 可以通过式(2)转换为出射辐射 $\mathbf{S}_o = [\mathbf{I}_o \quad \mathbf{Q}_o \quad \mathbf{U}_o \quad \mathbf{V}_o]^T$,

$$\mathbf{S}_o = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}_i, \quad (2)$$

其中: \mathbf{M} 表示偏振片的 Muller 矩阵。因此,成像传感器接收到的辐射强度为:

$$\mathbf{I} = \mathbf{M}_{11} \mathbf{I}_i + \mathbf{M}_{12} \mathbf{Q}_i + \mathbf{M}_{13} \mathbf{U}_i + \mathbf{M}_{14} \mathbf{V}_i. \quad (3)$$

线栅偏振片的 Muller 矩阵可以定义为:

$$\mathbf{M}_P = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中, θ 表示偏振光方向与偏振片透光轴的夹角, 则可以得到光强 I 与 Stokes 参量关系表达式^[11], 见式(5):

$$I = \frac{1}{2}(I_i + Q_i \cos 2\theta + U_i \sin 2\theta). \quad (5)$$

由此可以得到偏振光 Stokes 参量可以通过 4 个偏振角度强度图像表示, 如式(6)所示:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

最终, 根据式(6)得到偏振度图像计算方法, 见式(7):

$$DOP = \frac{\sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2}}{I_0 + I_{90}}. \quad (7)$$

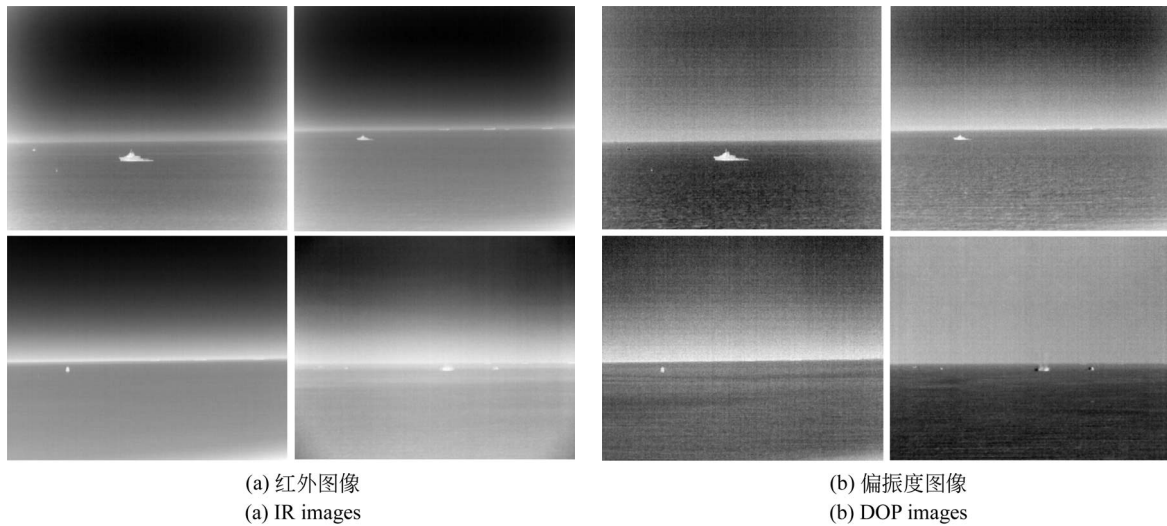


图 2 不同场景下的红外图像和红外偏振图像
Fig. 2 IR images and DOP images in different scenes

(Local Contrast, LC)及局部信杂比(Local Signal-to-Clutter Ratio, LSCR), 见式(9), 式(10)。

$$DOP' = \left[1 - \frac{DOP - \min(DOP)}{\max(DOP) - \min(DOP)} \right] \times 255, \quad (8)$$

$$LC = \frac{|\mu_T - \mu_B|}{\mu_T + \mu_B}, \quad (9)$$

$$LSCR = \left| \frac{\mu_T - \mu_B}{\sigma_B} \right|, \quad (10)$$

式中: μ_T 为目标区域灰度均值, μ_B 为背景区域灰度均值, σ_B 为背景区域灰度标准差, 红外图像与偏振图像客观评价见表 1。根据表 1, 红外强度图像的目标背景对比度低于红外偏振图像, 但由于

2.2 红外偏振及强度图像特性分析

物体反射辐射偏振态与物体材料, 粗糙程度, 入射角及出射角等因素密切相关^[1], 在海浪较小情况下, 海面较光滑属于高偏振特征物体, 实际采集的偏振度图像海面灰度较高, 而舰船目标灰度较低, 这与红外强度图像中的灰度特征相反, 为了统一目标与背景灰度特征, 根据式(8)将偏振度图像灰度进行反转。图 2 分别为 4 个场景下的红外图像和红外偏振图像。根据图 2 可以得到, 与红外图像相比, 偏振图像目标与海天线边缘更清晰, 但与此同时偏振图像中海浪纹理较为复杂, 偏振图像受海杂波影响较为严重且易受到噪声影响。根据式(9)和式(10)计算得到不同场景下红外强度图像和红外偏振图像的目标背景局部对比度

海杂波及噪声等影响, 红外偏振图像局部信杂比低于强度图像。

表 1 不同场景下红外图像与红外偏振图像客观评价
Tab. 1 Objective evaluation index of infrared images and infrared polarization images in different scenes

Evaluation Index	Image type	Scene 1	Scene 2	Scene 3	Scene 4
LC	IR	0.339 0	0.267 3	0.263 3	0.143 0
	DOP	0.529 0	0.332 0	0.307 5	0.401 3
LSCR	IR	17.377 4	23.539 3	32.196 6	11.198 4
	DOP	12.486 6	20.964 6	10.562 8	10.477 7

3 舰船目标检测流程

3.1 引导滤波

根据对图 2 与表 1 可以得到,红外强度图像信噪比较高而目标背景对比度较低,红外偏振图像虽然目标背景对比度较高,但是由于海杂波及噪声等影响导致信噪比较低,传统的均值滤波,中值滤波,高斯滤波器等是各向同性滤波器,在消除噪声的同时丢失了部分目标边缘和纹理信息。引导滤波是由 He 提出的一种简单可靠的边缘保持滤波器^[12],引导滤波假定引导图像和待滤波图像在二维滤波窗口中满足线性关系,当引导图像出现边缘,输出结果就会出现边缘。根据式(6)和式(7)可知,在采集红外偏振图像的同时也得到了红外图像,与红外偏振图像相比,红外图像有着较高的信噪比,受噪声和海杂波影响较小,利用红外图像中目标背景的梯度信息作为引导图像对偏振图像滤波,滤除海杂波和噪声影响,得到的滤波图像也就是红外强度信息和偏振信息的融合图像,在保留红外强度图像高信噪比的同时融合了红外偏振图像高目标背景对比度的特征。

引导滤波器包括输入图像 DOP , 引导图像 IR , 输出图像 RH , 其表达式为:

$$RH = a_k \cdot IR + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (11)$$

式中: ω_k 为一个半径为 r 的正方形窗口, 系数 a_k 与 b_k 为常数, 可用过线性回归求出, 即:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} IR_i \cdot DOP_i - \overline{IR}_k \cdot \overline{DOP}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad (12)$$

式中: $|\omega|$ 为 ω_k 内像素点个数, \overline{IR}_k 与 \overline{DOP}_k 分别表示图像 IR 和 DOP 在窗口 ω_k 内的均值, σ_k^2 表示方差, ϵ 表示权重因子。

由于像点 i 包含在若干不同的窗口 ω_k 中, 故式(11)中滤波输出 RH_i 会随着窗口 ω_k 的变化而改变, 通过取均值解决该问题, 因此改写式(11)为:

$$RH_i = \overline{a}_i \cdot IR_i + \overline{b}_i, \quad (13)$$

式中: $\overline{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k$ 与 $\overline{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k$ 分别表示平均系数。

3.2 海天线距离加权

海天线检测是前视图像研究热点之一, 海天

线检测不仅有利于海天场景分割, 也对抑制海面杂波干扰有较大意义。根据图 2 场景一、二中红外偏振图像, 海杂波在距离海天天线较远时影响较大, 在靠近海天天线附近海杂波不明显, 由此设计一种海天天线距离加权算法抑制海杂波对目标检测带来的影响。文献[13]基于梯度显著性方法增强海天天线直线特征同时抑制干扰, 采取区域生长算法检测海天天线。文献[14]提出一种结合链码跟踪与相位验证的直线检测方法, 有效克服由于噪声和相位编组导致的直线断裂问题。引导滤波图像融合了海天背景的红外强度特征和红外偏振特征, 海天天线垂直梯度显著, 根据这一特点提出一种简单高效的海天线检测算法。

对于前视图像而言, 理想状态下海天天线应为水平线, 而在实际过程中, 可以根据采集系统姿态数据将倾斜海天天线图像校正至水平。海面 and 天空有着较大温度差异和偏振特征差异, 因此海天天线有着显著的垂直梯度特征。首先, 应用梯度显著性增强模板 G 对图像进行卷积处理, 增强垂直方向上边缘区域, 即海天天线边缘。假设校正后海天天线倾角 θ , 若图像尺寸为 $M \times N$, 海天天线窗口尺寸为 $(N \tan \theta) \times N$ 。自上而下滑动窗口, 计算每个窗口梯度显著性图像灰度值, 灰度值最大窗口即视为海天天线窗口, 对窗口中的直线进行拟合得到海天天线结果。最后, 根据图像每个像素与海天天线的行向量距离进行加权。

对于前视图像而言, 理想状态下海天天线应为水平线, 而在实际过程中, 可以根据采集系统姿态数据将倾斜海天天线图像校正至水平。海面 and 天空有着较大温度差异和偏振特征差异, 因此海天天线有着显著的垂直梯度特征。

Step 1 应用梯度显著性增强模板 G 对图像进行卷积处理, 增强垂直方向上边缘区域, 即海天天线边缘。

$$G =$$

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}^T.$$

(14)

Step 2 假设采集系统姿态校正后海天天线倾角

θ , 图像尺寸为 $M \times N$, 海天窗口尺寸为 $(N \tan \theta) \times N$ 。自上而下滑动窗口, 计算每个窗口梯度显著性图像灰度值, 灰度值最大窗口则为海天窗口, 对窗口中的直线进行拟合得到海天线结果, 如式(15)所示。

$$L = a_l x + b_l. \quad (15)$$

Step 3 根据图像每个像素与海天线的行向量距离进行加权, 见式(16):

$$RH' = \frac{(T - \max(T))}{(\max(T) - \min(T))} \cdot RH, \quad (16)$$

其中: $T(i, j) = |j - L(i)| \quad i \in N, j \in M, i, j$ 分别为图像的行和列, $T(i, j)$ 为加权模板, RH' 表示加权后融合图像。

3.3 自适应尺度局部对比度

3.3.1 单一尺度局部对比度

红外图像和红外偏振图像目标细节较少, 无法像可见光图像一样通过细节特征检测目标, 特别是弱小目标。红外图像和红外偏振图像表现目标背景的辐射和偏振特性差异, 目标与背景对比度差异较大而细节特征较少, 应用局部对比度是检测红外目标的有效方法之一^[7], Chen 提出一种基于人类视觉感知局部对比度检测的弱小目标方法。

图 3 为局部对比度检测算法图, u 表示目标区域, v 表示局部背景区域, w 表示整幅图像。将 u, v 组成的滑动窗口分为 9 个单元, 中心单元“0”表示目标可能出现区域。首先, 计算区域中心“0”单元的最大像素值:

$$L_0 = \max I_j^0, j = 1, 2, \dots, N_0, \quad (17)$$

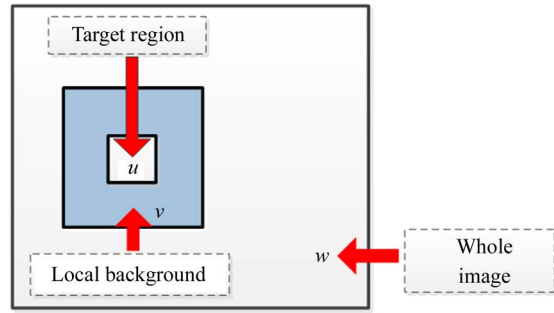
式中: I_j^0 为单元“0”中第 j 个像素点的灰度值大小; N_0 为单元“0”所包含的像素点个数。分别计算单元 1~8 的灰度均值:

$$m_i = \frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} I_j^i, i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, N_i, \quad (18)$$

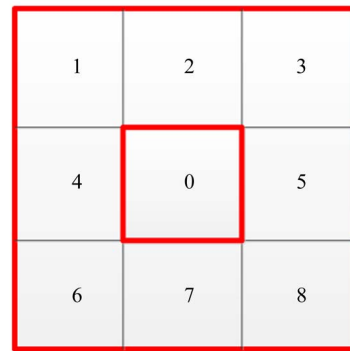
式中: I_j^i 表示滑动窗口单元“ i ”中第 j 个像素点的灰度值; N_i 表示滑动窗口单元“ i ”中所包含的像素点个数; i 表示滑动窗口单元的序号。局部对比度定义为:

$$C_n = \min_i \left\{ \frac{L_0^2}{m_i} \right\}, i = 1, 2, \dots, 8, \quad (19)$$

用 C_n 表示滑动窗口中心单元“0”像素灰度值。



(a) 计算滑动窗口局部对比度
(a) Calculate local contrast of sliding window



(b) 滑动窗口 9 个单元
(b) Nine units of the sliding window

图 3 局部对比度检测算法

Fig. 3 Local contrast method

在整幅图像 w 滑动窗口重复上述过程, 最终得到原图像的局部对比图 C 。

3.3.2 自适应尺度局部对比度

对于目标而言, 其尺度不是固定不变的, 文献 [7] 在算法基础上提出多尺度局部对比度方法, 计算不同尺度下的局部对比图, 取局部对比度最大值作为目标检测区域。该方法具有尺度不变性, 适用于尺度不同的小目标检测, 但随着尺度增大, 计算量随之变大, 而且当图像中同时存在尺度大小差异较大的目标时尺度选择困难, 本文提出一种自适应尺度局部对比度方法。

对于前视红外图像中的舰船目标, 远距离弱小目标一般为点状, 无清晰轮廓, 而近距离舰船目标通常具备一定轮廓特征。如图 4, 通过对前视图像舰船目标进行分析, 其长宽比约在 1:4 (侧视图) 至 1:1 (正视图) 范围变化, 由此设计自适应尺度局部对比度方法。

Step 1 假设图像中舰船目标尺寸大于 3×3 ,

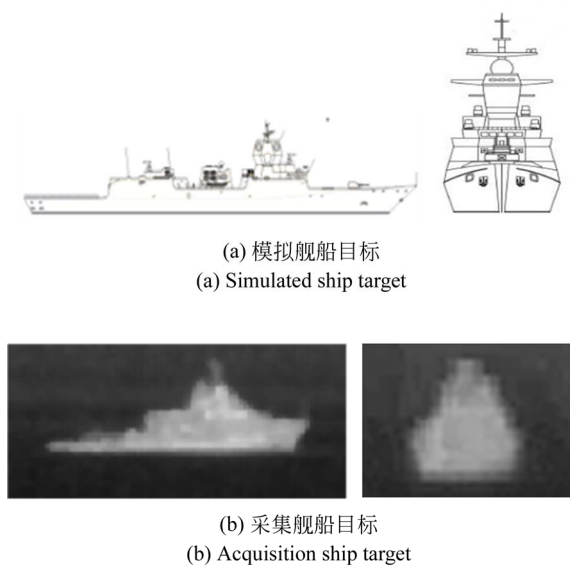


图 4 舰船目标侧视图与正视图

Fig. 4 Side view and front view of ship target

则局部对比度模板尺寸为 9×9 。对图像按尺度 r_n 进行变换, r_n 如式(20)所示, 其中 n 表示尺度数:

$$r_n = \left[\frac{1}{2^p}, \frac{1}{2^q} \right], n = 1, 2, 3, \dots, \quad (20)$$

式中: p 表示行变换系数, $p = \lfloor \frac{n-1}{3} \rfloor$, q 表示列变换系数 $q = n-1 - \lfloor \frac{n-1}{3} \rfloor$, $\lfloor * \rfloor$ 表示向下取整。

Step 2 根据单一尺度局部对比度算法计算尺度 r_n 下局部对比度图, 根据式(21)对尺度 r_n 下局部对比度图进行分割, 得到分割图像 T_{r_n} , 统计分割图像 T_{r_n} 中目标区域数量 t_n 。

$$T_{r_n} = I_{r_n} + k \times \sigma_{I_{r_n}}, \quad (21)$$

其中: I_{r_n} , $\sigma_{I_{r_n}}$ 分别表示尺度 r_n 下局部对比度图的均值和标准差, k 为分割系数。

Step 3 当局部对比度处理区域小于尺度 n 中的目标时, 部分目标像素被当做背景参与背景平均强度 $b_r(i, j)$ 计算, 在进行阈值分割后目标整体的局部对比度图被分割为多个部分, 造成该尺度局部对比度的误差; 当局部对比度处理区域与尺度 n 中的目标相同时, 局部对比度能够准确地量化该尺度下红外目标, 此时局部对比度响应最大。计算尺度 r_{n+1} 局部对比度图重复 Step 2, 统

计分割图像 $T_{r_{n+1}}$ 中目标区域数量 t_{n+1} , 若 $t_{n+1} \neq t_n$ 则重复 Step 3, 若 $t_{n+1} = t_n$, 则尺度 r_n 为最大尺度, 进行下一步。

Step 4 根据式(22)计算每个尺度下局部对比度图的各行各列的最大值作为最终局部对比度图, 根据式(21)分割得到舰船目标。

$$\hat{C}_{M,N} = \max_{r=r_0, r_1, \dots, r_n} C_{M,N}^r, \quad (22)$$

式中: $\hat{C}_{M,N}$ 为最终局部对比度图, r 为图像尺度。

4 实验结果与分析

本文实验仿真平台采用 CORE i5-6200U 主频 2.3 GHz, 内存 16 G 的笔记本电脑。实验参数设置如下: 引导滤波的滤波半径 r 为 9, 权重因子 ϵ 为 0.01; 海天倾角 $\theta = 5^\circ$; 分割系数 k 为 7, 图像大小为 512 pixel \times 640 pixel。

为验证本文所提方法能否抑制红外偏振度图像中的噪声及海杂波干扰, 最大限度利用偏振信息和强度信息, 本文对采集的图像中选择 4 组进行对比实验。不同角度偏振图像经过严格配准, 将本文所提融合方法与文献[3]和文献[5]提出的方法进行对比, 图 5 为文献[3]和文献[5]方法, 图 6 为本文引导滤波融合结果。选择 LC, LSCR 作为客观评价指标评价融合图像, 表 2 为不同融合算法评价结果。通过对比表 1, 2 中评价指标, WP 算法和 NSST 算法局部对比度较强度图像和偏振图像提升有限, 而局部信杂比下降明显, 本文方法在提高图像目标背景对比度的同时提高了图像局部信杂比, 有效抑制海杂波和噪声等干扰, 增大目标背景差异, 与 WP 算法、NSST 算法相比, 目标背景对比度分别提高 77.21%, 55.35% 局部信杂比分别提高 94.63%, 83.16%。可以看出, 由于频域分解融合方法中的高频分解无法区分红外偏振图像中的高频噪声和海杂波干扰和高频轮廓细节, 导致 NSST 方法和 WP 方法融合偏振信息和强度信息的同时将噪声和海杂波等干扰也融合到图像之中, 造成图像质量较差。引导滤波方法充分利用了目标与背景的强度信息和偏振信息, 使得融合图像有效抑制了海杂波和噪声干扰同时保持高对比度特征。

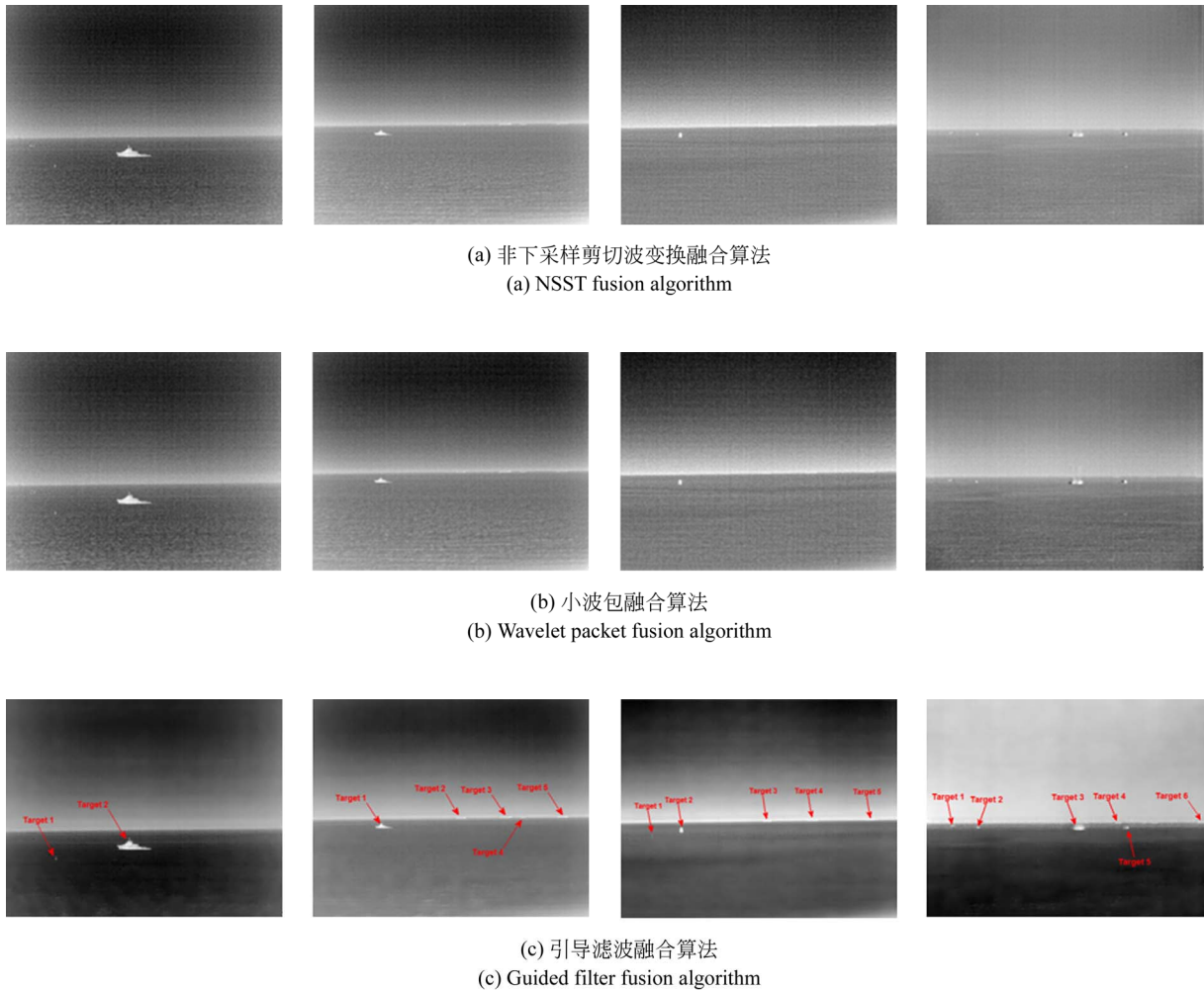


图 5 文献融合方法与本文方法对比

Fig. 5 Comparison of references and proposed method

表 2 融合图像客观评价指标

Tab. 2 Objective evaluation index of fusion images

Evaluation index	Fusion method	Scene 1	Scene 2	Scene 3	Scene 4	Average
LC	NSST	0.439 5	0.298 9	0.283 4	0.223 5	0.311 3
	WP	0.426 7	0.2665	0.235 4	0.163 0	0.272 9
	Proposed	0.771 5	0.365 2	0.333 1	0.464 7	0.483 6
LSCR	NSST	15.954 1	19.699 4	11.558 3	8.915 8	14.031 9
	WP	11.026 8	15.382 8	15.330 1	8.608 9	12.587 1
	Proposed	24.444 0	24.988 2	34.560 8	14.002 7	24.498 9

图 6 为海天线加权对自适应尺度局部对比度检测效果影响实验图(彩图见期刊电子版),其中图 6(a)~图 6(d)与图 6(e)~图 6(h)分别为未经

海天线加权处理和经过海天线加权后的自适应尺度局部对比度检测结果。根据对图 6 对比分析,以红外图像作为引导图像对红外偏振图像滤波抑

制了大部分海杂波及噪声干扰,但由于红外图像下方,即距离图像采集较近区域海杂波较为显著,海天线加权方法可以抑制海杂波,如图 6(d)中黄

色圈所示。海天线加权在抑制海杂波的同时增加海天线附近对比度,增加算法检测精度,避免如图 6(b)和图 6(c)中的目标漏检情况。

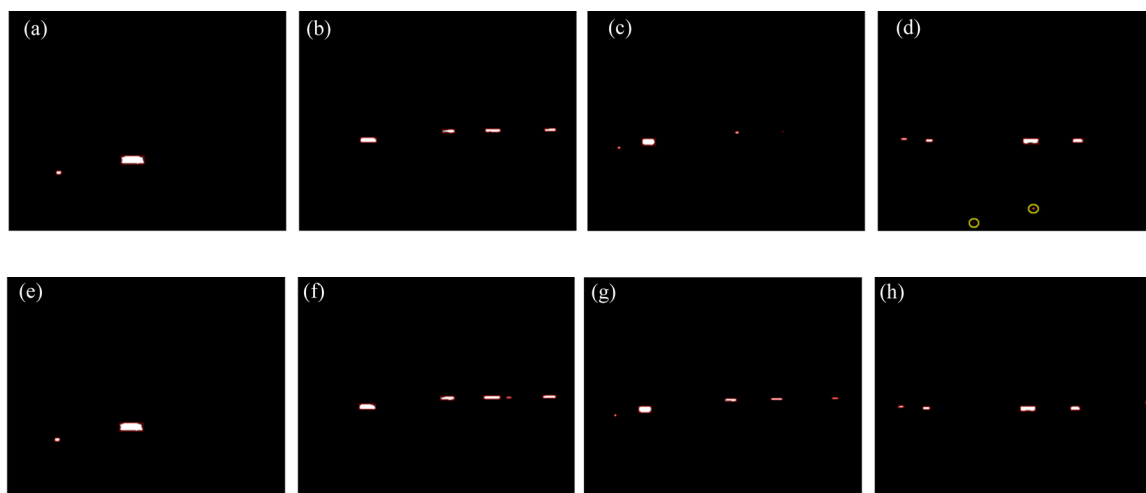


图 6 海天线加权方法对自适应尺度局部对比度算法检测结果影响

Fig. 6 Adaptive scale local contrast method result with or without Sea-sky line weighting

为进一步验证本文所提出的海天线加权及自适应尺度局部对比度方法在检测不同尺度舰船目标的有效性,将本文算法与 LCM,ST,FK 算法进行比较,实验结果如图 7 所示。如图 7 可以看出:LCM 算法(如图 7(a)~图 7(d))适合在海杂波及噪声干扰较小情况下检测小目标,如图 7(a)中的浮标(即图 5(a)中的 Target1),图(d)中远处的小船(即图 5(d)中的 Target5,Target6)较为显著,而作为较大尺寸的舰船目标(即图 6(a)中的 Target 2)并不明显,在如图 7(b)、图 7(c)海杂波和噪声干扰较大情况下,虚警率较高,检测效果差;ST 算法(如图 8(e)~图 8(h))对噪声及海杂波有一定的鲁棒性,但在目标尺度差距较大情况下,ST 算法检测小尺度目标较为困难,如图 8(e),且易受到海天线干扰,影响检测结果,如图 8(g);FK 算法(如图 8(i)~图 8(l))对尺寸差异较大目标有较好的响应效果,但由于易受到海杂波和噪声干扰导致检测效果不理想;本文算法(如图 8(m)~图 8(p))有效地抑制海杂波和噪声等干扰,对于目标尺度差异较大(例如图 6(a)中 Target1,Target2),弱小目标(如图 6(c)中的 Tar-

get3,Target4,Target5)等情况都有较好的效果。

SPIE 将小于图像总面积 0.12% 定义为小目标^[16],本文将红外偏振系统采集的 180 组海天场景图像中共计 397 个舰船目标分为小目标(像素小于 18×18 , 共计 273 个)和非小目标(像素大于等于 18×18 , 共计 124 个)。分别应用局部对比度算法,结构张量算法,小面核算法与本文算法检测舰船目标,实验结果见表 3。根据实验结果可以得到,由于舰船目标大小由 2×2 到大于 18×18 ,尺度变化范围较大,LCM 算法在受到较强海杂波干扰及检测大尺度目标时虚警率较高,ST 算法在目标尺度变化范围较大情况下对小目标检测效果较差,FK 算法由于受到海天线影响在检测海天线附近小目标时检测准确率较低,虚警率较高。本文方法目标检测准确率、虚警率分别为 95.0%,3.5%,与文献[6-8]方法相比检测准确率分别提高了 15.7%,17.2%,12.1%,虚警率降低了 30.8%,7.5%,25.0%,与其他方法相比本文对噪声及海杂波干扰鲁棒性较强,能够准确检测尺度差异较大的舰船目标。

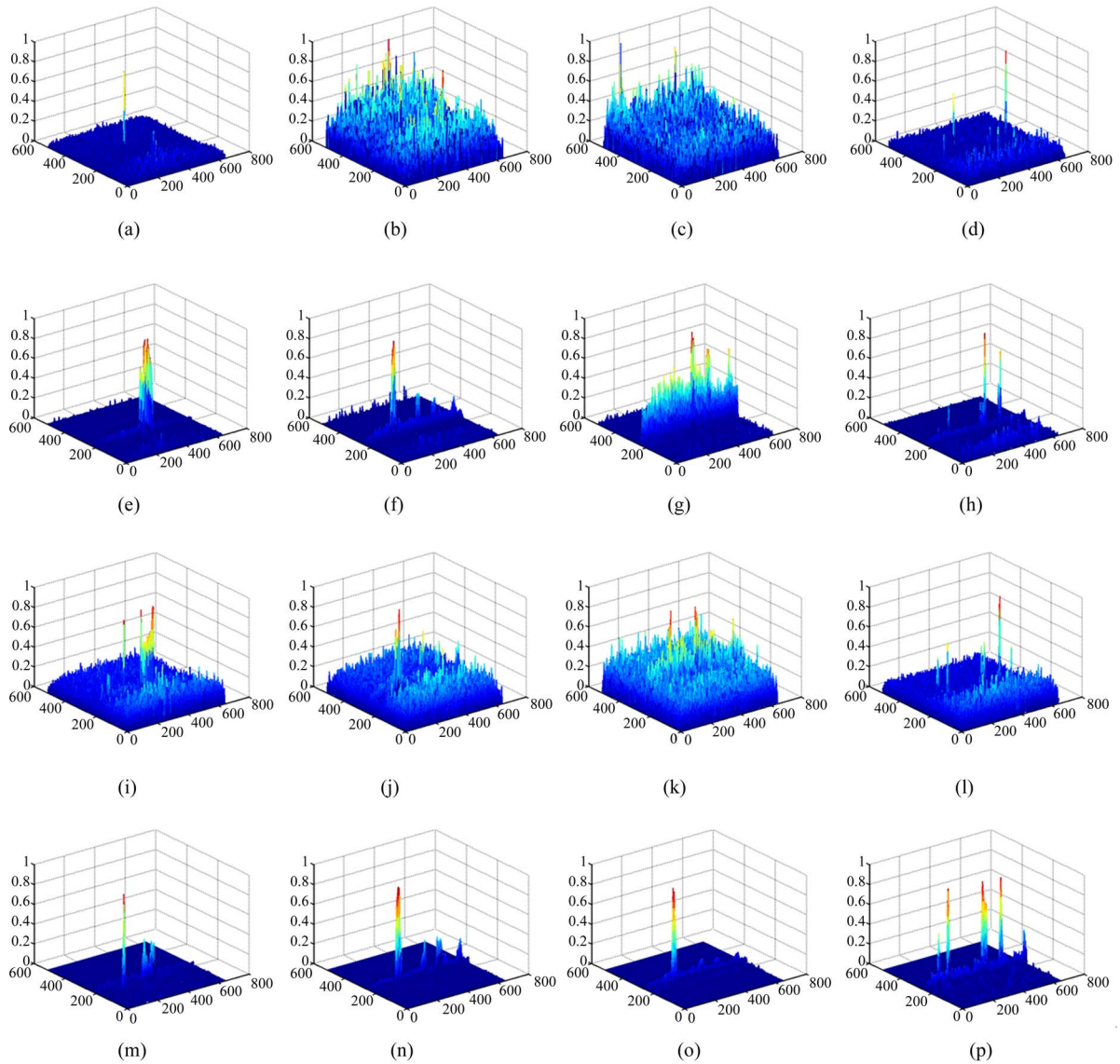


图 8 4 个场景下的不同算法响应图

Fig. 8 Response maps of different algorithms in 4 scenes

表 3 不同算法的检测率和虚警率

Tab. 3 Detection ratio and false alarm ratio of different algorithms

(%)

		LCM	ST	FK	MY
Accuracy ratio	Non-small target	67.7	91.1	83.1	97.6
	Small target	84.6	71.8	82.8	93.8
	Total	79.3	77.8	82.9	95.0
False alarm ratio		34.3	10.8	28.5	3.5

以上实验针对海天场景为验证本文所提算法对不同场景的舰船目标检测能力,应用红外偏振

成像系统采集 50 组岸岛场景红外偏振图像中的 132 个舰船目标进行检测,检测结果如表 4 所示。

将表 3 中的海天场景中的实验结果与岸岛场景实验结果相对比,可以看出在复杂岸岛背景下,文献算法探测准确率下降且虚警率大幅提升,本文算法

优于文献算法,但与海天场景相比,岸岛场景下降 7.1%,虚警率提高 17.6%。由此看出,本文算法更适用于海天场景红外偏振图像舰船目标检测。

表 4 岸岛场景检测性能对比

Tab. 4 Detection performance comparison of shore-island scene and sea-sky scene (%)

		LCM	ST	FK	Proposed
Shore-island scene	Accuracy ratio	65.9	75.8	71.2	87.9
	False alarm ratio	72.0	35.5	46.0	21.1

5 结 论

本文针对前视红外偏振图像检测不同尺度舰船目标问题,提出一种基于引导滤波和自适应尺度局部对比度的舰船目标检测方法。首先采用引导滤波方法融合红外强度和偏振信息得到高对比度高信杂比的融合图像,抑制噪声和海杂波干扰;然后利用融合图像的显著海天线梯度特征检测海天线并对图像进行海天线加权,进一步抑制较强

海杂波干扰,增强图像;最后根据局部对比度算法和舰船目标比例特征,提出一种自适应尺度局部对比度方法,根据不同尺度局部对比度对目标响应确定最终尺度,并根据各尺度最大响应检测舰船目标。通过实验验证和分析,本文算法与其他经典算法相比,有效解决了检测海天场景舰船目标尺度差异较大,前视红外偏振图像受海杂波和噪声干扰情况下虚警率较高的问题,并提高了检测精度,为红外偏振图像目标识别打下坚实基础。

参考文献:

- [1] CUI Z, YANG J, LI J, *et al.*. An infrared small target detection framework based on local contrast method[J]. *Measurement*, 2016, 91: 405-413.
- [2] 陈伟力,孙秋菊,王淑华,等. 基于目标边缘轮廓偏振特征的姿态分析初探[J]. *红外与毫米波学报*, 2016, 35(06): 758-765.
CHEN W L, SUN Q J, WANG SH H, *et al.*. Gesture analysis based on the polarization characteristics for the target edge contour[J]. *Journal of Infrared Millimeter Waves*, 35(6): 758-765. (in Chinese)
- [3] ZHANG J H, ZHANG Y, SHI Z G. Enhancement of dim and small targets in a sea background based on long-wave infrared polarisation features[J]. *IET Image Processing*, 2018, 12(11): 2042-2050.
- [4] ZHANG J H, ZHANG Y, SHI Z. Long-wave infrared polarization feature extraction and image fusion based on the orthogonality difference method [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2018, 27(2): 023021.
- [5] 陈伟力,王霞,金伟其,等. 基于小波包变换的中波红外偏振图像融合研究[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(5): 578-582+610.
CHEN W L, WANG X, JIN W Q, *et al.*. Approach to fusing MWIR polarization image based on wavelet packet transform[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(5): 578-582+610. (in Chinese)
- [6] 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): 141-151.
ZHAO G P, LI L, WANG J Y. Dim small target single-frame detection based on structure tensor analysis[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(1): 141-151. (in Chinese)
- [7] CHEN C L P, LI H, WEI Y, *et al.*. A local contrast method for small infrared target detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 574-581.
- [8] 漆昇翔,徐国靖,吴建民,等. 基于小面核滤波的快速红外舰船检测方法[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(11): 29-34.
QI SH X, XU G J, WU J M, *et al.*. Fast infrared ship detection method based on facet kernel filtering [J]. *Journal of Huazhong University of Science*

- and Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(11):29-34. (in Chinese)
- [9] QI S, XU G, MOU Z, et al. A fast-saliency method for real-time infrared small target detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 77: 440-450.
- [10] 陈伟力,孙秋菊,王淑华,等.目标表面发射率对红外辐射偏振特性的影响分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(3):737-742.
CHEN W L, SUN Q J, WANG SH H, et al. Influence analysis of target surface emissivity on infrared radiation polarization characteristics [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(3):737-742. (in Chinese)
- [11] 张哲,刘欣悦,王建立,等.分时型长波红外高帧频偏振成像实验研究[J]. *液晶与显示*, 2019, 34(5): 508-514.
ZHANG ZH, LIU X Y, WANG J L, et al. Division-of-time long-wave infrared high frame frequency polarization imaging experiment [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2019, 34(5):508-514. (in Chinese)
- [12] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering [J]. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [13] 王博,苏玉民,万磊,等.基于梯度显著性的水面无人艇的海天线检测方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(5):66-75.
WANG B, SU Y M, WAN L, et al. Sea Sky Line Detection Method of Unmanned Surface Vehicle Based on Gradient Saliency [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 66-75. (in Chinese)
- [14] 戴激光,张力,李晋威,等.一种链码跟踪与相位验证相结合的直线提取方法[J]. *测绘学报*, 2017, 46(2):218-227.
DAI J G, ZHANG L, LI J W, et al. A line extraction method for chain code tracking with phase verification [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(2):218-227. (in Chinese)
- [15] 刘德鹏,李正周,曾靖杰,等.基于多尺度局部对比度和多尺度梯度一致性的红外小弱目标检测算法[J]. *兵工学报*, 2018, 39(8):1526-1535.
LIU D P, LI ZH ZH, ZENG J J, et al. Infrared dim small target detection based on multi-scale local contrast and multi-scale gradient coherence [J]. *Acta Armamentarll*, 2018, 39(8):1526-1535.
- [16] GAO J, LIN Z, AN W. Infrared Small Target Detection Using a Temporal Variance and Spatial Patch Contrast Filter [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 32217-32226.

作者简介:



宫 剑(1990—),男,吉林珲春人,博士研究生,2013年于长春理工大学获得学士学位,2016年于空军航空大学获得硕士学位,主要研究方向为红外目标检测与识别。Email: gongjian0811@outlook.com

导师简介:



吕俊伟(1960—),男,山东牟平人,教授,博士生导师,分别于1985年、1988年于吉林工业大学获学士、硕士学位,2003年于法国第戎大学获得博士学位,主要从事目标识别与智能系统、目标探测与跟踪等方面研究。E-mail: ljwei369@163.com