

# 含噪光学遥感图像海面弱小舰船目标检测

宋明珠<sup>1,2</sup>, 曲宏松<sup>1\*</sup>, 金 光<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 海面舰船目标的检测与识别对于海面监测与目标打击具有重要意义, 弱小舰船目标由于缺少纹理信息且易受到海面阴影、噪声等因素的影响, 使得目前常用的检测方法效果较差。基于通道分离与负值扩展对比敏感函数提出了海面弱小舰船目标检测方法。该方法首先构建像素强度通道与噪声-边缘通道的多分辨率图像尺度金字塔; 之后, 构建不同尺度空间下的负值扩展对比敏感函数, 调制对应各位置的权重; 最后, 利用各空间尺度系数加权获得两通道视觉显著性图像, 通过通道差分处理实现了含噪图像中弱小舰船目标的快速检测。实验结果表明: 与其他 5 种算法相比较, 提出的方法具有较高的检测准确率(97.30%)、召回率(84.71%)及综合评价指标(94.49%), 同时具备较强的抗噪声能力, 适用于含噪海面光学遥感图像中弱小舰船的检测。

**关键词** 成像系统; 显著性检测; 负值扩展对比敏感函数; 对比敏感度; 弱小目标; 噪声

**中图分类号** TP751.1      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.1011004

## Weak Ship Target Detection of Noisy Optical Remote Sensing Image on Sea Surface

Song Mingzhu<sup>1,2</sup>, Qu Hongsong<sup>1</sup>, Jin Guang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The detection and identification of the ship target on the sea surface is significant for the monitoring and the target strike. The weak ship target with less texture information is affected by the sea surface shadow and noise interference, which results in the poor detection results with common algorithms. The weak ship target detection algorithm on sea surface is proposed based on the channel separation and minus extend contrast sensitivity function. Firstly, the multi-resolution image scale pyramid of the pixel intensity channel and the noise-edge channel is constructed. Secondly, the minus extend contrast sensitivity function under different scale space is established, and the weight of each position is modulated. Finally, based on the weighted spatial scale coefficient, the two channels' saliency maps are obtained. The weak ship target detection of noisy image is realized by channel differential processing. The experimental results show that compared with the other five algorithms, the proposed algorithm has high detection precision (97.30%), recall (84.71%) and F-Score (94.49%), and has strong anti-noise ability which is suitable to the weak ship target detection of noisy optical remote sensing image on sea surface.

**Key words** imaging systems; saliency test; minus extended contrast sensitivity function; contrast sensitivity; weak target; noise

**OCIS codes** 110.4280; 330.1800; 150.0155

**收稿日期:** 2017-05-27; **收到修改稿日期:** 2017-06-05

**基金项目:** 科技部重点专项(2016YFB0501202)、吉林省科技发展计划项目(20170101164JC)

**作者简介:** 宋明珠(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事空间光电成像技术方面的研究。

E-mail: songmingzhu14@mails.ucas.ac.cn

**导师简介:** 金光(1958—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间光学传感器总体方面的研究。

E-mail: jing@ciomp.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: quhongsong@aliyun.com

# 1 引 言

海上舰船是海面监测与战时打击的主要目标之一,检测与识别舰船目标是近年来遥感图像智能处理的热门领域。针对光学遥感图像舰船目标的检测主要可分为<sup>[1]</sup>:1)基于灰度统计特征的方法<sup>[2]</sup>;2)基于图像边缘信息特征的方法<sup>[3-4]</sup>;3)基于分形模型与模糊理论的方法<sup>[5-6]</sup>;4)基于视觉感知模型显著性检测的方法<sup>[7-8]</sup>。海面弱小舰船光学遥感图像易受海面阴影、噪声的影响,基于灰度统计特征、边缘信息特征与分形模型的方法在此环境下并不具备优势。基于视觉感知模型的方法将人类视觉系统快速聚焦于显著区域的特性引入目标检测,更为简捷有效。

基于视觉感知模型的显著性检测应用广泛,于 20 世纪 90 年代提出并得到持续发展,主要根据自上而下或自下而上的视觉显著性模型,实现目标区域的快速检测。Itti 等<sup>[9]</sup>提出了基于视觉注意机制的显著性模型,但作为最早的检测方法,其效力与运行速度相对处于较低水平;Zhang 等<sup>[10]</sup>提出基于贝叶斯模型的融合自顶向下与自底向上两种信息的局部显著性计算方法,该方法适用于小目标检测,但对噪声异常敏感;Cheng 等<sup>[11]</sup>提出基于全局对比度的显著性区域检测方法,运行效率与检测精度均得以提升;Huang 等<sup>[12]</sup>提出了通过多实例学习的显著对象检测,Wang 等<sup>[13]</sup>提出了基于卷积网络学习的显著性检测方法,此类基于学习的方法较适用于具备目标库的图像检测。类似方法见文献<sup>[14]~[21]</sup>,但均着眼于目标尺寸大、纹理细节丰富的无噪彩色图像检测,并未着重考虑全色图像小目标与噪声的影响,对本文目标而言均具有局限性。通过对含噪海面遥感图像分析可知,影响弱小舰船目标检测效果的主要原因在于孤立的脉冲噪声干扰,其中,盐噪声极易被检测为点目标。

针对上述问题,考虑基于底层视觉的显著性检测方法更为简捷有效,本文在 Murray 等<sup>[15]</sup>提出的非参数底层视觉模型(SIM)基础上对算法进行改进以实现海面弱小舰船目标的稳健性检测。

## 2 海面弱小舰船目标检测模型

### 2.1 SIM 模型介绍

SIM 模型是一种基于图像对比敏感度加权的显著性检测方法,如图 1 所示。

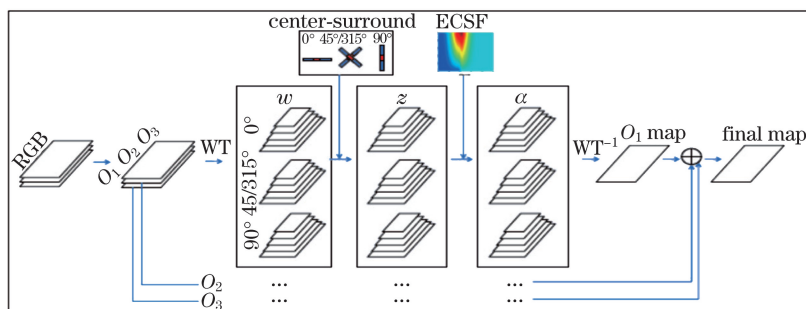


图 1 SIM 模型示意图

Fig. 1 Schematic of SIM model

具体方案为

$$I_c \xrightarrow{WT} \{w_{s,o}\} \xrightarrow{CS} \{z_{s,o}\} \xrightarrow{ECSF} \{\alpha_{s,o}\} \xrightarrow{WT^{-1}} S_c \quad (1)$$

将真彩色图像转至对立色通道,进行离散小波变换(WT)获取尺度空间金字塔;之后对各尺度系数矩阵( $w_{s,o}$ )进行中央-周围对比能(CS)计算,获得中央-周围对比能量测量参数( $z_{s,o}$ )及中心-周围对比能量( $r_{s,o}$ );利用扩展对比敏感度函数(ECSF)对 $z_{s,o}$ 进行加权,获取最终的通道响应 $\alpha_{s,o}$ ;最后利用通道响应 $\alpha_{s,o}$ 对变换系数矩阵 $w_{s,o}$ 进行加权,经离散小波逆变换( $WT^{-1}$ )获取最终各对立色通道的显著图。

SIM 模型基于 ECSF 加权思想可有效提取普通图像不同颜色空间的显著信息。但对于含噪图像,噪声作为高频刺激对视觉感知形成了目标式误导,直接影响了检测效果。因此,本文基于 SIM 模型的尺度构架,利用图像信息向像素强度通道与噪声-边缘通道转换实现高低频信息的分离,同时构造适用于不同空间频率的负值对比敏感度函数(MECSF),通过差分处理完成最终检测。

## 2.2 图像通道设计

在图像分解通道设计上,将图像信息转至像素强度通道与噪声-边缘通道。

$$I_c = \begin{cases} I_i(x, y) = I(x, y)/2^N \\ I_{ne}(x, y) = H(x, y)I(x, y)/2^N \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $I$  为原始图像信息,  $N$  为量化位数,  $I_i$  为像素强度通道。  $I_{ne}$  为噪声-边缘通道, 根据椒盐噪声较舰船目标相对孤立的特性,  $H(x, y)$  为设计中值均值比例逆滤波器, 通过对图像  $I$  进行滤波处理获得。滤波后可对孤立噪声与舰船目标边缘信息进行有效提取。令  $S_{xy}$  表示中心在  $(x, y)$ , 尺寸为  $m \times n$  的矩形子图像窗口的坐标组,  $H(x, y)$  表示为

$$H(x, y) = 1 - \left[ \frac{1}{mn} \sum_{(s,t) \in S_{xy}} I(s, t) \right] / \text{median}\{I(s, t)\}_{(s,t) \in S_{xy}}. \quad (3)$$

在通道转换后, 通过小波变换对两个通道进行不同频率分层处理以获取多个尺度的空间金字塔。空间尺度金字塔包含各尺度下水平、垂直、对角线方向的小波平面集合。实验表明, 样本图像大于 3 层尺度的信息基本对整体无影响, 故后续实验选择尺度为 3。

## 2.3 MECSF 构造

对比度是图像底层视觉模型中的重要特征, 当人类要深入分析复杂场景时, 视觉系统会根据高对比度刺激来判断显著性目标。采用基于对比度特性的中心-周围对比能量  $r_{x,y}$  表征图像区域显著性:

$$r_{x,y} = (a_{x,y}^{cen})^2 / (a_{x,y}^{sur})^2, \quad (4)$$

式中  $a_{x,y}^{cen}$  与  $a_{x,y}^{sur}$  分别表示中心与边缘区域能量。为保障噪声信息与海面本底信息在高频尺度的有效分离, 计算  $r_{x,y}$  时, 在分母项加上固定系数, 取  $10^{-4}$ , 之后对  $r_{x,y}$  进行非线性缩放归一化处理, 最终的中心-周围能量测量参数  $z_{x,y}$  为

$$z_{x,y} = r_{x,y}^2 / (1 + r_{x,y}^2). \quad (5)$$

对比敏感度函数(CSF)是定量分析局部对比度对视觉造成影响的函数, Otazu 等<sup>[14]</sup>在 CSF 基础上进行修改, 获得定量分析能量对比度的 ECSF 为

$$f_{ECSF}(z, s) = z \cdot g(s) + k(s), \quad (6)$$

式中  $g(s)$  为权值函数,  $k(s)$  为附加函数, 用来保障下界非零。利用 ECSF 对  $z_{x,y}$  进行加权, 获取最终通道响应。ECSF 的设计是基于这一基本假设: 环境空间频率含量与中心-周围刺激对比是决定刺激对视觉感知变化的两个主要因素<sup>[14]</sup>。由于目标海面图像中弱小舰船的纹理细节信息丧失, 因此采取牺牲目标边缘的策略, 利用高频区域逆向显著化思想, 构造 MECSF, 则  $g(s)$  表示为

$$g(s) = \begin{cases} \alpha(s - s_0^g) \exp\left[-\frac{(s - s_0^g)^2}{2\sigma_1^2}\right] \left\{1 + \beta \exp\left[-\frac{(s - s_0^g)^2}{2\sigma_1^2}\right]\right\}^{1/2}, & s < s_0^g \\ \alpha(s - s_0^g) \exp\left[-\frac{(s - s_0^g)^2}{2\sigma_2^2}\right] \left\{1 + \beta \exp\left[-\frac{(s - s_0^g)^2}{2\sigma_2^2}\right]\right\}^{1/2}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $s$  为当前空间尺度参数,  $\sigma_1, \sigma_2$  定义了  $g(s)$  的空间,  $s_0^g$  为  $g(s)$  的峰值尺度,  $\alpha, \beta$  为权重因子,  $\alpha$  与  $\beta$  分别影响高低频分量。当注意视觉主要集中于低频时, 调高  $\alpha$  值, 相应地调低  $\beta$  值; 反之亦然。当  $s_0^k$  为  $k(s)$  的峰值尺度,  $\sigma_3$  定义为  $k(s)$  的空间, 此时的附加函数  $k(s)$  表示为

$$k(s) = \begin{cases} \alpha(s - s_0^k) \exp\left[-\frac{(s - s_0^k)^2}{2\sigma_3^2}\right] \left\{1 + \exp\left[-\frac{(s - s_0^k)^2}{2\sigma_3^2}\right]\right\}^{1/2}, & s < s_0^k \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases}. \quad (8)$$

MECSF 模型曲线如图 2 所示。模型设计的特点在于  $g(s)$  最大值小于零, 即采用负权值函数构造。此时, 针对本文目标检测的需求, 在权重因子设计上,  $\alpha$  取小值,  $\beta$  取大值, 将权重函数对中心-周围能量测量参数进行加权后, 噪声与边缘的响应为负最大化。在形成的显著图像中, 噪声、边缘处将形成明显的凹陷带, 即形成暗色显著区, 此时生成的显著图与正加权时有明显差异, 如图 3 所示。最后, 利用构建的 MECSF, 获取最终的通道响应为

$$\mathcal{V} = f_{MECSF}(z, s). \quad (9)$$

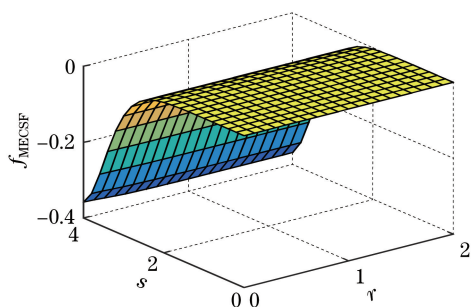


图 2 MECSF 模型

Fig. 2 MECSF model

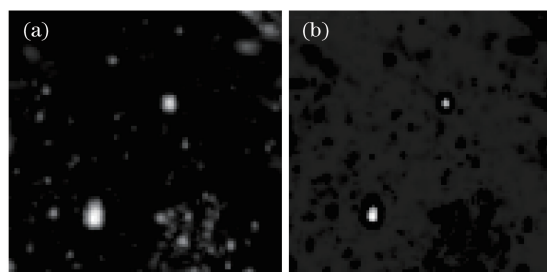


图 3 (a)正加权与(b)负加权显著图对比

Fig. 3 Contrast of saliency maps with (a) plus weight and (b) minus weight

## 2.4 构建显著图

利用通道响应 $\vartheta_{s,o}$ 对变换系数矩阵 $w_{s,o}$ 进行加权,经离散小波逆变换获取像素强度通道与噪声-边缘通道的显著图为

$$S_c(x, y; p) = WT^{-1}(\vartheta_{x,y,s,o,p} \cdot \omega_{x,y,s,o,p}), \quad (10)$$

式中 $p=1$ 代表像素强度通道, $p=2$ 代表噪声-边缘通道。对两通道进行差分处理,削弱噪声干扰,得到最终显著图 $S$ 为

$$S = \sqrt{S_c^2(x, y; 1) - S_c^2(x, y; 2)}. \quad (11)$$

## 3 实验结果与分析

### 3.1 检测效果

根据实际需求,将尺寸 $2\sim 30$  pixel的目标视为弱小舰船目标(由于图像灰度信息整体改变,因此不考虑图像强度因素带来的影响)。对40幅正常海面全色谱段可见光遥感图像进行检测,同时与5种相对效果较好的算法进行对比,效果如图4所示,对比算法依次为:Context Aware(CA)<sup>[16]</sup>、协方差(COV)<sup>[17]</sup>、谱残差(SR)<sup>[18]</sup>、空间权重差异性(SWD)<sup>[19]</sup>、SIM<sup>[15]</sup>。

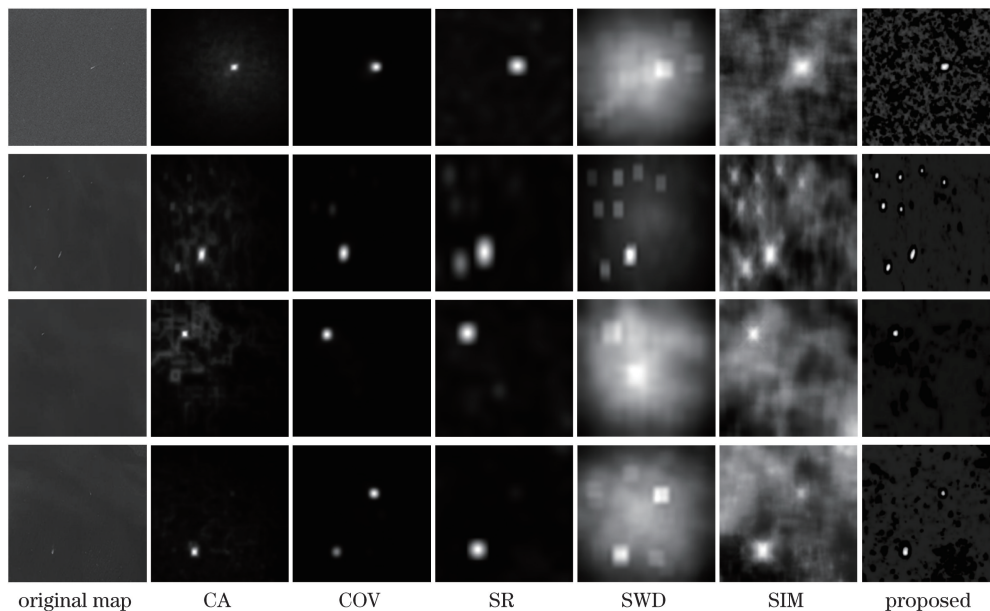


图 4 不同算法的效果(无噪声)

Fig. 4 Results of different algorithms (without noise)

对获取的显著检测图,经设定阈值的二值化处理及腐蚀膨胀操作<sup>[20]</sup>获取检测目标数。以准确率、召回率、综合评价指标(F-Score,  $F_{score}$ )作为评价算法的标准,分别定义为

$$P_{\text{recision}} = \frac{T_p}{T_p + F_p} \times 100\%, \quad (12)$$

$$R_{\text{ecall}} = \frac{T_p}{T_p + F_N} \times 100\%, \quad (13)$$

$$F_{\text{Score}} = (1 + \gamma^2) \times \frac{P_{\text{recision}} \times R_{\text{ecall}}}{\gamma^2 \times P_{\text{recision}} + R_{\text{ecall}}}, \quad (14)$$

式中 $T_p$ 代表正检数, $F_p$ 代表虚警数, $F_N$ 代表漏检数。 $\gamma$ 用来平衡准确率与召回率, $\gamma$ 越大召回率越重要, $\gamma$ 越小准确率越重要。文中 $\gamma$ 可针对不同任务需求自适应取值,考虑弱小舰船目标检测过程受脉冲噪声干扰情况下准确率与召回率同等重要,取 $\gamma=0.5$ 。不同算法检测效果对比如图5所示。

针对无噪图像,本文算法准确率(97.30%)较最高的COV算法(93.22%)高4.2%,召回率(84.71%)与CA算法(84.71%)持平,综合评价指标(94.49%)较最高的COV算法(85.67%)高9.33%。

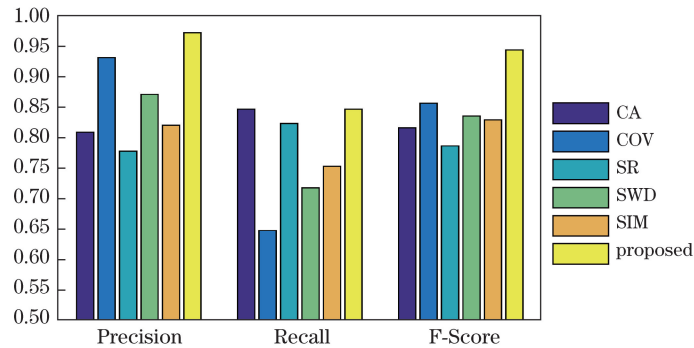


图5 不同算法的检测结果(无噪声)

Fig. 5 Detection results of different algorithms (without noise)

分析对比方法:CA算法利用上下文感知进行显著性检测,易将海面弱纹理视为目标,存在高虚警数;由于弱小舰船目标的纹理信息弱,COV算法采取均值与协方差描述子对图像区域7维特征向量进行描述的方式无法得到有效利用,导致高漏检数;SR算法对图像进行对数频谱分析,去除对数频谱中通用信息的过程导致弱小目标群检测过程中次级大目标被忽视,正检数下降;SWD算法在海面亮区计算缩减的尺度空间图像块差异及图像块空间距离与中心偏差过程形成了较大权重,导致整体检测本底值升高;SIM算法在尺度分解过程中针对海面弱纹理与边缘信息的提取量过大,导致目标与本底信息差异不明显,同时扩展对比灵敏度函数的引入并未明显使注意集中于目标区域,带来虚警。

对加入均值为0、方差为0.002的孤立脉冲噪声的上述40幅图像进行含噪检测实验,检测统计与显著性检测效果如图6、7所示。针对含噪图像,各对比算法均不具备抗脉冲噪声能力,正检数明显下降、虚警与漏检明显上升。本文算法准确率较最高的SIM算法高40.22%,召回率略低于COV算法5.2%,综合评价指标较最高的SR算法高35.12%。

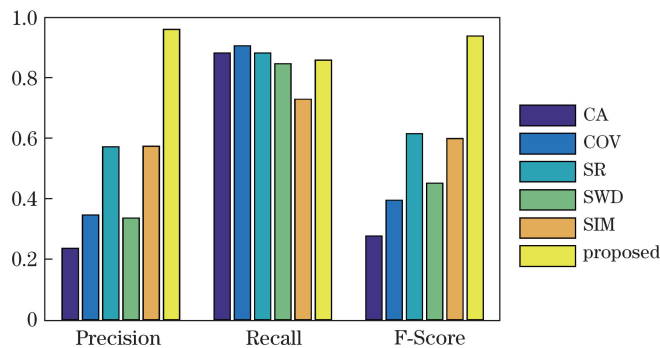


图6 不同算法的检测结果(含噪声)

Fig. 6 Detection results of different algorithms (with noise)

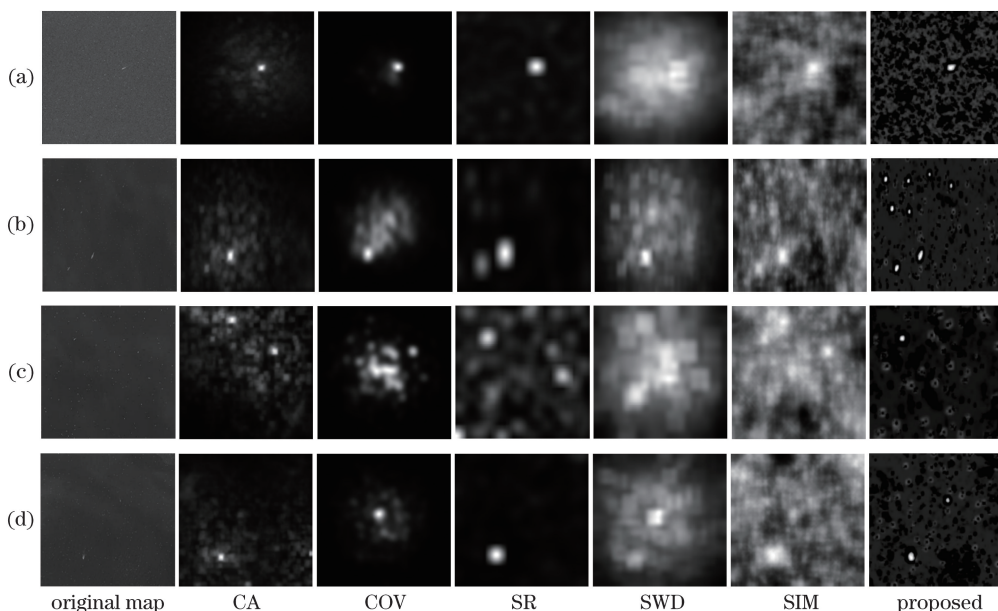


图 7 不同算法的效果(含噪声)

Fig. 7 Results of different algorithms (with noise)

本文算法充分考虑了海面弱小舰船目标在检测过程受海面本底信息与噪声的干扰,通过设计更加满足人眼针对高低频率响应需求的 MECSF,同时结合通道差异化设计,可有效提取目标主体区域,实现了噪声与图像边缘信息的有效弱化及目标区域的有效增强。

对正检、漏检与虚警数据进行分析,本文算法存在漏检与虚警的原因主要为:1)单个目标尺度过小(目标在图像中小于 2 pixel)时会发生漏检情况;2)多个目标距离过近(两目标间距小于算法中采用模板尺寸 3 pixel)时,会产生目标区域连通,多个目标被视为一个目标。

### 3.2 算法适应性

对正常目标图像分别加入均值为 0,方差为 0.005,0.010,0.015,0.020 的脉冲噪声进行抗噪能力对比实验,检测效果统计如图 8 所示。

当加入噪声方差不超过 0.010 时,各评价指标均高于 85%;加入噪声方差不超过 0.020 时,各评价指标均高于 75%。随着噪声增加,检测效果下降的原因主要为:脉冲噪声具有一定的随机性,当噪声过多,噪声及边缘信息存在提取不足的情况,盐噪声出现聚集后可能被识别为目标。

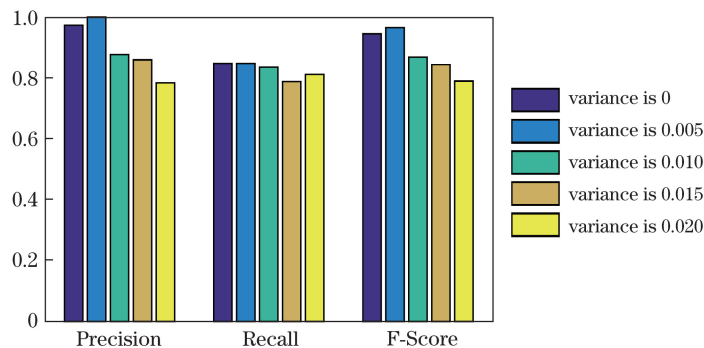


图 8 准确率、召回率、综合评价指标柱状图

Fig. 8 Histogram of precision, recall and F-score

### 3.3 时间对比实验

采用 Inter(R) Xeon(R) CPU E5-1620 v2 @3.70GHz 计算机与 Matlab R2015a 软件进行时间对比实验。对图 7 中 4 幅图像数据运用各对比算法进行显著性检测,各算法耗时如表 1 所示。

表 1 耗时对比

Table 1 Contrast of consuming time

Algorithm	Fig. 7(a) /s	Fig. 7(b) /s	Fig. 7(c) /s	Fig. 7(d) /s
CA	60.0304	18.0013	32.5419	32.1684
COV	20.1928	20.0097	20.3326	20.4710
SR	0.0310	0.0156	0.0152	0.0152
SWD	0.1235	0.2759	0.0905	0.1498
SIM	1.2095	3.6124	1.2426	1.3055
Proposed	0.9724	2.9301	0.9112	1.0233

本文算法运行速度优于 CA、COV 算法, 差于 SR、SWD 算法, 略快于 SIM 算法(约快 20%), 算法耗时主要是在多通道空域频域变换上。综合本文检测的特殊性与算法的准确性, 算法耗时在可容忍范围。

## 4 结 论

SIM 模型主要应用于彩色目标的检测, 利用不同通道的响应对小波系数进行加权, 通过整个通道最终实现显著性检测。对于全色图像, 基于 SIM 模型的检测效果并不理想。通过设计图像分解通道, 即把全色图像分解为像素强度通道与噪声-边缘通道, 并构造负值扩展对比敏感函数, 利用负值权重加权小波系数, 实现了不同尺度下噪声的凹陷处理, 从而降低噪声对检测结果的干扰。实验结果表明, 本算法兼顾良好的检测效果与抗噪能力。针对无噪图像, 检测准确率为 97.30%, 召回率为 84.71%, 综合评价指标为 94.49%; 噪声方差不超过 0.02 时, 准确率、召回率、综合评价指标均维持于 75% 以上。本文算法在算法耗时上仍有待完善之处, 在下一步工作中重点考虑算法的并行化加速优化设计。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Yanqing, Ma Lei, Tian Yuan. State-of-the-art of ship detection and recognition in optical remotely sensed imagery[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(9): 1029-1039.  
王彦情, 马雷, 田原. 光学遥感图像舰船目标检测与识别综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(9): 1029-1039.
- [2] Shi Peng. The ship detection based on optical remote sensing images[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010.  
施鹏. 基于光学遥感图像的舰船目标自动检测技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [3] Shi Z W, Yu X R, Jiang Z G, *et al.* Ship detection in high-resolution optical imagery based on anomaly detector and local shape feature[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4511-4523.
- [4] Liu Jin, Yang Jie, Pang Ruifan, *et al.* A method for fast ship detection and recognition in sea-sky background based on multi-scale feature cluster[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(1): 111-116.  
刘进, 杨洁, 庞瑞帆, 等. 一种基于多尺度特征簇的舰船目标快速定位与识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 111-116.
- [5] He Sihua, Yang Shaoqing, Shi Aiguo, *et al.* Detection of ship target under sea background based on texture high-order fractal feature[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(4): 79-82.  
何四华, 杨绍清, 石爱国, 等. 纹理高阶分形特征在海面舰船目标检测中的应用[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(4): 79-82.
- [6] Hu J, Gao J B, Posner F L, *et al.* Target detection within sea clutter: a comparative study by fractal scaling analyses[J]. Fractals-complex Geometry, Patterns, and Scaling in Nature and Society, 2006, 14(3): 187-204.
- [7] An Yu, Wang Xiaofei, Xia Xuezi, *et al.* Detection of sea battlefiled's ship targets in optical remote sensing images[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2015, 48(4): 568-573.  
安戡, 王小非, 夏学知, 等. 海战场光学遥感图像舰船目标检测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(4): 568-573.
- [8] Guo Shaojun, Lou Shuli, Liu Feng. Multi-ship saliency detection via patch fusion by color clustering[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1807-1817.  
郭少军, 娄树理, 刘峰. 应用颜色聚类图像块的多舰船显著性检测[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7): 1807-1817.

- [9] Itti L, Koch C, Niebur E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [10] Zhang L, Tong M H, Marks T K, *et al.* Sun: a Bayesian framework for saliency using natural statistics[J]. Journal of Vision, 2008, 8(7): 32.
- [11] Cheng M M, Zhang G X, Mitra N J, *et al.* Global contrast based salient region detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 569-582.
- [12] Huang F, Qi J Q, Lu H C, *et al.* Salient object detection via multiple instance learning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(4): 1911-1922.
- [13] Wang L Z, Wang L J, Lu H C, *et al.* Saliency detection with recurrent fully convolutional networks[C]. European Conference on Computer Vision, 2016: 825-841.
- [14] Otazu X, Parrage C A, Vanrell M. Toward a unified chromatic induction model[J]. Journal of Vision, 2010, 10(12): 5.
- [15] Murray N, Vanrell M, Otazu X, *et al.* Saliency estimation using a non-parametric low-level vision model[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011: 433-440.
- [16] Goferman S, Zelnik-Manor L, Tal A. Context-aware saliency detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012, 34(10): 1915-1926.
- [17] Erdem E, Erdem A. Visual saliency estimation by nonlinearly integrating features using region covariances[J]. Journal of Vision, 2013, 13(4): 11.
- [18] Hou X D, Zhang L Q. Saliency detection: a spectral residual approach[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007: 18-23.
- [19] Duan L J, Wu C P, Miao J, *et al.* Visual saliency detection by spatially weighted dissimilarity[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2011: 473-480.
- [20] Cheng M M, Zhang G X, Mitra N J, *et al.* Global contrast based salient region detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 569-582.
- [21] Yang linna, An Wei, Lin Zaiping, *et al.* Small target detection based on visual saliency improved by spatial distance[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0715004.  
杨林娜, 安玮, 林再平, 等. 基于空间距离改进的视觉显著性弱小目标检测[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0715004.