

文章编号: 1001-3806(2018)03-0379-06

## 基于视觉显著模型的遥感图像舰船快速检测

孙越娇<sup>1,2</sup>, 雷武虎<sup>1,2\*</sup>, 胡以华<sup>1,2</sup>, 赵楠翔<sup>1,2</sup>, 任晓东<sup>1,2</sup>

(1. 国防科技大学 电子对抗学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 合肥 230037; 2. 国防科技大学 电子对抗学院 电子制约技术安徽省重点实验室, 合肥 230037)

**摘要:** 为了降低传统高分辨率海面遥感图像舰船目标检测方法的计算复杂度, 提高检测速度, 在舰船目标检测中引入了基于直方图对比度的视觉显著模型和空间降维算法, 提出一种新的高分辨率海面遥感图像舰船目标快速检测算法。首先对高分辨率遥感图像进行空间降维, 然后计算降维图的视觉显著图, 突出感兴趣目标区域, 最后利用最大类间方差法分割视觉显著图以获取舰船目标候选区域。结果表明, 目标检测所消耗的时间减小为原来的 10% ~ 12%, 弱化了复杂海面纹理背景对目标检测的影响。该研究提高了高分辨率遥感图像舰船目标的检测效率。

**关键词:** 图像处理; 舰船检测; 视觉显著; 空间降维; 遥感

中图分类号: TP751

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.03.017

## Rapid ship detection in remote sensing images based on visual saliency model

SUN Yuejiao<sup>1,2</sup>, LEI Wuhu<sup>1,2</sup>, HU Yihua<sup>1,2</sup>, ZHAO Nanxiang<sup>1,2</sup>, REN Xiaodong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Pulsed Power Laser, Electronic Engineering Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Electronic Restriction, Electronic Engineering Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In order to reduce the computational complexity of ship target detection methods for sea surface remote sensing images of traditional high resolution and improve the speed of detection, combined with visual salience algorithm based on histogram contrast and spatial dimension reduction algorithm, a new ship target fast detection algorithm for sea surface remote sensing images of high resolution was proposed. Firstly, spatial dimension reduction of high resolution remote sensing images was carried out. The saliency map was calculated and the interest area of the target area was highlighted. At last, the visual salient image was segmented by the method of maximum inter class variance to obtain the candidate region of the ship target. The results show that the time consumed by the target detection is reduced to 10% ~ 12% of the original. The influence of complex sea surface texture background on target detection is weakened. The research improves ship target detection efficiency for high resolution remote sensing images.

**Key words:** image processing; ship detection; visual salience; spatial dimension reduction; remote sensing

## 引言

遥感图像目标检测与识别一直是遥感图像处理和模式识别领域研究的热点课题, 而舰船作为海上运输载体和重要的军事目标, 其自动检测与识别具有非常重要的现实意义, 无论在民用还是军事领域都有着广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

近年来, 随着对地观测技术的飞速发展, 卫星遥感

进入了一个前所未有的新阶段, 可利用的卫星遥感图像数据迅速增长, 为海域侦察和舰船目标监视提供了极为丰富的数据源。对于由卫星、无人机等侦察平台在海洋背景下获取的海量的大幅面可见光图像数据而言, 若仅仅依靠人工目视判读会出现工作量大、效率低、重复性高、主观性强、成本高等问题, 无法满足现代社会对高效信息的需求。因此, 为提高工作效率, 研究海洋背景下目标的快速自动检测很有必要。

当前, 许多学者都深入研究了海洋背景下舰船目标检测技术。参考文献[2]中利用水体与舰船目标的灰度差异进行图像分割, 获取舰船目标候选区域。参考文献[3]中通过自适应定向正交投影的高斯分解法来拟合海洋区域直方图, 并采用改进的信息熵极小误

作者简介: 孙越娇(1993-), 女, 硕士研究生, 主要从事遥感图像处理方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: loveleehom23@163.com

收稿日期: 2017-07-05; 收到修改稿日期: 2017-11-01

差分割算法进行图像分割。参考文献[4]中利用形态学对比度法在水域中进行目标检测。参考文献[5]中利用目标的灰度统计特性和目标的空间结构信息,提出一种基于标准差特征平面 contrast box 滤波的舰船目标检测方法。参考文献[6]中利用水体与舰船目标的类高阶梯度差异进行图像分割,实现舰船的检测。以上方法均属于基于统计特征的检测方法。该方法需要对整幅图像进行全局分析,计算复杂度比较高,且一般适用于平静海面情况。对于复杂海面情况(如存在海浪、云雾、阴影、噪声等干扰或水体较亮),容易产生虚警和漏警。参考文献[7]中则利用舰船目标边缘特征显著的特性,线性组合原始灰度和边缘强度图,并进行 Otsu 自适应阈值分割。但是该方法仅在海面平静且舰船与海面对比度明显时,效果较好,对于复杂海面情况不适用。

作者将视觉关注模型与空间降维方法引入高分辨率海面遥感图像的舰船目标检测中,在大幅提高了检测速度的同时,还降低了复杂海面背景对舰船检测的影响。

### 1 高斯金字塔

高斯金字塔<sup>[8,9]</sup>的实质是通过高斯平滑和亚采样获得一些列下采样图像,其公式表示如下:

$$G_l(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) G_{l-1}(2i + m, 2j + n) \quad (1)$$

式中,  $l$  为高斯金字塔层数,且  $1 \leq l \leq N$ ,  $G_l(i, j)$  为第  $l$  层高斯金字塔图,  $G_0(i, j)$  为原始图,  $i$  和  $j$  分别为图像行数与列数;  $\omega(m, n) = h(m)h(n)$  是  $5 \times 5$  具有低通特性的窗口函数,  $h$  是高斯密度分布函数;由此可以得到  $G_0, G_1, G_2, \dots, G_N$  构成的高斯金字塔图,其中  $N + 1$  为金字塔总层数,且上一层图像大小是下一层图像大小的  $1/4$ 。金字塔示意图如图 1 所示。

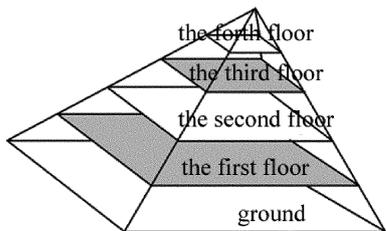


Fig. 1 Image of pyramid decomposition

### 2 视觉显著算法

传统的图像目标检测算法大多是对整幅图像进行全面搜索处理。而目标通常只占据图像中的很小一部分区域,因此,这种传统方法处理分析难度较大,计算

效率受到严重制约。自底向上的视觉显著算法能较好地解决这个问题。在面对一个复杂场景时,它能根据视觉刺激有选择性地分配计算资源,从而提高计算效率,降低分析难度。因此将视觉显著算法引入到遥感图像的目标检测中,有助于感兴趣目标的快速检测。

#### 2.1 Itti 视觉显著模型

1998年, ITTI, KOCH 等人在 KOCH 和 ULLMAN 的工作基础上提出基于显著性特征的注意力选择模型, Itti 模型<sup>[10]</sup>。

该模型首先利用高斯金字塔对输入图像进行线性滤波,然后提取初级视觉特征:颜色、亮度和方位,之后在多种尺度下使用中央周边差异操作产生颜色、亮度和方位特征图,并将这些特征图融合得到最终的显著图,最后利用生物学中胜者为王(winner-take-all, WTA)的竞争机制和返回抑制的方法来完成注意焦点的提取和转移。Itti 模型结构如图 2 所示。

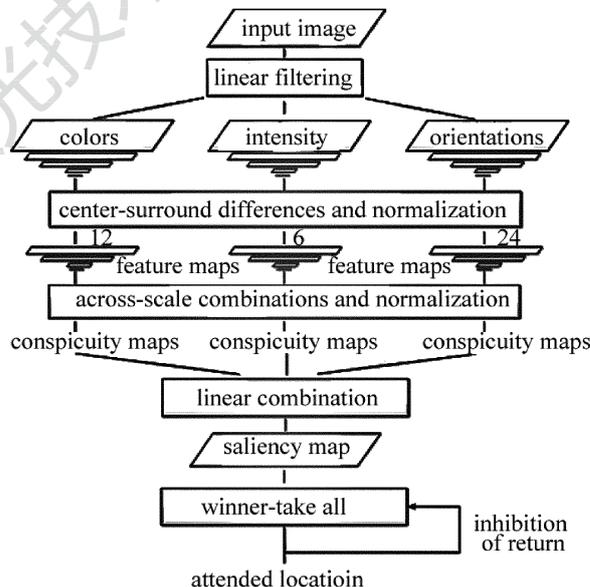


Fig. 2 General architecture of Itti model

#### 2.2 谱残差(spectral residual, SR)视觉显著模型<sup>[11]</sup>

从信息理论角度,信息可分为冗余部分和变化部分:

$$H_{im} = H_m + H_p \quad (2)$$

式中,  $H_{im}$  表示突出的部分,  $H_p$  则表示冗余的信息。通过去除图像冗余信息,就可以获得图像与众不同的部分,即显著目标。

对于给定图像  $I(x)$ , 其显著图的计算如下:

$$A(f) = \text{Re}(\mathcal{F}[I(x)]) \quad (3)$$

$$P(f) = \text{Im}(\mathcal{F}[I(x)]) \quad (4)$$

$$L(f) = \lg[A(f)] \quad (5)$$

$$R(f) = L(f) - h_n(f) * L(f) \quad (6)$$

$$S(x) = g(x) * \mathcal{F}^{-1} \{ \exp[R(f) + P(f)] \}^2 \quad (7)$$

$$h_n(f) = \frac{1}{n^2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $f$  表示输入的原始图像,  $\mathcal{F}$  和  $\mathcal{F}^{-1}$  分别表示傅里叶变换和傅里叶逆变换,  $A(f)$ ,  $P(f)$  分别为图像的振幅谱和相位谱,  $L(f)$  是对数振幅谱,  $h_n(f)$  是  $n \times n$  均值滤波的卷积核,  $R(f)$  代表谱残差,  $g(x)$  为高斯滤波器, 用来平滑显著图, 以获取更好的视觉效果。最后由谱残差和相位谱反向傅里叶变换得到显著图  $S(x)$ 。

### 2.3 调频 (frequency-tuned, FT) 视觉显著模型

FT<sup>[12]</sup> 方法从频率的角度对图像进行分析。

令  $\omega_l$  为低频阈值,  $\omega_h$  为高频阈值, 为了强调最大的显著性目标,  $\omega_l$  必须非常低, 这也有助于突出整体显著性区域; 为了显著性目标具有良好的边界,  $\omega_h$  必须很高, 然而, 为了避免噪声和纹理图案, 需要忽略最高的频率。

FT 方法使用高斯函数差分 (difference of Gaussian, DoG)  $G(x, y)$  滤波器进行带通滤波。

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_1^2}\right) - \frac{1}{\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma_2^2}\right) \right] = G(x, y, \sigma_1) - G(x, y, \sigma_2) \quad (9)$$

当算子  $\rho = \sigma_1 : \sigma_2 = 1 : 1.6$  时, 是最令人满意的检测物体边缘的算子,  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  表示标准差,  $\rho$  限制了 DoG 的带宽。因此组合几个窄带通 DoG 滤波器得到足够大的  $[\omega_l, \omega_h]$ 。

$$\sum_{n=0}^{N-1} G(x, y, \rho^{n+1}\sigma) - G(x, y, \rho^n\sigma) = G(x, y, \sigma\rho^N) - G(x, y, \sigma) \quad (10)$$

可以通过选择具有大的比例  $K = \rho^N$  的 DoG 来获得应用几个带通滤波器的组合结果。取  $N = \infty$ , 则  $G(x, y, \sigma\rho^N)$  对图像的滤波就是计算整幅图像的平均值, 而  $\sigma$  取一个高的小的高斯核, 可以滤去一些噪声。

得到显著图  $S$  的计算方程为:

$$S(x, y) = \| I_\mu - I_{\omega_h}(x, y) \| \quad (11)$$

式中,  $I_\mu$  为图像的平均特征,  $I_{\omega_h}(x, y)$  是高斯模糊后的图像的特征,  $\| \cdot \|$  是  $L_2$  范数,  $L_2$  范数是欧氏距离。FT 方法使用的是 Lab 颜色空间, 每个像素的位置是一个  $[L, a, b]^T$  向量, 其中,  $L$  是亮度,  $a, b$  是两个颜色

通道。

### 2.4 基于直方图对比度 (histogram contrast, HC) 的视觉显著模型

HC<sup>[13-14]</sup> 是基于直方图对比度的方法, 它是根据像素间的颜色差异来分配显著值, 并产生具有全分辨率的显著性图像<sup>[15]</sup>。

图像  $I$  中的像素  $I_k$  的显著值被定义为:

$$S(I_k) = S(c_l) = \sum_{j=1}^n f_j D(c_l, c_j) \quad (12)$$

式中,  $c_l$  是像素  $I_k$  的颜色值,  $n$  是与  $c_l$  不同的颜色的数量,  $f_j$  是图像  $I$  中的颜色  $c_j$  的概率,  $D(c_l, c_j)$  为对应像素在 Lab 空间的距离度量。由于 3 维直方图计算量大, 对直方图进行简化。

2.4.1 基于直方图的算法加速 将每个通道的颜色量化到 12 个级别, 减少为  $12^3 = 1728$  种颜色。忽略出现频率较小的颜色, 选择高频出现的颜色至覆盖 95% 以上的像素, 剩下的小于 5% 的像素所占的颜色由直方图中距离最近的颜色所代替。

2.4.2 色彩空间平滑 虽然用颜色量化后的直方图计算对比度提高了效率, 但量化会产生瑕疵, 一些相似的颜色可能被量化为不同的值。因此, 为了减少这种随机性给显著性值计算带来的噪声, 采用平滑操作来改善每个颜色的显著性值。将每个颜色的显著性值替换为相似颜色 (用 Lab 距离测量) 显著性值的加权平均。选择  $m = n/4$  个最近邻颜色来改善颜色  $c$  的显著性值。

$$S(c)' = \frac{1}{(m-1)T} \sum_{i=1}^m [T - D(c, c_i)] S(c_i) \quad (13)$$

$$T = \sum_{i=1}^m D(c, c_i) \quad (14)$$

式中,  $T$  为颜色  $c$  和其  $m$  个最近邻颜色  $c_i$  的距离和。

### 3 舰船目标的快速检测

图 3 是引入空间降维和视觉显著模型后的高分辨率遥感图像舰船目标快速检测的流程图。

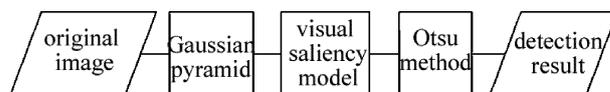


Fig. 3 Flow chart of rapid ship target detection

根据图 3 可得到舰船目标快速检测的算法步骤: (1) 根据图像的空间分辨率, 按照 (1) 式计算原始图像的高斯降维图  $G_i(i, j)$ ; (2) 将  $G_i(i, j)$  作为视觉显著模型的输入图像, 计算其视觉显著图; (3) 采用最大类间方差法<sup>[16-18]</sup> 对显著图进行分割, 获取目标。

#### 4 实验结果与分析

为了验证本文中算法的可行性,进行实验仿真。实验中所用软件为 Visual C++ 2010,硬件条件为 i5CPU,内存 2G。对海面舰船目标的快速检测,分别作了 2 组实验加以说明。其图像来源于 Google Earth。

##### 4.1 实验 1:视觉显著图的计算

对 3 组高分辨率舰船遥感图像分别采用 Itti, SR, FT, HC 方法进行显著图的计算。实验结果如图 4 所示。图 4a 为  $512 \times 512$  的平静海面背景下的舰船目标遥感图像,且目标与海面对比度明显;图 4b 为  $512 \times 512$  的不平静海面背景下的舰船目标遥感图像,且目标与海面对比度不明显;图 4c 为  $1024 \times 600$  的多舰船目标遥感图像。

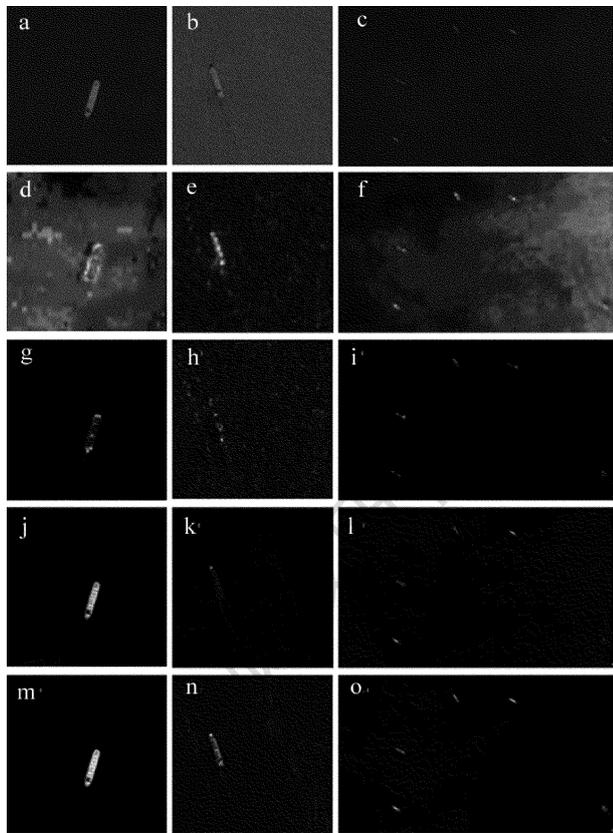


Fig. 4 Different saliency map

a ~ c—original image d ~ f—Itti saliency map g ~ i—SR saliency map  
j ~ l—FT saliency map m ~ o—HC saliency map

对图 4a ~ 图 4c 做图像多次实验,记录其平均处理时间,如表 1 所示。

综合分析实验结果发现,3 组图像的 Itti 显著图效果都较差,背景复杂,且目标与背景区分度小,不利于目标的分割,此外 Itti 算法计算复杂度高,处理时间较其它 3 重算法相比最长;SR 显著图的优点是计算简

Table 1 The processing time of different algorithms

	the processing time/ms			
	Itti	SR	FT	H
the first image ( $512 \times 512$ )	2271.4	126.1	106.8	64.7
the second image ( $512 \times 512$ )	2390.0	129.2	110.3	69.5
the third image ( $1024 \times 600$ )	4895.2	286.9	235.7	106.1

单、速度快,但是只能粗略的显示目标,且不能克服物体表面纹理的影响,不利于目标整体的分割(如第 1 幅图像的 SR 显著图其舰船内部纹理影响目标突显的完整性);FT 和 HC 算法的计算时间都较快,且两种方法在目标的突显等方面具有明显的优势,但 HC 算法在计算时间和显著区域的一致高亮上略优于 FT 算法。

##### 4.2 实验 2:基于视觉显著图的舰船目标快速检测

分别计算实验 1 中 3 幅图像的高斯降维图,并依次计算每幅图像的第 2 层高斯降维图的 HC 显著图,最后对 HC 显著图采用最大类间方差法算法分割检测目标。在实际可见光海面遥感图像舰船目标检测中,根据图像的分辨率及目标具体情况,可进行不同层次的高斯降维图的计算。高斯降维的层数越多,检测速度越快,但是图像越模糊,若层数太多会导致检测效果变差。考虑到本文中使用的图像的分辨率及目标情况,因此,本文中计算到第 2 层高斯降维图。第 1 幅图和第 2 幅图两层高斯降维后大小由  $512 \times 512$  变为  $128 \times 128$ ,第 3 幅图两层高斯降维后大小由  $1024 \times 600$  变为  $256 \times 150$ ,降维后的图像为原图像的  $1/16$ 。实验结果如图 5 ~ 图 7 所示。

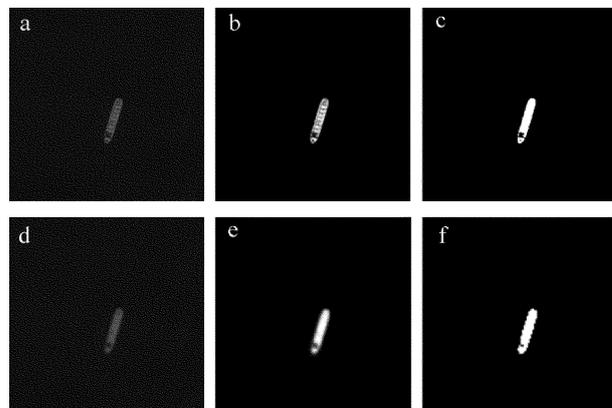


Fig. 5 Comparison of ship detection results before and after dimension reduction of Fig. 4a

a—original image b—HC saliency map c—the result of segmentation  
d—the reduced dimension image e—HC saliency map after dimension reduction  
f—the result of segmentation after dimension reduction

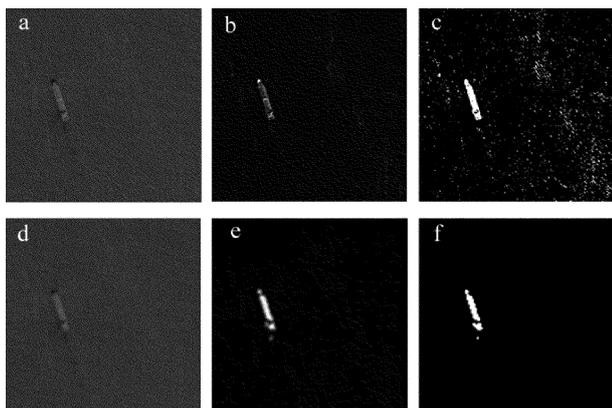


Fig. 6 Comparison of ship detection results before and after dimension reduction Fig. 4b

a—original image b—HC saliency map c—the result of segmentation d—the reduced dimension image e—HC saliency map after dimension reduction f—the result of segmentation after dimension reduction

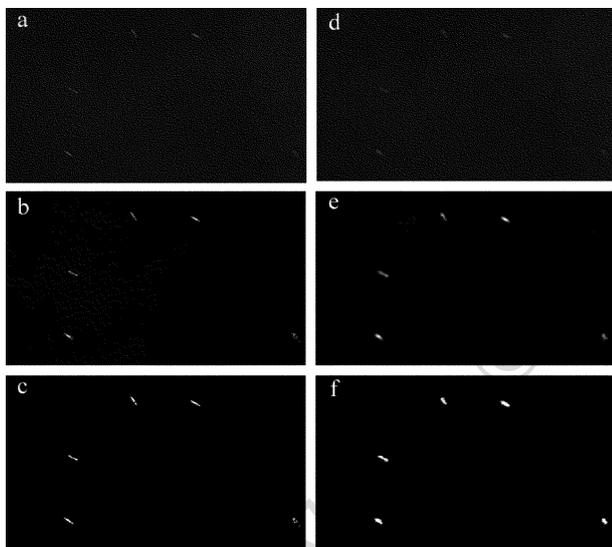


Fig. 7 Comparison of ship detection results before and after dimension reduction of Fig. 4c

a—original image b—HC saliency map c—the result of segmentation d—the reduced dimension image e—HC saliency map after dimension reduction f—the result of segmentation after dimension reduction

图 5 ~ 图 7 中分别给出了空间降维策略在不同的高分辨率遥感图像中的目标检测结果。从图中所显示的结果不难发现,针对高分辨率遥感影像,降维后的目标检测结果与没有进行降维处理前基本一致,并且,对于海面不平静的复杂纹理背景遥感图像,降维处理能减小背景对目标检测的影响(如图 6 所示)。

从表 2 可以看出,与直接对遥感图像进行基于 HC 视觉显著的目标检测相比,本文中在计算高斯降维图后进行基于 HC 视觉显著的目标检测,最终检测的运行时间缩减为原来的 10% ~ 12%,效率明显提高。

Table 2 Comparison of target detection time

	original image/ms	Gaussian dimension reduction image/ms
the first image	73.4	8.9
the second image	78.4	9.1
the third image	121.9	12.6

综上所述,作者的算法利用高斯降维方式在提高检测效率的前提下,通过视觉显著图的计算,能很好的突显舰船目标区域,实现海洋背景下舰船的快速检测。

## 5 结 论

传统的高分辨率海面遥感图像舰船目标的检测方法大都采用滑动窗口对整幅图像进行全面搜索,计算复杂度较高。对典型的几种视觉显著模型进行实验对比分析后,将基于直方图对比度的视觉显著模型(HC 视觉显著模型)引入高分辨率遥感图像的舰船目标检测中,提出了一种新的基于视觉显著与空间降维的高分辨率遥感图像舰船目标检测算法。实验结果表明,该方法通过空间降维策略不仅使目标检测所消耗的时间减小为原来的 10% ~ 12%,而且弱化了复杂海面纹理背景对目标检测的影响,充分证明了该算法的有效性,具有理论意义与实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG Zh. A study on harbor target recognition in high resolution optical remote sensing image [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2005:79-84 (in Chinese).
- [2] WANG M, LUO J Ch, MING D P. Extract ship targets from high spatial resolution remote sensed imagery with shape feature [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, 30(8): 685-688 (in Chinese).
- [3] CHU Zh L, WANG Q H, CHEN H L, et al. Ship auto detection method based on minimum error threshold segmentation [J]. Computer Engineering, 2007, 33(11): 239-241 (in Chinese).
- [4] XIAO L P, CAO J, GAO X Y. Detection for ship targets in complicated background of sea and land [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(6): 6-10 (in Chinese).
- [5] ZHAO Y H, WU X Q, WEN L Y, et al. Ship target detection scheme for optical remote sensing images [J]. Opto-Electronic Engineering, 2008, 35(8): 102-106 (in Chinese).
- [6] XU J, XIANG J Y, ZHOU X, et al. A target segmentation algorithm based on feature field [J]. Infrared and Laser Engineering, 1998, 27(2): 21-24 (in Chinese).
- [7] ZHU C, ZHOU H, WANG R, et al. A novel hierarchical method of ship detection from spaceborne optical image based on shape and texture features [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(9): 3446-3456.
- [8] WANG F Ch, ZHANG M, GONG L M, et al. Fast detection algorithm for ships under the background of ocean [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(5): 602-606 (in Chinese).

- [9] ZHANG L B, WANG P F. Fast detection of regions of interest in high resolution remote sensing image [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7):714001 (in Chinese).
- [10] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1998, 20(11):1254-1259.
- [11] HOU X, ZHANG L. Saliency detection: a spectral residual approach [C]// Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2007. New York, USA:IEEE, 2007:1-8.
- [12] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, *et al.* Frequency-tuned salient region detection[C]// Computer Vision and Pattern Recognition CVPR 2009. New York, USA:IEEE, 2009:1597-1604.
- [13] CHENG M M, ZHANG G X, MITRA N J, *et al.* Global contrast based salient region detection[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New York, USA:IEEE, 2011:409-416.
- [14] CHENG M M. Saliency and similarity detection for image scene analysis [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012:31-53 (in Chinese).
- [15] WEI Y. Research on image salient region detection methods and applications[D]. Ji'nan: Shandong University, 2012:35-46 (in Chinese).
- [16] WANG Y W, LIANG Y Y, WANG Zh H. Otsu image threshold segmentation method based on new genetic algorithm[J]. Laser Technology, 2014, 38(3):364-367 (in Chinese).
- [17] WEI X F, LIU X. Research of image segmentation based on 2-D maximum entropy optimal threshold[J]. Laser Technology, 2013, 37(4):519-522 (in Chinese).
- [18] ZHANG J B, YANG H X, ZHOU T T, *et al.* Improved segmentation method of 2-D Otsu infrared image [J]. Laser Technology, 2014, 38(5):713-717 (in Chinese).

《激光技术》编辑部

版权所有 ©