

文章编号 1004-924X(2017)05-01300-12

基于视觉显著性的无监督海面舰船检测与识别

徐 芳^{1,2}, 刘晶红^{1*}, 曾冬冬^{1,2}, 王 宣¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:在航天航空光学遥感舰船目标检测中,受大气、光照、云雾和海岛等海面不确定条件的影响,传统的舰船检测方法存在检测效率低和可靠性差等问题,因此,本文提出一种无监督海面舰船目标自动检测方法。该方法以视觉显著性为依据,结合多显著性检测模型快速搜索海面目标,生成显著图后对其进行粗分割,对提取的目标切片做标记并进行精细分割,利用改进的 Hough 变换旋转目标主轴以保证目标对 Y 轴的对称性;对可能检测到的厚重云层和岛屿等伪目标使用梯度方向特征进行鉴别,通过判定目标在 360°范围内 8 个区间的梯度幅度统计值,确认舰船目标及去除伪目标。实验结果表明,该舰船检测方法能够成功提取海面上大小不同,位置随机分布的舰船目标,准确获取舰船目标的数量和位置信息,在大量真实光学遥感图像上的测试结果显示,本文方法检测准确率高于 93%,通过目标鉴别处理,剔除伪目标后,虚警率可低于 4%,鲁棒性较强。

关键词:计算机视觉;舰船检测;视觉注意机制;显著性区域;梯度方向特征

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1300

Detection and identification of unsupervised ships and warships on sea surface based on visual saliency

XU Fang^{1,2}, LIU Jing-hong^{1*}, ZENG Dong-dong^{1,2}, WANG Xuan¹

(1. Department of Airborne Optical Imaging and Measurement,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. The University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: liul577@126.com

Abstract: In target detection on aerospace optical remote sensing, due to the interference of uncertain conditions on sea surface such as atmosphere, solar radiation, cloud and mist, islands and others, traditional ship detection methods always have some defects such as low detection efficiency, poor reliability. Therefore, the author proposed an unsupervised ship automatic detection method. In this method, visual saliency was combined with multi-saliency detection model for fast searching of sea-surface targets; after saliency map was generated, a rough segmentation was conducted on it, then extracted target slice was marked and fine segmentation was implemented, subsequently, improved Hough transformation was used to rotate principal axis of target for ensuring the symmetry of targets to Y axis; the characteristics of gradient direction was applied to recognize phony targets such as thick clouds layer, islands and others that may be detected, the gradient and amplitude statistical value of

收稿日期:2016-08-24;修订日期:2016-10-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60902067);吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001)

those targets in 8 intervals on all directions were judged to identify target ships and warships and eliminate phony targets. The experimental result indicates that the detection method of ships and warships can be used to successfully extract target ships and warships which are in different size and random distributed on sea surface for obtaining accurate quantity and location information about them. In test on a large number of authentic optical remote sensing pictures, the detection accuracy rate of proposed method is higher than 93%, while the false alarm rate is lower than 4% through target identification and treatment and phony target elimination, which has strong robustness.

Key words: computer vision; detection on ships and warships; visual attention mechanism; saliency area; characteristics of gradient direction

1 引言

近年来,随着对地观测技术的飞速发展,涌现出了大批高空间分辨率的光学遥感成像卫星,它们可获得卫星亚米级分辨率的全色影像;而无人机等航空影像甚至可以获取近地高精度目标,航天航空遥感为海域目标检测和识别提供了极为丰富的数据源。舰船是海上监测和战时打击的重要目标,通过对其进行检测和识别可以监察重点海域的舰船分布情况,掌握敌方作战实力,分析海上作战情报,进行精确制导等;另外,还可以满足海上交通监管,反走私,海上搜救等实际工作的需要。实际应用中,由于拍摄距离远,云团、雾霾遮蔽,光照不均匀,舰船与海面亮度及颜色对比度不高,以及海杂波、小岛等的干扰,很容易导致检测产生虚警和漏检。因此,如何精准、快速、稳定地检测和提取海洋背景中的舰船目标,赢得尽可能多的反应时间与处理时间,已成为当前迫切需要解决的难题。传统光学遥感舰船检测方法大多基于灰度阈值分割^[1-3]和灰度统计^[4]。这类方法适用于海面纹理均匀,水体灰度较低且舰船与海面对比度较大的情况,但对一些复杂情况如存在大海浪,云层遮挡,加上舰船黑白极性等等,很容易导致虚警;还有人提出了基于分形模型的方法^[5],其利用自然背景和人造背景分形特征的不同进行检测,但在有云雾干扰时,背景自相似性降低,分形模型拟合误差较大;最后一种是基于机器学习的方法^[6-7],该方法识别准确性较高,但是需要预先制作模板,依赖先验知识。

基于视觉显著性的方法由于可以迅速找到与当前场景和任务相关的信息,近些年已成为舰船检测的研究热点^[8-9]。目前显著性检测方法主要分为基于空间域模型的方法和基于频域模型的方法,空间域模型有:ITTI模型^[10];AIM(Attention

based on Information Maximization)模型^[11];GBVS(Graph-Based Visual Saliency)模型^[12];CA(Context Aware)模型^[13];FT(Frequency-Tuned Saliency)模型^[14];HC(Histogram Contrast)模型^[15]等。该类模型通过提取及融合图像的多种特征进行检测。遥感图像中,目标相对较小,容易受海况,天气,光照等的干扰,背景抑制能力较弱,且耗时较大。而基于频域的显著性检测算法在计算速度和背景抑制方面具有明显优势,Hou等人提出了谱残差法(Spectral Residual,SR)^[16],这是首次提出基于频域分析的显著性检测模型;Guo等人在SR的基础上提出了四元傅里叶变换相位谱法(Phase Quaternion Fourier Transform, PQFT),可处理彩色图像的多通道特征,边缘检测性能较好,但目标内部连续性较差^[17];Li等人提出超复数频域变换(Hypercomplex Frequency Domain Transform, HFT)理论,该方法对目标整体性的检测效果较好^[18-19],但对背景抑制能力不强,而且对多个距离相近的目标区分能力较弱;还有人提出基于图像分块的检测方法^[20],在海杂波占据大部分区域的光学遥感图像中,单独分块会增大虚警率;而且,当存在厚重云层和小岛干扰时,前述方法的虚警率也会大大提高。文献^[21]使用图像配准以及非监督分类等方法去除云雾,但仍不能去除厚重云层。

针对上述问题,本文提出了一种基于视觉显著性的无监督海面舰船检测方法。该方法包括:目标预筛选和舰船目标鉴别。前半部分通过结合多显著性检测模型搜索海面舰船目标区域,可以更有效地抑制海面大面积云雾,海杂波背景干扰,增强了目标整体的连续性和目标间的可区分性,提高了对较小目标的检测能力。后半部分设计了一种实用的梯度方向特征方法,对检测到的目标加以鉴别确认,逐一剔除厚重云层,海岛和海岸线等虚假目标的干扰,保留真实舰船目标。该方法具有较强的目标表征能力,可适用于不同尺度的

舰船目标,由粗到精地实现了光学遥感图像中海面舰船目标的检测与识别。最后经定性和定量分析比较,验证了本文方法性能。

2 显著性检测及目标区域切片提取

2.1 显著性检测模型

自然图像的频域特性具有尺度不变性,Hou 基于此提出了简单快速的 SR 方法^[16],用以计算单通道灰度图像的显著性。接着,Li 提出了 HFT 方法对其进行扩展^[19],改进后的方法可检测彩色图像中的目标。该算法首先使用广义调谐的亮度 I ,红绿 C_{RG} 和蓝黄 C_{BY} 颜色特征构建四元数图像。再对四元数图像进行离散傅里叶变换,在频域内对幅度谱进行多尺度高斯平滑滤波,进而得到多尺度显著图;最终选出最佳显著图即可。

由于直接应用 HFT 方法检测遥感图像舰船目标时,对海面背景干扰的抑制能力较弱,且对多个目标检测时,目标区分性不强。因此,本文从颜色,频域变换和尺度选择几方面对 HFT 方法进行改进,并使用改进的 PQFT 方法对其进行融合修正,最终得到目标预检测结果。

2.1.1 改进 HFT 显著性模型

输入空间离散图像 $f(x, y)$,将图像从 RGB 颜色空间转换到 CIE Lab 模式空间,求解图像每个特征通道在整幅图像上的均值 I_m, a_m, b_m ,计算图像中各像素在各特征通道下与整幅图像各特征通道均值的距离,将原图像相应位置像素 $L(x, y), a(x, y), b(x, y)$ 值依次减去平均值,得:

$$L_d(x, y) = (L(x, y) - I_m), \quad (1)$$

$$a_d(x, y) = (a(x, y) - a_m), \quad (2)$$

$$b_d(x, y) = (b(x, y) - b_m). \quad (3)$$

将 L_d, a_d, b_d 作为输入图像的 3 个颜色特征,

则输入图像中每个像素位置处的四元数可表示为:

$$q(x, y) = L_d(x, y)u_1 + a_d(x, y)u_2 + b_d(x, y)u_3, \quad (4)$$

式中: u_1, u_2, u_3 是四元数的基,满足条件: $u_1^2 = u_2^2 = u_3^2 = -1, u_1 \perp u_2, u_2 \perp u_3, u_3 \perp u_1, u_3 = u_1 u_2$, 四元数特征顺序不影响显著性计算。

考虑到离散傅里叶变换后,在图像 4 个角处可能出现噪声,本文对四元数作离散余弦变换,而不是离散傅里叶变换:

$$Q[u, v] = DCT(q(x, y)). \quad (5)$$

用不同的高斯核函数对幅度谱进行平滑滤波,以抑制尖峰部分,增强显著部分,不同的幅度谱经平滑滤波后可构成一个谱尺度空间。定义频域变换后的幅度谱 A ,高斯核函数 G 以及谱尺度空间 Λ 如下:

$$A(u, v) = |Q[u, v]|, \quad (6)$$

$$G(u, v; k) = \frac{1}{2\pi 2^{2k-2}} e^{-(u^2+v^2)/(2^{2k-1})}, \quad (7)$$

$$\Lambda(u, v; k) = (G(\cdot, \cdot, \cdot; k)A)(u, v), \quad (8)$$

式中: k 是空间尺度参数,考虑到处理的实时性和实际的实验效果,令 $k=1, 2, 3$ 。

再进行离散余弦反变换后可得一系列显著性图 S_k ,根据熵最小准则选出最佳尺度显著图 $S'(x, y)$,经过平滑即得到改进后的显著图:

$$S_1(x, y) = g * (S'(x, y))^2, \quad (9)$$

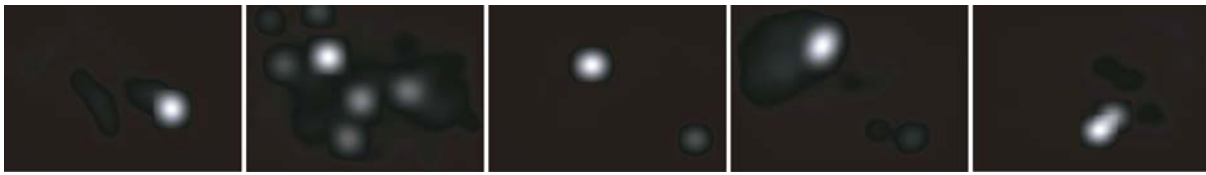
式中: g 是一个多尺度的高斯核函数。原始图像及使用原始 HFT 算法和改进后算法得到的显著图 $S_1(x, y)$ 如图 1 所示,可见使用原始 HFT 算法得到的显著图中,目标周围有多个像素被误划入显著图中,且受云层影响较大;而使用改进方法得到的显著度图中,原图像中海面杂波,云团,阴影等背景干扰得以很好的抑制,感兴趣目标得到凸显。



(a) 原始图像
(a) Original images



(b) 改进前算法的显著图
(b) Saliency maps by original HFT algorithm



(c)改进后算法的显著性图

(c)Saliency maps by improved algorithm

图 1 改进算法与原始算法的结果对比

Fig. 1 Comparison of process results by improved algorithm and original HFT algorithm

2.1.2 显著图融合修正

分析图 1 可发现,利用改进后算法得到的显著图中舰船目标会扩大一定的像素数,如果多个舰船目标距离较近,则可能出现目标混叠现象,从而不能有效区分目标的个数。为突出舰船目标的边缘信息,本文使用改进的 PQFT 算法对显著图 $S_1(x, y)$ 的结果进行修正。将广义调谐颜色模式改为 Lab 颜色模式,直接使用 L, a, b 3 个颜色特征构造四元数:

$$q(x, y) = L(x, y) u_1 + a(x, y) u_2 + b(x, y) u_3. \tag{10}$$

由于使用幅度谱可以得到不同方向上的强度,本文选用幅度谱的对数参与显著性计算,这与原 PQFT 方法仅考虑相位信息不同。本文特征包含亮度,颜色和方向信息。

本文算法步骤如下:将离散傅里叶变换变为离散余弦变换,如式(5)所示。

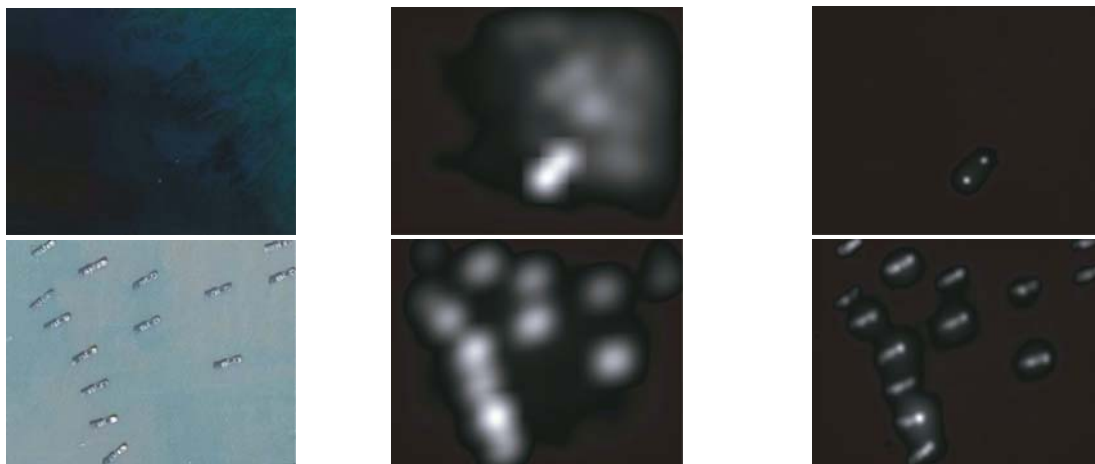
接着,计算离散余弦变换后的幅度谱的对数值:

$$AL = \log(A) = \log(|Q[u, v]|). \tag{11}$$

最后,经过反离散余弦变换和空域平滑后得到显著图 $S_2(x, y)$ 。为修正 $S_1(x, y)$ 中存在的问题,将 $S_2(x, y)$ 与显著图 $S_1(x, y)$ 做加权融合,融合前,先将两部分显著图分别进行归一化,得到 $S'_1(x, y)$ 和 $S'_2(x, y)$,对二者进行融合,公式如下:

$$S(x, y) = \omega_1 \cdot S'_1(x, y) + \omega_2 \cdot S'_2(x, y). \tag{12}$$

经过多次实验发现,设 $\omega_1 = 0.3, \omega_2 = 1 - \omega_1$ 时,既可有效区分目标,又能使目标保持完整。修正前后的效果图如图 2 所示。



(a)原始图像

(a)Original images

(b)修正前显著图

(b)Saliency maps before modification

(c)修正后显著图

(c)Saliency maps after modification

图 2 修正前后的显著性图

Fig. 2 Saliency maps before and after modification

由图 2 可知,通过本文方法处理后,舰船目标周围的背景干扰得到很好的抑制,之前产生的团

聚现象减弱,目标可区分性加强。

图 3(彩图见期刊电子版)是图 2 中两组图像改进前后显著图的能量分布密度图,只要找到可

以有效分离图 3(b)和图 3(d)中波峰的分割平面就可以提取舰船目标区域,通过比较也可以说明本文方法可以有效检测目标。

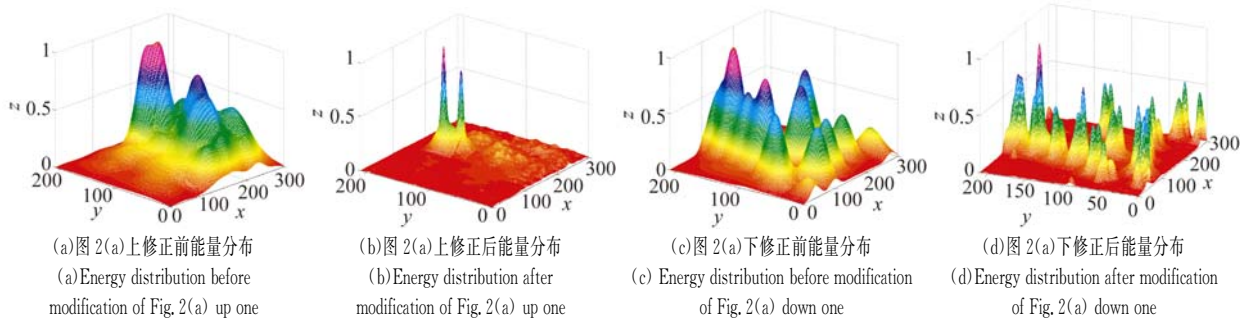


图 3 显著图的能量分布密度图

Fig. 3 Energy distribution of saliency maps

2.2 目标区域分割与切片提取

得到显著图后,根据显著图的灰度统计特性计算阈值 T ,之后对显著图进行二值分割。本文使用 Otsu 方法(大津法)对显著图进行粗分割,分离检测到目标与海面背景,如公式(13)所示:

$$S(x, y) = \begin{cases} 1, & S(x, y) \geq T \\ 0, & S(x, y) < T \end{cases} \quad (13)$$

计算二值图中每个分离目标区域的最小外接矩形,相应地,在原光学图像中标记。计算外接矩形的质心和长宽值,提取出带有目标的切片,将每个切片的纵横坐标在原始坐标位置上扩大 10 个像素,以保证完整性良好,且在后续精细分割时方便自动提取目标区域的前景范围,避免过分割等问题。

3 目标精细分割与鉴别

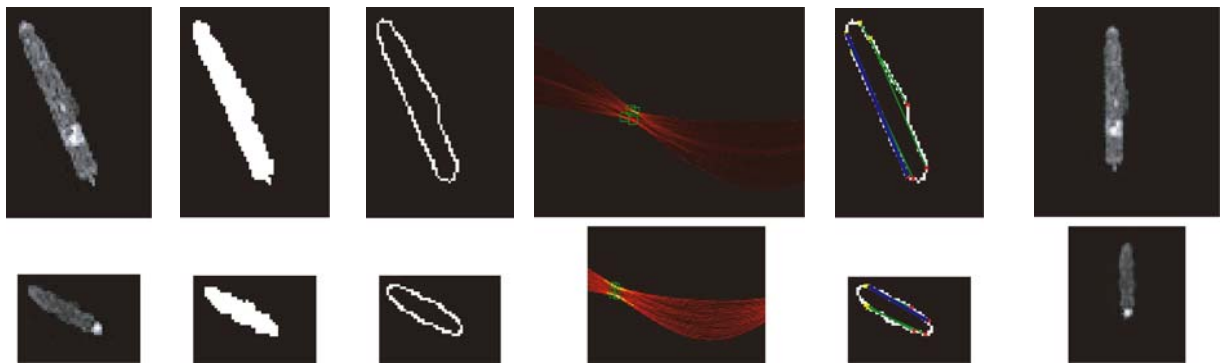
显著性检测虽然可以抑制一些薄云,海雾,阴影,海杂波等的干扰,但仍可能检测到厚重的云层,岛屿或海岸线等干扰物。此时需根据舰船与干扰物的有效特征剔除非舰船目标,该步骤对降低虚警率非常重要,但在一些文献中被较少考虑甚至没有考虑。光学遥感图像中检测到的干扰目标形状不规则,而舰船目标呈长条状且两条侧弦呈对称分布,形状特征较规律,本文使用梯度方向特征鉴别目标,鉴别前需对目标切片作精细分割,规则化等预处理。

3.1 自动精细目标分割

本步骤对多个单目标切片逐一进行小区域 GrabCut 精细分割,定义目标切片中的横坐标为 $(4, col-4)$,纵坐标为 $(4, row-4)$ 范围内的区域为前景,其余区域为切片的背景,其中: col 和 row 为图像的宽和高。通过该方法得到的坐标可自动初始化前景矩形框的位置,因目标切片中仅包含单个目标及周围小部分附属区域,一般可将终止分割迭代次数设为两次,如果海面环境复杂,或者目标切片较大(大于 $55 \text{ pixel} \times 55 \text{ pixel}$),则设为三次,即可实现非交互式分割。如果切片中存在舰船,则会得到舰船目标的精细分割结果;若有岛屿或者厚重云层,则分割目标区域呈不规则形状;若是背景,由于大部分背景为近似均匀分布,它们的亮度值为零或者接近于零,故对于这些目标切片可直接剔除。

3.2 规则化目标切片和梯度方向特征

精细分割后,对目标切片使用改进的 Hough 变换进行处理,以保证目标本身关于竖直轴对称。变换过程如图 4(彩图见期刊电子版)所示,其中,在第二步二值化处理中,原始 Hough 变换的是使用 Otsu 方法分割输入图像,与其不同,本文根据实际应用情况做了改进,将灰度化目标切片中像素值 < 30 的像素设为 0,其余设为 1,这样既可以有效去除目标周边的杂散点,又可以防止目标内部纹理明显时,本应沿边缘的直线向内部倾斜,保证后续旋转的准确性。

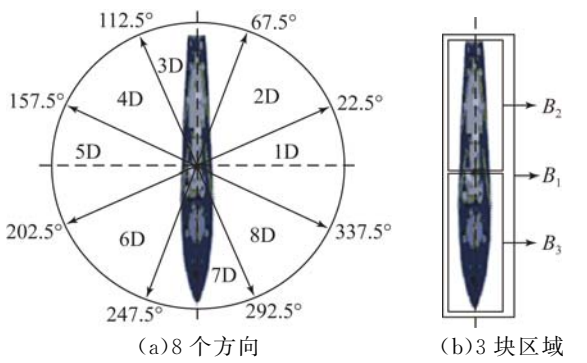


(a)输入图像 (b)二值化 (c)Canny 边缘 (d)Hough 变换 (e)计算斜率 (f)旋转对称
 (a)Input images (b)Binarization (c)Canny edges (d)Hough transform (e)Slope calculation (f)Rotation symmetry

图 4 Hough 变换过程

Fig. 4 Hough transformation process

对规则化切片中目标求梯度,具体方式如图 5。



(a)8 个方向 (b)3 块区域
 (a)Intervals of eight bins (b)Three blocks

图 5 方向和区域划分说明

Fig. 5 Illustration for bins and blocks

将 360°的梯度方向划分为 8 个 bins,如图 5

(a)所示,为更充分准确地鉴别目标,排除与舰船相似的伪目标,将经过对称处理的目标细分为 3 部分 B_1, B_2, B_3 ,如图 5(b)所示。分别计算 B_1, B_2, B_3 在 8 个 bins 上的梯度幅度统计特征,如图 6 所示。图 6 前两行为舰船目标的梯度幅值方向统计图像,它们的直方图分布很规律,第三行图像是云层和岛屿的梯度幅值方向统计图像,它们的分布没有规律。这是因为,舰船的两条长侧弦是对称分布的,其平行性受尺寸影响较小,基本沿舰船主轴呈对称分布,结果证明本文舰船目标鉴别方法可鲁棒地表征舰船目标特性。

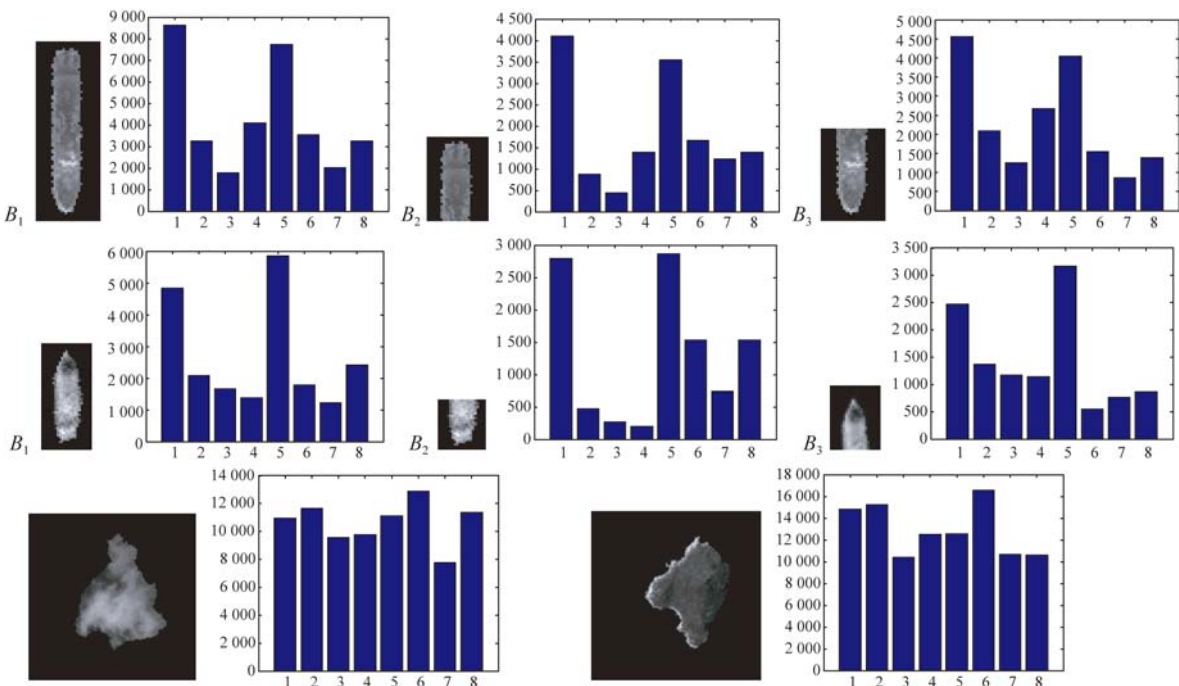


图 6 梯度方向直方图特征

Fig. 6 Histogram features of gradient directions

3.3 无监督舰船目标鉴别

一般来说,如果 B_1, B_2, B_3 的 8 方向梯度幅度满足如下条件即可严格判定其为舰船:

- (1) 1 bin 和 5 bin 的统计值应该高于其它的 bins;
- (2) 1 bin 和 5 bin 应该对称分布,近似等高。但在实际应用中,由于干扰因素的存在,使得计算出的梯度直方图不一定严格对称,因此本文适当放松限定条件,引入放松因子: $\alpha_1, \alpha_2, \gamma$, 令 $H = \{h_i, i=1, 2, 3, \dots, 8\}$, $H_f = \{h_1, h_5\}$, $H_p = \{h_2, h_3, h_4, h_6, h_7, h_8\}$, $\overline{H_f}$ 是 H_f 的平均值, $\overline{H_p}$ 是 H_p 的平均值,令其满足下面的条件: (1) $\frac{\overline{H_p}}{\min(H_f)} < \alpha_1$;
- (2) $\frac{\max(H_p)}{\max(H_f)} < \alpha_2$;
- (3) $\frac{\min(H_f)}{\max(H_f)} > \gamma$ 。

通过对大量图像中的舰船目标进行测试,取: $\alpha_1 = 0.6, \alpha_2 = 0.7, \gamma = 0.65$, 如果目标 B_1, B_2, B_3 的梯度幅值统计量同时满足上述 3 个条件,即可判定为舰船。

综上所述,本文算法的整体流程如下:

- (1) 输入图像和相应参数,融合多显著性检测方法计算得到凸显目标区域的显著图;
- (2) 对显著图使用大津法进行自适应粗分割;
- (3) 提取多个目标切片;
- (4) 对单目标切片实行自动 GrabCut 精细分割;

(5) 利用 Hough 变换使目标主轴平行于竖直方向;

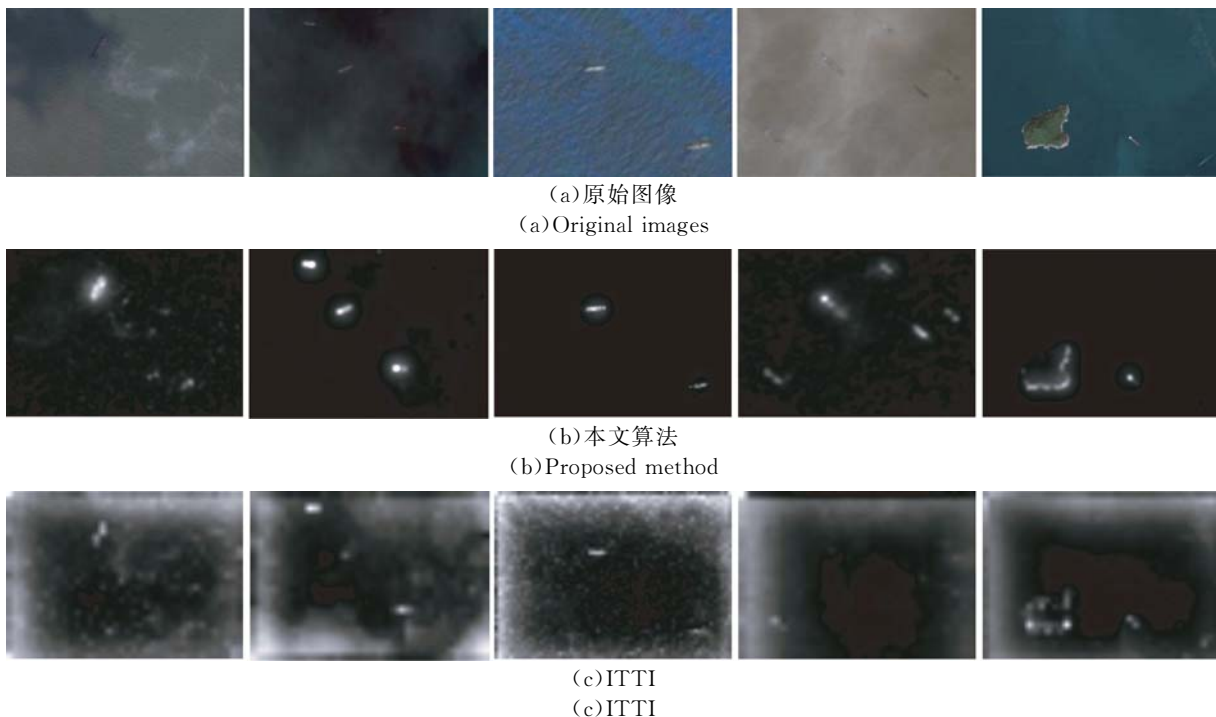
(6) 计算梯度方向特征,判断目标是否为舰船,是则输出为舰船,不是则剔除。

4 实验结果与分析

为评价本文舰船目标检测系统的性能,本文从 3 个方面做对比测试。实验用的 68 幅光学遥感图像数据来源于 Google Earth,所有图像分辨率为 300×210 ,共包含 167 个不同大小的真实舰船目标。硬件运行平台为 Intel 3.30 GHz CPU + 4.00 GB 内存,软件运行平台为 Matlab 2010a。

4.1 显著性检测方法的性能测试

本部分从主客观两方面对算法进行验证。主观上,直接对比不同方法计算得到的显著性图。图 7 列出了部分显著性检测结果,海面背景从左至右分别为:第一组海面有阴影遮蔽,第二组海面有云雾干扰,第三组海面杂波明显,第四组为黑极性舰船,与海面颜色对比度差异很小,有不均匀的海雾,且舰船大小和长度不同,第五组存在海岛。比较本文显著性检测方法与空间域和频域显著性方法的效果。



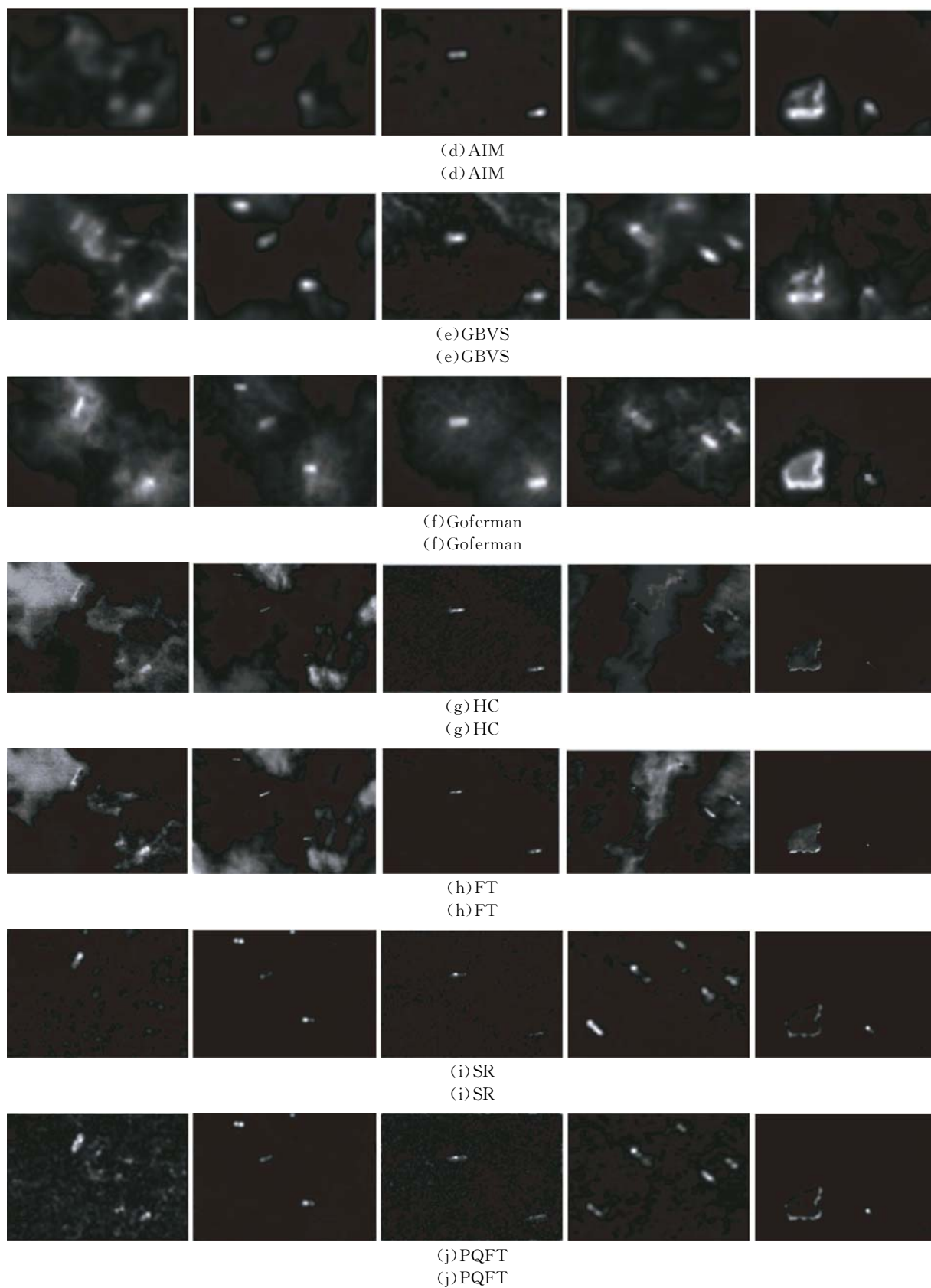


图 7 显著性检测对比图

Fig. 7 Comparison of saliency maps using different methods

从图 7 可见,空间域显著性检测方法对海面云雾,阴影,海面污染等的背景抑制能力较弱,而频域显著性检测方法对背景的抑制作用则更有效。本文提出的算法可有效抑制海杂波,海面云雾遮挡,而且对不同大小、不同颜色、单个或多个舰船都可以得到很好的检测效果。虽然 SR 和 PQFT 方法也可以较好地抑制背景干扰,但可以看到在每组显著图(图 7(i)、7(j))中二者的舰船目标区域均存在明显的间断或检测不完整的现象,而且舰船目标越大,间断越严重。本文方法得到的检测结果则较均匀,而且本文方法显著性区域会较原有舰船大小放大一定的范围,比 SR 和 PQFT 方法检测出的舰船完整性更好。最后一组图像,海岛也被检测出来了,这需要后续进行目标鉴别,剔除非舰船目标,降低虚警率。

建立实验用光学遥感图像基准 Ground Truth 图像库,人工标注出准确的舰船位置区域二值化图像,用 A 表示,显著图中粗分割检测到的目标区域的二值化图像,用 B 表示,用查全率(Recall)和查准率(Precision)来度量算法性能,它们的计算公式如下:

$$Recall = \frac{A \cap B}{A} = \frac{\sum_{(x,y)} A(x,y) B(x,y)}{\sum_{(x,y)} A(x,y)}, \quad (15)$$

$$Precision = \frac{A \cap B}{B} = \frac{\sum_{(x,y)} A(x,y) B(x,y)}{\sum_{(x,y)} B(x,y)}, \quad (16)$$

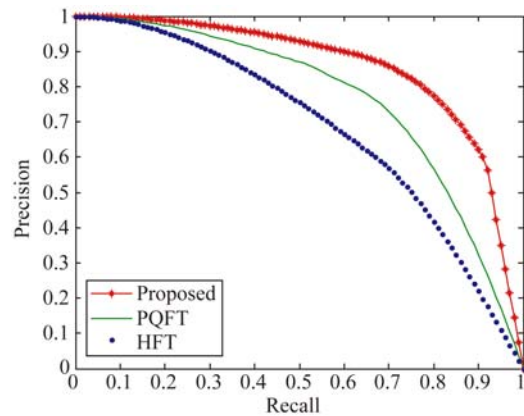
得到多幅图像的 Recall 和 Precision 值。二者的综合评价指标 F-Measure 定义为:

$$F-Measure = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{1 \cdot Precision + Recall}. \quad (17)$$

本文方法,PQFT 和 HFT 的检测结果如图 8 (彩图见期刊电子版)所示。

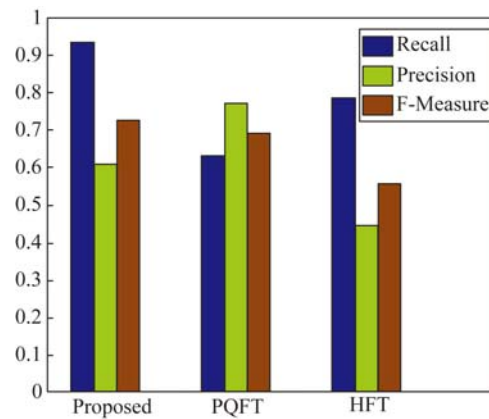
在图 8 中,因 HFT 的检测目标区域较大,所以 Precision 不高,另外,如果图像中目标大小相差较大,小目标很可能被淹没,影响其 Recall 值;而 PQFT 的 Precision 较高,但在检测较大目标时,检测区域可能会出现间断,导致其 Recall 值相对较低,而本文显著性检测方法综合了二者的优点,检测时将目标区域进行了一定程度的放大,这虽然会使 Precision 相对降低,但完整检测舰船

的能力增强,便于后续处理。



(a) Precision-Recall 曲线

(a) Precision-Recall curves



(b) F-Measure 柱状图

(b) Histogram of F-Measure

图 8 不同方法的显著性检测结果对比

Fig. 8 Saliency detection contrast of different methods

4.2 目标鉴别后的检测性能测试

鉴别目标后,使用检测正确率和虚警率对本文舰船目标检测算法进行定量评价:

检测正确率:

$$Cr = \frac{N_{tt}}{N_t}, \quad (18)$$

虚警率:

$$Far = \frac{N_{fa}}{N_{tt} + N_{fa}}, \quad (19)$$

式中: N_t 是图像中正确目标的总个数, N_{tt} 是正确检测的目标个数, N_{fa} 为虚警个数。为客观评价本文方法的有效性,将其与两种无监督舰船检测方法(文献[3]和文献[4])的检测结果进行对比。为评价本文目标鉴别方法的有效性,比较直接使用本文显著性检测方法不带目标鉴别和带目标鉴别两

种情况的检测结果,具体实验数据如表 1。

表 1 不同方法的检测结果

Tab. 1 Detection results of different methods

方法	Nt	Ntt	Nfa	$Cr/\%$	$Far/\%$
方法 [3]	167	137	33	82.036	19.412
方法 [4]	167	143	29	85.628	16.86
不带目标鉴别	167	157	16	94.012	9.249
带目标鉴别	167	156	6	93.413	3.704

实验结果显示,带有目标鉴别过程的方法精度更高。方法[3]提出一套完整的海面舰船检测处理链,使用统计和形态学滤波的方法提取目标区域。然而,该步骤在获得舰船目标的同时也将产生较多干扰,虽然后续使用小波变换等方法可去除部分干扰,但对复杂海面的效果仍不理想;方法[4]通过分析海面灰度分布直方图突出舰船目标等异常信号,并且利用目标紧致性和长宽比等鉴别目标,检测性能优于方法[3],但处理存在形状和纹理都不规则的云团时,检测效果会受到较大影响,而且鉴别方法比较简单粗略;当仅使用本文的显著性检测方法而不经目标鉴别处理时,

虽然也可以有效抑制云雾,杂波等的干扰,但仍不能有效去除厚重云层和海岛等干扰;本文方法进行目标鉴别后,得益于显著性对海面背景干扰的抑制和梯度方向特征对舰船目标的准确表征,相比于文献[3]和[4]方法及不带目标鉴别的情况,其具有更佳的检测准确率和虚警率。虽然目标鉴别后,检测准确率降低了 0.599%,但虚警率也降低 5.545%,这进一步说明了本文方法的有效性。

在处理时间上,使用本文显著性检测方法处理一幅图像的平均时间是 1.693 s,在鉴别阶段,以 55×92 大小的目标切片为例,各辅助算法的运行时间如表 2 所示。

表 2 辅助算法用时

Tab. 2 Running times of auxiliary algorithms (s)

显著图粗分割	精细分割	Hough 变换	梯度特征提取
0.097	0.025	0.448	0.164

检测结果如图 9 所示,最终检测图例说明本文提出的舰船检测方法对于海雾,阴影,厚重云层,岛屿等干扰具有鲁棒性,而且对海面上不同尺寸,位置随机分布的舰船具有较高的检测精度。



图 9 部分检测结果

Fig. 9 Part of detection results of proposed method

4.3 模型参数测试

本部分分析了参数 $\omega_1, \alpha_1, \alpha_2, \gamma$ 的取值对 Cr 和 Far 的影响,结果见图 10。

权重参数 ω_1 可以反映改进后的 HFT 和 PQFT 模型对本文显著性检测方法的贡献, ω_1 越大,检测后目标区域的完整性越好,但目标间可区分性较差, ω_1 越小,则相反,易产生虚警,改变 ω_1 ,观察 Cr 和 Far 的变化趋势,测试结果如图 10(a)所示。放松因子 $\alpha_1, \alpha_2, \gamma$ 是对目标判定的

关键约束,本文采用单独变化某一个参数,将另外两个值固定为已假设的经验值的测试方法。当 α_1 很小时,比值约束严格,判定为正确目标的数量少,对应的 Cr 低,而此时虚警个数很高, Far 较高,随着 α_1 的增大,判定条件放宽, Cr 升高, Far 降低,当 α_1 很大时,虚警数量很高, Far 升高。 γ 反映了 h_1 和 h_5 中较小统计值与较大统计值的比值约束, γ 越小,条件约束越宽松,反之,越严格, Cr 随着 γ 的增大先增大后减小, Far 随着的 γ 的

增大而减小。 α_2 为细节判别约束,对检测结果的敏感性较差,与参数 γ 相互影响。根据实验经验

将以上参数设置为 $\alpha_1=0.6, \alpha_2=0.7, r=0.65$, 此时可以较好地平衡 Cr 和 Far 两个指标。

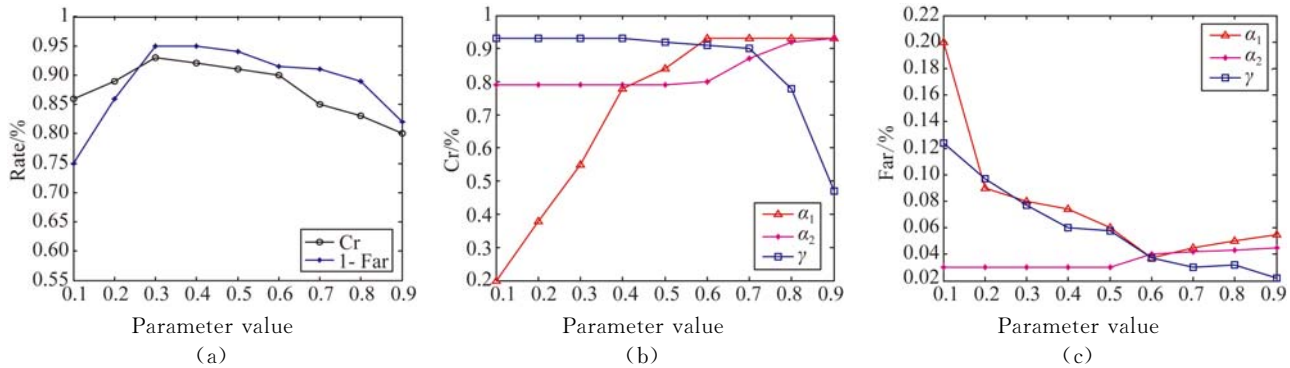


图 10 不同参数下的检测性能

Fig. 10 Detection performances on different parameters

5 结 论

为准确高效地检测和提取复杂海面背景下不同大小的舰船目标,本文提出一种结合多显著性模型的检测方法搜索海面目标区域,相较于当前典型显著性检测方法,本文方法能获得令人满意的检测结果,在多幅光学遥感图像上的检测正确率为 94.012%,虚警率为 9.249%;对于可能出现的厚重云层和岛屿等干扰,本文设计了一种实用

的梯度方向特征法用以表征目标的结构分布信息,对检测到的目标进行鉴别,去除伪目标后,可将虚警率降为 3.704%;另外,本文方法对单幅图像的平均检测时间为 1.693 s,处理大小为 55×92 时的目标切片约需 0.734 s,经优化可实现大范围海域舰船目标的快速定位和数量确定。下一步可将该方法与无人机或卫星平台姿态数据相结合,计算出各个舰船的位置、航向等情报信息,该方法为舰船目标的分类识别打下了基础。

参考文献:

- [1] GUO W Y, XIA X ZH, WANG X F. A remote sensing ship recognition method based on dynamic probability generative model [J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(14): 6446-6458.
- [2] 王刚, 陈永光, 杨锁昌, 等. 采用图像块对比特性的红外弱小目标检测 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(5): 1424-1433.
WANG G, CHEN Y G, YANG S CH, *et al.*. Detection of infrared dim small target based on image patch contrast [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1424-1433. (in Chinese)
- [3] CORBANE C, NAIMAN L, PECOUL E, *et al.*. A complete processing chain for ship detection using optical satellite imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(22): 5837-5854.
- [4] YANG G, LI B, JI S F, *et al.*. Ship detection from optical satellite images based on sea surface analysis [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(3): 641-645.
- [5] 苏丽, 庞迪. 全景海域图像中的圆形海天线提取 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(11): 3279-3288.
SU L, PANG D. Circle sea-sky-line extraction in panoramic images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(11): 3279-3288. (in Chinese)
- [6] TANG J X, DENG C W, HUANG G B, *et al.*. Compressed-domain ship detection on spaceborne optical image using deep neural network and extreme learning machine [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(3): 1174-1185.
- [7] 王丽, 魏巍, 吴林刚, 等. SAR 图像目标识别新方法 [J]. *液晶与显示*, 2014, 29(3): 429-434.
WANG L, WEI W, WU L G, *et al.*. Novel target recognition method for SAR images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014,

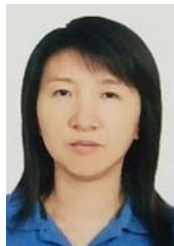
- 29(3): 429-434. (in Chinese)
- [8] QI S X, MA J, LIN J, *et al.*. Unsupervised ship detection based on saliency and S-HOG descriptor from optical satellite images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7):1451-1455.
- [9] ZHANG Y G, ZHANG L B, YU X C. Region of interest extraction based on multiscale visual saliency analysis for remote sensing images [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9, 095050-1-095050-15.
- [10] 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.
- [11] BRUCE N D B, TSOTSOS J K. Saliency based on information maximization [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2006, 18(5): 155-162.
- [12] HAREL J, KOCH C, PERONA P. Graph-based visual saliency [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2006, 19: 545-552.
- [13] STAS G, LIHI Z M, AYELET T. Context-aware saliency detection [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(10): 1915-1926.
- [14] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, *et al.*. Frequency-tuned salient region detection [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1597-1604.
- [15] 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*, 2011, 37(3): 409-416.
- [16] HOU X D, ZHANG L. Saliency detection: a spectral residual approach [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, 2007: 1-8.
- [17] GUO C L, MA Q, ZHANG L M. Spatio-temporal saliency detection using phase spectrum of quaternion Fourier transform [C]. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Minneapolis, 2008: 1-8.
- [18] 杜慧, 张涛, 张叶, 等. 基于空频域结合的显著目标检测[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(9): 913-920. DU H, ZHANG T, ZHANG Y, *et al.*. Saliency detection based on frequency domain combined with spatial domain [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(9): 913-920. (in Chinese)
- [19] LI J, LEVINE M D, AN X J, *et al.*. Visual saliency based on scale-space analysis in the frequency domain [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 35(4): 996-1010.
- [20] 张颖颖, 张帅, 张萍, 等. 融合对比度和分布性的图像显著性区域检测[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 1012-1019. ZHANG Y Y, ZHANG SH, ZHANG P, *et al.*. Detection of salient maps by fusion of contrast and distribution [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4):1012-1019. (in Chinese)
- [21] 李炳燮, 马张宝, 齐清文, 等. Landsat TM 遥感影像中厚云和阴影去除[J]. *遥感学报*, 2010, 14(3):534-545. LI B X, MA ZH B, QI Q W, *et al.*. Cloud and shadow removal from Landsat TM data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2010, 14(3): 534-545. (in Chinese)
- [22] PROIA N, PAGÉ V. Characterization of a Bayesian ship detection method in optical satellite images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 226-230.

作者简介:



徐芳(1987—),女,山东日照人,博士研究生,2011年于吉林大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事航空航天成像目标检测与识别等方面的研究。E-mail: xufang59@126.com

导师简介:



刘晶红(1967—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于长春理工大学获得学士学位,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。E-mail: liu1577@126.com