

基于视觉显著性的海面舰船检测技术

丁鹏^{1,2}, 张叶¹, 贾平¹, 常旭岭¹, 刘让^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中科院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: 海面舰船检测技术有着特殊的军用以及民用意义, 为了在宽广且环境复杂多变的海面上快速、高效、精确地检测到舰船目标, 本文提出了一种基于多特征、多尺度视觉显著性的海面舰船检测方法. 该方法充分利用了四元数图像可在多个通道上同时进行操作, 节省操作时间, 并保证不同尺度特征之间关联性的特点; 除此之外, 该方法还利用人眼对不用大小的图像关注目标不同的特点对图像进行尺度大小变换以避免漏检. 该方法先用顶帽算法对原图进行简单的图像预处理以抑制云层、油污的干扰; 其次提取多种特征构成四元数图像进行舰船目标显著性检测; 在得到显著图后利用 OTSU 分割算法确定舰船所在的区域, 并在原图上标定、提取舰船目标. 通过在多种海面情况下分别进行实验分析, 实验结果表明该算法可以排除云、雾、油污等干扰, 精确、快速地检测到舰船目标, 真正率达 96.52%, 虚警率低至 2.11%, 相较于他显著性检测算法在舰船检测方面有明显的优势.

关键词: 舰船检测; 视觉显著性; PQFT 算法

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)01-0127-08

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.018

Ship Detection on Sea Surface Based on Visual Saliency

DING Peng^{1,2}, ZHANG Ye¹, JIA Ping¹, CHANG Xu-ling¹, LIU Rang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The ship detection technology is of special significance in both military and civilian level. In order to detect ship targets quickly, efficiently and accurately in a wide and complex sea surface environment, a new method for ship detection based on multi-features and multi-scale visual saliency is proposed. This method makes full use of features of the hyper-complex images which can be operated simultaneously in a number of channels, save operation time, and guarantee the characteristics of different scale characteristics. First, the method uses top-hat algorithm for image preprocessing of the original image to suppress the interference of clouds and oil. Secondly, a variety of features are extracted to form hyper-complex images to detect the significance of ship targets. When we get the last saliency map, we segment ships to ensure the target location by using the OTSU algorithm, and then we mark the ship target in the original image. We make the experimental analysis in several sea conditions, and experimental results show that the algorithm can eliminate fog, cloud and grease interfering with accurate detection of ship targets. In this algorithm, true rate meets 96.52% and the false alarm rate is as low as 2.11%. Compared to other saliency detection algorithm in ship detection, this algorithm has obvious advantages.

Key words: ship detection; visual saliency; PQFT algorithm

1 引言

我国海洋资源丰富且海域广阔, 与多个国家接壤, 周边环境复杂多变, 加强对领海的监控可有效地保障海洋权益, 保护国家安全. 舰船作为海上交通、资源勘探

的主要载体以及海军的主要战斗力量, 对其进行高效检测是非常必要的: 随着海洋探索力度以及远洋贸易、运输的加强, 对舰船进行高效检测可以打击走私犯罪、提高海上交通效率、实施海上救援. 同时, 在军事上, 精确检测到舰船目标可有效判断敌人的军事动向, 为打

赢战争,捍卫领海,保证国家安全,保护人民提供强大的信息支持.随着遥感技术的发展,卫星光学遥感图像分辨率有了很大的提高,来源也越来越丰富,利用星载可见光遥感图像进行海面舰船目标检测得到迅速发展.舰船检测是海面目标检测、识别以及预警的基础组成部分,检测结果的好坏对后续操作起决定性作用.目前常用的海面舰船检测办法有边缘检测法、阈值分割法、基于视觉显著性的办法、基于神经网络的办法^[1].其中边缘检测和阈值分割是传统的检测办法,其效果不是非常理想,而神经网络的方法主要应用于舰船分类识别.视觉显著性^[2]是模拟人眼可快速集中于感兴趣区域而提出的目标检测算法模型,主要分为从上往下的显著性检测方法和从下往上的显著性检测方法.前者是根据已知的任务而去主动寻找所需目标显著图的方法;后者是模仿人类对景象的本能反映而设计的显著图获取方法,其中以 ITTI 设计的算法模型^[3]最为著名,但其耗时长,参数多,运行效果一般.长期以来很多研究人员相继提出各种显著性目标获取方法如:GBVS 算法^[4]、CA 算法^[5]、FT 算法^[6]、SUN 算法^[7]、PQFT 算法^[8-10]、SR 算法^[11]、AC 算法^[12]、LC 算法^[13]、PCA 算法^[14]、HC 算法^[15]等.随着海洋舰船检测逐步成为研究热点,近年来许多学者利用视觉显著性进行海面舰船检测:Ren 利用多尺度光谱残差法检测海面目标^[16];Yao 利用多尺度光谱残差法和最大信息环绕法相结合检测海面舰船目标^[17].Ren 提出的多尺度光谱残差法没有考虑各个尺度之间的关联性,需要分别计算不同尺度下的显著图,增加时间成本,且对较大海面目标检测效果较差;姚志军的光谱残差法(SR)和最大信息环绕法(MSS)结合的方法先利用 SR 算法在不同尺度得到显著图,在此基础上再利用 MSS 算法进一步进行显著性检测得到结果显著图,此算法对 SR 算法依赖性太强且增加计算时间.

原始 PQFT 算法通过提取运动特征,2 个颜色特征,以及强度特征构成四元数图像来得到目标的显著图,本文提出的显著性算法同样利用四元数可以同时处理四个特征尺度并保证各个尺度间关联性的优势.针对静态图像的特点,本文提取相应的特征进行目标显著性检测,并利用人眼对不同大小图像所关注显著性对象不同的特点进行尺度大小变换以避免次显著性目标漏检.将本文提出的显著性检测算法配合图像分割算法以及连通区域标记算法用于卫星光学遥感图像中的舰船目标检测.实验表明本文提出的算法模型可以快速、精确地检测到海面舰船目标,具有较强的抗干扰能力,能排除云、雾、油污的干扰,高效、精确地检测到海面舰船目标.经过在多种环境下进行实验分析,发现本文算法具有较高的精确性,实时性.

2 相关算法原理

2.1 PQFT 算法

侯晓迪于 2007 年提出利用对数光谱残差求取目标显著图的方法——SR 算法^[11],该算法运行速度快,运行效果较好.作者对图像的对数光谱图进行了分析,认为图像中对数光谱异常的地方对应显著目标存在的区域.但 2008 年,郭程磊对 SR 算法进行分析认为在 SR 算法中起决定性作用的是位相谱而不是对数光谱残差,并据此提出 QFT 算法,QFT 算法^[10]表示如下:

$$F(u, v) = \mathfrak{F}(I(x, y)) \quad (1)$$

$$P(u, v) = \text{angle}(F(u, v)) \quad (2)$$

$$s(x, y) = \mathfrak{F}^{-1}(\exp(i * P(u, v))) \quad (3)$$

$$S(x, y) = g(x, y) * |s(x, y)|^2 \quad (4)$$

其中, $I(x, y)$ 表示原图, \mathfrak{F} 表示傅里叶变换, \mathfrak{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换, $P(u, v)$ 表示光谱图的位相谱, $g(x, y)$ 是高斯滤波函数, $S(x, y)$ 表示显著图.但 QFT 仅仅是对灰度图进行操作,没有扩展至多维空间,在计算目标显著图的过程中忽略了颜色信息、亮度信息和运动信息等必要的信息,所以郭在 QFT 算法基础上提出 PQFT 算法^[8-10]:将原图转为四元数图像,四元数数图像包含颜色尺度、强度尺度以及运动尺度,再将 QFT 算法应用于四元数图像求取目标显著图.具体流程如下:设 $r(t)$, $g(t)$, $b(t)$ 分别是原图 $I(x, y, t)$ 的红、绿、蓝颜色尺度,利用下式将其扩展至广义调谐红、绿、蓝、黄颜色尺度:

$$R(t) = r(t) - (g(t) + b(t))/2 \quad (5)$$

$$G(t) = g(t) - (r(t) + b(t))/2 \quad (6)$$

$$B(t) = b(t) - (r(t) + g(t))/2 \quad (7)$$

$$Y(t) = (g(t) + r(t))/2 - |g(t) - r(t)|/2 - b(t) \quad (8)$$

进一步将上述广义调谐颜色尺度转化为人脑正常接受的颜色尺度 $RG(t)$ 和 $BY(t)$:

$$RG(t) = R(t) - G(t) \quad (9)$$

$$BY(t) = B(t) - Y(t) \quad (10)$$

强度尺度为:

$$I(t) = (b(t) + r(t) + g(t))/3 \quad (11)$$

运动尺度为:

$$M(t) = |I(t) - I(t - \tau)| \quad (12)$$

τ 常取 3. 因为本文主要讨论静态图像所以仅仅对静态图像进行解释即令:

$$M(t) = M(x, y)$$

且 $RG(t)$ 、 $BY(t)$ 、 $I(t)$ 对同一幅静态图像为常数,所以空间域的超复数图像可表示为:

$$q(x, y) = M(x, y) + RG(x, y)\mu_1 + BY(x, y)\mu_2 + I(x, y)\mu_3 \quad (13)$$

其中, $\mu_i^2 = 1$, $i = 1, 2, 3$, 且 $\mu_1\mu_2 = \mu_3$, $\mu_1 \perp \mu_2$, $\mu_1 \perp \mu_3$, μ_2

$\perp \mu_3$;

化简表达式如下:

$$q(x, y) = f_1(x, y) + f_2(x, y)\mu_2 \quad (14)$$

$$f_1(x, y) = M(x, y) + RG(x, y)\mu_1 \quad (15)$$

$$f_2(x, y) = BY(x, y) + I(x, y)\mu_2 \quad (16)$$

四元数傅里叶变换以及逆变换分别表示为:

$$F_i(u, v) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} e^{-\mu_i 2\pi((xv/M) + (yu/N))} f_i(x, y) \quad (17)$$

$$f_i(x, y) = \frac{1}{\sqrt{MN}} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} e^{\mu_i 2\pi((xv/M) + (yu/N))} F_i(u, v); \quad i = 1, 2 \quad (18)$$

对四元数图像进行傅里叶变换得到:

$$Q(u, v) = F_1(u, v) + F_2(u, v)\mu_2 \quad (19)$$

用指数形式表示如下:

$$Q(u, v) = \|Q(u, v)\| e^{\mu \phi} \quad (20)$$

令 $\|Q(u, v)\| = 1$; 并作傅里叶逆变换得到:

$$q_2 = b\mu_1 + c\mu_2 + d\mu_3 \quad (21)$$

$$S(x, y) = g(x, y) * |q_2(x, y)|^2 \quad (22)$$

$S(x, y)$ 即得到的特征显著图. PQFT 算法是一种考虑多种特征的频域算法, 其显著区域检测效果优于 QFT 算法和 SR 算法.

2.2 PQFT 算法用于海面舰船检测的优缺点分析

充分了解 PQFT 算法用于卫星图像中海面舰船检测优点和不足有利于设计更好的方法从而实现高效舰船检测的目的, 使用 PQFT 算法得到的海面舰船显著图以及结果标记图如图 1 所示.

经充分研究对比分析发现利用 QPFT 算法检测海面舰船目标有如下优点: ①频域显著性检测算法速度非常快, 满足海面舰船检测的实时性要求; ②可以减弱云、雾、海面油污对检测效果的干扰如图 1(c), (e), (f); ③对尾迹的压制效果比较好; ④可以有效突出舰船小目标所在区域的显著性, 其显著性明显高于其他物体及背景区域如图 1(c), (e), (f). 但 PQFT 算法也存在一些缺点: ①PQFT 算法易检测出某些干扰区域如图 1(b); ②当存在多个目标且部分目标与背景对比度较低时容易造成漏检、误检如图 1(a); ③对于对比度相差较大的目标同时存在时, 容易造成漏检如图 1(d).

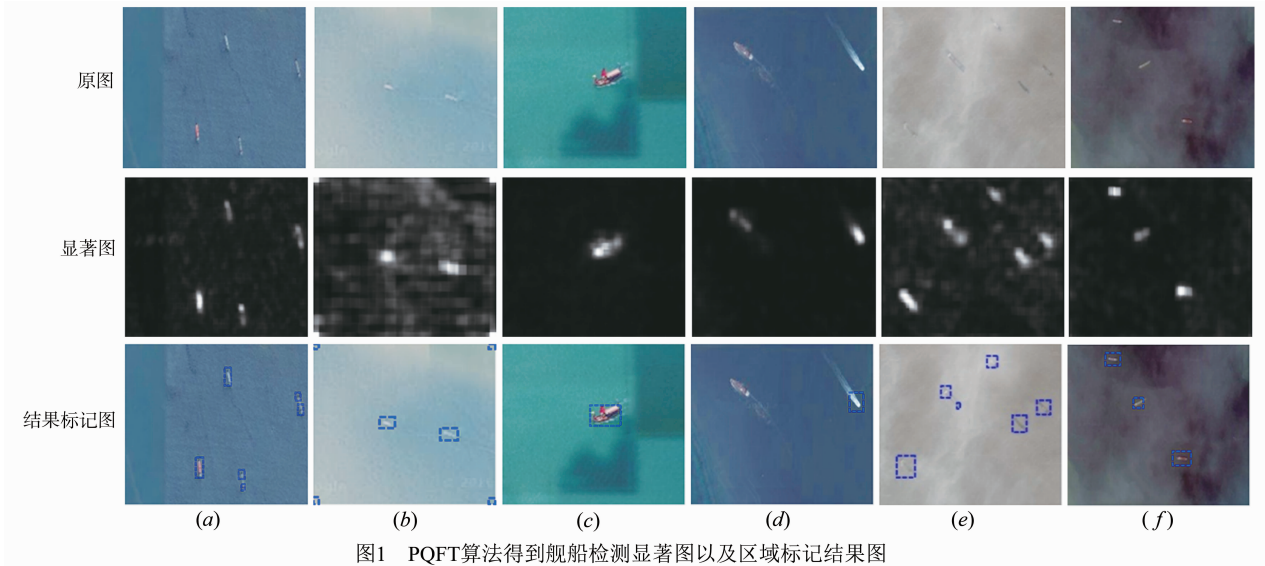


图1 PQFT算法得到舰船检测显著图以及区域标记结果图

3 本文设计的 MS-PQDT 算法

步骤 1 针对实际海面舰船检测情况, 为削弱云层、油污对检测结果的影响, 利用顶帽算法进行图像背景抑制以利于后续目标显著性的提取. 顶帽算法表达如下:

$$g - g \circ B = g - ((g \ominus B) \oplus B) \quad (23)$$

其中, \circ 表示开操作, \oplus 以及 \ominus 分别代表膨胀和腐蚀操作. 如 A 被 B 膨胀, 定义为:

$$A \oplus B = \{z | (\hat{B})_z \cap A \neq \emptyset\} \quad (24)$$

如 A 被 B 腐蚀则定义为:

$$A \ominus B = \{z | (B)_z \subseteq A\} \quad (25)$$

其中, \emptyset 表示空集, \hat{B} 表示 B 的反射, $(B)_z$ 表示点 z 对集合 B 的平移; B 表示为结构元, g 是原图, 针对本文算法 B 大小通常选择 10 左右.

步骤 2 原始 PQFT 算法在 RGB 颜色空间进行显著性检测, 但实际上 CIE-Lab 颜色空间更加符合人眼的观察模型, 所以本文选择将原图转至 CIE-Lab 颜色空间图像. 除了选取更加适合的颜色空间之外, 本文还利用离散余弦变换代替傅里叶变换以获得更好的频域操作结果. 原始 PQFT 算法选取强度尺度、2 个颜色尺度和运动尺度作为算法的特征尺度, 本文处理静态图像, 没有运动特征

尺度,而方向尺度能够反应静态图像中目标的大量信息,所以选取方向尺度代替运动尺度作为特征之一,方向尺度用 gabor 滤波法求得,方向分别选取 $[\frac{\pi}{8}, \frac{\pi}{4}, \dots, \pi]$ 共八个方向,并整合在一起. 运用改进型 PQFT(PQDT)算法求得显著图 S . 算法流程表示如下:

$$e(x, y) = \text{gabor}(I(x, y)) \quad (26)$$

$$q_1(x, y) = e(x, y) + L_1(x, y)\mu_1 + A_1(x, y)\mu_2 + B_1(x, y)\mu_3 \quad (27)$$

$$Q(u, v) = \text{DCT}(q_1(x, y)) = \|Q(u, v)\|e^{i\phi} \quad (28)$$

I 表示经过步骤 1 处理后的图像, $e(x, y)$ 表示方向特征尺度, DCT 表示离散余弦变换.

令 $\|Q(u, v)\| = 1$, 并对式 (28) 做离散余弦逆变换:

$$q_2(x, y) = \text{DCT}^{-1}(Q(u, v)) \quad (29)$$

$$S(x, y) = g(x, y) * |q_2(x, y)|^2 \quad (30)$$

$g(x, y)$ 表示二维高斯滤波, DCT^{-1} 表示离散余弦逆变换, $S(x, y)$ 表示改进型 PQFT 算法得到的显著图.

步骤 3 人眼对不同大小图像关注显著性对象不同,所以本文进一步对原图进行尺度大小变换以避免次要显著性目标漏检. 本文选取尺度大小分别为: $128 * 128$ 、 $192 * 192$ 、 $256 * 256$. 对不同尺度大小的图,同时进行显著性检测,对其分别归一化后相加得到最后结果显著图.

步骤 4 在得到舰船显著图后,采用 OTSU 算法自

动求取阈值进行分割,得到舰船所在的位置,但是有时分割结果不能较好的得到目标的全部信息,所以在得到分割结果后再在原图对应位置上使用连通区域标记算法提取舰船目标.

4 实验结果和分析

4.1 定性分析

实验对多种海面状况下的舰船进行检测并与多种视觉显著性算法对比以检验设计算法的正确性、实用性和优越性. 实验中图像均取自 Google Earth. 实验所用编程软件有 VS2010 以及 Matlab2014a. 电脑配置为: CPU i7, 4G RAM, 频率 3.6GHz.

如图 2 所示,在简单海面情况下, FT、MSS、PQFT、CA、LC、HC、AC、PCA 算法以及本文设计的算法可以较为精确地得到目标显著图,而 ITTI、GBVS、SR、SUN 算法得到的显著图结果精确性略低且 GBVS 的检测结果造成漏检, SUN 算法得到的结果干扰较强.

从图 3 可以看出在有油污污染的海面上, FT、MSS、CA、LC、HC 等算法在得到目标显著图时,依然带入了油污的干扰, ITTI、GBVS、SUN 算法可以较好的去除油污但是目标区域过于模糊且 SUN 算法的结果受干扰太强, PQFT、PCA、SR、AC 算法以及本文设计的算法得到的舰船显著性图片较为良好,可以较好地消除油污的干扰.

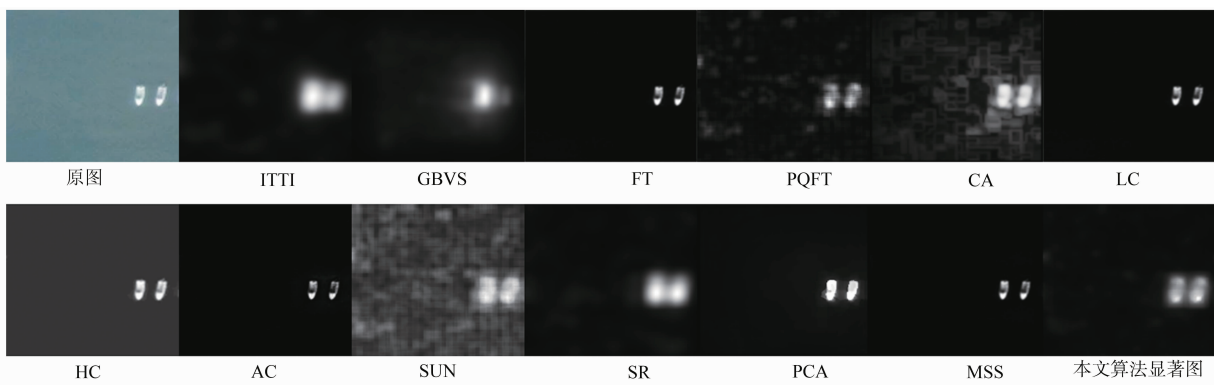


图2 简单海面情况下各种算法显著图

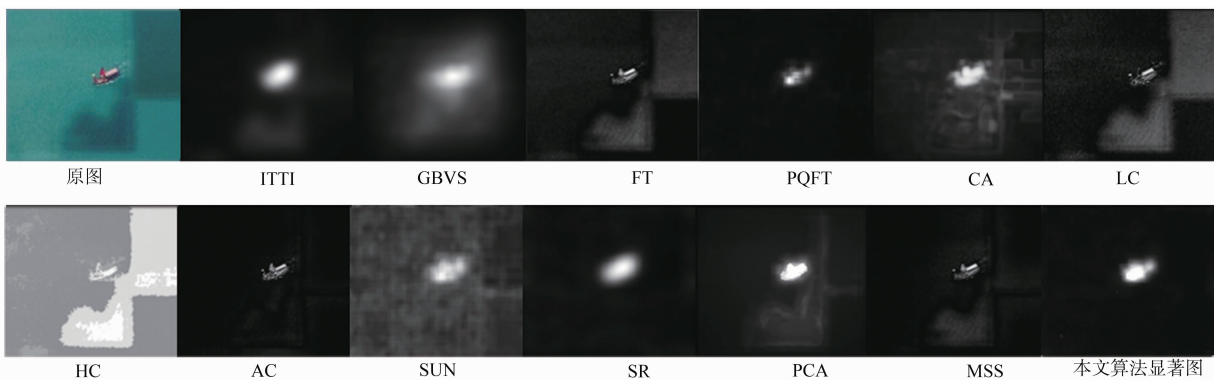


图3 油污海面上舰船各种算法显著图

从图 4 的实验结果可以看出,当对于对比度相差较大的舰船同时存在时,ITTI、GBVS、CA、SR、PCA 以及本文设计的算法可以较好地得到两个目标的显著图,其余算法均是某个目标显著性较强,另一个则较弱,不利于后续分割,容易造成漏检。

从图 5 的实验结果可以看出对于对于黑极性舰船存在于较为复杂的环境下时,除却 PQFT 算法、SR 算法、SUN 算法以及本文设计算法外均不能有效检出目标的显著图,尤其 ITTI 算法、FT、MSS 算法和 GBVS 算法完全失效,其余算法均不能完整的得到全部目标的

显著图,另外,SUN 算法得到的显著图干扰太多。

从图 6 的实验结果可以看出对于对于舰船存在于薄云环境下时,ITTI 和 GBVS 算法几乎失效,FT、CA、LC、HC、AC、PCA 算法虽可以得到目标的显著图,但是对云层的抑制效果非常差。PQFT 算法、SUN 算法以及 SR 算法可以较好的检出目标,相较之下 SUN 算法得到的结果受干扰太强,SR 算法得到的显著性检测结果过于模糊,而 PQFT 算法以及本文设计的算法不仅目标范围精确且完全排除薄云的干扰。

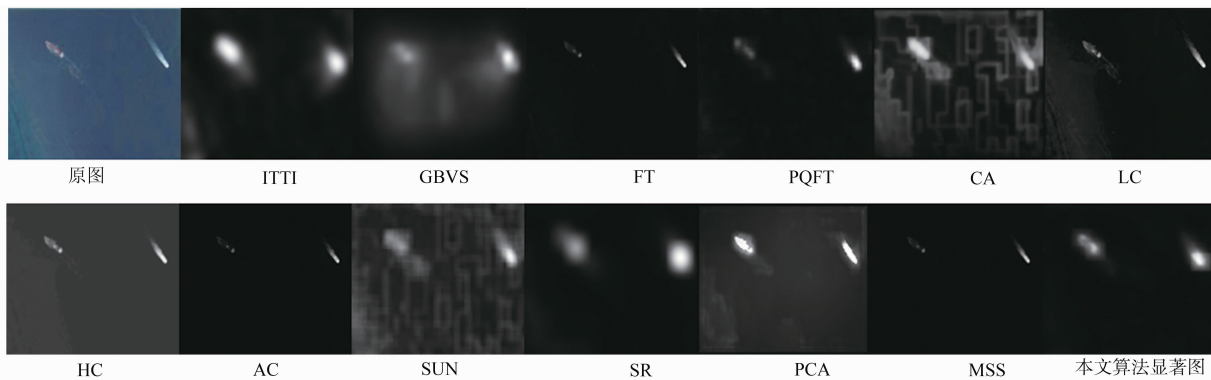


图4 对比度较大的舰船各种算法显著图

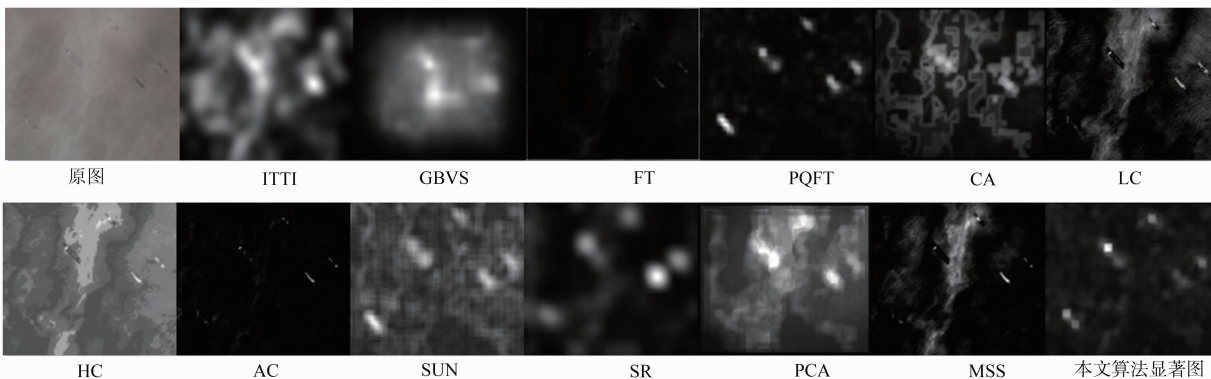


图5 黑极性舰船各种算法显著图

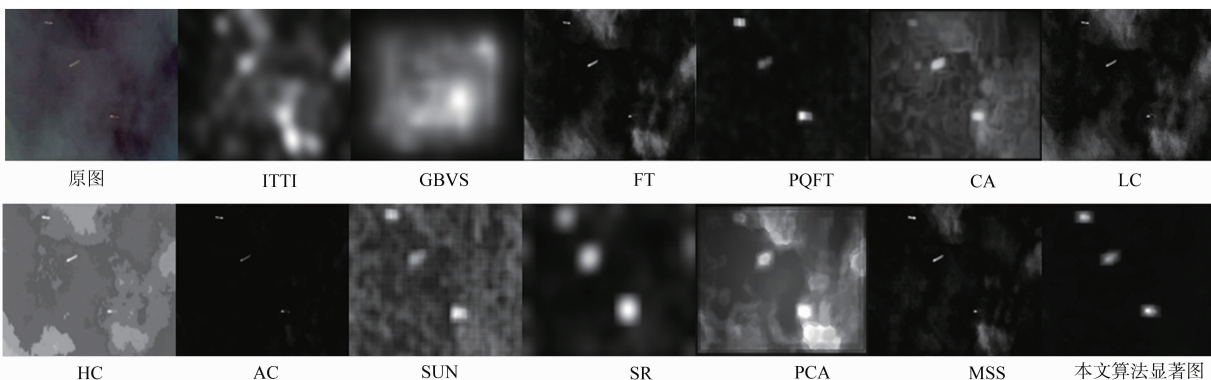


图6 薄云情况下舰船各种算法显著图

从图 7 的实验结果分析可以看出对于对于薄雾环境下舰船检测情况,除却 PQFT、SR、PCA、AC 算法以及

本文设计的算法外均不能有效检出目标的显著图,尤其 ITTI、GBVS、SUN 算法几乎完全失效。但是 PQFT 算

法得到的结果干扰太强,SR 算法得到的结果范围过于模糊且依然存在一定干扰,PCA、AC 算法则丢失许多细节.而本文设计的算法可以很好地检测出目标且范围精确,受干扰较小.

从图 8 的实验结果分析可以看出对于对于离岸较近情况下的舰船检测情况,除却 PQFT、SR、PCA、LC、HC

算法以及本文设计的算法外均不能有效检出目标的显著图,其中 SUN 算法得到的结果干扰太强,GBVS 算法存在严重的漏检且模糊.而本文设计的算法可以很好地得到目标显著图.

使用本文算法进行舰船检测并进行标定的结果如图 9 所示.

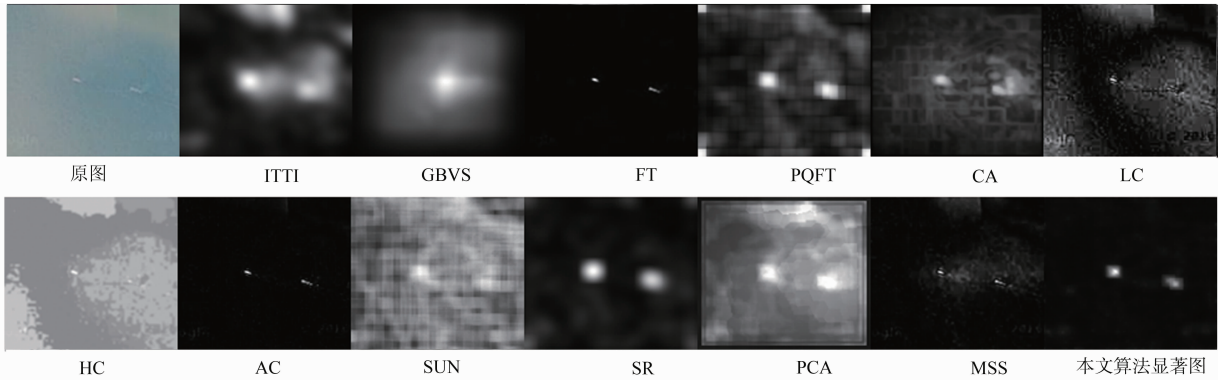


图7 薄雾情况下舰船各种算法显著图

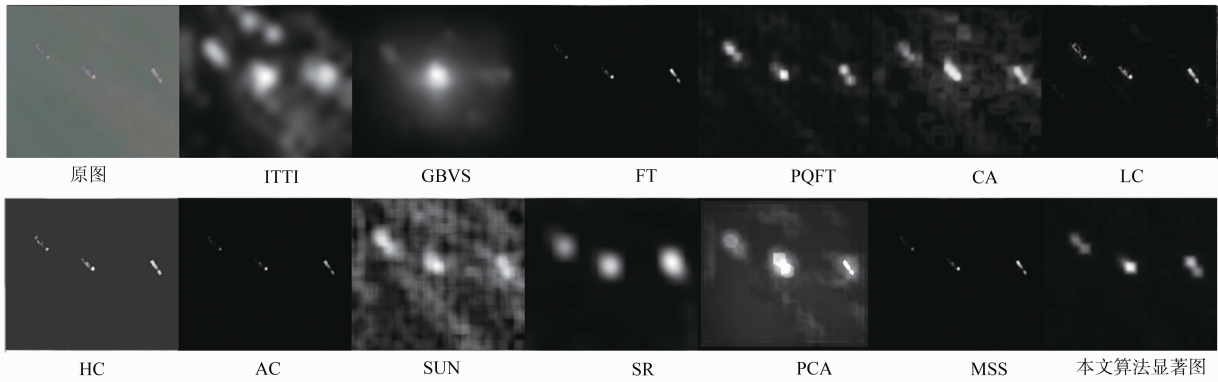


图8 舰船离岸较近情况下各种算法显著图

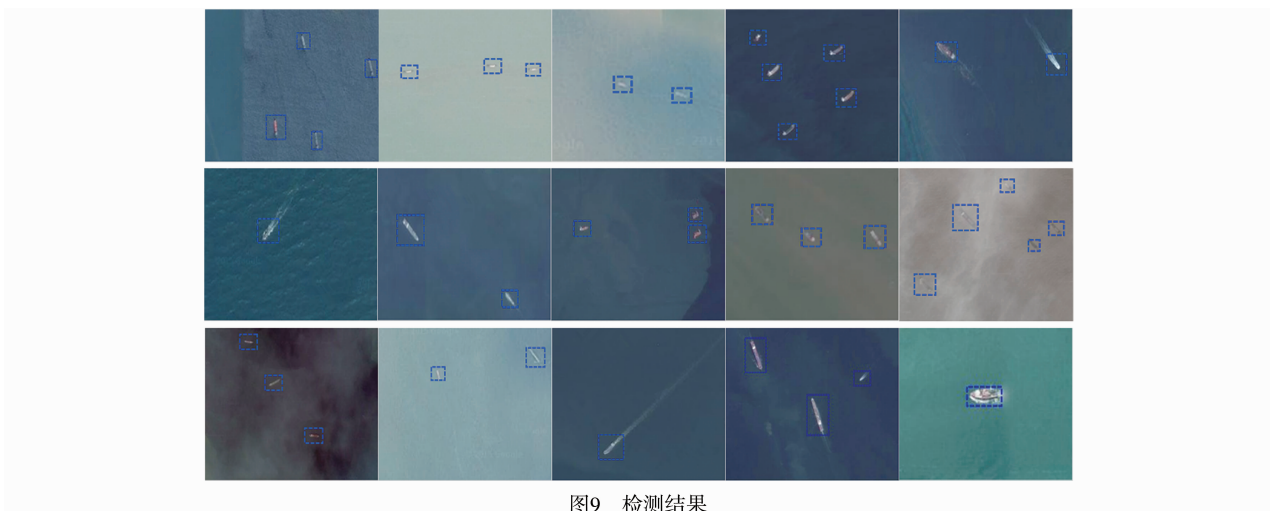


图9 检测结果

从上述多种情况分析可以看出,ITTI 算法、GBVS 算法不适合在复杂环境下用于卫星光学遥感图像进行舰船目标检测,当环境复杂时,这两种算法几乎失效.

FT、MSS、AC、PCA、CA、LC、HC、SUN 算法虽然在复杂的环境下可以得到目标的显著图,但受云、雾干扰太大,但是相较而言 PCA 算法效果最好,SUN 算法、CA 算法

仅次于 PCA 算法. PQFT 算法和 SR 算法在各种环境下均具有一定的适用性,但是 SR 算法检出范围不够精确,不利于后续分割、定位且容易造成漏检,而 PQFT 算法考虑的特征多于 SR 算法,检出的目标显著图更加精确但容易检测出干扰项.而本文设计的算法不仅抗干扰性强且精确性也同样得到满足.实验证明本文设计的算法在各种环境下均具有较好的抗干扰性,可以排除云、雾、油污的干扰,精确检测到舰船目标,且误检率较低.

4.2 时间分析

并非所有的算法都具有实用性,满足舰船检测的实时性要求,所以对不同算法进行时间分析是非常必要的.对于 $256 * 256$ 大小的图像,各算法求取海面舰船显著图平均运行时间如表 1 所示.

表 1 不同算法的运行时间

Algorithm	Time(S)	Code
FT	0.093	m
SUN	1.9693	m
ITTI	0.2714	m + C
GBVS	0.2237	m + C
LC	0.1435	m
HC	0.5118	m
AC	5.2982	m
CA	78.94	m
PQFT	0.0742	m
SR	0.1374	m
PCA	2.9281	m
MSS	0.1672	m
Ours	0.1288	m

从 4.1 的实验结果和 4.2 的时间分析实验结果可以看出,GBVS、ITTI 不适合复杂环境下的舰船目标检测,SUN、PCA、CA、AC 算法运行时间较长不适合实际应用.LC 算法仅仅考虑可灰度图且效果比 FT 稍差一些,容易将云、雾等像素接近的区域当作显著性目标造成检测失败;HC 算法虽然考虑了整个颜色空间,但是依然容易将云、雾等像素接近的区域当作显著性目标造成检测失败,另外运行时间也较长.SR 算法仅仅考虑二维图像信息,需要转至 $64 * 64$ 大小的图片才可以得到较好结果,其检出范围不够精确,不利于后续分割、定位,容易造成漏检,而 PQFT 算法容易检测出干扰项,相对而言 PQFT 算法速度优于 SR 算法且考虑特征更加全面,结果更加精细.而本文设计的算法可以较好地得到显著性目标,且检测结果非常精细.所以上述实验分析可以证明本文设计的算法能够精确检测到海面舰船目标且该算法满足实时性要求.

4.3 定量分析

通过上述定性分析和时间分析,说明本算法优于

空域算法,但是尚不能完全说明本文的算法优于频域算法——SR 算法和 PQFT 算法,缺乏定量的依据,据此本文进一步分析真正率和虚警率来证明本文算法的优势.定义 NT(目标总数),NC(检出的目标数),TP(检出的正确目标数),FN(虚假目标被检为虚假目标的个数),FP(检出的虚假目标数),TPR(真正率),FA(虚警率)定义为:

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} = \frac{TP}{NT} \quad (31)$$

$$FA = \frac{FP}{FP + TP} = \frac{FP}{NC} \quad (32)$$

实验中选取 82 幅图像,共 144 个目标,实验结果如表 2.

表 2 不同算法的真正率和虚警率

Algorithm	SR	PQFT	Ours
NT	144	144	144
NC	150	145	142
TP	125	128	139
FP	25	17	3
TPR	86.81%	88.89%	96.52%
FA	16.7%	11.72%	2.11%

5 总结

本文在多种海面情况下分析多种视觉显著性算法应用情况.研究发现 ITTI 算法和 GBVS 不适用于复杂场景下的舰船目标检测.CA 算法、PCA 算法、AC 算法运行速度较慢不满足实时性要求.MSS、FT、LC、HC 算法可以有效地得到目标的整体显著图.HC 算法和 LC 算法对于云层、油污的抗干扰性太弱.SR 算法容易造成漏检且定位不够精确,PQFT 算法容易造成误检.实验证明本文设计的算法在简单海面、薄雾、薄云、油污、存在黑极性舰船等多种海面情况下均能够较为理想的检测出目标,真正率达 96.52%,虚警率为 2.11%,且满足实时性要求,证明本文算法的正确性、优越性.

参考文献

- [1] 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.
Wang Y Q, Ma L, Tian Y. State-of-the-art of ship detection and recognition in optical remotely sensed imagery[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(9): 1029-1039. (in Chinese)
- [2] BORJI A, CHENG M M, JIANG H, et al. Salient object detection: A Benchmark [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(12): 5706-5722.
- [3] 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.
- [4] BERNHARD S, JOHN P, THOMAS H. Graph-Based Visual Saliency [M]. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press. 2007. 545 – 552.
- [5] GOFERMAN S, ZELNIK-MANOR L, TAL A. Context-aware saliency detection [A]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [C]. San Francisco: IEEE, 2010. 2376 – 2383.
- [6] ACHANTA R, HEMAMI S, ESTRADA F, et al. Frequency-tuned salient region detection [A]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York: IEEE, 2009. 1597 – 1604.
- [7] LY Z, MH T, TK M, et al. SUN: A Bayesian framework for saliency using natural statistics [J]. Journal of Vision, 2008, (7): 32 – 58.
- [8] BIAN P, ZHANG L M. Biological Plausibility of Spectral Domain Approach for Spatiotemporal Visual Saliency [M]. London, United Kingdom: Springer Press. 2009. 251 – 258.
- [9] CHENLEI G, QI M, LIMING Z. Spatio-temporal saliency detection using phase spectrum of quaternion fourier transform [A]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition [C]. New York: IEEE, 2008. 1 – 8.
- [10] GUO C, ZHANG L. A novel multiresolution spatiotemporal saliency detection model and its applications in image and video compression [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(1): 185 – 198.
- [11] HOU X, ZHANG L. Saliency detection: a spectral residual approach [A]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition [C]. Minneapolis: IEEE, 2007. 1 – 8.
- [12] ACHANTA R, ESTRADA F, WILS P, et al. Salient region detection and segmentation [A]. 2008 International Conference on Computer Vision Systems [C]. Santorini: Springer, 2008. 66 – 75.
- [13] ZHAI Y, SHAH M. Visual attention detection in video sequences using spatiotemporal cues [A]. Proceedings of the 14th Annual ACM International Conference on Multimedia [C]. Santa Barbara: IEEE, 2006. 815 – 824.
- [14] MARGOLIN R, TAL A, ZELNIK-MANOR L. What makes a patch distinct? [A]. Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) [C]. Portland: IEEE, 2013. 1139 – 1146.
- [15] CHENG M M, MITRA N J, HUANG X, et al. Global Contrast Based Salient Region Detection [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(3): 569 – 582.
- [16] REN L, SHI C, RAN X. Salient target detection method under sea surface environment based on multi-scale phase spectrum [A]. Proceedings of the Natural Computation (ICNC) [C]. Shanghai, IEEE. 2011. 977 – 981.
- [17] ZHIJUN Y. Small target detection under the sea using multi-scale spectral residual and maximum symmetric surround [A]. Proceedings of the Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSDK) [C]. Shenyang: IEEE, 2013. 241 – 245.

作者简介



丁 鹏 男, 江苏扬州人. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生, 研究方向为图像处理、深度学习.
E-mail: dingpeng14@mails.ucas.ac.cn



张 叶 女, 吉林长春人. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员. 研究方向为计算机视觉和机器学习.
E-mail: zhangye@ciomp.ac.cn



贾 平 男, 吉林延吉人. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员. 研究方向为图像处理、智能系统处理, 红外成像与光电测量.
E-mail: jiap@ciomp.ac.cn



常旭岭 男, 吉林长春人. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究实习员. 计算机视觉和机器学习.
E-mail: changxuling@ciomp.ac.cn