

基于光学遥感图像的舰船目标检测技术研究

尹 雅 黄 海 张志祥

(海军工程大学电子工程学院 武汉 430033)

摘 要 舰船目标的检测与识别技术是遥感图像处理与分析领域的研究热点,应用广泛。文中针对光学遥感图像,围绕舰船目标检测的一般处理流程,综述了目前各环节采用的主要处理方法,分析比较了各方法的优劣,指出了各环节面临的瓶颈问题,阐述了自然图像上的检测方法应用于舰船目标检测时的局限性,并讨论了当前研究面临的挑战,最后对相关的发展趋势进行了展望。

关键词 光学遥感图像,舰船检测,舰船识别

中图法分类号 TP399 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2019.03.010

Research on Ship Detection Technology Based on Optical Remote Sensing Image

YIN Ya HUANG Hai ZHANG Zhi-xiang

(Electronic Engineering College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract The detection of ships in optical remote sensing images is a research hotspot with broad applications in the field of remote sensing image processing and analysis. Based on the optical remote sensing image, this paper summarized the main processing methods used in each link around the general processing flow of ship detection, and analyzed the advantages and disadvantages of each method. Then, the paper pointed out the bottleneck problems faced by each link, expounded the limitations of natural image detection methods applied to ship target detection and discussed the challenges faced by current research. Finally, the relevant development trends were discussed.

Keywords Optical remote sensing image, Ship detection, Ship classification

1 引言

舰船目标检测是海洋监测的一项重要技术,在海事安全、海上交通、海洋污染防治、海洋空间规划、渔业管理、国防安全和边境管制等领域都有广泛的应用。随着遥感、卫星和人工智能技术的发展,空天平台遥感数据的获取能力不断增强,基于遥感图像的舰船目标检测引起了人们极大的关注。与传统的舰船检测技术相比,基于遥感图像的舰船目标检测技术具有高时效性,遥感图像的高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率的发展态势也为舰船目标的精细识别提供了进一步的可能。

遥感舰船目标检测主要基于两类图像:合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)图像和光学遥感图像。SAR 图像受气候与时间的影响相对较小,尤其是随着新一代星载高分辨率 SAR 卫星的发射运行^[1], SAR 图像中舰船识别的潜力得到了进一步增强,因此现有舰船识别研究工作大部分都是基于 SAR 图像,光学遥感图像一直以来都是作为 SAR 图像的重要补充。随着光学遥感技术的发展,针对光学遥感图像的研究也逐渐发展起来。目前,世界上已有多种先

进的高分辨率成像卫星:法国的 Helios“太阳神 2 号”光学成像卫星的分辨率可达到 0.5 m;以色列 Ofeq9“地平线 9 号”间谍卫星的分辨率高于 0.5 m;中国的“高分二号”卫星目前也已达到优于 1 m 的光学遥感图像分辨率^[2]。光学遥感图像采用波长为 400~760 nm 的电磁波成像,该波段可通过人眼感知,因此也被称为可见光图像^[3]。光学遥感图像可以提供更高的分辨率和更多细节信息,这对于精确定位舰船和识别舰船类型非常重要。与 SAR 图像相比,光学遥感图像也有着更直观的图像可读性。基于这些改进,光学遥感图像舰船目标检测逐渐成为遥感图像处理领域的研究热点。

2 检测方法总结

早期遥感的空间分辨率相对较低时,通常会使用 CFAR^[4]、GLRT^[5]等方法检测舰船目标,这些方法将舰船目标看作点目标,然后遍历搜索目标图片。随着空间分辨率的提高,高分辨率图片中的舰船目标具有纹理细密、面积较大的特点,因此,不能再将舰船目标看作点目标,而应将其视为区域目标。现阶段的舰船检测识别过程通常分为 3 个步骤:首先,输入图像进行预处理,减弱环境的影响,当图像中出现陆地区域时,

到稿日期:2018-04-27 返修日期:2018-08-24

尹 雅(1994—),女,硕士生,主要研究方向为图像识别,E-mail:yinya752@163.com;黄 海(1991—),男,硕士生,主要研究方向为人工智能;张志祥(1971—),男,博士,副教授,主要研究方向为软件质量保证技术,E-mail:hgzzx@sina.com(通信作者)。

进行海陆分离操作;然后,在图像中提取可能包含舰船目标的候选区域,这也是工作流程中最重要的一步;最后,在获取的舰船目标候选区域的集合中移除非舰船对象,得到真实舰船目标。具体流程如图 1 所示。本文以舰船目标检测的流程为主脉来剖析舰船目标检测的关键技术。

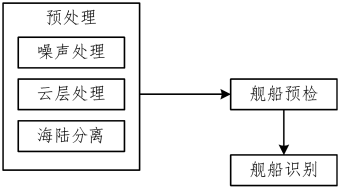


图 1 舰船目标检测流程
Fig. 1 Ship detection process

2.1 预处理

预处理是舰船目标检测流程的基础,前期处理结果的好坏会直接关系到后期舰船目标特征提取的优劣,从而影响最终的检测精度。预处理中将大体积的数据分解为矩形片段,利用这些片段中的统计特性提取局部化信息来进行操作,以此增强有用信息的作用,减弱不利信息的影响。

2.1.1 噪声处理

光学遥感图像中常会出现由光学图像传感器或大气辐射引起的噪声,如椒盐噪声和高斯噪声,这些噪声往往会对后续目标的提取过程产生较大影响。根据不同噪声的统计特性需要选取最优滤波器进行去噪操作,包括维纳滤波器^[6]和中值滤波器^[7-8]等。然而,采用滤波的方法进行去噪容易造成图像中目标的部分边缘或轮廓信息损失,因此出现了很多基于传统方式的改进方法。许军毅等^[9]提出了一种基于灰度统计的快速中值滤波方法,通过在滤波窗口内对像素值进行灰度直方统计,来减少计算中值的时间,提高滤波效率。针对中值滤波器中窗口选取的问题,金文超等^[10]提出了一种改进滤波器窗口尺寸的方法来抑制椒盐噪声,同时兼顾去噪和保留目标细节。

2.1.2 云层处理

光学遥感图像易受天气影响,经常会出现云层的干扰。完整的云层会遮蔽图像,导致错过检测的图像区域,但小而孤立的云层可能被视为目标。对大多数遥感数据应用来说,从图像中隔离云层非常重要。

根据最终判别手段的不同,云层处理的方法可分为阈值法和模式识别法。阈值法是云层处理操作中最常用的方法,因为云在所有光谱带中具有高值,所以在图像直方图的基础上相对容易消除^[8]。Corbane 等^[11]基于图像具有高斯分布且云像素对应于最亮像素的假设,通过直方图确定阈值信息,将所有大于或等于云阈值的像素都按照设定规则屏蔽,从而达到去云的目的。此外,根据含云图像在傅里叶变换中中心点急剧上升的特点,Jin 等^[12]使用傅里叶变换算法从图像中去除云。阈值法虽然容易实现,运算简单,但通用性较低。模式识别类的方法相较于阈值法能够提供更精确、更自动化与智能化的处理结果,在模式识别类方法中,云层与地表的界限被明显区分,云区位置能被准确检测,主要方法包括人工神经网络

、支持向量机、聚类法等。随着机器学习研究的不断深入,支持向量机具有越来越好的分类性能,基于支持向量机的云层处理方法开始被广泛使用。王睿等^[13]提出了一种基于最小二乘的支持向量机法以进行云检测,同时结合人工神经网络完成厚云去除,这种方法运算速度快,能消除多时相遥感图像间的光谱差异,适用性强,其主要缺点是样本点选取的难度大、受图像阴影的影响大。

2.1.3 海陆分离

将遥感图像中的陆地区域进行遮蔽或去除的操作被称为海陆分离。去除陆地部分的干扰,可使最终检测范围限定在海洋区域,缩小候选区域检测的范围,简化检测的复杂度。传统的海陆分离方法是采用一种先验地理信息匹配的方式,导入现有的海岸线数据,完成海陆分离,这种方法简单、高效,对于特定场合、特定港口和特定时间段的海陆分离具有理想效果,但是面对环境变化和季节变换时,该方法不能满足实际需求。现阶段常用的方法根据图像提取特征的不同可分为阈值分割法和边缘特征分割法。

阈值分割法从海面 and 陆地具有不同的灰度或纹理统计特征出发,根据这些差异可以确定一个分割阈值。分割的阈值选取方法包括直方图谷底法^[14]、最大类间方差法(OTSU 法)^[15-17]、自适应阈值法^[18]、最小误差判别法(统计判决法)^[19]等。Li 等^[17]对 OTSU 算法进行了改进并将其与 MeanShift 算法相结合,提高了海陆分离的精度,同时很好地保留了舰船的细节信息。Beşbinar 等^[20]使用数字地形高程数据,利用零值完成海陆分离,根据阈值将图像分割成水和非水,这种方法简单且快速,特别是针对高分辨率遥感图像能有效减少计算负荷,然而,阈值法可能无法完全移除陆地区域或将海面上低强度的舰船目标误移除,出现这种问题时可通过滤波的方式进行一定程度上的纠正。

基于边缘检测的分割法主要通过边缘特征提取将图像分成不同的区域。常见的边缘检测算法有 ROA 检测、梯度边缘检测、小波检测等。Cheng 等^[21]提出了基于双树复数小波变换的 Chan-Vese 模型来完成海陆分割;Aktaş 等^[22]提出了基于边缘感知的海陆分割法,并使用可控滤波器来保护海岸线边界;胡倩等^[23]利用边缘检测和梯度矢量流的有向力作用生成初始轮廓线,再使用主动轮廓模型对其进行调整,得到了精确的海陆边界。

2.2 舰船预检

舰船预检是在经过预处理后的图像上提取出可能包含舰船目标的候选区域,这是舰船目标检测流程中的关键一步,常见的研究方法包括以下 5 类。

2.2.1 基于灰度统计特征的方法

因为背景和待测物存在很强的灰度差异,所以可以通过分割具有灰度特征的图像来实现舰船候选区的提取。Shuai 等^[16]使用 OTSU 二值分割算法自动选取阈值,使分割后的目标和背景具有最大的差异性,然后通过形态学的操作将离散的单个目标形成连通区域,提取相对完整的舰船候选区。Zhang 等^[24]将形态对比计算用于描述灰度特征差异。在云

被覆盖或存在大海浪的复杂背景中,基于灰度统计特征的方法会出现很多的虚警、漏警,目标检测的准确率低。

2.2.2 基于显著性检测的方法

显著性检测的实质是实现人眼观察系统的功能,模仿人的视觉中的选择注意机制。基于显著性检测的方法从图像本身出发,利用底层特征描述某个区域和它周围的对比度,由此来提取图像的显著性区域。宋明珠等^[25]对 SIM 模型进行了改进,通过构造负值扩展对比敏感函数实现了良好的检测效果与抗噪能力,但延长了程序运行的时间。王慧利等^[26]通过结合一种最大对称环绕的显著图计算方法和一种基于元胞自动机的同步更新机制实现了舰船目标候选区域的提取,解决了显著性图分辨率低、目标边界模糊等问题。丁鹏等^[27]利用多尺度自适应的顶帽算法抑制云层、油污的干扰,然后提取双颜色空间特征以及边缘特征构成双四元数图像进行舰船显著性检测,排除了多种干扰并保证了不同尺度特征之间的关联性,最后实现了舰船目标的精确检测。显著性检测的方法在复杂背景的舰船目标检测上有相对较好的表现性能,但当图像中舰船较多而聚集时,虚警率会上升。

2.2.3 基于形状和纹理特征的方法

舰船具有特定形状(窄弓区域和平行船体边缘),因此可以通过检测舰船丰富的边缘信息的方法来提取舰船候选区域。Liu 等^[28]使用舰船独特的形状属性进一步提取了舰船候选区域,包括面积、长短轴比和紧凑度等,排除了云层、海浪等其他目标,获得了舰船候选区域。Liu 等^[29]应用边缘信息从高分辨率遥感图像中检测近海舰船。然而,当在复杂的沿海环境中提取物体形状时,基于特定特征的检测精度会迅速下降。Xu 等^[30]通过迭代训练自动学习的鲁棒形状模型将鲁棒不变广义 Hough 变换(Robust Invariant Generalized Hough Transform,RIGHT)引入形状提取。虽然它可以从训练中获得更广泛的适用特征,但 RIGHT 不能代表大多数船形特征,只能代表形状特征。

基于形状特征的方法具有鲁棒率,能提供相对较高的检测准确率,但误警率仍然存在。

2.2.4 基于模板的方法

基于模板的方法根据训练集中的舰船样本信息建立模板库,再遍历图像中的待匹配位置,如像素位置或滑动窗口的位置,然后按照一定策略在模板库中进行匹配。Harvey 等^[31]将训练集中的舰船样本加上一定的旋转角度变化得到模板库,然后遍历图像中的每个像素位置,在模板库中进行舰船匹配。Xu 等^[32]基于不变霍夫变换以及证据收集过程,设计了一个形状库(即 R-table),匹配时也是遍历图像中的像素点,在库中进行匹配计算。卢国民^[33]采用模板大小的窗口对待检测舰船图像进行扫描并截取图像块,对图像块进行径向梯度角特征提取,利用轮廓模板信息校验的方法去除虚警,得到最终舰船检测的结果。基于模板匹配的方法也可以在一定程度上应对聚集的舰船,然而一般存在效率低以及难以鲁棒地应对各种复杂背景(如杂波海面)等缺陷。

2.2.5 基于深度学习的方法

深度学习方法使用多层神经网络,并通过训练算法和数

据来适应方法的性能。刘峰等^[34]利用改进的 Alexnet 网络实现对多波段图像并行地提取特征,得到不同波段下舰船目标的特征信息。Tang 等^[35]提出了一种基于自编码器的深度神经网络与极限学习机(ExtremeLearningMachine,ELM)结合的方法,其采用压缩域进行快速舰船候选提取,利用深度神经网络进行高层特征的表示和分类,并将 ELM 用于高效的特征共享和决策。Zou 等^[36]提出了一种基于 SVDNet 的自动特征提取方法来检测舰船目标。Zhang 等^[37]提出了一种基于 CNN 模型的 S-CNN 舰船检测方法。基于深度学习的方法不需要明确定义对象特征,而是将图像数据直接输入到人工神经网络。虽然这可能是非常强大的,但需要大量的训练集,并且如果执行的过程稍有偏差,那么在训练集中没有很好地表示的新对象将在最终结果中被错误分类。

表 1 舰船检测的各方法比较

Table 1 Comparison of ship detection methods

检测方法	优点	缺点	使用场景
基于灰度统计特征的方法	快速,简单	目标检测准确率低	平静海面、舰船目标与海面背景具有强对比度
基于形状与纹理特征的方法	鲁棒性好	误警率高	近岸舰船检测
基于显著性检测的方法	复杂背景下处理效果好	船只聚集时误警率高	舰船目标分布稀疏
基于模板的方法	简单,容易实现,抗噪性好	鲁棒性差,效率低	聚集分布的舰船
基于深度学习的方法	不需要人工定义特征	需要大量训练集,参数多,不鲁棒	单独分布的舰船

2.3 舰船识别

舰船的识别分类是对所有检测到的舰船候选区域中的真实舰船目标进行识别,识别的结果一般是两种类型的对象:舰船和非舰船对象(即虚警)。检测到的非舰船对象可能包含杂波、海浪、岛屿或其他小噪声区域等。现有研究工作在舰船分类识别这一阶段所采用的方法,可以划分为基于学习分类的方法和非学习分类方法两大类。

2.3.1 基于学习的方法

基于学习的方法通常通过提取舰船目标的复杂特征并训练分类器来预测不确定的舰船目标。选择的主要有效特征包括 Hu 矩特征、LBP 特征、SIFT 特征、HOG 特征、形状边缘特征、颜色特征、纹理特征、GIST 全局特征和基于深度学习的神经网络特征等。分类模型则包括支持向量机(Support Vector Machine,SVM)分类器、贝叶斯分类器、可变性组件模型(Deformable Part Model,DPM)、Adaboost 等。Qi 等^[38]提取了适用于不同尺寸或具有强烈尾流舰船的 S-HOG 描述符。Yang 等^[39]提出了将局部特征与空间信息相结合的 LBP 特征。Yang 等^[40]使用目标的集合特征和领域相似度来有效识别模糊外观的候选船,利用 SVM 分类器根据舰船候选区的 LBP 特征对图像进行分类。单一特征起到的作用往往并不是十分理想,通常采用多特征联合方法去除虚警。彭敬涛等^[15]提取了舰船目标的形状特征、纹理特征、LBP 特征和 HOG 特征,提出了一种改进的 LBP 特征提取算法,该算法增强了抗干扰能力,降低了计算复杂度,增加了 LBP 特征提取的可控性。王慧利等^[41]从舰船的形状特征和 S-HOG 特征中为每个显著

区域提取特征向量,并通过使用 AdaBoost 分类器的彻底辨别来确认检测目标。然而,研究也表明,并不是提取的特征越多越好,只有选取合适的特征进行融合,才能起到事半功倍的效果。为了减少误报,这些设计的特征描述符和分类器通常非常复杂,使得它们不适用于实时系统。

2.3.2 基于非学习的方法

非学习的分类方法通常包括形状匹配^[32]、模板匹配^[31]、基于先验知识建立规则的虚警剔除^[42]等。Liu 等^[29]针对舰船候选窗口(旋转矩形框)提取沿矩形框的边缘梯度强度,根据先验知识,虚警目标的边缘强度值较低,经过非极大值抑制后,完成虚警剔除。Yang 等^[19]对候选区提取几何特征、纹理特征、形状特征,然后设计一个线性的候选区域选择函数,完成虚警剔除。这类方法提取的特征由于多是手工设计,因此难以鲁棒应对大量的复杂场景。

3 方法分析及面临的挑战

3.1 舰船目标检测方法的比较分析

在预处理阶段,噪声处理和云层处理的现有工作取得了较好的效果,而在海陆分离任务中,当遇到复杂海面时,分离效果不佳,对陆地的分离往往只是大致将陆地部分去除,与此同时,对海陆分离部分实验性能的评估多是基于目视分析,缺少统一的评价标准。后续稳定高性能的预检算法和识别算法的开发会使得处理环节对海陆分离算法精度的依赖极大降低,因此目前在预处理阶段的首要要求还是在云判和海陆分离中不要将真实目标误去除。

在舰船预检阶段与舰船识别阶段,从复杂背景中抽取舰船目标仍然是当前的瓶颈问题。基于先验知识的手工设计的方法虽然具备一定的从复杂背景中提取舰船的能力,但是其受限于有较多参数的多步骤设计思路,非常不鲁棒。而基于学习的方法一般不能精准定位舰船目标,只能在舰船单独分布的场景上取得不错的舰船检测性能。与此同时,在舰船识别任务中,尽管目前光学遥感图像的辨率质量已足以支撑这个任务的研究,但现有的工作还未开展对舰船型号识别的研究。

通过分析舰船目标检测流程中的各种技术和方法,可以发现,为了更好地理解算法相互之间的性能,需要将它们应用于同一卫星图像数据集。该数据集应该是异构的,包含各种舰船类型、各类天气条件及不同地理位置等,只有这样才能确保所有方法的适当比较及最佳方法的选择,使评估工作为实际应用贡献真正的参考价值。

近几年,自然图像目标检测领域迅速发展,尤其是深度学习中小卷积神经网络模型的发展,使得检测性能大幅提高^[43],然而,由于舰船目标独特的旋转、长条和聚集等特性,直接在舰船目标检测中应用自然图像上的检测方法难以取得理想效果。已有舰船检测方法中,也有尝试改造自然图像领域中的方法并将其运用在舰船目标上^[44],比如 Zhang 等^[37]就是借鉴了 R-CNN 的思路,但是需要针对舰船目标设计预检方法,遗憾的是预检部分的方法不够稳定。Zou 等^[36]提出的 SVD-

Net 则是借鉴了 PCANet^[45]的思路,但依然未能较好地解决近岸复杂背景下的舰船目标检测问题。

3.2 存在的问题及发展趋势

在利用光学遥感图像进行舰船目标检测的技术发展进程中,大多数研究都面临着以下 4 个方面的挑战:

1)复杂背景下的舰船目标检测较困难。光学遥感图像提供大量的细节信息,同时将背景干扰进一步放大。光照、云层、大气中的颗粒物等因素会对遥感图像的成像造成影响,而云雾、波浪、尾流杂波等干扰因素将导致检测产生虚警或漏检,当舰船目标过小(仅有 10~20 像素)时,噪声干扰效果被进一步放大,这些都限制了舰船目标检测的性能。因此,有效提取并综合利用多源卫星数据中包含的有价值的信息,是一个值得研究的方向。

2)舰船特征的变化为检测带来难度。不同舰船具有不同的外形结构与材料构成,不同成像条件提取到的信息及产生的阴影遮蔽问题等均为舰船特征的提取增加了难度。因此,快速从数据中提取描述性强的特征,同时减小计算量,是一个值得研究的方向,也是未来图像智能化处理识别的方向。

3)遥感图像舰船目标检测的样本获取难。随着深度学习等新兴技术在舰船目标检测领域的应用,舰船检测对训练数据的需求越来越大,然而,现阶段遥感场景缺乏共享数据集,与此同时,因为舰船在不同光照和角度下具有不同的表面特征,在不同工作状态下的目标样本采集也存在困难,所以用户往往难以得到大量的训练数据。因此,寻找适应性强、适用范围更广的舰船检测算法,基于少量样本训练深度学习模型实现特征的自动提取是一个值得研究的方向。

4)海量遥感数据的快速处理具有挑战性。大批量高分辨率、短重访周期成像卫星的发射,使得基于空天平台遥感数据的获取能力日益增强,天基遥感图像向着高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率方向发展的趋势使遥感图像总量急剧膨胀,大数据中快速准确地提取舰船目标成为难点。为满足未来发展中不断增多的需求,舰船检测识别任务不再只是对舰船的定位,还应包括对舰船目标类别属性、部件状态及速度的判断,实现对舰船目标的精细识别。从智能的角度不断改进舰船检测模型,使其具备自主学习及动态更新的能力也是一个值得研究的方向。

结束语 基于光学遥感图像的舰船目标检测是一个具有重要意义和富有挑战的问题,近年来吸引了越来越多研究人员的关注。本文以光学遥感图像中舰船目标的识别为主要目标,重点分析和总结了现有的检测方法,讨论了不同方法的优势与不足,最后指出了舰船检测技术所面临的挑战。从光学遥感图像中精确分类舰船是未来舰船目标检测的主流方向,同时,自动实时的舰船检测一直以来都是各类海上任务的关键,在不久的将来,随着越来越多先进卫星的发射,遥感方法将通过改善海域的覆盖范围而被大量用作海域工作全面运作的监测工具,实时目标检测的实现指日可待。

参 考 文 献

[1] XIONG W,XU Y L,CUI Y Q,et al.Geometric Feature of Ship

in High-resolution[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(1): 49-58. (in Chinese)

熊伟, 徐永力, 崔亚奇, 等. 高分辨率合成孔径雷达图像舰船目标几何特征提取方法[J]. 光子学报, 2018, 47(1): 49-58.

[2] HUANG J, JIANG Z G, ZHANG H P, et al. Remote Sensing Image Ship Target Detection Based on Convolutional Neural Network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1841-1848. (in Chinese)

黄洁, 姜志国, 张浩鹏, 等. 基于卷积神经网络的遥感图像舰船目标检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(9): 1841-1848.

[3] LIN Y D. Target Detection in Optical Remote Sensing Images with Complicated Background [D]. Chengdu: Xi'an Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

林煜东. 复杂背景下的光学遥感图像目标检测算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[4] AI J, QI X, YU W, et al. A Novel Ship Wake CFAR Detection Algorithm Based on SCR Enhancement and Normalized Hough Transform[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2011, 8(4): 681-685.

[5] XU J, JI K, LEI L, et al. Ship Target Detection from Optical Satellite Remote Sensing Image based on GLRT[J]. Remote Sensing Technology & Application, 2012, 27(4): 616-622.

[6] ZHANG L, GAN C S, HU Y. Ship detection algorithm research on high resolution optical remote sensing image. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(9): 184-189. (in Chinese)

张雷, 甘春生, 胡宇. 高分辨率光学遥感影像舰船检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(9): 184-189.

[7] LI X, LIU Y Q, BIAN C J, et al. Inshore ship detection method in optical remote sensing images using local salient characteristics[J]. Journal of Image and Graphics, 2016, 21(5): 657-664. (in Chinese)

李轩, 刘云清, 卞春江, 等. 局部显著特征下的光学遥感图像舷靠舰船检测[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(5): 657-664.

[8] CHEN L, WANG Z R, HAN Z, et al. Vessel target detection and identification method based on Optical remote sensing image [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(20): 77-85. (in Chinese)

陈亮, 王志茹, 韩仲, 等. 基于可见光遥感图像的船只目标检测识别方法[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 77-85.

[9] XU J Y. The Study of Ship Target Detection in Optical Satellite Remote Sensing Image [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

许军毅. 光学卫星遥感图像舰船目标检测技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.

[10] JIN W C. The Ship Detection Based on Complex Background Optical Remote-Sensing Images [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)

金文超. 基于复杂背景的光学遥感图像舰船目标检测技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.

[11] CORBANE C, NAJMAN 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.

[12] JIN T, ZHANG J. Ship detection from high-resolution imagery based on land masking and cloud filtering [C] // International Conference on Graphic and Image Processing. 2015.

[13] WANG R. A Research of Thick Cloud Detection and Removal Method in Optical Remote Sensing Data [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2015. (in Chinese)

王睿. 光学遥感图像厚云检测与去除方法研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2015.

[14] CHU Z L, WANG Q H, CHEN H L. ShipAuto Detection Method Based on Minimum Error Threshold Segmentation [J]. Computer Engineering, 2007, 33(11): 239-241. (in Chinese)

储昭亮, 王庆华, 陈海林, 等. 基于极小误差阈值分割的舰船自动检测方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(11): 239-241.

[15] PENG J T. The Study of Ship target Detection in Optical Remote Sensing Image [D]. Shanghai: Donghua University, 2017. (in Chinese)

彭敬涛. 光学遥感图像舰船目标检测技术的研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.

[16] SHUAI T, SUN K, WU X, et al. A ship target automatic detection method for high-resolution remote sensing [C] // Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2016: 1258-1261.

[17] LI N, ZHANG Q, ZHAO H, et al. Ship detection in high spatial resolution remote sensing image based on improved sea-land segmentation [C] // International Symposium on Optoelectronic Technology & Application. International Society for Optics and Photonics. 2016.

[18] LONG M, SOOMRO N Q, JINJING S, et al. Hierarchical Sea-Land Segmentation for Panchromatic Remote Sensing Imagery [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-8.

[19] YANG G, LI B, JI S, et al. Ship Detection From Optical Satellite Images Based on Sea Surface Analysis [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 11(3): 641-645.

[20] BEŞBİNAR B. Inshore ship detection in high-resolution satellite images: approximation of harbors using sea-land segmentation [C] // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI. International Society for Optics and Photonics, 2015: 725-727.

[21] CHENG L, SHOU H, LI H. A Water/Land Segmentation Algorithm Based on an Improved Chan-Vese Model with Edge Constraints of Complex Wavelet Domain [J]. Chinese Journal of Electronics, 2015, 24(2): 361-365.

[22] AKTAŞ Ü R, CAN G, VURAL F T Y. Edge-aware segmentation in satellite imagery: A case study of shoreline detection [C] // Pattern Recognition in Remote Sensing. 2012: 1-4.

[23] HU Q, ZHANG F, LIU R Y, et al. Land-sea boundary extraction based on gradient vector flow and active contour model [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2013, 40(6): 698-704. (in Chinese)

胡倩, 张丰, 刘仁义, 等. 基于梯度矢量流和主动轮廓模型的海陆边界提取[J]. 浙江大学学报(理学版), 2013, 40(6): 698-704.

[24] ZHANG Y, XU Z Y, CHEN W F, et al. Faint Targets Detection Based on Retinex Theory and Gray Morphological Filtering

Method[J]. *Infrared Technology*,2010,32(1):46-51.

[25] SONG M Z,QU H S,JIN G. Weak Ship Target Detection of Noisy Optical Remote Sensing Image on Sea Surface [J]. *Acta Optica Sinica*,2017,37(10):153-160. (in Chinese)
宋明珠,曲宏松,金光. 含噪光学遥感图像海面弱小舰船目标检测[J]. *光学学报*,2017,37(10):153-160.

[26] WANG H L,ZHU M,LIN C B,et al. Ship detection of complex sea background in optical remote sensing images[J]. *Optics and Precision Engineering*,2017,26(3):723-732. (in Chinese)
王慧利,朱明,蔺春波,等. 光学遥感图像中复杂海背景下的舰船检测[J]. *光学精密工程*,2017,26(3):723-732.

[27] DING P,ZHANG Y,JIA P,et al. Ship detection on sea surface based on multi-feature and multi-scale visual attention[J]. *Optics and Precision Engineering*,2017,25(9):2461-2468. (in Chinese)
丁鹏,张叶,贾平,等. 基于多尺度多特征视觉显著性的海面舰船检测[J]. *光学精密工程*,2017,25(9):2461-2468.

[28] LIU Y,CUI H,LI G. A Novel Method for Ship Detection and Classification on Remote Sensing Images [C] // *International Conference on Artificial Neural Networks*. Springer, Cham, 2017:556-564.

[29] LIU G,ZHANG Y,ZHENG X,et al. A New Method on Inshore Ship Detection in High-Resolution Satellite Images Using Shape and Context Information[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*,2013,11(3):617-621.

[30] XU J,SUN X,ZHANG D,et al. Automatic Detection of Inshore Ships in High-Resolution Remote Sensing Images Using Robust Invariant Generalized Hough Transform [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*,2014,11(12):2070-2074.

[31] HARVEY N R,PORTER R,THEILER J. Ship detection in satellite imagery using rank-order grayscale hit-or-miss transforms [J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*,2010,7701:770102.

[32] XU J,FU K,SUN X. An Invariant Generalized Hough Transform Based Method of Inshore Ships Detection [C] // *International Symposium on Image and Data Fusion*, 2011.

[33] LU G M. Research on Fast RGA-Based Ship-Target Detection for Optical Remote Sensing Images [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2017. (in Chinese)
卢国民. 基于 RGA 的快速光学遥感图像舰船目标检测算法研究 [D]. 成都:西南交通大学,2017.

[34] LIU F,SHEN T S,MA X X,et al. Ship recognition based on multi-band deep neural network[J]. *Optics and Precision Engineering*,2017,25(11):2939-2946. (in Chinese)
刘峰,沈同圣,马新星,等. 基于多波段深度神经网络的舰船目标识别[J]. *光学精密工程*,2017,25(11):2939-2946.

[35] TANG J,DENG C,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 & Remote Sensing*, 2014, 53 (3): 1174-1185.

[36] ZOU Z,SHI Z. Ship Detection in Spaceborne Optical Image With SVD Networks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*,2016,54(10):5832-5845.

[37] ZHANG R,YAO J,ZHANG K,et al. S-Cnn Ship Detection from High-Resolution Remote Sensing Images[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*,2016,XLI-B7:423-430.

[38] QI S,MA J,LIN J,et al. Unsupervised Ship Detection Based on Saliency and S-HOG Descriptor From Optical Satellite Images [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*,2015,12(7):1451-1455.

[39] YANG F,XU Q,LI B. Ship Detection From Optical Satellite Images Based on Saliency Segmentation and Structure-LBP Feature [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*,2017,14(5):602-606.

[40] YANG F,XU Q,GAO F,et al. Ship detection from optical satellite images based on visual search mechanism [C] // *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*,2015:3679-3682.

[41] WANG H L,ZHU M,LIN C B,et al. Ship detection in optical remote sensing image based on visual saliency and AdaBoost classifier[J]. *Optoelectronics Letters*,2017,13(2):151-155.

[42] YAO Y,JIANG Z,ZHANG H,et al. Ship detection in panchromatic images;a new method and its DSP implementation [C] // *Isprs International Conference on Computer Vision in Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics*,2016.

[43] PONT-TUSET J,ARBELÁEZ P,BARRON J T,et al. Multi-scale Combinatorial Grouping for Image Segmentation and Object Proposal Generation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*,2017,39(1):128-140.

[44] CHENG G,HAN J. A Survey on Object Detection in Optical Remote Sensing Images[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*,2016,117:11-28.

[45] CHAN T H,JIA K,GAO S,et al. PCANet:A Simple Deep Learning Baseline for Image Classification [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*,2015,24(12):5017-5032.