

doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2020.09.020

引用格式: 王伟.基于遥感图像的船舶目标检测方法综述[J].电讯技术, 2020, 60(9): 1126-1132. [WANG Wei. Overview of ship detection technology based on remote sensing images[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(9): 1126-1132.]

## 基于遥感图像的船舶目标检测方法综述\*

王 伟\*\*

(中国西南电子技术研究所 成都 610036)

**摘 要:** 如何在复杂环境中准确、快速地实现各类船舶目标检测是一项重要研究课题,也是保障船舶航行安全、保护领土安全、加强水域资源监管的基础。红外成像、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)以及卫星遥感等成像技术的发展为船舶检测提供了丰富的图像数据,已取得许多研究成果。介绍了船舶目标检测的过程,从基于传统图像处理技术的船舶目标检测和基于深度学习的船舶目标检测两方面总结并分析了现有船舶目标检测方法,讨论了相关关键技术,最后指出了未来的研究方向。

**关键词:** 船舶检测; 遥感图像; 图像处理; 深度学习

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TN911; TP75 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2020)09-1126-07

## Overview of Ship Detection Technology Based on Remote Sensing Images

WANG Wei

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

**Abstract:** How to detect all kinds of ship targets accurately and quickly in complex environment is an important research and ship detection technology is also the foundation of ensuring the navigation safety of ships, protecting territorial security and strengthening the supervision of water resources. The development of remote sensing technologies such as infrared imaging, synthetic aperture radar (SAR) and satellite remote sensing provides abundant image data for ship detection and many research findings based on remote sensing images have been achieved. This paper introduces the ship detection process, summarizes and analyzes the existing ship detection methods based on traditional image processing technology and deep learning, discusses related key technology and finally points out the future research direction.

**Key words:** ship detection; remote sensing image; image processing; deep learning

### 0 引言

近年来,随着我国经济与社会的不断发展,工业生产、观光旅游、能源运输、进出口贸易等对于内河、海洋等水上交通的需求与日俱增。为了满足经济的发

展以及航运需求的快速增长,船舶越来越大型化、高速化,安全性成为了现代船舶研究领域中的重要研究内容。船舶数量的增多、船舶尺度与吨位的增大使得船舶航行风险也不断增大,船舶相撞、搁浅、船

\* 收稿日期: 2020-04-07; 修回日期: 2020-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1404900)

\*\* 通信作者: wangw\_cetc10@163.com

桥相撞等交通事故不仅能够造成人员伤亡以及船舶损坏等巨大经济损失,还会导致水域自然环境严重污染,引发突发社会热点问题。船舶目标检测技术能够为水上货物贸易、人员运输以及资源调配等活动提供技术支撑,是船舶监测与风险防控的重要理论基础。

此外,我国海岸线漫长,海洋国土面积巨大,周边国家对我国主权岛屿骚扰事件频发,我国海洋资源丰富,包括体量巨大的油气矿产以及渔业资源,也遭受周边国家的非法入侵;一些域外国家以自由航行幌子,对我国海洋权益进行肆意侵犯。船舶目标检测技术是加强海洋监管、保障我国海洋权益的重要技术手段。

因此,不论对于内河环境还是海洋环境,船舶目标检测研究具有重要的理论意义和实际应用价值。船舶目标检测能够避免船舶在航行过程中可能出现的碰撞事故保障航行运输安全,能够及时发现非法入境、违规作业的目标,对于社会经济、航行运输安全、资源保护、海洋战略安全有着极为重要的作用。

遥感技术为船舶目标检测提供了大量数据,红外技术<sup>[1]</sup>、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术<sup>[2]</sup>、光学卫星成像技术等已被广泛应用在内河、海洋等各类环境下的船舶检测<sup>[3]</sup>。利用红外技术能够在大雨、大雾等恶劣气候条件下正常地对船舶进行监控。随着超大规模集成电路等技术的发展,红外成像系统在民用领域得到了普及,并已应用在桥梁防撞等主动式船舶检测中。SAR能够在恶劣天气条件下全天候工作,在海洋环境下的船舶目标检测中应用广泛。近年来,随着遥感技术的发展,卫星能够提供高分辨率图片,为船舶目标识别算法提供了更丰富的船只图像信息,卫星图像也成为了船舶目标检测重要的技术手段。

各类遥感成像技术在应用于船舶目标检测时也存在一些问题<sup>[4-5]</sup>。其中,卫星遥感通过卫星拍摄图像,宏观性强,成像面积大,但存在的不足是图像主要为平面图,分辨率较低且图像传输时间过长、实时性较差。孔径合成雷达是目前比较成熟的遥感技术,得益于雷达波长特性,对云层、大雾等天气具有较好的穿透作用,能够全天候工作,但是雷达成像不含丰富光谱,与人类视觉有变差,清晰度较差,通用性不足。红外成像技术可在夜间、大雾等光照不足的问题保障全天候作业,但红外成像信息不丰富,在海洋环境下成像效果又容易受距离影响。可见光成像技术能够提供丰富的图像细节具有较高分辨率,

但容易受到气候环境影响,需要进行预处理。

目前,船舶目标检测研究方法大致可以分为两类:一类基于传统图像处理技术的船舶检测方法,通过图像分割、特征提取以及分类器分类等过程进行目标检测;另一类以深度学习技术为基础,利用卷积神经网络等算法进行船舶检测,目前已经成为研究热点。传统图像处理方法应用广泛,技术较为成熟,但是由于太依赖人工特征提取,泛化能力以及鲁棒性较差。而基于深度学习的方法虽然在识别精度与实时性方面具有良好的表现,但过于依赖高质量数据并且对于一些边界情况应对能力相对较弱。随着我国经济、军事、社会需求的不断发展,对于各类环境下船舶目标检测的要求将进一步加强,在使用深度学习等新技术进行船舶目标检测研究的同时还应当大力发展基于传统图像处理技术的检测方法,通过各种方法相结合更好地应对可能面对的各种检测问题。

## 1 船舶目标检测流程

船舶目标检测研究的核心是图像技术,通过对船舶目标图像的采集,再利用各种目标检测过程可以从复杂环境下识别出船只目标。现有方法主要分为两类:基于传统图像处理的目标检测技术以及基于人工智能深度学习的目标检测技术,各类方法在具体的处理过程上有所区别,但这些方法都具有一般流程,具体如图 1 所示。

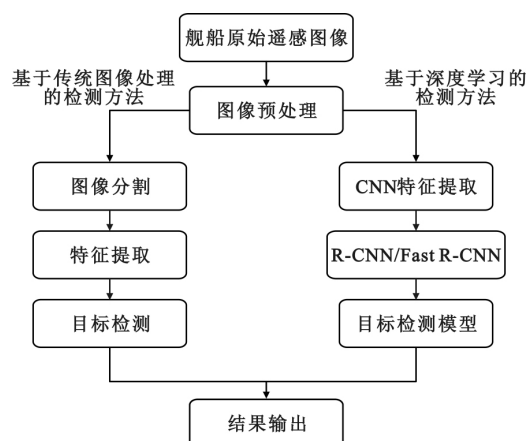


图 1 船舶目标检测流程图

利用诸如边缘检测等一般图像处理方法进行船舶目标检测时,在对原始遥感图像进行预处理以及图像分割的基础上获得图像中可能包含目标的位置,通过特征提取对候选区域颜色特征、边缘特征、纹理特征等进行提取;再利用分类、聚类目标识别

方法,最终可以输出识别结果。基于深度学习的方法则采用卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)、深度信任网络(Deep Belief Network, DBN)、图神经网络等深度学习模型<sup>[6]</sup>,通过对图像进行深层次的特征提取,利用深度神经网络实现对特征图的逐层传递,并可进行合理优化,对目标位置可进行准确预测。

无论是基于一般图像处理技术的船舶目标检测还是基于深度学习的船舶目标检测方法都需要对原始图像进行预处理,消除由于环境、信号传输等外部干扰因素造成的噪声。特征提取方式的不同是两类方法重要区别之一。利用传统图像处理方法进行船舶目标检测,依靠方向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradient, HOG)、尺度不变特征变换(Scale Invariant Feature Transform, SIFT)、局部二值模式特征(Local Binary Pattern, LBP)等特征提取算法为进一步船舶目标检测提供确定的特征向量<sup>[7]</sup>。深度学习方法则通过卷积神经网络等进行特征提取<sup>[8]</sup>。相比较而言,受到图像分辨率、舰船目标形态、采样时光照等影响,传统特征提取方法鲁棒性较弱且十分依赖先验知识,深度学习通过神经网络进行特征提取具有一定的封装特性,受主观因素影响较小,能够更为准确地获得船舶目标特征。

对于检测效果,通过特征提取、目标分类等过程的目标检测方法由于特征算子依赖先验知识,并且鲁棒性较弱,此外检测过程大多采用穷举方式进行像素搜索,因此面对复杂处理对象时检测结果较差,而深度学习在处理一些复杂环境下的目标检测有更好的检测精度。

## 2 基于传统图像处理技术的船舶目标检测

### 2.1 研究综述

基于传统图像处理技术的船舶目标检测方法首先对红外图像、卫星遥感图像以及雷达图像等进行过滤、去噪、分割、特征提取等处理,再采用机器学习、模式识别等目标识别过程,获得特征数据在目标图像上的位置,实现船舶目标检测。

红外成像是传统船舶目标检测方法中使用较为广泛的技术,在内河和外海相关领域研究中都受到了中外学者的关注<sup>[9]</sup>。李柯等<sup>[10]</sup>很早就开始研究红外船舶目标检测在实际内河航道中的应用,通过利用帧间差分法以及背景差分法可对运动目标轮廓进行有效实时提取,适用于桥梁防撞等应用环境。

Li 等人<sup>[11]</sup>针对现有红外舰船检测方法受海上波浪影响较大的问题,提出了一种基于形态学重建和多特征分析的方法,通过对热红外(Thermal Infrared, TIR)图像进行基于灰度形态学的开闭处理重建以平滑复杂的背景杂波,利用融合亮度和亮度的显著性检测策略,以及结构张量的平均特征值测度描述船舶目标,能够满足复杂条件下海面船舶检测。石超等人<sup>[12]</sup>通过使用形态学中的 Top-Hat 算子操作对红外图像进行预处理,使用改进 ViBe (Visual Background Extractor) 算法完成对舰船目标的检测,在应对背景噪声复杂的海面船舶检测时有着很好的效果。Wang 等人<sup>[13]</sup>通过利用高斯混合模型分析红外图像组中辐射异常图像块,获得候选目标,再利用生物学中异常斑块检测方法实现卫星红外成像传感器对于海洋环境中的船舶目标检测。

使用雷达图像的传统方法也取得了一些研究成果,例如: Dzvonkovskaya 等人<sup>[14]</sup>基于高频雷达信号,通过曲线回归分析的阈值化信号处理方法以及恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测算法识别跟踪船舶目标,从而避免外部噪声、射频干扰和各种杂波对船舶目标识别的影响; Leng 等人<sup>[15]</sup>提出了一种用于合成孔径雷达图像舰船检测的双边恒虚警率算法,通过结合 SAR 图像的强度分布和空间分布可以有效减小 SAR 模糊性和海杂波的影响; Jia 等人<sup>[16]</sup>在图像预处理后,选取 HOG 特征、几何特征和纹理特征作为船舶检测的特征,利用极值学习机对船舶目标进行了有效检测。

在利用卫星遥感图像方面, Yang 等人<sup>[17]</sup>利用显著性分割和局部二值模式描述卫星图像中的船舶结构,可从不同海面图像提取候选区域,通过筛选过程,利用船舶结构特征识别目标船只; He 等人<sup>[18]</sup>利用船舶旋转角字体以及尺度因子对不同方向、不同尺寸的船舶进行检测,通过像素估算、位置姿态加权计算能够提高检测方法鲁棒性。

这些非深度学习的检测方法通过分析所使用的遥感图像特点以及待检测目标环境特点选取合适的图像处理方法,然后再进行目标检测。

### 2.2 检测方法分析

#### 2.2.1 关键技术分析

##### (1) 基于红外图像的检测方法

红外船舶图像通过探测由物体向外辐射的红外射线获得。基于成像原理以及探测设备的特性,红外成像噪声不可避免,红外船舶图像具有背景杂波不

噪声产生来源多,船舶自身信号容易被各种背景和噪声所淹没。此外,由于红外探测装备为噪声的主要来源之一,相应的图像信噪比较低,给船舶目标检测带来了很大的困难。因此,去噪等红外图像预处理是基于红外图像的船舶目标检测技术的关键。通过图像去噪预处理过程,减小噪声对于红外图像的影响,为后续图像处理过程提供准确基础。针对红外图像噪声特点,常用的去噪方法有中值滤波与伪中值滤波、小波阈值去噪、图像锐化、直方图均值等<sup>[19]</sup>。其中,利用直方图均值等空间域方法具有算法简单、计算速度快等优点,但会对图像造成一定程度的模糊;小波阈值去噪对于除去红外图像中的高斯噪声具有很好的效果,能够较好保留图像特征,适合处理各类尺寸、分辨率的红外图像,但是由于采用了阈值方法,如何选取合适的阈值较为困难。

对于红外图像分割,根据红外图像为灰度图的本质特性以及需要进行去噪处理的特点,红外船舶图像在检测过程中边缘可能非常模糊,因此图像分割算法需要能够应对红外图像特点。目前,对于红外船舶图像分割较为常用的方法有基于边缘检测的图像分割算法、基于最大熵的图像分割算法和基于聚类的图像分割算法等<sup>[20]</sup>。

利用梯度最大值以及二阶导数过零点值进行图像边缘判断的传统边缘算子方法虽然简单易实现,但在抗干扰、定位等方面性能较差。目前一些新的边缘检测技术也逐渐应用于图像提取过程中。基于数学形态学的边缘检测方法包括基于多尺度形态学的边缘检测、基于偏微分方程形态学的边缘检测。基于神经网络的边缘检测方法利用邻域灰度极值筛选图像,并利用 BP(Back Propagation)神经网络进行学习。

在有效的数据预处理以及图像分割基础上,可设计相应检测,例如基于形态学重构等。

## (2) 基于 SAR 图像的检测方法

SAR 图像相对于红外图像具有更为丰富的纹理信息以及图像轮廓,能够呈现更多的目标区域细节。SAR 图像是船舶物体等对雷达波散射特性的反映,其成像机制具有加性和乘性噪声,因此去噪也是基于 SAR 检测方法需要解决的重点问题。由于干斑噪声是 SAR 图像中的主要噪声,因此去噪方法可以采用滤波去噪、小波阈值去噪以及 Contourlet 变换去噪等<sup>[21]</sup>。这些去噪方法主要是为了抑制图像背景杂波并保持图像边缘以及纹理细节。

SAR 图像具有更为丰富的背景信息,因此在进

行图像分割时需要对内容以及噪声等因素进行有效处理。现有可用于 SAR 图像分割的算法除了基本的基于边缘与空间的图像分割算法之外,还有基于马尔科夫的分割算法、基于阈值的分割算法以及多尺度几何分析的分割算法<sup>[22]</sup>。其中阈值分割方法简单易于实现,但受限于斑点噪声、目标大小以及目标背景等因素,适用范围有限;基于马尔科夫的方法则依赖像素点与周围像素点的关系;基于多尺度几何分析的分割方法则可适用于复杂且多目标的图像分割,更适用于船舶检测。

SAR 船舶图像的目标检测主要强调高检测率以及低虚警率。恒虚警率算法通过在一定区域内对比像素灰度与门限值实现目标检测,是较为常用的基于 SAR 图像的船舶目标检测方法<sup>[23]</sup>。该方法根据水域杂波数据绘制杂波分布模型曲线,并根据虚警率求出目标像素分割值,进而根据阈值得到图像中高灰度值的目标。还有一些其他方法也取得了良好的检测效果,例如基于显著性检测的船舶目标检测方法等。

## (3) 基于光学遥感卫星图像的检测方法

基于光学遥感卫星获得的船舶图像与红外和 SAR 图像相比成像更为清晰直观,并且拍摄的范围更为广泛。在使用卫星图像进行船舶目标检测时,图像中会存在一些噪声,例如云雾噪声、椒盐噪声、带状噪声等。这些噪声受天气情况、光线、传感器特性等内外因素影响。此外,由于卫星拍摄范围巨大,图中可能会出现陆地、岛屿等非目标物体,因此在图像预处理时都应当进行过滤:对于云雾的处理最为基础的方法是使用小波变换去除噪声,在此基础上还有一些增强算法,比如基于 Atrous 卷积的增强算法以及反锐化掩蔽算法等;对于椒盐噪声等可使用中值滤波等方法;对于陆地与岛屿等噪声大多采用先验地理信息方法、灰度阈值方法、基于纹理信息的方法等海陆分割方法。

在使用光学卫星图像进行具体船舶目标检测时则需要预测检测、候选目标区域(Region of Interest, ROI)生成等过程,最终再利用 CFAR 等算法进行目标检测。

### 2.2.2 对比分析

红外成像技术主要依靠物体热辐射原理,被动接收目标自身热辐射,无论昼夜均可正常工作,并且由于红外波长的特点对雨、雾等恶劣天气具有一定的穿透作用,但是由于成像分辨率一般,且抗干扰能力以及成像稳定性一般,基于红外图像的船舶识别

一般应用于内河水域的船舶防撞等。

SAR 属于主动式微波传感器成像,具有较强的穿透能力,可全天候对目标区域进行观测。与红外图像相比,SAR 图像地物轮廓更为清晰,内容对比度更好,纹理信息更为丰富,且由于微波特性能够探测水下物体,并且能够布置在飞机、卫星等多平台,可用于海域、内河等多种场景下的船舶目标识别。但是其成像分辨率与红外成像相比较低,并且干斑噪声导致信噪比较低,对于检测过程有一定负面影响。

光学遥感卫星图像受益于卫星遥感技术、计算机技术、通信技术的发展,能够获得高分辨率的图像,从而得到更多的舰船细节,可为船舶目标精确检测提供特征更为丰富的数据。但是光学遥感卫星技术易受天气、复杂海况等条件影响,不能做到全天候监控。

基于三种不同类型遥感成像技术图像的船舶检测方法有着类似的处理过程,虽然有各自的优劣,但都有其应用价值。表 1 给出了各类成像技术应用于船舶目标检测的特点对比,结论来自于文献[24-27]。

表 1 基于各类成像技术的船舶检测方法对比

成像技术	检测方法 应对噪声 类型	检测方法 常用应用 场景	图像 质量	特征 丰富 程度	检测 系统 性能	检测 范围
红外 图像	高斯噪声、 脉冲噪声	内河	较好	少	全天候	小
合成孔径 雷达图像	相干 斑噪声	海洋	较好	较少	全天候	大
光学遥感 卫星图像	椒盐噪声、 云雾噪声、 陆地岛屿 噪声	海洋	清晰	多	受条件 限制	大

### 3 基于深度学习的船舶目标检测

#### 3.1 研究综述

对于船舶目标检测,目标区域选取以及目标特征提取受到方法效率以及变形、背景、光照等噪声影响,难以快速准确地识别目标船舶。深度学习在图形研究领域应用广泛,通过多层人工神经网络能够更好地描述图像特征,对于复杂条件下的船舶目标检测可以取得显著效果。近年来,基于深度学习对船舶目标检测的研究也越来越丰富,主要有基于区域建议以及基于回归方法等类型方法。例如:Zhang 等人<sup>[28]</sup>采用基于区域卷积神经网络(R-CNN)的高分辨率遥感图像船舶检测方法,通过支持向量机

(Support Vector Machine, SVM)对图像进行分辨率预处理,获得可能含有目标图像的兴趣区域,在此基础上利用 Fast R-CNN 实现目标检测;Guo 等人<sup>[29]</sup>在 R-CNN 基础上进行了改进,利用旋转角度信息平衡神经网络特征层、样本层、目标层关系以应对图像中船舶尺寸大小不一以及密集分布所带来的检测精度问题;Zhao 等人<sup>[30]</sup>提出了一种耦合 CNN 用于小型密集型 SAR 舰船检测,通过设置两个子网分别从收集船舶特征信息以及评价筛选的角度有效区分密集船舶目标,取达了良好的检测效果。

YOLO 及其改进版本也是目前船舶目标识别中常用的技术。YOLO 的核心思想为利用整张图作为深度学习网络输入,在目标图像网格分割的基础上,分别判断并检测中心坐标位于网格内目标,并且网格内对边界框位置坐标及置信度进行计算最终筛选得到最优边框。例如:Sun 等人<sup>[31]</sup>基于 YOLO 提出了一种船舶目标检测方法,通过重新定义旋转矩阵的表示形式对网络损耗函数进行了新的计算,提高了检测精度,降低了检测过程的资源需求。YOLO 算法简单易实现,但对于划分结果内存在多个小目标的情况容易出现漏检等问题<sup>[32]</sup>。因此,一些研究者<sup>[33-34]</sup>在 YOLO 的基础上提出了 YOLOv2、YOLOv3 等模型,提高了目标检测能力,在小目标识别检测方面改进了性能。

#### 3.2 算法分析

深度学习的检测过程本质上是机器学习的过程,但与一般机器学习技术相比更加智能化,检测能力也更为强大。深度学习通过多层次学习,能够获得比原始图像更高层次的抽象数据,在基于遥感图像的船舶目标检测中更为有效。

基于深度学习的船舶目标检测方法使用较多的数据为 SAR 图像数据,这是由于合成孔径雷达技术具有抗干扰能力强、可全天候工作等特点,并且由于遥感技术的发展,SAR 数据可获得的渠道增多,此外通过对抗生成网络等技术能够将 SAR 图像处理得更接近于光学图像。光学卫星图像也适用于深度学习检测,但由于光学遥感图像尺寸以及噪声的问题,目前现有研究相对基于 SAR 图像的研究较少。

基于区域建议的方法也可称为二步法,其核心检测思想是第一步选取候选区域,第二步对这些候选区域进行分类或者回归。此类方法主要有 R-CNN、Fast R-CNN、Faster R-CNN 以及 Mask R-CNN 等。这些方法都包含候选区域选择、特征提取、目标分类、边界回归等步骤,区别主要在于候选区域生成

以及训练过程。基于回归方法等类型方法也称为一步法,主要思路就是均匀地在图片上不同位置进行密集抽样,并利用神经网络进行特征提取,快速实现目标检测任务。此类方法主要有 YOLO、SSD 等。从总体上看,无论使用 SAR 图像还是光学遥感卫星图像,由于算法机制的原因,二步法算法在检测准确性上要优于一步法,但是由于需要额外步骤获取建议区域在速度上处于劣势。一步法具有较快的处理速度,并且对于背景处理较好,但是准确度与二步法算法相比较低。

#### 4 研究展望

结合目前船舶目标以及检测方法的发展方向,未来值得关注的研究点如下:

##### (1) 小型水上目标检测

随着科技进步以及国民经济的增长,小型无人舰船逐渐在民用领域得到了迅猛发展和广泛应用。当前对于小型水上动态目标的检测还缺乏系统性的研究,如何精确识别小型水上目标是保障航运安全亟待解决的问题。此外,对于国家安全,小型水上目标不容易被雷达等遥感技术手段探测,因此针对此类目标的检测对于水域领土安全、资源保护等也有着十分重要的现实意义。

如何定义小型水上目标,利用红外或者雷达技术获取小型水上目标数据是该研究方向中一项有意义的研究内容。基于小型目标样本较少、数据标注较难实现等问题,选取何种方法进行目标检测需要在特征处理以及深度学习结构设计等方面进行更深入的研究。

##### (2) 提高检测效率

目前,现有方法在船舶目标检测时虽然能够根据不同类型遥感图像进行船舶检测,但无论是基于传统图像处理还是深度学习的方法在检测准确率等方面还存在一定的不足。只有在保证超高准确率的前提下,才能够顺利应用于无人检测平台等实际需求中,实现应用领域的知识转化。

##### (3) 遥感技术的发展为检测方法带来的影响

当前可应用于船舶目标检测的图像类型包括红外图像、SAR 图像、光学遥感卫星图像等多种形式,随着遥感技术的发展,遥感图像成像分辨率越来越高,图像内容特征越来越丰富,现有方法如何在利用数据丰富特征基础上提高预处理、特征提取、分类识别等各个过程效率也是未来需要研究的问题。

##### (4) 船舶目标检测与识别技术更有效结合

随着我国经济发展与国防安全需求的增加,有效检测并识别出特定水域内的船只以及舰船类型有着重要经济与安全意义。目前虽然已有许多检测与识别的研究方法,如何基于各类遥感图像进行更为准确、实时的检测与识别,如何保证复杂环境下检测与识别的有效性是值得关注的重点问题。

#### 5 结 论

随着内河、海洋航运的发展以及经济资源、国土安全要求的提升,船舶目标检测成为了研究热点。遥感技术、计算机视觉、图像处理等领域技术的进步给研究者提供了丰富的研究方法和途径。本文按照传统的船舶目标检测方法和基于深度学习的目标检测方法分别进行了分类总结,并对未来的研究方向进行了探讨,以期为该领域相关人员提供参考。

##### 参考文献:

- [1] ZHOU M, JING M H, LIU D G, et al. Multi-resolution networks for ship detection in infrared remote sensing images [J]. *Infrared Physics & Technology* 2018, 92: 183-189.
- [2] WANG C, BI F, ZHANG W, et al. An intensity-space domain CFAR method for ship detection in HR SAR images [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(4): 529-533.
- [3] WU F, ZHOU Z, WANG B, et al. Inshore ship detection based on convolutional neural network in optical satellite images [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2018, 11(11): 4005-4015.
- [4] SASIKALA J. Ship detection and recognition for offshore and inshore applications: a survey [J]. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems* 2019, 7(14): 177-188.
- [5] ANUPRIYA K R, SASILATHA T. Ship intrusion detection system—a review of the state of the art [C]// *Proceedings of 2018 International Conference on Soft Computing Systems*. Singapore: Springer, 2018: 147-154.
- [6] SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: an overview [J]. *Neural Networks* 2015, 61: 85-117.
- [7] ÖZTÜRK Ş, BAYRAM A. Comparison of HOG, MSER, SIFT, FAST, LBP and CANNY features for cell detection in histopathological images [J]. *Helix* 2018, 8(3): 3321-3325.
- [8] CHEN Y, JIANG H, LI C, et al. Deep feature extraction and classification of hyperspectral images based on convolutional neural networks [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2016, 54(10): 6232-6251.
- [9] 宋述林, 吴兰. 红外视觉检测技术在内河船舶助航系



- 统的应用[J].舰船科学技术,2018,40(8):155-157.
- [10] 李柯,黄席樾,刘俊,等.桥梁防撞系统中的红外船舶目标检测算法[J].红外技术,2008(6):4-8.
- [11] LI Y,LI Z,ZHU Y,et al.Thermal infrared small ship detection in sea clutter based on morphological reconstruction and multi-feature analysis[J/OL].Applied Sciences,2019,9(18):3786[2020-02-25].http://res-mdpi-com-s.vpn.uestc.edu.cn:8118/d\_attachment/applsci/applsci-09-03786/article\_deploy/applsci-09-03786.pdf.
- [12] 石超,陈恩庆,齐林.红外视频中的舰船检测[J].光电工程,2018,45(6):86-91.
- [13] WANG H,ZOU Z,SHI Z,et al.Detecting ship targets in spaceborne infrared image based on modeling radiation anomalies[J].Infrared Physics & Technology,2017,85:141-146.
- [14] DZVONKOVSKAYA A,GURGEL K W,ROHLING H,et al.Low power high frequency surface wave radar application for ship detection and tracking[C]//Proceedings of 2008 International Conference on Radar. Adelaide: IEEE,2008:627-632.
- [15] LENG X,JI K,YANG K,et al.A bilateral CFAR algorithm for ship detection in SAR images[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2015,12(7):1536-1540.
- [16] JIA S,QU C,LIN W,et al.Extreme learning machine based ship detection using synthetic aperture radar[C]//Proceedings of 2017 International Conference on Extreme Learning Machine.Cham: Springer,2017:103-113.
- [17] YANG F,XU Q,LI B.Ship detection from optical satellite images based on saliency segmentation and structure-LBP feature[J].IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2017,14(5):602-606.
- [18] HE H,LIN Y,CHEN F,et al.Inshore ship detection in remote sensing images via weighted pose voting[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2017,55(6):3091-3107.
- [19] IRUM I,SHAHID M A,SHARIF M,et al.A review of image denoising methods[J].Journal of Engineering Science & Technology Review,2015,8(5):1-5.
- [20] SONG Y H,YAN H.Image segmentation algorithms overview[EB/OL].(2017-07-07)[2020-02-25].http://arxiv-org-s.vpn.uestc.edu.cn:8118/ftp/arxiv/papers/1707/1707.02051.pdf.
- [21] LATHA S,SAMIAPPAN D.From nonlinear digital filters to shearlet transform: a comparative evaluation of denoising filters applied on ultrasound images[M]//Cognitive Informatics and Soft Computing. Singapore: Springer,2019:733-741.
- [22] CHOUHAN S S,KAUL A,SINGH U P.Soft computing approaches for image segmentation: a survey[J].Multimedia Tools and Applications,2018,77(21):28483-28537.
- [23] GAO G,SHI G.CFAR ship detection in nonhomogeneous sea clutter using polarimetric SAR data based on the notch filter[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2017,55(8):4811-4824.
- [24] 卢昌祥.红外和 SAR 遥感图像中机场跑道检测[D].南京:南京航空航天大学,2010.
- [25] LIN C L,KUO C W,LAI C C,et al.A novel approach to fast noise reduction of infrared image[J].Infrared Physics & Technology,2011,54(1):1-9.
- [26] 王昱,张广友,李新涛,等.卫星遥感影像预处理中噪声去除方法的研究[J].遥感技术与应用,2007,22(3):455-459.
- [27] SINGH P,SHREE R.A new homomorphic and method noise thresholding based despeckling of SAR image using anisotropic diffusion[J].Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences,2020,32(1):137-148.
- [28] ZHANG S,WU R,XU K,et al.R-CNN-based ship detection from high resolution remote sensing imagery[J].Remote Sensing,2019,11(6):631-636.
- [29] GUO H Y,YANG X,WANG N N,et al.A rotational Libra R-CNN method for ship detection[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2020,58(8):5772-5781.
- [30] ZHAO J P,GUO W W,ZHANG Z H,et al.A coupled convolutional neural network for small and densely clustered ship detection in SAR images[J].Science China Information Sciences,2019,62(4):1-16.
- [31] SUN X C,JIANG H,HUO T T,et al.A fast multi-target detection method based on improved YOLO[C]//Proceedings of SPIE.[S.l.]: SPIE,2020:1-8.
- [32] 寇大磊,权冀川,张仲伟.基于深度学习的目标检测框架进展研究[J].计算机工程与应用,2019,55(11):25-34.
- [33] CHANG Y L,ANAGAW A,CHANG L,et al.Ship detection based on YOLOv2 for SAR imagery[J].Remote Sensing,2019,11(7):1-14.
- [34] ZHANG X,SHI Z,WU Z,et al.Sea surface ships detection method of UAV based on improved YOLOv3[C]//Proceedings of Eleventh International Conference on Graphics and Image Processing (ICGIP 2019). Hangzhou: IEEE,2019:1-7.

#### 作者简介:



王伟男,1986年生于四川西昌,2013年于北京电信科学技术研究院获硕士学位,现为工程师,主要从事信息融合、目标识别、人工智能等方面的研究。