

遥感图像中舰船检测方法综述

唐沐恩, 林挺强, 文贡坚

(国防科学技术大学 ATR 国防科技重点实验室, 长沙 410073)

摘 要: 随着遥感成像技术的发展, 遥感图像中大型移动目标的检测和识别成为可能, 舰船目标检测和识别就是在这一背景下提出的。在参考大量文献的基础上, 回顾了舰船检测的发展历程, 分析了其研究现状, 对舰船检测方法进行了综述并分类, 在此基础上对各类算法进行对比, 最后给出了该领域存在的问题和发展趋势。

关键词: 舰船检测; SAR 图像; 可见光图像; 遥感图像

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2011)01-0029-08

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.01.007

Overview of ship detection methods in remote sensing image

TANG Mu-en, LIN Ting-qiang, WEN Gong-jian

(ATR Key Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Along with the remote sensing imaging technology developing, detection and recognize the good-size moving target in remote sensing image become true, it is the background of the ship target detection and recognize. Based on extensive investigation of existing articles, this paper reviewed the development history and current challenges of ship detection methods in details. First presented a comprehensive overview of ship detection methods. Then, gave classification and comparisons of ship detection methods. At last, discussed conclusions and future development of ship detection.

Key words: ship detection; SAR images; optical image; remote sensing image

0 引言

舰船目标检测与监视是世界各海岸地带国家的传统任务, 在舰船寻找与救助、捕鱼船监视、非法移民、保卫领土、反毒品、舰船非法倾倒油污的监视与管理^[1]等方面有着广泛的应用。随着遥感成像技术的发展, 利用遥感图像进行舰船目标检测成为可能, 其研究对象包括对舰船本身和舰船尾迹的检测。一般认为, 衡量舰船检测方法的好坏有以下几个方面: 提取舰船的准确性; 检测结果连通性, 是否能够指导实际应用以及计算的复杂度。

在二十多年的发展历程中, 各国研究者对舰船检测方法进行了广泛的研究, 目前已提出了许多舰船检测算法^[2,3], 如双参数恒虚警 (CFAR) 算法^[2,4,5]、最佳熵自动门限法 (KSW)^[6,7]、基于 K 分布的 CFAR 方法^[8,9]、多极化检测方法^[10,11]等。随着应用领域的不断扩大和小波理论、视觉显著度模型、分形理论等新理论的引入, 舰船检测的研究变得缤纷多彩。但迄今为止, 对这些方法还没有统一的分类, 在参考大量文献的基础上, 对遥感图像中舰船检测方法进行分类并在此基础上进行概括和评述。

1 发展与现状

自 1978 年在 SEASAT 的 SAR 图像上, 人们第一次发现海洋表面延伸 20 km 长的舰船尾迹以来, 人们逐渐对 SAR 图像舰船尾迹表示关注并进行研究。利用 SAR 图像检测舰船及其

尾迹, 是在不同气象条件下监视舰船的自动化手段, 目前国际上已经发展了众多的星载 SAR、机载 SAR, 获得了越来越多的 SAR 图像数据。随着海量的 SAR 图像用于舰船及其尾迹检测, 需要开展自动检测算法方面的研究。1986 年挪威国防研究院 (NDRE) 与欧空局 (ESA) 签订合同, 开展利用 SEASAT 图像进行舰船和舰船尾迹 SAR 检测的研究项目; 在之后的数年中, 发表了众多关于 SAR 图像舰船尾迹和产生机理的研究论文。2000 年 5 月 30 日 ~ 6 月 1 日, 在加拿大新斯科舍省 Digby 城, 由海洋遥感联盟 (AMRS) 召集, 专门召开了世界上第一次关于海岸水域舰船检测的专题讨论会 “Ship Detection in Coastal Waters Workshop 2000”, 来自加拿大、美国、意大利、英国、挪威等国家的科学家发表了约 30 篇文章, 讨论了各种检测舰船的传感器 (包括 SAR、高频表面波雷达、声学方法、光学传感器)、检测平台和检测算法。

同时, 利用 SAR 图像进行海洋监视的应用系统得到了众多国家研究人员的开发, 如加拿大 Satlantic 公司开发的 RADARSAT 海洋监视工作站 (ocean monitoring workstation, OMW) (包括舰船检测、油膜检测、海洋波谱、海洋风、海况分析等模块)、阿拉斯加 SAR 演示系统 (Alaska SAR demonstration system, AKDEMO)、欧盟的联合研究中心 (Joint Research Centre, JRC) 系统、英国 Qinetiq 的 MaST 系统、法国的 CLS 和 BOOST 公司开发的 SAR tool。为了加强对渔业活动的监视和管制, 欧盟于 2002 年 1 月启动了 IMPAST 项目, 将 SAR 与 VMS 相结合来实现对欧盟海域的渔船进行监控。在 IMPAST 的基础上, 欧盟第

五框架项目 DECLIMS 于 2003 年 5 月启动,为期 3 年,集中了来自欧盟、美国、日本和中国等政府、研究与工业部门的力量,其目标是集中力量开展利用卫星遥感影像进行海上舰船探测、分类和识别的研究,以便更好地了解这类系统的能力,并且推动新型传感器和平台的研制,满足舰船检测的实用化要求。该项目最初启动时包括 JRC、Qinetiq、CCRS、RADARSAT International、荷兰 TNO、挪威 FFI 和中国科学院电子所等 16 个单位,目前已扩展至 24 个。考虑到舰船探测水上遥感实验比较复杂,而且只有美国、加拿大、挪威、英国、意大利、新加坡等国家进行过水面实验,DECLIMS 采用了基线(benchmark)实验方法,即利用相同的遥感数据和地面调查数据,由各个合作伙伴分别利用各自的方法进行分析和处理,通过比较评价不同方法的优劣和当前存在的普遍问题。

目前,在 SAR 图像中进行舰船检测的研究较多,但大多数是使用恒虚警(CFAR)算法针对中低分辨率(25 m 以上)的 SAR 图像进行的。由于 SAR 图像逐渐向高分辨率发展,对于舰船目标的研究除了目标检测外,还必须考虑到检测方法是否有利于目标参数提取,从而有利于后续的目标分类和识别。

在利用可见光遥感图像进行舰船检测方面,绝大多数图像中舰船目标在灰度上表现出与背景较大的差异,而图像灰度是一种极易获取的特征,基于目标灰度特征开展算法研究是绝大多数文献和实用系统所采用的思路。该方面的研究主要集中于目标和背景分割阈值获取方法的不同,最具代表性的有直方图谷底阈值、最大类间方差阈值、最大熵阈值。国外也已开发出了基于可见光遥感图像目标检测的实用系统,如欧盟第 5 框架 DECLIMS (detection and classification of marine traffic form space)项目中德国的 Definiens 和法国的 IRD。但一般情况下,可见光图像会受到云层以及油污、海浪等干扰,建立背景模型比较困难,图像中目标与背景差异性不一致,图像中舰船灰度分布不均匀,与海背景对比也不明显,不易分割。由于目标成像相对清晰、目视判读的直观性强、灰度信息丰富,能够反映目标的细节结构,不仅能提取目标的形状参数,还可以提取目标的纹理特征、结构特征,这非常有利于后续的识别工作。正是由于图像情报的易获取性,国内外公开发表的研究文献较少,使得一直以来利用可见光遥感图像检测舰船目标研究受阻。因此,相对于 SAR 图像,利用可见光图像进行舰船检测技术相对滞后。另一方面,伴随着可见光遥感图像获取技术的不断进步和遥感图像数据量的不断增加,已有的图像分析处理能力无法满足海量数据的处理需求。如何从背景干扰复杂、目标特征不稳定、数据量巨大的可见光遥感图像中,快速准确地检测出感兴趣的目标,是摆在各国研究人员面前的一个极具挑战性的工作。

2 舰船检测方法分类

由于遥感图像覆盖范围广、包含数据量大,容易出现噪声、模糊、阴影等。图像的光谱信息通常会受多种因素影响,如季节变化、拍摄角度、传感器状态、天气条件等,即使同一地区不同时间拍摄得到的图像也可能具有不同的亮度和对比度。同时,随着卫星应用技术的不断提高和新型传感器的出现,遥感

图像的分辨率由中低分辨率向高分辨率迈进,图像质量也发生显著变化,因此尽管人们进行了广泛深入的研究,但不像期待的那样取得巨大成功。大量的研究表明,单纯依靠舰船检测算法并不能获得令人满意的结果。为提高检测概率,减少虚警,在使用舰船检测算法对目标检测之前首先必须对遥感图像作预处理,同时对检测结果也需要作后续处理。一般归纳起来分为四个步骤,如图 1^[12]所示。



图 1 舰船检测工作步骤

1) 陆地掩模 目的是将图像中的陆地区域、云遮挡进行遮蔽或移除,使得舰船检测器仅仅作用于海洋区域而对陆地区域不作任何处理。一方面,去除陆地地物带来大量的虚警,使得后期目标辨识和虚警抑制的工作量缩小;另一方面,减少处理图像的大小,提高计算速度。

2) 预处理 其步骤是一系列的图像处理操作,目的是抑制杂波背景,增强和凸显目标,去除由于各种因素造成的对舰船检测的干扰,尽可能地提高舰船检测的准确性和可靠性。这些操作包括数据的几何校正和辐射校正、斑噪抑制滤波、直方图调整、目标增强等处理方法。

3) 图像分割 利用相应的舰船检测算法将海洋区域中的疑似目标从背景中分割出来。在通常的处理过程中,检测算法主要是针对舰船目标本身,而对舰船尾迹的检测则仅仅被作为一种辅助手段来增加检测的准确性。这主要是因为部分舰船目标受各种原因的影响,无法观测到尾迹或者尾迹不明显,单纯借助尾迹进行舰船目标检测无法满足实际应用的需要。

d) 虚警抑制 其主要目的是通过先验知识和人工干预将分割得到的疑似目标进行筛选,从中剔除干扰信息。常用的先验知识主要包括舰船目标的尺寸、形状、结构、散射特性以及周围环境的异常等特性。

目前,有学者对舰船检测方法进行分类,如将舰船检测算法分为双参数 CFAR 算法、基于 K 分布的 CFAR 算法、多极化检测算法和其他检测算法,或将检测算法分为全局阈值检测算法、基于滑动窗的自适应阈值方法、雷达恒虚警的 CFAR 检测算法、基于模板的检测算法、基于小波分析的多尺度检测算法和基于多极化数据的多极化检测器。

本文按照舰船检测方法所基于的基础理论和研究思路的不同,将单极化 SAR 遥感图像和可见光遥感图像中的舰船检测方法分为四大家族,如图 2 所示,对多极化 SAR 遥感图像中的舰船检测方法单独进行介绍。各个家族的方法既有区别,又有联系。某一种方法只能更大程度地属于某一家族,较小程度地属于其他家族,本文根据隶属程度进行分类。

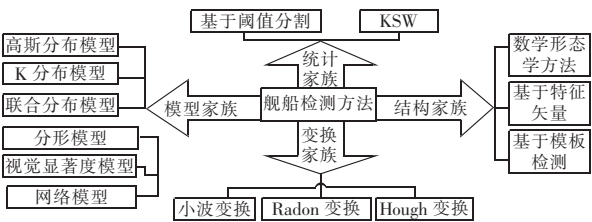


图 2 舰船检测方法分类

2.1 统计家族

统计家族的方法是基于像元及其邻域的灰度属性,研究目标区域中的统计特性,或像元及其邻域内的灰度一阶、二阶或高阶统计特性。统计家族的方法思想简单、易于实现,主要包括基于阈值的检测算法和最佳熵自动门限法。

1) 基于阈值的检测算法

从检测策略上来讲,基于阈值的检测算法可分为全局阈值算法和局部阈值算法。全局阈值算法是一类最简单的舰船检测算法^[13,14]。该类算法通过设置一个固定的全局阈值对图像进行分割。常见的全局阈值算法有直方图阈值算法,如谷点法、统计判决法、最大熵法、迭代计算的自动阈值法等。其优点在于阈值计算简单、运算复杂度低。然而其缺点也同样明显:全局阈值无法根据图像中局部区域的变化自动调节阈值,因此检测结果易受局部变化而引入大量虚警和漏检;对幅宽较宽的图像,由于成像机理的原因,海面背景有强烈的灰度变化,也会导致出现虚警和漏检^[12]。该类方法在检测过程中只利用了目标的灰度统计特性,没有考虑目标的空间结构信息,并且直方图形状与图像内容的联系也具有不确定性。因此,该类算法的后续研究较少。

典型的局部阈值算法是基于滑动窗的阈值检测算法,基于滑动窗口的自适应阈值检测算法是由 Eldhuset 等人^[2,13]在1996年提出的。这个检测算法是利用窗口滤波技术对 SAR 图像中船只进行检测的,它被用在了 Eldhuset 开发的自动舰船检测系统之中,与舰船尾迹检测器协同工作。与全局阈值算法相比,该算法考虑到了海洋环境的局部变化,所选取的检测阈值能够更好地符合检测局部区域的统计特性。然而 Eldhuset 等人在其论文中也承认,这个算法在斑噪较多、海面风浪较大时,容易造成大量的虚警。同时这个算法由于需要反复计算窗口内背景区域的统计参数,运算量极大,处理过程的速度较慢,不能够满足实际应用中实时或近实时处理的需要。

2) 最佳熵自动门限法

1985年 Kapur 等人^[6]提出一种最佳熵自动门限法,在此简称为 KSW 方法。它将信息论中 Shannon 熵概念用于图像分割,其出发点是使图像中目标与背景分布的信息量最大。该算法通过选取双阈值克服了单阈值分割算法对高分辨率图像存在的检测舰船不连通、检测虚警高等缺陷。尽管 KSW 方法选取了双阈值分割,但由于其阈值的选取只利用了灰度统计特性,没有考虑目标的空间结构信息,并且直方图的分布与图像内容的联系也具有不确定性。在传统的 KSW 算法中,准则函数被简单地定义为目标灰度熵与背景灰度熵之和,背景灰度熵与目标灰度熵在准则函数中占有同等的比例。这忽略了背景与目标在图像上所占比重的不同,也忽略了背景与目标在灰度范围上的差异。当图像包含较强的海杂波时,往往得不到好的检测结果。为了克服传统的 KSW 算法的缺点,有学者提出了改进的 KSW 算法。在改进算法中,准则函数被定义为背景灰度熵与目标灰度熵的加权和,检测门限被选择以最大化这一准则函数。由于加权系数的引入,该算法能针对 SAR 图像上舰船目标检测的实际情况,调整背景灰度熵与目标灰度熵在准则函数中所占的比例。当海杂波较弱时,该算法与传统的 KSW

算法等价;当海杂波较强时,该算法比传统的 KSW 算法有更好的表现。

2.2 模型家族

模型家族中,假设图像是以某种参数控制的分布模型方式形成的,通过先验知识或参数估计来估计模型参数,以参数为特征或采用某种分类策略进行图像分割,因此模型参数的估计和模型的选择是该家族方法的核心问题。

2.2.1 分布模型

基于分布模型的检测算法中,恒虚警 (CFAR) 检测方法^[2,4,5]是雷达信号检测领域里最常用和最有效的一类检测方法。大量的研究和实验指出,CFAR 检测器具有极好的稳健性,即便在海况极为恶劣的情况下,CFAR 检测器仍然能够取得较好的检测结果。这个算法的核心思想是在保证虚警率为常数的同时,根据虚警率和 SAR 图像海洋杂波的统计特性(即海洋杂波的概率密度函数)计算得到检测舰船目标的阈值^[15,16]。由此可见该算法的关键问题在于杂波概率密度函数的选择,使用不同的海洋杂波模型将得到具有不同形式和检测效果的 CFAR 检测器。

当背景杂波满足高斯分布,可以得到双参数检测器。双参数检测器是一个复合滑动窗口,由目标窗口、保护窗口和背景窗口组成。其中,保护窗口是为了防止有部分目标像素泄露到背景窗口中,造成背景杂波统计量计算的错误;背景窗口用于背景杂波统计,其尺寸依赖于用户的选择。由于双参数检测器需要对图像中的每个点都进行统计,计算量大,时间长,运行时间与窗口尺寸的设定有关;当背景窗口中出现不需要的目标(即两个目标之间太近)或背景不连续时,算法不稳定。

当背景杂波满足 K 分布,得到基于 K 分布的 CFAR 检测器。许多情况下,高斯模型对描述雷达海杂波分布并不理想,自从 1976 年 Jakeman 和 Pusey 引入 K 分布的概念后,K 分布模型受到了越来越多的关注,由于它提供了很好的海洋杂波描述而被广泛接受。该算法认为图像观测强度满足 K 分布,通过对背景区域中的像素观测强度进行统计计算,求解虚警概率方程得到检测阈值,最后根据检测阈值对图像进行分割。大量研究表明,K 分布能够很好地描述极化 SAR 图像。加拿大海洋监测系统(OMW)中使用的监测算法就是一个使用 K 分布作为海洋杂波分布模型的 CFAR 检测算法^[16~25]。

一般认为,对于海面比较平静的情况,可以认为海杂波服从瑞利分布,大多数海情服从 K 分布,更复杂的海情杂波服从复杂分布,如 K 分布和其他分布的和。据此可以选择较合适的分布模型。但很明显,该算法首先需要背景杂波分布的假设,这就需要一定的先验知识,一般情况下背景杂波也并不严格地服从某种分布;其次,该类算法需要对图像中每个像素都进行统计,因此计算量较大,并且随着滑动窗口尺寸的增加而增加。为自适应地根据 SAR 图像的统计特性选择其杂波分布模型,2000 年的 Jiang 等人^[26]使用基于概率神经网络(PNN)的非参数模型代替了概率密度函数的参数模型来描述海洋背景的杂波分布,但该算法由于会出现不收敛的问题而导致算法失败,其仅仅被研究,没有得到实际应用。

2.2.2 分形模型

图像中的目标物体一般分为人工物体和自然物体两大类。对人工物体描述的有力工具是欧几里德几何学以及解析几何、微分几何等,但对如山、河、岩石、森林、云团等对象,传统几何并不能很好地描述。Mandelbrot 于 1975 年创立的分形几何学改变了这一状况,它用分形一词来表述那些没有特征长度,具有无限精细结构的图形、构造及现象。自然物体与人工物体在分形特征上存在差异,使得在图像分析中运用分形理论和技术成为可能。基于分形模型的舰船检测认为自然景物和舰船目标的分形维数有一定的差别,根据差异进行检测。但实际图像中受背景复杂度、随机噪声、成像质量等影响,单一的尺度或恒常的分形维数很难区分自然景物和人造目标;在多尺度情况下,自然景物的分形参数在一定尺度范围内能保持相对稳定,而舰船目标的分形参数随尺度显著变化。Lo 等人^[27]研究了海面雷达反射信号的分形特征及海面目标的分形检测;Gan 等人^[28]研究了海面雷达反射信号的高阶分形特征并将其用于海面目标的分形检测;Kaplan^[29]引入 Hurst 参数提出了扩展分形特征用于识别 SAR 图像中特定尺寸的目标;张东晓等人^[30]提出了一种多尺度分形的舰船目标检测方法,该方法的检测结果稳定,优于边缘检测、阈值分割和单一分形维检测结果,是一种非常具有潜力的方法,但其计算速度较慢,对预处理要求较高。

2.2.3 视觉显著度模型

近些年,研究者发现人类视觉注意系统在面对一个复杂场景时,能够将注意力集中在少数几个显著的视觉对象上,对其进行优先处理,该过程被称为视觉注意。这个过程与目标识别非常相似,尤其是海上舰船目标。视觉显著度模型是视觉注意机制^[31]的一部分,用于量化人眼的视觉显著度,以便生成视觉显著图,从而寻找图像中视觉显著的对象。最具有代表性的是 Itti 模型^[32],该模型提供了一种自底向上、各个特征图可并行计算的机制,并且将多种特征在多个尺度下进行融合,最后合成一张综合的视觉显著度图。模型对噪声、模糊、对比度和亮度具有很好的鲁棒性。田明辉等人^[1]利用显著度模型进行舰船目标检测,其算法分为三个阶段:a)显著图计算,对于一幅遥感图像,通过特征提取、显著度计算和显著图融合三个子部分生成该遥感图像的视觉显著图;b)感兴趣区域提取,在第一阶段生成的显著图中寻找较为显著的视觉对象,并将该区域提取出来,完成前期疑似目标筛选;c)舰船目标识别,将第二阶段提取出来的视觉显著对象进行详细判别,从而完成舰船的目标识别过程。该算法与传统的基于分割的算法相比,在检测时引入多特征融合的检测方法,较好地将舰船目标和海背景分割开来,避免了单一特征的变化对检测结果图像的影响,因而检测率得到了提高,但由于计算特征较多,该检测算法要慢于阈值分割的方法。随着计算机性能和计算方法的发展,并行化和优化算法的成熟,计算速度慢的问题将会逐步得到解决,视觉显著度模型将是一个很有潜力的检测模型。

2.3 变换家族

变换家族的方法建立在时、频分析与多尺度分析基础之上,对图像中某个区域内实行某种变换后,再提取保持相对平稳的特征值,以此特征值作为特征表示区域内的一致性以及区

域间的相异性。变换家族的方法如图 2 所示,其中的 Radon 和 Hough 变换主要应用在舰船尾迹检测中。

2.3.1 小波变换

小波变换是近几年蓬勃发展起来的集数学、科学计算及信号处理于一体的新理论,在图像处理及模式识别中起着重要的作用,其应用范围涉及图像增强、取噪、数据压缩到边缘检测、纹理分析和分割等不同领域。罗强等人^[33]提出一种基于小波变换的卫星 SAR 海洋图像舰船目标检测方法,应用小波理论检测 SAR 海洋图像舰船目标,提出了一种基于图像直方图小波变换的图像分割,确定检测对象,算法简单,对于复杂的图像分割具有较强的鲁棒性、有效性和自适应性,但难以对检测能力的一定指标进行约束;李晓玮等人^[34]提出一种基于小波分解的 K 分布 SAR 图像舰船检测,对 SAR 图像小波分解后的各子频图像进行融合处理后,运用 K 分布参数计算阈值进行检测;彭石宝等人^[35]针对不同海情杂波服从不同概率密度分布的特点,讨论了复杂杂波背景下基于小波变换检测海洋 SAR 图像中舰船目标的性能,给出了不同海情下的检测性能,通过正交对称小波对海洋 SAR 图像作多分辨率分析,提取图像水平方向、垂直方向和对角线方向的细节信息,并基于空间相关选择最佳尺度来检测图像中舰船目标。

基于小波分析的多尺度检测器是由在 Lockheed Martin Canada 的研究者提出的一个仍处于实验中的算法。它是基于以下的假设:人工目标在低分辨率很容易被检测到,因为它们的散射与自然物体相比是恒定的,并可被用来对单一杂波目标进行检测。由于该算法具有多尺度分析的能力,尤其适合于高分辨率的图像。有文献表明该检测器具有很高的效率。

2.3.2 Radon 和 Hough 变换

Radon 和 Hough 变换主要应用在舰船尾迹检测方面,通过计算图像沿各个方向的投影来检测尾迹。由于 Radon 变换在提取线性特征方面具有独特的能力,绝大部分对于尾迹检测的研究都是围绕着 Radon 变换开展的。归纳起来,尾迹检测方法大致可以分为无先验知识的线状特征检测和有先验知识的扫描算法两大类。本文将分别对这两类方法进行介绍。

第一类方法主要是在未知舰船位置的情况下,通过对线性特征进行检测来提取舰船尾迹,最为常用的提取线性特征的方法是 Radon 变换。如 Rey 等人^[36,37]将 Radon 变换用于对 SEASAT 图像尾迹进行检测;Copeland^[38]描述了使用局部 Radon 变换检测尾迹的特征空间线性检测方法;Lin 等人则将形态学滤波与 Radon 变换结合起来^[39],并给出了一些尾迹检测的约束条件,根据这些条件对尾迹进行了检测。国内在尾迹检测方面的研究开始相对较晚,主要的研究成果包括王世庆等人^[40]提出的基于形态学滤波的 Radon 变换检测法,周建红等人^[41]提出的利用 Radon 变换检测窄 V 形尾迹的方法等。

第二类方法是已知舰船目标位置时,在舰船附近计算 180°之内各个方向上的亮度均值,从而得到一个扫描曲线,根据这个曲线判断出尾迹的可能位置。关于这个算法的研究和应用较少,目前已知的是,Eldhust 使用该方法对 ERS 图像进行了尾迹检测,Cusano 也曾使用此方法对 ERS 快视图像进行尾迹检测。

使用 Radon 变换进行尾迹检测的优势在于不需要关于舰船位置的先验知识,但 Radon 变换运算较为复杂,运算效率不高,在对数据量较大数据进行处理时速度极慢;而基于扫描的算法使用舰船目标的位置信息,在舰船目标附近的有限区域内进行检测,在检测的同时还将得到舰船的偏移量,其运算速度较快,并且所得信息还可用于检测舰船的速度,因此较之 Radon 变换要简单,但其需要关于舰船位置的先验知识,只能作为对舰船目标检测的验证和信息提取之用。

总的来说,与检测舰船本身相比,对舰船尾迹特征的检测要复杂得多,许多问题都需要被考虑。首先舰船尾迹具有一定的宽度,因此一般的边缘检测算法无法用于尾迹的检测;同时尾迹的强度可能高于海洋背景,也可能低于海洋背景,因而使用强度信息检测尾迹也是不可行的;此外,尾迹并不一定是笔直的,可能存在弯曲,并且在海洋表面还存在着大量的与尾迹相似的线状特征。所有这些问题都为舰船尾迹的检测带来了困难,因此尾迹检测算法方面的研究远少于舰船检测算法的研究。

2.4 结构家族

结构家族的方法基于背景基元分析背景特征,着力找出背景基元,认为图像是由许多背景基元和非背景基元即目标基元构成,通过实现对两种基元的分割实现检测。

2.4.1 数学形态学方法

数学形态学的本质就是使用结构基元寻找形状的空间重复性。肖利平等人^[42]提出一种基于形态学滤波的局部目标背景对比度法来实现目标检测。首先提取海背景区域,为了更好地完成目标检测,充分利用人类视觉系统非线性特点,采用形态学中膨胀与腐蚀相结合构成的非线性滤波器平滑图像,去除噪声以及与背景反差很大的像素点,从原始图像中减去滤波运算后的图像,得到一些重要的标记点即目标点。基于上述分析,提出一种基于形态学滤波的局部目标背景对比度法来实现目标检测。刘颖健等人^[43]提出一种数学形态学方法,并将其应用到舰船目标检测数据后处理中,以提高检测率。

2.4.2 特征矢量与模板

为解决可见光图像中舰船目标的黑白极性、海浪干扰等问题,徐军等人^[44]提出了基于特征域的舰船目标检测算法。该方法将灰度图像变换到特征域以克服目标难以检测的问题,生成突出目标的特征图。基于特征域的分割方法避免了灰度图像中舰船目标黑白极性的问题,便于后续的目标分割;同时,合适、理想的特征选取,在特征图上对海浪、云影和亮带进行强有力的压制,对尾流也能很好地控制,很好地解决了在灰度图像上目标和背景在灰度级上难以分割的难题。但是,如果背景的灰度分布复杂、受噪声影响大,会增加噪声对特征图的影响,产生误分割。此外,在特征转换的过程中还会对目标本身的轮廓有一些影响,利用该方法分割目标,形状信息将有所丢失。

邹焕新等人^[45]提出一种基于特征矢量匹配的 SAR 海洋图像舰船目标检测方法,用 DBFR 场模型来描述 SAR 图像的海洋分布,该算法通过提取 SAR 海洋图像中每个像素的分形值、分形模型拟合误差和方差统计量特征参数,结合图像像素的灰度值,形成一个对应于每个像素的特征矢量,并利用模糊

数学的模糊子集概念,提出了一种基于特征矢量匹配的舰船目标检测方法。该算法适合于复杂的 SAR 图像分布,稳定性较高,但计算量较大。李长军等人^[46]提出一种基于模糊理论的 SAR 图像海上舰船检测方法,该算法先通过熵最大准则进行 ROI 分割,然后选用三个具有位移和旋转不变性的特征,即舰船面积、舰船的灰度均值和舰船的主轴长度。通过这三个特征值确定隶属函数的形式,从而实现在图像的模糊特征平面上定量描述目标。

基于模板的阈值检测算法不仅考虑了舰船本身的强度信息,同时还将其周围像素的强度信息也作为检测依据的一部分,希望通过引入周围像素的信息提高检测的准确性。最广为人知的模板检测算法是 JRC 开发的 SUMO 检测器,这个检测器使用了四个 4×4 的滑动窗口作为检测模板,并使用了三个阈值对中心像素及其周围像素进行检测^[47,48]。但其阈值的设定来自于大量实验得到的经验参数,这组参数仅适用于特有的数据,对其他数据的效果并不理想,JRC 在 IMPAST 项目的报告^[49]中就曾指出,其 SUMO 算子对 Envisat ASAR 数据的检测结果不甚理想,并提出需要对检测算法的阈值参数和模板形式进行修改,以适应 Envisat ASAR 数据的检测需要。

2.5 多极化 SAR 遥感图像中的舰船检测方法

由于目前获取舰船多极化图像的限制,多极化检测算法尚处于研究过程中。在这里仅对其作一个简单的介绍。Sciotti 等人^[50,51]曾将广义高斯似然比方法用于对 SIRC SAR 数据进行检测;Touzi 等人^[52]利用极化熵对舰船目标进行了检测;Ringrose 等人^[53]将 Cameron 分解对 SIRC SAR 数据进行了检测,并取得了成功。在国内有田已睿等人^[54]根据 Envisat 的 AP 数据可以在一次成像过程中得到同一场景的两幅不同极化模式的数据,引入了基于矢量的 P-CFAR 检测器对交替极化数据进行检测。牛朝阳等人^[55]利用极化白化滤波算法融合 Envisat/ASAR 双极化复数据图像,同时抑制相干斑,然后利用双参数恒虚警率(2pCFAR)算法进行舰船目标检测。

3 舰船检测算法比较

在对目前已有的各类舰船检测算法作了较为全面的阐述,按照各类算法所基于的基础理论和研究思路的不同进行分类的基础上,对已有的舰船检测方法进行比较。本文对家族内部方法的比较称为纵向比较,家族之间方法的比较称为横向比较。

3.1 纵向比较

1) 统计家族

全局阈值分割算法、基于滑动窗的舰船检测以及 KSW 算法都是通过灰度或灰度的统计特征来进行分割的。三种方法的出发点都是通过寻找目标与背景之间的灰度差异,将目标与背景分割。全局阈值算法的优点是计算简单、易于实现,缺点是对局部有强烈变化的图像失效;基于滑动窗的方法比全局阈值算法有较好的局部适应能力,不足的是计算量随着滑动窗口的增大而增大;KSW 其实质也是全局阈值算法,由于其选择了两个阈值,检测结果的连通性较之前两者好,但其分割阈值是

基于直方图的最佳熵,只利用了灰度统计特性,没有考虑目标的空间结构信息,并且直方图的分布与图像内容的联系也具有不确定性,因此虚警较高。

2) 模型家族

高斯分布模型和 K 分布模型在该家族中占统治地位,研究该领域的学者较多,并将最新的理论成果与之结合,不断涌现出新的算法。多数情况下,这两个模型可以近似地描述背景杂波的分布模型,但对于复杂海面情况,检测效果很大程度上依赖于对背景杂波模型的估计,而在实际应用中受诸多因素的影响,杂波模型通常难以准确估计;此外,对于舰船目标与背景杂波差异较小的情况,如水上木船的检测,可能是无效的。分形模型和视觉显著度模型是除上述模型外研究较多的两个模型,这两个模型的实质是将图像灰度变换到特征域中,通过特征对图像进行分割,效果较好,但两种方法都有计算量大的缺点,很难达到实时的检测需求。

3) 变换家族

小波具有良好的时频局部特征、尺度变化特征和方向特征,可实现对信号的时频分析和多分辨率分析,在图像处理、计算机视觉、纹理分析等方面取得了良好的应用。小波分析和多分辨理论,基于舰船目标像元的空间相关性和背景杂波在不同尺度小波变换域快速递减的规律,可以有效地抑制背景杂波并突出待检测舰船目标,具有较好的自适应能力,能够检测出复杂背景中的弱目标。

由于 Hough 变换一般应用于二值图像,比应用于灰度图像的 Radon 变换速度快,并具有直线端点的定位能力。Radon 变换有三个缺陷,即 Radon 变换域中双 x 状亮线给变换域峰值检测带来困难;SAR 图像中较短的尾迹线段容易被海面噪声淹没而无法被检测到;Radon 逆变换无法显示尾迹的起点。利用 Hough 变换检测直线的方法是在 Hough 变换域中寻找极大值点,进而确定直线参数。对于图像中存在多条直线尾迹时,通常是依次检测 Hough 变换参数空间中的多个极大值点,而次极大值点的确定是通过直接选择窗口屏蔽极大值点后再检测最大值完成的。但实际上常常存在几条尾迹的对比度、宽度等特征并不相同,并且 Hough 变换属于非线性变换。一条直线对应的变换域中的极大值点区域并非有规则的形状,这给对极大值点的窗口选择带来困难。

4) 结构家族

利用数学形态学的方法进行检测,其结果依赖于结构基元的选择,如何选择较好的结构基元是该类方法的关键;基于特征矢量的方法,若其特征选择不合理,易导致算法的失败,且特征提取过程可能会耗费大量的时间,导致算法的速度较慢;基于模板匹配的方法,当图像发生非刚体变换时或噪声过高时,易导致模板的误匹配,最终使算法失效。

3.2 横向比较

舰船检测一般是对图像的某个域进行检测,在相应的域中,通过阈值分割得到检测结果。下面从计算复杂度、提取舰船的准确性、检测结果的连通性三个方面给出各大家族的优势和不足。

统计家族的优势是方法简单、易于实现,但适应能力和鲁

棒性较差,检测结果的连通性较差,准确性不高;模型家族的方法能够兼顾局部的随机性和全局的规律性,检测结果连通性较好,但由于利用模型表征图像信息而非利用灰度信息,易丢失目标的形状信息,且一般计算复杂度较高;变换家族对目标能进行多分辨表示,更加符合人眼视觉特征,但多分辨分解只是对低频进行分解,对高频不予考虑,而目标信息往往存在于高频,小波包分析虽克服了这一缺点,但效果不佳,并且计算量大;结构家族的方法利用局部信息进行检测,计算复杂度较低,但检测结果的连通性较差,抗噪能力不强,并且检测结果依赖于先验知识的获取。

4 存在的问题与发展趋势

本文对公开发表的国内外文献中关于遥感图像中舰船检测算法进行了一个总体的回顾。需要指出的是:一方面,在本文中介绍的各种星载 SAR 舰船检测算法和国外的各种成熟系统大多仍然是基于单通道单极化数据的,由于多极化数据能够有效地提高舰船监测和识别的准确率,随着 Envisat ASAR、AIOS/PALSAR、Terrian SAR 以及 RADARSAT-2 等多极化乃至全极化卫星的发射,利用多极化多通道数据进行海洋舰船检测将成为未来技术发展和应用的方向;另一面,随着 IKONOS、QuickBird 等高分辨率遥感卫星的发射,基于高分辨率遥感图像的信息提取与目标识别逐渐成为新的研究热点。

目前成像卫星图像有高、中、低不同分辨精度,同一目标在遥感图像上的特征取决于图像获取的传感器特性、时间、视角、空间分辨率、舰船速度、舰船颜色、海况特征、天气等因素,此外与舰船的大小、尺寸、形状也有关,这对实现快速准确检测舰船有较大影响。主要存在以下问题:

a) 目标在不同分辨率图像中显著性特征不同。在中低分辨率图像中,目标形状特征明显,目标灰度通常高于海域灰度,但不同类型的舰船相对于背景的对比度有很大差异;高分辨率图像中,目标除形状特征明显外,其结构特性也清晰可见,单一的分割方法难以得到好的分割结果。不同分辨率图像中选择何种显著特征进行目标提取需要进行研究。

b) 不同背景下舰船的检测方法有较大差异。在海陆背景图像即近岸的海域图像中检测舰船,由于受陆地及地上建筑物的影响,使得直接一次分割出舰船目标非常困难,一般先要海陆分离,从复杂的背景图像中分离出海域,再在海域中检测目标,从而降低目标检测复杂性,提高目标检测的准确性和效率。在复杂的海域图像中,可以直接检测舰船,但海浪、云与阴影的存在使得虚警很多,而且对检测的快速性要求较高,快速准确地检测出舰船是需要深入研究的。

c) 海域环境下背景广阔,目标稀疏且尺寸相对微小,实现舰船目标感兴趣区域(region of interest, ROI)的快速检测亟待解决。

d) 舰船是运动目标,其航行产生的尾迹包含丰富的信息,尾迹信息的利用有助于获取更多的目标信息。但遥感图像中舰船和尾迹往往有相似的灰度特性且连在一起,分离困难,检测尾迹就等同于检测舰船,同时这也是舰船鉴别困难的一个因素。当云层发生局部遮挡的时候,利用海面遗留下的尾迹检测

舰船也是一种方法。SAR 图像中关于舰船尾迹的研究很多,已有比较成熟的理论框架和实用算法,能否借鉴已有的技术手段来满足实际需求,是值得关注的一个问题。

针对以上问题,本文认为遥感图像中舰船目标检测的主要发展趋势有以下几点:

a)利用已有的地理信息进一步提高检测精度,如利用对港口目标的先验信息的适当表述,判断并识别图像中的港口目标,实现海陆的有效快速分割,减少计算量。

b)融合多源图像信息进行舰船检测和识别算法的研究。目前舰船检测算法只是在某一种或几种情况下检测性能良好,单一传感器获得的数据也存在一定不足。例如,SAR 图像观测范围广,但因成像机理产生的相干斑噪声造成检测虚警率高,目标特征不直观;可见光图像分辨率高,目标特征明显可用于识别,但观测范围和时间有限。如何融合多传感器的数据进行舰船的检测和识别,需要作进一步研究。

c)随着高分辨率成像卫星的发射,基于高分辨率遥感图像的信息提取与目标识别逐渐成为新的研究热点,高分辨遥感图像中蕴涵着大量的目标信息以及特征信息,如纹理、团块、上下文等特征,因此基于特征的检测算法将成为检测算法的发展趋势。

d)随着卫星应用与成像技术的发展,将检测算法与影像获取过程相结合,即在获取的图像中利用检测算法检测目标,利用已有的地理信息对存在目标的区域作多次拍摄获取更多图像数据,以提高检测结果的准确性。

参考文献:

- [1] 田明辉,万寿红,岳丽华. 遥感图像中复杂海面背景下的海上舰船检测[J]. 小型微型计算机系统,2008,29(11):2162-2166.
- [2] ELDHUSET K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR image in costal regions[J]. IEEE Trans on Geosciences and Remote Sensing,1996,34(4):1010-1019.
- [3] 侯四国,张红,王超,等. 一种新的 SAR 图像船只检测方法[J]. 遥感学报,2005,9(1):50-55.
- [4] CASSENT D,SU Wei,TURAGA D,*et al.* SAR ship detection using new conditional contrast box filter[C]//Proc of SPIE. 1999:274-284.
- [5] WAKERMAN C C,FRIEDMAN K S,PICHEL W G,*et al.* Automatic ship detection of ships in RADARSAT SAR imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2001,27(5):371-378.
- [6] KAPUR J N,SAHOO P K,WONG A K C. A new method of gray-level picture threshold using the entropy of the histogram[J]. Computer Vision,Graphics,and Image Processing,1985,29(2):273-285.
- [7] 种劲松,朱敏慧. 高分辨率合成孔径雷达图像舰船检测方法[J]. 测试技术学报,2003,17(1):15-18.
- [8] VACHON P W,CAMPBELL J W M,BJERKELUND C A,*et al.* Ship detection by the RADARSAT SAR validation of detection model predictions[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,1997,23(1):48-59.
- [9] JIANG Q,AITNOURI E,WANG S,*et al.* Automatic detection for ship target in SAR imagery using PNN-model[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2000,26(4):297-305.
- [10] TOUZI R. Calibrated polarimetric SAR data for ship detection[C]//Proc of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2000:144-146.
- [11] RINGROSE R,HARRIS N. Ship detection using polarimetric SAR data[C]//Proc of SAR Workshop. Paris:European Space Agency,2000:687-692.
- [12] 田巴睿,王超,张红. 星载 SAR 舰船检测技术及其在海洋渔业检测中的应用[J]. 遥感应用与技术,2007,22(4):503-512.
- [13] ELDHUSET K. Automatic ship and ship wake detection in spaceborne SAR images from coastal regions[C]//Proc of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1988:1529-1533.
- [14] NOCAK L M. Effects of polarization and resolution on SARATR[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System,1997,33(1):102-115.
- [15] IRVING W W,NOVAK L M,WILLSKY A S. A multiresolution approach to discrimination in SAR imagery[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System,1997,33(4):1157-1169.
- [16] VACHON P W,ADLAKHA P,EDEL H,*et al.* Canadian progress toward marine and coastal applications of synthetic aperture radar[J]. Johns Hopkins APL Technical Digest,2000,21(1):33-40.
- [17] VACHON P W,CAMPBELL J W M,BJERKLUND C,*et al.* Detecting surface vessels by RADARSAT[M]//Remote Sensing of the Pacific Ocean by Satellites. [S. l.]:Earth Ocean & Space Pty. Ltd.,1998.
- [18] VACHON P W,CAMPBELL J W M,BJERKLUND C,*et al.* Validation of ship detection by the RADARSAT synthetic aperture radar and the ocean monitoring workstation[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2000,26(3):200-212.
- [19] WAKERMAN C C,FRIEDMAN K S,PICHEL W,*et al.* Automatic detection of ships in RADARSAT-1 SAR imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2001,27(5):568-577.
- [20] REY M T,CAMPBELL J W M,PETROVIC D. A comparison of ocean clutter distribution estimators for CFAR-based ship detection in RADARSAT imagery,1340[R]. Ottawa:Defense Research Establishment Ottawa,1998.
- [21] REY M T,DROPOULOUS A,PETROVIC D. A search procedure for ships in RADARSAT imagery,1305[R]. Ottawa:Defense Research Establishment Ottawa,1996.
- [22] HENSCHER M D,HOYT P A,STOCKHAUSEN J H,*et al.* Vessel detection with wide area remote sensing technology[J]. Sea Technology,1998,39(9):63-68.
- [23] HENSCHER M D,OLSEN R B,HOYT P,*et al.* The ocean monitoring workstation:experience gained with RADARSAT[C]//Proc of Geomatics in the Era of RADARSAT. 1997.
- [24] HENSCHER M D,REY M T,CAMPBELL J W M,*et al.* Comparison of probability statistics for automated ship detection in SAR imagery[C]//Proc of SPIE. 1998:986-991.
- [25] CAMPBELL J W,VACHON P W,DOBSON F W. The extraction of ocean surface information from SAR imagery[C]//Proc of Geomatics in the Era of RADARSAT. 1997.
- [26] JIANG Qing-shan,AITNOURI E,WANG S,*et al.* Automatic detection for ship target in SAR imagery using PNN-model[J]. Canadian Journal of Remote Sensing,2000,26(4):297-305.
- [27] LO T,LEUN G H,LITVA J,*et al.* Fractal characterization of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets[J]. IEEE Proceedings F,1993,140(4):243-250.
- [28] GAN D,SHOUHONG Z. High-order fractal characterizations of sea-scattered signals and detection of sea-surface targets[J]. Electronics Letters,1999,35(5):424-425.
- [29] KAPLAN M. Improved SAR target detection via extended fractal fea-

- tures[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2001, 37(2): 436-451.
- [30] 张东晓, 何四华, 杨绍清. 一种多尺度分形的舰船目标检测方法[J]. 激光与红外, 2009, 9(3): 315-318.
- [31] WANG Su, WANG An-sheng. Cognition psychology[M]. Beijing: Peking University Press, 1992.
- [32] ITTI L, KOCH C, NIEBUR E. A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(11): 1254-1259.
- [33] 罗强, 罗莉, 任庆利, 等. 一种基于小波变换的卫星 SAR 海洋图像舰船目标检测方法[J]. 兵工学报, 2002, 23(6): 500-503.
- [34] 李晓玮, 种劲松. 基于小波分解的 K-分布 SAR 图像舰船检测[J]. 测试技术学报, 2007, 21(4): 350-354.
- [35] 彭石宝, 袁俊泉, 向家彬. 复杂杂波背景下海洋 SAR 图像中舰船目标的检测[J]. 雷达与对抗, 2006, 1(1): 29-33.
- [36] REY M T, TUNALE J K, FOLINSBEE J T, et al. Application of radon transform techniques to wake detection in seasat: a SAR images[J]. IEEE Tans on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 553-560.
- [37] REY M T, TUNALE J K, SCBBALD T. Use of the Dempster-Shafer algorithm for the detection of SAR ship wake[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31(5): 1114-1118.
- [38] COPELAND A C, RAVICHANDRAN G, TRIVEDI M M. Localized radon transform: based detection of ship wakes in SAR images[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 35-45.
- [39] LIN I I, KWONG L K, LIN Y C, et al. Ship and ship wake detection in the ERS SAR imagery using computer-based algorithm[C]//Proc of International Conference on Geoscience and Remote Sensing. 1997: 151-153.
- [40] 王世庆, 金亚秋. SAR 图像船行尾迹检测的 Radon 变换和形态学图像处理技术[J]. 遥感学报, 2001, 5(4): 289-294.
- [41] 周红建, 陈越, 王正志, 等. 应用 Radon 变换方法检测窄 V 形船舶航迹[J]. 中国图象图形学报, 2000, 5(11): 901-905.
- [42] 肖利平, 曹炬, 高晓颖. 复杂海地背景下的舰船目标检测[J]. 光电工程, 2007, 34(6): 6-10.
- [43] 刘颖健, 唐功友, 赵训洪, 等. 数学形态学方法在海面船目标检测中的应用[J]. 中国海洋大学学报, 2005, 35(3): 511-514.
- [44] 徐军, 向健勇, 周翔, 等. 基于特征域的目标分割算法[J]. 红外与激光工程, 1998, 27(2): 21-23.
- [45] 邹焕新, 匡纲要, 郁文贤. 基于特征矢量匹配的 SAR 海洋图像舰船目标检测[J]. 现代雷达, 2004, 28(8): 25-29.
- [46] 李长军, 胡应添, 陈学 . 基于模糊理论的 SAR 图像海上舰船检测方法研究[J]. 计算机应用, 2005, 25(8): 1954-1956.
- [47] KOURTI N, SHEPARD I, VERBORGHV J. Fishing boat detection by using SAR imagery[C]//Proc of AMRS Workshop on Ship Detection in Coastal Waters. 2000.
- [48] SCHWARTZ G, ALVAREZ M, VARFIS A, et al. Elimination of false positives in vessels detection and identification by remote sensing[C]//Proc of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2002: 116-118.
- [49] CHESWORTH J, LEMOINE G. IMPAST: improving fisheries monitoring by integrating passive and active satellite technologies results and analyses from the second year's campaign, I. 04. 3[R]. Ispra, Italy: Institute for the Protection and Security of the Citizen Cybersecurity and New Technologies for Combating Fraud, 2004.
- [50] SCIOTTI M, PASTINA D, LOMBARDO P. Polarimetric detectors of extended targets for ship detection in SAR images[C]//Proc of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2001: 3132-3134.
- [51] SCIOTTI M, PASTINA D, LOMBARDO P. Exploiting the polarimetric information for the detection of ship targets in nonhomogeneous SAR images[C]//Proc of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2002: 1908-1913.
- [52] TOUZI R, CLARONNEAU F, HAWKINS R K, et al. Ship-sea contrast optimisation when using polarimetric SARs[C]//Proc of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2001: 426-428.
- [53] RINGROSE R, HARRIS N. Ship detection using polarimetric SAR data[C]//Proc of SAR Workshop. Paris: European Space Agency, 2000: 687-689.
- [54] 田巴睿, 王超, 张红. Envisat AP 图像 P-CFAR 舰船检测方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(2): 183-187.
- [55] 牛朝阳, 马德宝, 李武阜. 基于联合 PWF-2pCFAR 算法的 Envisat/ASAR 双极化数据舰船检测方法研究[J]. 信息工程大学学报, 2008, 9(3): 319-322.
- [56] 尤晓建, 徐守时, 侯蕾. 基于特征融合的可见光图像舰船检测新方法[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(19): 199-202.
- [57] 蒋李兵. 基于高分辨光学遥感图像的舰船目标检测方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [58] 韩先锋, 李俊山, 孙满园. SAR 图像舰船目标分割算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(6): 41-44.
- [59] 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): 239-242.

(上接第19页)

- [3] HEFEEDA M, SALEH O. Traffic modeling and proportional partial caching for peer-to-peer systems[J]. ACM Trans on Networking, 2008, 16(6): 1447-1460.
- [4] ALLEN M S, ZHAO B Y, WOLSKI R. Deploying video-on-demand services on cable networks[C]//Proc of the 27th International Conference on Distributed Computing Systems. Washington DC: IEEE Computer Society, 2006.
- [5] 彭雪娜, 李佳, 闻英友, 等. 面向 P2P 流媒体直播的数据分发机制研究进展[J]. 计算机科学, 2010, 37(5): 15-20.
- [6] CHARIKAR M, GUHA S, TARDOS E, et al. A constant-factor approximation algorithm for the k -median problem[C]//Proc of the 31st Annual ACM Symposium on Theory of Computing. New York: ACM Press, 1999: 1-10.
- [7] JAIN K, VAZIRANI V V. Approximation algorithms for metric facility location and k -median problems using the primal-dual schema and Lagrangian relaxation[J]. Journal of the ACM, 2001, 48(2): 274-296.
- [8] CAMERON C W, LOW S H, WEI D X, et al. High-density model for server allocation and placement[C]//Proc of ACM SIGMETRICS International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems. New York: ACM Press, 2002: 152-159.
- [9] 中国互联网络信息中心(CNNIC). 第25次中国互联网络发展状况统计报告[EB/OL]. (2010-01-01)[2010-07-08]. <http://www.cnnic.net.cn/index/00/02/index.html>.