

HRWS SAR 图像舰船目标监视技术研究综述

邢相薇^{*①②} 计科峰^② 康利鸿^① 詹明^①

^①(北京遥感信息研究所 北京 100092)

^②(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是实现舰船目标监视应用的重要遥感手段之一。高分辨率宽测绘带(High Resolution Wide Swath, HRWS) SAR 能够同时获取方位向高分辨率和宽测绘带 SAR 数据,为 SAR 图像舰船目标监视带来了新的机遇和挑战。该文综述了国内外 SAR 图像舰船目标监视技术研究现状,总结了舰船监视对 SAR 成像系统基本性能要求,结合 HRWS SAR 成像特点,分析了舰船目标监视面临的关键技术问题,重点介绍了研究小组在 HRWS SAR 图像舰船目标检测、特征提取、分类识别等关键问题的解决方案和初步研究成果,并指出需进一步研究的方向。

关键词: 合成孔径雷达(SAR); 高分辨率宽测绘带(HRWS); 舰船目标监视

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2015)01-0107-15

DOI: 10.12000/JR14144

引用格式: 邢相薇, 计科峰, 康利鸿, 等. HRWS SAR 图像舰船目标监视技术研究综述[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 107-121. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14144>.

Reference format: Xing Xiang-wei, Ji Ke-feng, Kang Li-hong, *et al.* Review of ship surveillance technologies based on High-Resolution Wide-Swath Synthetic Aperture Radar imaging[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 107-121. <http://dx.doi.org/10.12000/JR14144>.

Review of Ship Surveillance Technologies Based on High-Resolution Wide-Swath Synthetic Aperture Radar Imaging

Xing Xiang-wei^{①②} Ji Ke-feng^② Kang Li-hong^① Zhan Ming^①

^①(Beijing Institute of Remote Sensing Information, Beijing 100092, China)

^②(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Synthetic Aperture Radar (SAR) is widely used in ship surveillance. High-Resolution Wide-Swath (HRWS) SAR data are simultaneously collected, which introduces challenges and offers new research opportunities. SAR-based ship-surveillance technologies and the performance requirements of SAR systems are reviewed and summarized. Furthermore, the characteristics of HRWS SAR imaging and ship surveillance technologies are considered in tandem, and preliminary research results on ship detection, feature extraction, and classification are discussed. Finally, we point out issues to be addressed in future work.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); High-Resolution Wide-Swath (HRWS); Ship surveillance

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是实现舰船目标监视的一种重要手段^[1]。与光学、红外和高光谱传感器相比, SAR 不受光照、气候等条件的影响,具有全天时、全天候的成像能力,且具有一定的穿透性。特别是星载 SAR 系统,具

有作用距离远、覆盖范围广、连续工作时长、成像模式丰富等优势,从而使其在众多舰船目标监视手段中脱颖而出^[2-4]。

在舰船目标监视应用中,一方面期望 SAR 成像具有较大的观测范围,从而分析区域内的舰船目标分布情况和观测完整的舰船编队;另一方面也期望 SAR 成像具有较高的分辨率,能够检测到更小尺寸的舰船目标,甚至实现舰船目标分类识别。然而,传统的 SAR 成像受雷达最小天线面积条件的约束,观测带宽和成像分辨率之间存在矛盾,从而

2014-11-25 收到, 2015-01-22 改回; 2015-02-06 网络优先出版

国家自然科学基金(61372163)资助课题

*通信作者: 邢相薇 xingxiangwei@nudt.edu.cn

制约了其在舰船目标监视方面更广泛的应用。以星载 SAR 最基本的 3 种成像模式即条带模式、扫描模式、聚束模式为例,它们的特点是成像分辨率越高则成像幅宽(或称为测绘带)越小,反之亦然^[5,6]。比如,扫描模式下成像幅宽能达到几百千米,而成像分辨率在几十米量级;条带模式下成像幅宽虽然能达到几十千米,但成像分辨率在几米量级;聚束模式下一次成像区域只有 $10\text{ km} \times 10\text{ km}$,其相应的图像分辨率则可以达到米级。由于经典的 SAR 成像模式不能兼顾成像分辨率和成像幅宽,而且星载 SAR 要经过数天后才能重访同一地区,因此,传统的星载 SAR 成像不能满足舰船目标监视的应用需求。

高分辨宽测绘带(High-Resolution Wide-Swath, HRWS)星载 SAR 成像技术解决了高成像分辨率和宽测绘带宽之间的矛盾,成像能力大幅提升^[7,8]。根据不同的成像算法和应用需求,未来的 HRWS 星载 SAR 将可以在多种成像分辨率和成像幅宽的组合模式下进行成像,如德国宇航中心在研的 HRWS 系统将能够获取 70 km 幅宽和 1 m 高分辨率的 SAR 数据,与 TerraSAR-X 条带模式(30 km 幅宽和 3 m 分辨率)的成像能力相比大大提高^[1]。欧空局计划发射的 Sentinel-1 星载 SAR 系统将具有 400 km 最大幅宽和 5 m 最高分辨率的成像能力^[1]。图 1 给出了 HRWS 星载 SAR 多模式成像的示意图。

HRWS 星载 SAR 成像技术的发展将极大地促进 SAR 图像舰船目标监视技术的研究,开启 SAR 图像舰船目标监视应用的新纪元。HRWS 将显著促进和改善舰船目标监视的性能,如提高检测率、检测更小尺寸舰船目标、有效区分舰船目标和虚警以

及为舰船目标分类识别提供可能性等。HRWS 星载 SAR 可以工作在多种成像模式,即获得不同的成像幅宽和分辨率的 SAR 图像,在未来的发展中还将与多极化等星载 SAR 成像技术相结合,衍生出更多的成像模式。在不同的成像分辨率和幅宽条件下,HRWS 星载 SAR 能够满足不同的舰船目标监视的应用模式,如大范围海域普查、重点海域监视、特定船只跟踪等。

然而,HRWS SAR 与传统 SAR 成像具有不同的特点,从而为 SAR 图像舰船目标监视带来了新挑战。方位向模糊虚警即是 HRWS SAR 图像舰船目标检测所遇到的挑战之一。自 2001 年 Suess 等人^[5,6,9]明确提出同时具有高分辨率和宽测绘带的成像方法以来,HRWS SAR 成像主要依赖于偏置相位中心(DPCA)、波束形成(BF)等技术和与之相应的单发多收、多发多收等多通道接收体制。在使用多通道接收体制实现 HRWS SAR 成像过程中,为了避免星下点回波和发射脉冲的干扰,采用不同的脉冲重复频率发射信号会引起对接收回波的非均匀采样和重构,从而使得方位向模糊度提高,即增加 SAR 图像中的方位向模糊虚警^[10]。

因此,鉴于 HRWS SAR 新的成像机理和舰船目标监视自身的特点,需要深入研究 SAR 图像舰船目标监视的各项技术。一方面,HRWS SAR 宽幅成像能力对舰船目标检测性能提出了更高的要求,特别是要保证复杂海洋背景环境、方位向模糊和旁瓣模糊等条件下的舰船目标检测性能。另一方面,HRWS 星载 SAR 的高分辨率特性为 SAR 图像舰船目标分类识别提供了可能,但由于 SAR 成像几何和舰船目标曳动等原因造成 SAR 图像中舰船目标存在十字模糊、目标遮挡、结构缺失等不利因素,再加上 SAR 目标电磁散射机理本身的复杂性和难以实现完全观测等原因,HRWS 星载 SAR 图像舰船目标特征提取和分类识别仍需进一步深入研究。

2 SAR 图像舰船目标监视研究现状

SAR 系统的发展为 SAR 图像舰船目标监视研究提供了客观条件。1978 年,美国发射了第 1 颗 SAR 海洋卫星——SEASAT,首次验证了星载 SAR 能够对大范围海洋区域中的舰船目标及其航迹进行观测。上世纪 90 年代以来,ERS-1/2, RADARSAT-1/2, ENVISAT, ALOS PALSAR, TerraSAR-X 等星载 SAR 系统的发射获取了大量 SAR 图像数据,为 SAR 图像舰船目标监视研究创造了客观条件。为了满足渔业生产、海上运输及国

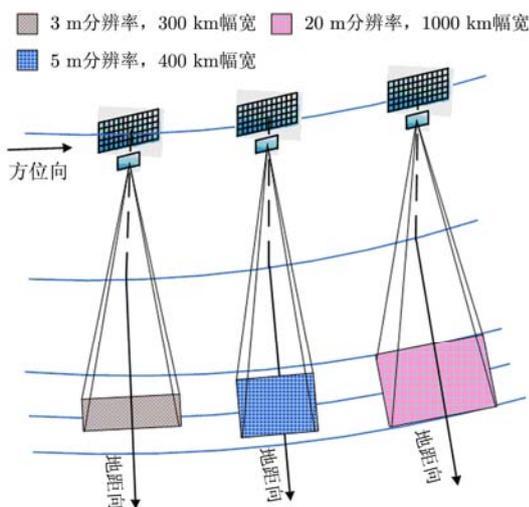


图 1 HRWS 星载模式成像示意图

Fig. 1 Illustration of the HRWS spaceborne SAR imaging mode

防安全部门对 SAR 图像舰船监视的应用需求,以及验证和评估不同成像条件下 SAR 图像舰船目标监视的性能,加拿大、美国、欧盟等国家和地区开展了大量的 SAR 图像舰船目标监视研究,并形成了典型的 SAR 图像舰船监视系统。

2.1 加拿大、美国研究现状

OMW 是一款在 SAR 图像中检测舰船目标的商业软件,同时具有油污监视和风浪提取等其他功能,主要应用于对 Radarsat-1 和 ERS 图像的实时分析^[1]。该系统由 Satlantic Inc.和加拿大渔业与海洋部(Fisheries and Oceans Canada)签约共同开发,其资金来源于国防部(Department of National Defence, DND)和加拿大遥感中心(Canada Centre for Remote Sensing, CCRS)。DND 通过渥太华国防研究机构(Defence Research Establishment Ottawa, DREO)为 OMW 提供技术支持,主要感兴趣于大范围监视中的舰船检测。OMW 系统的检测过程主要包括以下几个步骤:第 1 个步骤是图像获取,主要包括数据预处理、地理定标、陆地隔离、波缝(beam seam/nadir)模糊隔离等,其中陆地隔离利用了世界海岸线矢量数据库(World Vector Shoreline Database);第 2 个步骤是对图像中的目标进行预筛选,采用标准的 CFAR 方法,这种 CFAR 将 L 视的 K 分布作为海洋杂波的概率密度分布函数,不采用滑动窗口,而是在每个条带上只计算一个阈值;接下来是进行两个阶段的鉴别,第 1 个阶段采用面积、与其他目标或陆地之间的距离等简单的目标参数,第 2 个阶段则由人工手动完成,操作员可以根据自己的知识来进一步判定目标;最后,OMW 输出候选舰船目标的位置和面积信息。此外,如果图像中包含舰船尾迹,则进行尾迹检测并输出由尾迹估计的航向和航速。系统的算法和参数都是可以由用户进行选择的,并逐步实现了较为友好的操作界面。OMW 相关研究人员的下一步研究重点将关注于如何利用多极化图像如 Radarsat-2 图像来减少现有系统较多的虚警。

AKDEMO 是美国 NOAA/NESDIS 项目中演示 Radarsat-1 图像在阿拉斯加地区实时应用的系统^[12]。Wackerman 等人^[13]具体描述了该系统,其核心部分即 CFAR 检测器是由 Veridian ERIM 国际公司开发的。AKDEMO 舰船检测系统的主要步骤包括:陆地隔离,包含有 ± 2 km 的缓冲区,其目的是消除陆地掩膜误差带来的影响,需要对其进行特别处理以降低虚警率;检测模块由滑动窗口的双参数 CFAR 来实现;系统没有通用的虚警鉴别步骤,但对两种特别的虚警进行了处理,一种是 SAR

系统的噪声阶跃样本,另一种即为陆地掩膜误差引起的虚警。对系统的评估表明,该系统具有良好的性能,而且可以对 ENVISAT 等极化数据进行处理。

2.2 欧盟研究现状

面向渔业监测、溢油污染监测、海岸安全等应用需求,从 2002 年起,欧盟组织多家单位开展一系列的研究,已成为 SAR 图像舰船目标监视研究的重镇。IMPAST(Improving fisheries Monitoring through integration Passive and Active Satellite based Technologies)项目开启了欧盟利用 SAR 图像改善渔业舰船监测性能的先河^[14]。自 2002 年 1 月启动,IMPAST 项目联合了 14 个研究机构和商业伙伴,其目标是利用遥感技术开发近实时的舰船探测运行系统,进而与船只监视系统(Vessel Monitoring System, VMS)相结合,改善渔业检测效果^[15]。经过为期 3 年的研究,欧盟 JRC,英国 Qinetiq 开发了相应的 SAR 图像舰船探测系统,西班牙 UPC 等对舰船 SAR 成像进行了模拟研究。IMPAST 项目最终形成了一个完整的实用舰船探测示范系统,对 Radarsat-1 和 ENVISAT 数据进行处理。

在 IMPAST 项目的基础上,欧盟于 2003 年 5 月启动了第 5 框架项目 DECLIMS^[15,16]。DECLIMS 项目的目标是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,开展基准实验评估各类探测方法的优缺点,满足用户需求,并且推动新型传感器和平台的研制,满足舰船监视的实用化要求。与 IMPAST 项目相比,DECLIMS 项目的合作单位扩展到 24 家,进一步支持了法国 BOOST 公司的 SARTool,英国 AMRS,挪威 Eldhuest, MeosView, AEGIR,意大利罗马大学,Alenia Aerospazio,新加坡,中国中科院电子所等 SAR 图像舰船检测算法和监视系统的研发。通过采用相同的 SAR 数据和地面调查数据,DECLIMS 开展了基准实验对典型的 8 种算法进行分析和评估^[17]。

为了更好地将 SAR 图像舰船监视的研究服务于全球环境和安全监视(Global Monitoring for Environment Security, GMES),欧盟进一步启动了海事安全服务项目(MARitime Security Service, MARISS)作为 GMES 的一个重要服务单元(GMES Service Element, GSE)^[18]。自 2005 年启动以来, MARISS 集结了一大批政策制定部门、用户团体及信息服务公司等力量,旨在解决欧盟海域的非法海上交通活动。项目综合利用岸基雷达信息、船只检测系统(VDS)、船只监视系统(VMS)、自动识别系统(AIS)以及地球观测(EO)产品如船只

检测报告、关键特征检测报告等,从而致力于增强对海洋边境监视的能力。在上述框架下, MARISS 将综合利用和关联不同类型的数据,并改进目前所能提供的信息,最终实现统一的实用性服务。该项目主要提供 4 个服务功能: (1)公开海域舰船检测:综合利用 AIS, VMS 船只报告以及 SAR 舰船检测和参数估计结果,最终结果发送到用户终端; (2)海洋边境线的舰船跟踪:综合利用船只跟踪系统 (Vessel Tracking System, VTS) 雷达和 SAR 舰船检测产品,对于驶入领海区域的船只为其提供向前追溯 3 h 的 VTS 数据,从而与前述 3 h 内获取的 SAR 数据进行关联;对于驶出领海区域的船只,提供后续 3 h 内的 VTS 数据,并与该时间范围内的 SAR 数据进行关联。(3)关键区域的异常检测:通过比对不同类型、不同时间获取的数据,对重点海岸区域内的特殊特征进行检测。这些特殊特征包括人群的聚合、加油区域、救援营区等。对上述类型信息的分析,有助于揭示热点区域的异常并触发专门的监视行动。(4)决策帮助:通过综合 EO 舰船检测结果和辅助数据,提供决策建议,最终结果将与 GIS 进行综合和分发。

在 MARISS 项目的支持下,西班牙 GMV 开发的舰船监视系统 (ShIp MONitoring System, SIMONS) 主要对 SAR 图像和 AIS 数据进行自动处理,提供近实时的服务^[19]。SIMONS 系统在 SAR 舰

船检测的基础上重点开展 SAR 舰船分类、识别,并综合利用自动识别系统和 GeoPortal 网页等提供实时的海上船只监视服务,其数据处理流程如图 2 所示。通过 140 多幅 30 m 分辨率的 ENVISAT 数据和相关的 AIS 数据交叉验证表明, SIMONS 系统对西班牙附近海域的部分船只正确分类率接近 60%。在后续的工作中, Margarit 等人还进一步分析了典型舰船目标在极化、极化干涉 SAR 数据中的散射特性,提取稳健的特征对其进行分类识别,开辟了 SAR 图像舰船目标分类识别研究的新方向。

受益于 TerraSAR-X 数据的获取和应用需求,德国宇航局 (DLR) 重点开展了高分辨 SAR 图像舰船监视研究。作为欧盟全球环境和安全监视 (Global Monitoring for Environment Security, GMES) 计划的一部分, DLR 在 DeMarine-Security 项目中开展了海上人造目标检测 (Detection of Artificial Objects in Sea Area, DEKO) 子项目^[20,21]。该项目的执行周期为 2008 年 5 月到 2011 年 3 月,其主要目标有 3 个, (1)根据处理结果定义 GMES 下游应用的概念; (2)开发新型的检测和分类算法对舰船和其他海上人工目标进行分析; (3)对 SAR 系统工作参数进行实验验证。DEKO 系统基于商业化的遥感影像处理平台,对公开海域及海岸线/港口两类区域的舰船目标进行监视,其界面示例如图 3 所示。其主要处理步骤包括:相干斑去噪和基于海岸线数据库



图 2 SIMONS 系统数据处理流程

Fig. 2 Data procedures of the SIMONS system

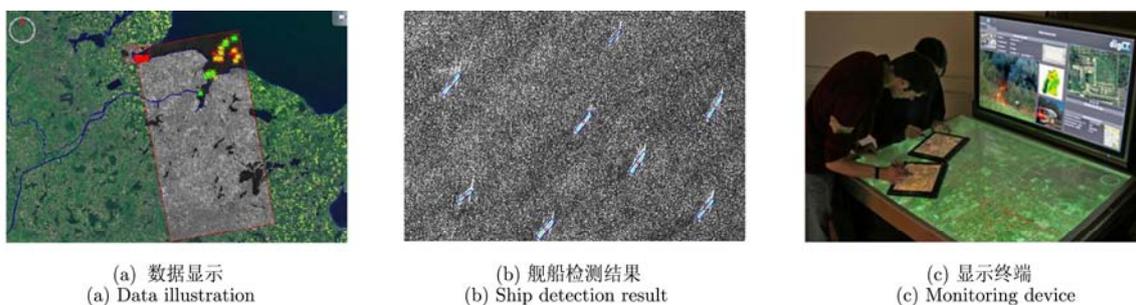


图 3 德国 DLR DEKO 系统示例

Fig. 3 Illustration of the DLR DEKO system, Germany

的陆地掩膜等预处理、舰船 ROI 区域分割和聚类、舰船区域参数提取、初步分类识别等。

2.3 我国研究现状

我国从上世纪 90 年代开始对 SAR 图像舰船目标监视进行研究。中科院电子所、国防科技大学、武汉大学、海洋二所、中科院遥感与数字地球研究所、解放军信息工程大学等单位分别对 SAR 图像舰船目标检测、特征提取和分类识别等进行了深入研究。中科院电子所在国内率先开展相关研究并参与欧盟 DECLIMS 项目,开发了名为“Ship Surveillance”的 SAR 图像舰船目标检测系统^[22];国防科技大学在近 10 年内持续开展 SAR 图像舰船目标监视研究^[23-28],开发了名为“SARWAMS”的 SAR 图像舰船目标检测系统,并对舰船目标分类识别和 SAR 与 AIS 综合的舰船目标监视技术进行了探索。中科院遥感与数字地球研究所在高分辨率 SAR 图像舰船目标分类识别方面开展了有益的研究^[29-31]。

2.4 SAR 图像舰船目标监视性能

由于开展水面遥感探测实验较为复杂,因此对各类监视系统的性能进行系统性评估的工作开展较少。DECLIMS 项目开展了基准实验^[7],采用工作在不同模式(S5, S7, W2, W3, SNA, SNB)的 17 幅 RADARSAT-1 图像对项目中的 8 个监视系统进行性能测试和评估。由于 VMS 和目视判读结果等验证数据存在一定的不确定性,基准实验对各系统最终检测结果采用软判决的方式进行评估。将目视判读结果作为验证数据的条件下,有些“理想”的图像中检测率大于 97%,大部分图像检测率在 85%~95%,一些“恶劣”的图像检测率只有 75%~90%甚至低至 70%~80%。将 VMS 数据作为验证数据的条件下,有 8 幅图像的检测率在 80%~100%,5 幅图像的检测率在 40%~75%。基准实验结果表明没有一种检测算法优于其他所有的方法,有些算法在某些情况下性能较好,而另外的算法则在另外的情况下性能较好。同时,基准实验还揭示了 SAR 图像舰船目标检测中需要继续研究的问题,如特殊海洋特征、成像旁瓣和方位模糊等容易引起虚警、海陆分割不精确、相邻目标难以区分以及检测算法参数不能自动化选取等。

DEKO 采用 20 多幅 1.2~2.5 m 分辨率条带模式 TerraSAR-X SAR 图像和相关的 AIS 数据分析了系统性能^[32]。初步的结果表明,DEKO 系统对舰船和其他人造目标的检测率达到 96%,对舰船尺寸参数提取误差在 3~10 个像素左右,方位估计误差在 9°以内。但是,该系统仍不能将尺寸较小的舰船目

标与海洋杂波及其它人造目标进行完全区分,而且风暴、方位向和距离向模糊会造成漏检和虚警等。

此外,SAR 图像舰船目标监视应用对监视系统的处理效率也有近实时性的要求^[17,33]。SAR 图像舰船目标监视数据处理流程从卫星获取开始,包括地面站接收、SAR 处理、SAR 舰船检测、检测结果与其他数据源融合处理,直到将最终处理结果发送到用户终端。如果整个处理流程都在地面接收站内进行,则目前对单幅图像最快的处理速度是 5 min,其中舰船目标检测部分耗时小于 1 min。如果数据处理中涉及到不同站点间的数据交换和专家人工判读,则需要考虑到 FTP 数据传输的耗时,目前从数据获取到最终将检测结果呈现在用户面前的耗时约 20~30 min。

由于不同 SAR 系统的成像波段、极化方式、成像模式等参数造成图像分辨率和观测带宽不同,需要选择合适的成像参数用于 SAR 图像舰船目标监视应用。加拿大 OMW 和欧盟 DECLIMS 项目都对不同 SAR 成像模式下舰船监视性能进行了系统的分析和研究^[34]。在公开海域,由于观测范围较大且舰船目标具有较大的尺寸,具有 50 m 分辨率和 300 km 测绘带的 RADARSAT-1 窄扫描远场模式较为适用。在港口区域,由于众多小尺寸船只的观测需求,具有 25 m 分辨率和 100 km 测绘带的 RADARSAT-1 第 4~7 标准波束模式和 ENVISAT IS4-7 模式(入射角大于 45°时采用 HH 极化,小于 45°时采用 HV 极化)的 SAR 图像较为适用。对于更小的如长度为 10 m 量级的船只,8 m 分辨率的 RADARSAT-1 精细模式图像更为适用,但只有 50 km 的测绘带宽会限制其应用范围。舰船参数提取和分类识别对 SAR 图像分辨率要求更高。DECLIMS 的基准实验表明在较为有利的条件下标准模式的 RADARSAT-1 图像可对 70 m 以上的船只大小进行估计,而 8 m 分辨率精细模式的图像可对 25 m 以上船只大小进行估计。西班牙 SIMONS 系统采用 30 m 分辨率的 ENVISAT 和 ERS 图像只能实现对少部分检测到的舰船进行分类识别,与 AIS 交叉验证表明其分类识别率约为 60%。德国 DEKO 系统采用高达 1.2~2.5 m 分辨率的 TerraSAR-X 图像实现了舰船目标几何参数提取和初步分类,其长度估计误差为 19.6 m,方位角估计误差为 9°以内,对结构较为明显的 3 类船只分类率达到 81%。ENVISAT, ALOS PALSAR, RADARSAT-2 等提供了双极化甚至全极化的观测能力,有利于利用极化信息改善 SAR 图像舰船目标监视性能。研究表明,舰船目标在 HH 极化和交叉极化通道中较为明显,而尾迹等海洋特征

则在 VV 极化通道中较为明显。当入射角大于 45° 时, HH 通道更适用于舰船检测, 而入射角小于 45° 时, 交叉极化 HV 或 VH 更适用于舰船检测。多极化信息的获取还有助于对舰船目标进行参数提取, 如分析舰船目标的基本散射体类型等。但是, 极化信息必须与高分辨率相结合才能达到预期的目的。

此外, 为了更好地得到舰船监视性能, 需要联合使用 SAR 图像与其他辅助数据如 VMS(渔船), AIS(商船)及 LRIT(商船, Long Range Identification System)等^[35]。基于目前 SAR 图像舰船目标监视的研究成果, 表 1 给出了利用 SAR 图像进行渔业管理应用对未来 SAR 系统的性能要求^[36]。

表 1 利用 SAR 图像进行渔业管理应用对未来星载 SAR 系统性能要求

Tab. 1 Requirements for future SAR sensors for fisheries control

性能要求	公开海域渔业管控		近岸或港湾内渔业管控	
	最低要求	理想情况	最低要求	理想情况
重访周期(d)	3	1	3	1
数据传输(卫星获取后)	< 1 h	< 15 min	< 1 h	< 15 min
极化方式	HH	HH+HV	HH	HH+HV
等效视数	3	5	3	5
分辨率(m)	55	30	25	10
最小幅宽(km)	300	400	100	150
入射角($^\circ$)	> 30	> 35	> 35	> 35
地理定标精度(m)	300	150	150	50

3 HRWS SAR 图像舰船目标监视关键技术分析

HRWS SAR 成像具有同时获取高分辨率和宽测绘带数据的能力, 从而为 SAR 图像舰船目标监视研究提供了更为有利的条件, 也会给 SAR 图像舰船目标监视研究带来新的挑战。一方面, HRWS SAR 宽测绘带特性将拓展 SAR 图像舰船目标监视的范围, 更有利于实现大范围海域普查、舰船编队监视跟踪等; 另一方面, HRWS SAR 的高分辨率特性有助于对热点区域和重点舰船目标进行监视, 特别是 HRWS SAR 高分辨率图像对舰船目标的刻画更为精细, 从而为 SAR 图像舰船目标分类识别提供了可能。

目前, 由于星载 HRWS SAR 实测数据难以获取, 直接基于实测 HRWS SAR 数据进行舰船目标监视的研究尚未见诸报道, 部分学者分别针对 HRWS SAR 高分辨率和宽测绘带的特点进行了舰船目标检测研究。一方面, 在高分辨率 SAR 图像中, 舰船目标表现为扩展目标, 船体结构细节特征更为明显, 且海洋杂波背景更为复杂, 需要对已有的检测算法进行改进以适应图像高分辨特性^[30,37-39]; 另一方面, 测绘带宽的提高易产生方位向模糊, 极化信息的引入有助于减少检测结果中的方位向模糊虚

警^[40,41]; 同时, 高分辨率或宽测绘带数据的数据量急剧增加, 为了保证检测的实时性, 需设计相应的快速检测算法^[37,42]。此外, 部分学者还利用 HRWS 成像的多通道体制, 设计了相应的运动目标检测算法^[43,44]。

结合 HRWS SAR 图像特点和 SAR 图像舰船目标监视技术的研究进展, 作者认为 HRWS 星载 SAR 图像舰船目标监视仍然需要对如下几个关键技术开展研究:

(1) 复杂海洋背景条件下的舰船目标检测是 HRWS SAR 图像舰船目标监视关键技术之一。复杂海洋背景环境, 如高海况、洋流变化、高航行密度等, 将使 HRWS 星载 SAR 图像舰船目标检测的性能下降。在高海况或洋流变化区域, SAR 图像海洋背景杂波呈现为不均匀的统计特性, 强散射杂波和杂波边缘等使得检测虚警率提升或检测率下降。在高航行密度区域, 相邻目标的雷达回波容易形成相互干扰, 从而造成检测结果中出现漏检、目标结构缺失等现象。

(2) 利用多极化数据减少 SAR 成像中的方位向模糊、旁瓣模糊等虚警是 HRWS SAR 图像舰船目标监视的另一关键技术。多极化和 HRWS 相结合描述了成像地物和目标更为丰富的散射特性, 从中不

仅可以提取物体的散射强度,还可以分析分辨单元的散射类型,一方面可以分析不同极化方式对舰船目标检测性能的影响,另一方面还为消除方位向模糊、旁瓣模糊等虚警提供了可能,通过综合利用多通道极化信息可以有效减少检测结果中的虚警。

(3) 面向高分辨 SAR 图像舰船目标分类识别的特征提取也是实现 HRWS SAR 图像舰船目标监视的一项关键技术。受成像几何、雷达参数及舰船运动特性的影响, SAR 图像中舰船目标区域易受相干斑噪声、成像旁瓣、运动模糊及相邻船只干扰等因素的影响,从而使得舰船目标特征提取不够精确;另一方面,随着 HRWS 星载 SAR 图像分辨率的提高,分析不同类型舰船目标在 SAR 图像中的散射特点,提取有效的分类识别特征也亟待进一步研究。

(4) 在舰船目标检测、特征提取等研究基础上, HRWS SAR 图像舰船目标监视还亟需对高分辨 SAR 图像舰船目标分类识别算法这一关键技术进行深入研究。与 SAR 系统发展水平和人类对舰船目标监视的迫切需求相比,星载 SAR 图像舰船目标分类识别的研究仍然十分薄弱和不足。随着 HRWS 星载 SAR 图像数据的获取,人们对星载 SAR 图像舰船目标监视提出了更高的要求,不仅要求从 SAR 图像中获取舰船目标的位置、几何参数、运动状态等基本信息,而且希望获知观测舰船目标的类别信息。但是, SAR 图像中的舰船目标往往存在目标遮挡、方位敏感及不完全观测等特点,这就需要研究具有鲁棒性的 SAR 图像舰船目标分类识别算法。

4 HRWS SAR 图像舰船目标监视初步研究成果

针对 HRWS SAR 图像舰船目标监视所面临的上述关键问题,以发展自动/半自动的 HRWS SAR 图像舰船目标监视系统为目的,结合我国 SAR 成像卫星与地面应用系统建设及发展需求,在大量国内外星载 SAR 实测数据的支持下,作者所在的研究小组在舰船检测、特征提取、分类识别等方面进行了初步的探索性研究。

4.1 复杂海洋背景条件下的舰船目标检测^[45]

在实际的应用中,用于舰船目标检测的 SAR 图像一般具有较宽的测绘带,而分辨率则较低。对于 HRWS SAR 图像,虽然用于舰船检测的 SAR 图像也成像于宽幅模式,然而其分辨率却得到了提高。在图像分辨率提高及复杂的海况条件下, SAR 图像海洋杂波起伏更为严重,经典的统计分布模型已不足以描述其统计特性。 G^0 分布对不同波段、不同极化方式、不同分辨率、不同海况等条件下的 SAR 图

像海洋杂波均具有较强的建模能力。因此,作者提出引入 G^0 分布描述 SAR 图像海洋杂波统计特性,进而计算 CFAR 检测阈值。

另一方面,复杂海洋背景还表现在 SAR 图像海洋杂波出现的杂波边缘和干扰目标的情况。每幅 SAR 图像覆盖上千平方千米的海洋区域,在该区域内海洋的风场条件一般有所变化,在不同的风场区域,其雷达后向散射强度有所差异,从而在不同区域的交界处形成杂波边缘环境;同时,由于成像噪声、风暴及相邻目标的影响,待检测舰船目标的背景杂波中可能存在较强的干扰回波,即存在干扰目标的情况,从而对待检测舰船目标形成遮掩效应。经典的 CFAR 检测器在杂波边缘和干扰目标杂波环境中检测性能下降,出现检测率下降或虚警率上升的情况。作者设计的变化索引和筛选 CFAR 检测器在均匀杂波、杂波边缘、干扰目标等杂波环境中检测性能具有鲁棒性。

因此,基于上述两方面的考虑,作者提出一种复杂背景中的 SAR 图像舰船目标检测算法,综合考虑了海洋杂波的统计特性和不同的杂波环境。算法的原理框图如图 4 所示。图 5 给出了对我国香港地区的 TerraSAR-X 实测数据的检测结果。实验图像距离向和方位向分辨率分别为 1.9 m 和 3.3 m,人工判读实验区域内包含 41 个舰船目标。将本文检测算法与经典的 CA-CFAR, VI-CFAR 进行对比发现,本文算法检测出了所有的舰船目标,而 CA-CFAR 和 VI-CFAR 方法的检测结果中分别出现了 4 个和 3 个漏检目标。进一步观察它们所处的背景环境发现,这几个目标周围都有邻近的目标,邻近目标对其形成了干扰,从而使得 VI-CFAR 的检测率下降。

4.2 面向虚警去除的多极化 SAR 图像舰船目标检测^[46]

与单极化 SAR 相比,极化 SAR 提供了多通道的数据和更为丰富的散射信息。通过分析舰船目标与海洋背景的不同极化散射特性,能够改善舰船目标检测的性能。但是,由于 HRWS SAR 成像的特点所引起的方位向模糊、舰船强散射点引起的旁瓣模糊等大量虚警,使得传统的极化 SAR 图像舰船目标检测方法的性能有所下降。

我们利用极化 SAR 数据分析舰船目标及其背景不同的散射机理,构造加权极化特征向量并输入 SVM 分类器实现舰船目标检测,算法流程如图 6 所示。具体地,算法首先根据相干矩阵分解提取每个像素相干矩阵的特征值,在训练阶段,分别选取舰船目标、海洋杂波、模糊噪声(如果存在的话)的训练样本,通过 RELIEF-F 特征选择获得每个特征的

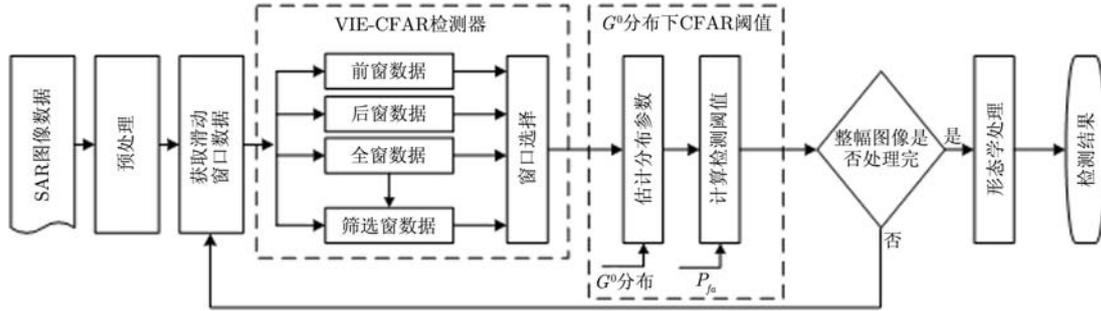


图4 复杂背景下 SAR 图像舰船目标检测算法框图

Fig. 4 Framework of the ship detection algorithm on SAR imagery in case of complex background

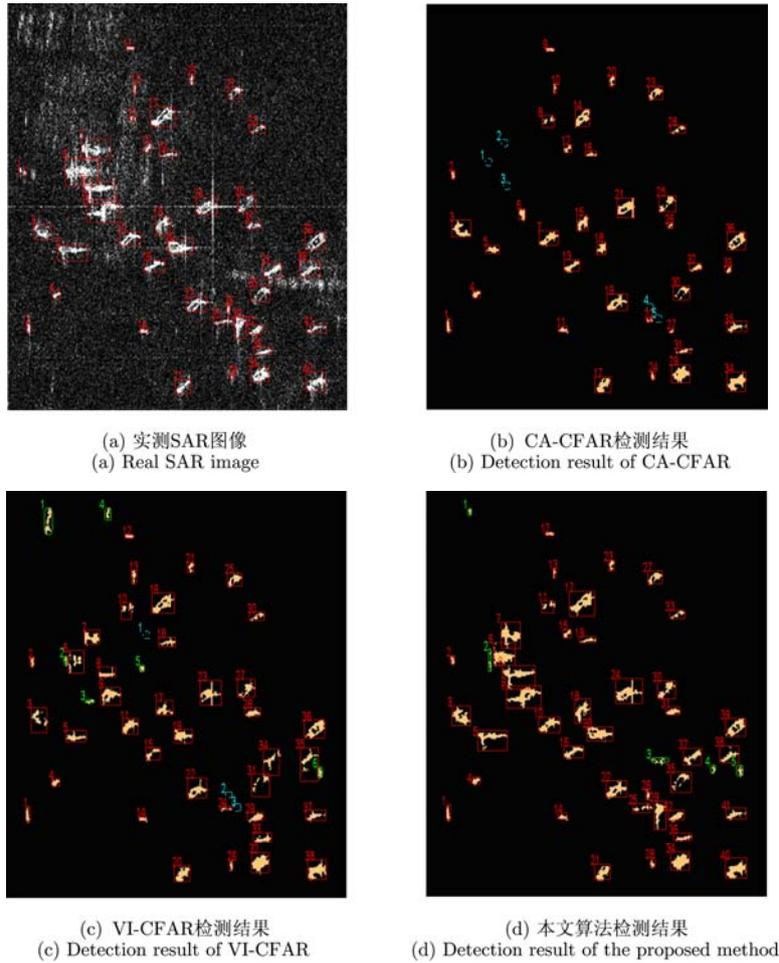


图5 TerraSAR-X SAR 图像舰船目标检测结果

Fig. 5 Ship detection results on TerraSAR-X SAR imagery

权值，然后输入 SVM 分类器训练分类器的参数；在测试阶段，根据训练结果对每个测试像素的特征向量进行选择 and 加权，然后输入训练好的 SVM 分类器，进而判定该测试像素是否属于舰船目标类别。

将上述算法应用于实测的 AIRSAR 数据，如图 7 所示。图 7(a)为 C 波段全极化数据 Pauli 合成图，经人工判读，其中包含有 9 个舰船目标和 1 个虚警。

图 7(b)为 HH 极化单通道数据中的 CA-CFAR 检测结果，检测出 9 个舰船目标，但同时引入了 9 个虚警。图 7(c)为本文算法的检测结果，也成功地检测出 9 个舰船目标且有效地去除了方位向模糊虚警。

4.3 高分辨 SAR 图像舰船目标特征提取^[45]

特征提取是 SAR 图像解译的重要步骤，也是 HRWS SAR 图像舰船目标监视研究中的关键技术

之一。通过提取 SAR 图像舰船目标的相应特征，一方面可以进一步鉴别检测结果中的虚警；另一方面，通过提取特征降低原始数据的维数，并揭示不同目标的内在本质特性，从而有助于对目标进行分类识别。

在高分辨率 SAR 图像中，舰船目标的几何尺度、区域等特征受船体区域后向散射起伏、成像旁

瓣效应、相邻目标干扰等因素的影响，使得提取结果不准确。作者重点针对十字旁瓣和邻近目标的现象，提出一种基于 Radon 变换和直方图分析等方法改善舰船目标几何特征提取的性能。算法流程如图 8 所示。利用该算法对部分舰船目标的特征提取结果如图 9 所示。

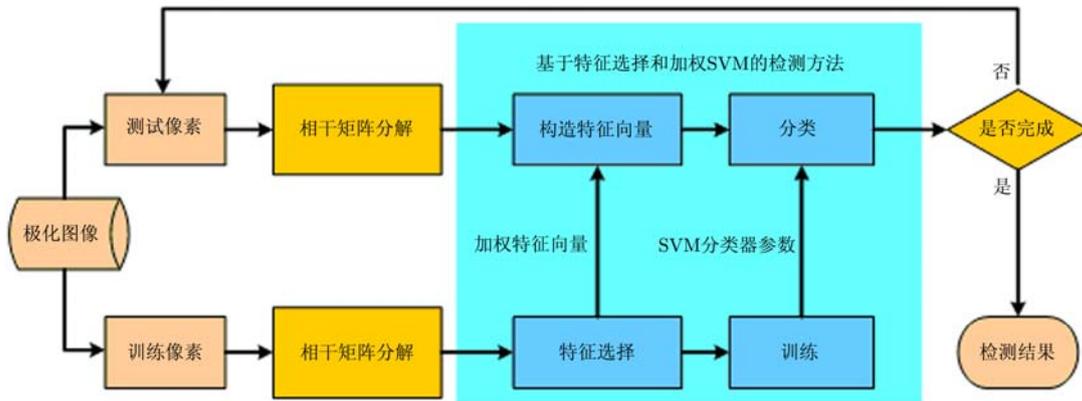


图 6 基于特征选择加权和 SVM 的极化 SAR 舰船目标检测算法流程

Fig. 6 Flowchart of the SAR ship detection algorithm based on feature selection and weighted SVM

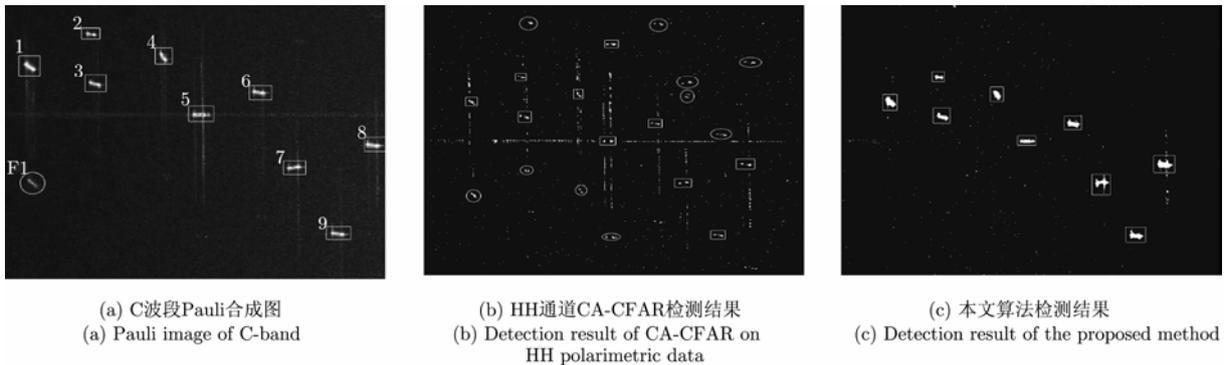


图 7 面向模糊虚警去除的多极化 SAR 图像舰船目标检测结果

Fig. 7 Remove of ambiguities for ship detection using multi polarimetric SAR data

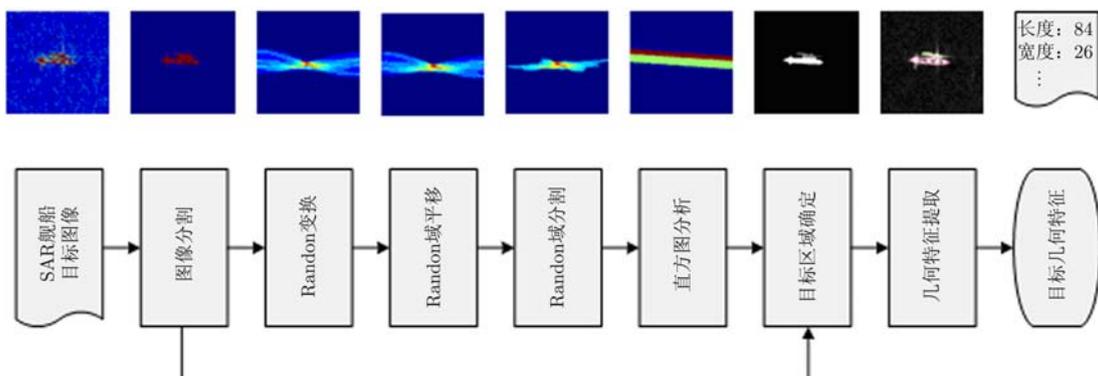


图 8 舰船目标几何特征精确提取算法流程图

Fig. 8 Framework of the precise extraction method of ship's geometric features

SAR 成像技术的发展为 SAR 图像舰船目标电磁散射特征提取提供了条件。电磁散射特征是 SAR 图像中舰船目标的本质特征，揭示了舰船目标各个部位的散射机理，具有易于理解和直观的物理意义，但限于图像分辨率和极化/极化干涉 SAR 数据处理的限制，SAR 图像舰船目标电磁散射特征提取仍需深入研究。

宏结构是指由船体、上层建筑、功能性设备等引起较强雷达后向散射的舰船部件所组成的结构。不同舰船目标具有不同的几何结构，特别是起重架、驾驶舱、船舷、舱口、输油管等部件在 SAR 图像上形成了强散射点。这些部件反映了舰船目标中强散射结构的分布，描述了舰船目标在 SAR 图像中的宏观散射特点，因此称之为宏结构散射特征。作者针

对油船、集装箱、货船等 3 种典型的舰船目标，从分析它们的宏结构及散射特点出发，利用图像处理的方法从 SAR 图像中提取了它们的宏结构特征宏结构散射特征的提取方法如图 10 所示。部分舰船目标的宏结构散射特征提取结果如图 11 所示。

4.4 高分辨 SAR 图像舰船目标分类识别^[47]

相对于舰船目标检测技术的深入研究和应用而言，关于星载 SAR 图像舰船目标分类识别的研究还处于起步阶段。目前，国外研究机构开发的舰船目标识别系统还不能完全地实现舰船目标的分类识别。在过去相当长的一段时间内，受分辨率的限制，SAR 图像舰船目标分类识别研究主要基于仿真数据、高分辨机载 SAR 以及 ISAR(Inverse SAR)数据开展。SAR 图像舰船目标分类识别的实现途径主要有

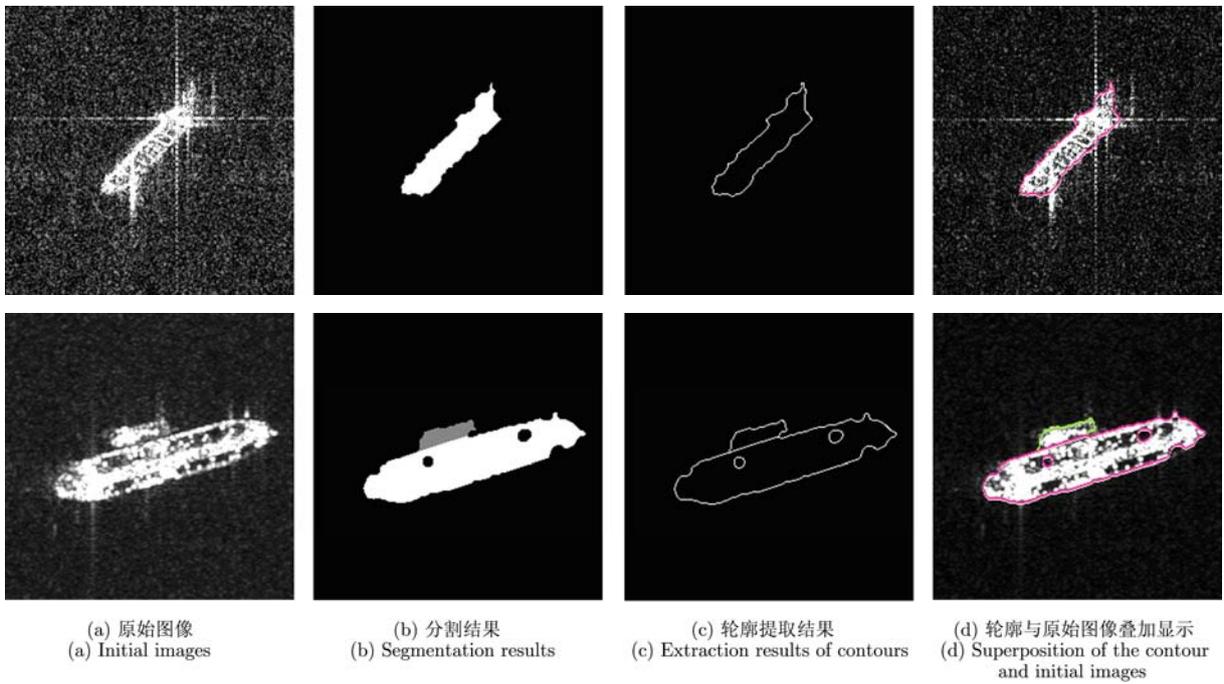


图 9 十字旁瓣模糊和邻近目标舰船目标切片分割结果

Fig. 9 Segmentation results of the ship target with cross side-lobe ambiguities and neighbors

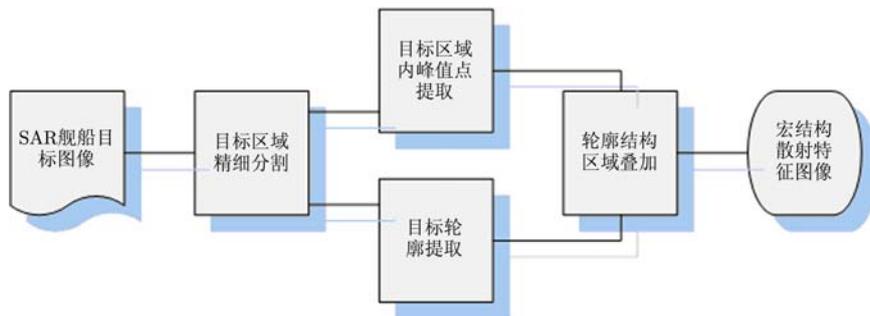


图 10 宏结构散射特征提取算法流程

Fig. 10 Framework of the algorithm for super-structure scattering feature extraction

基于图像模板匹配的分类识别以及基于特征模板匹配的分类识别两种。与直接基于图像的方法相比，基于特征方法的效率更高，因此大多数研究都集中在基于特征方法上。已有文献表明总结已有研究，一个典型的 SAR 图像舰船目标分类识别框架如图 12 所示。

目标切片数据库的建立是实现高分辨 SAR 图像舰船目标识别的前提条件。受分辨率和高分辨 SAR 图像数据获取能力的限制，目前的研究大多基于通过对舰船目标的 3 维 CAD 模型根据不同的成像参数、目标姿态等条件进行电磁散射计算，然后对仿真计算结果进行 SAR 成像处理，建立仿真的

SAR 舰船目标切片数据库。

随着高分辨 SAR 系统的成功研制和投入使用，高分辨 SAR 图像的获取能力大大增强，从而可以从实测的高分辨 SAR 图像中获取大量的舰船目标切片，再根据 AIS 等地面验证数据得到其对应的舰船类型、型号等真实信息，最后建立实测的高分辨 SAR 舰船目标切片数据库。本文基于获取的实测 TerraSAR-X 聚束模式高分辨 SAR 图像数据，建立了包含有 50 只集装箱船、150 只货船和 50 只油轮等 3 类典型舰船目标的切片数据库。部分切片数据如图 13 所示。

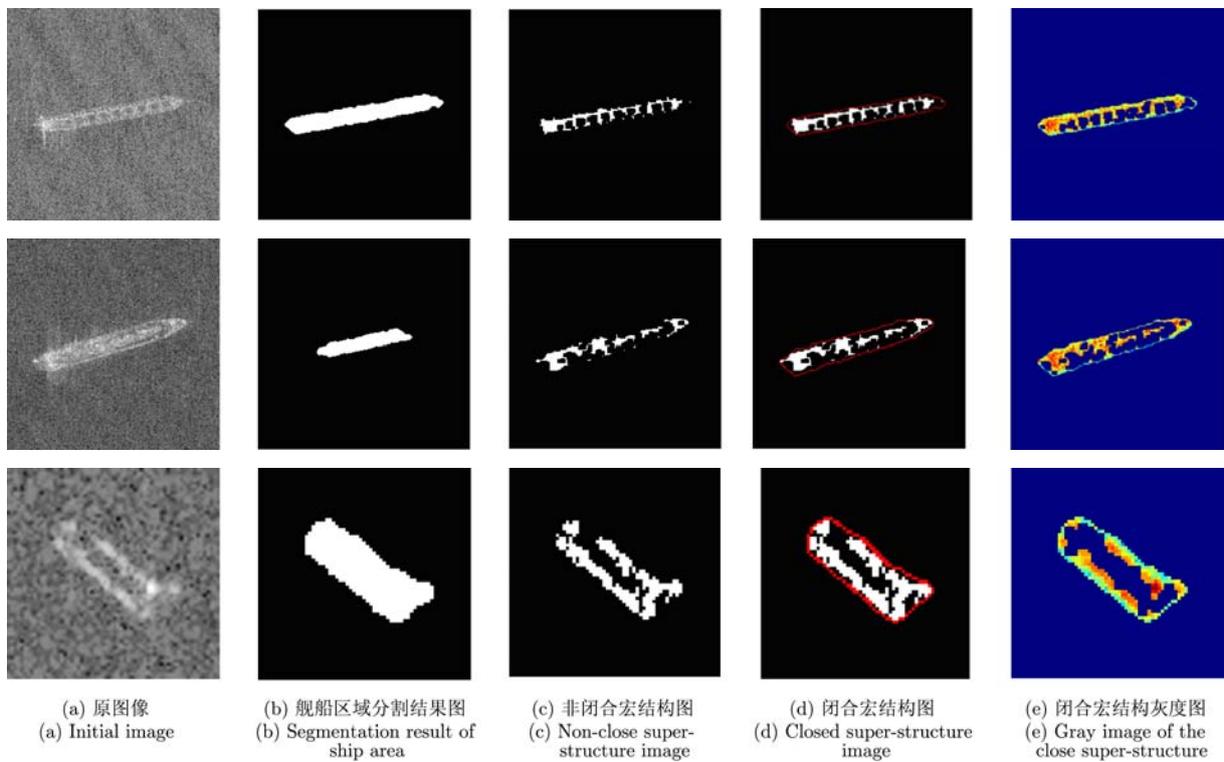


图 11 典型船只宏结构图像分割结果(从上到下：集装箱船、油船、货船)

Fig. 11 Segmentation results of several typical ship's super-structure image (From top to bottom: Container ship, Oil tanker, Bulk)

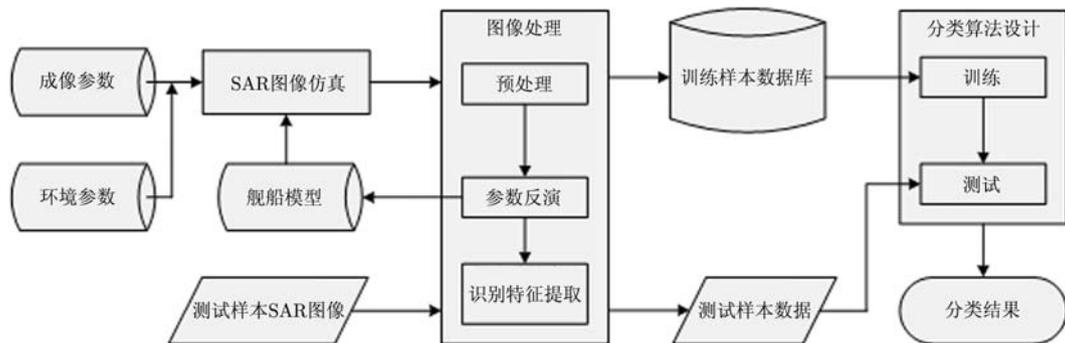


图 12 SAR 图像舰船目标分类识别框架

Fig. 12 Framework of the SAR ship classification

在建立高分辨 SAR 图像舰船目标切片数据库的基础上,分类算法也是影响 SAR 图像舰船目标分类识别性能的重要因素。在其他条件相同的情况下,研究具有更优分类性能和鲁棒性的分类识别算法尤为可贵。因此,作者结合 SAR 图像舰船目标分类自身存在的问题和特点,引入稀疏表示理论,提出一种基于特征字典的稀疏表示分类算法,将其应用于 TerraSAR-X SAR 图像中 3 类典型舰船目标分类识

别,验证了稀疏表示分类对 SAR 图像舰船目标分类识别的有效性。算法流程如图 14 所示。分类结果如表 2 和表 3 所示。

5 结束语

HRWS SAR 图像舰船目标监视关键技术研究是 SAR 图像海洋遥感应用的前沿性课题,具有较高的理论价值和广阔的应用前景。虽然本文对该问题

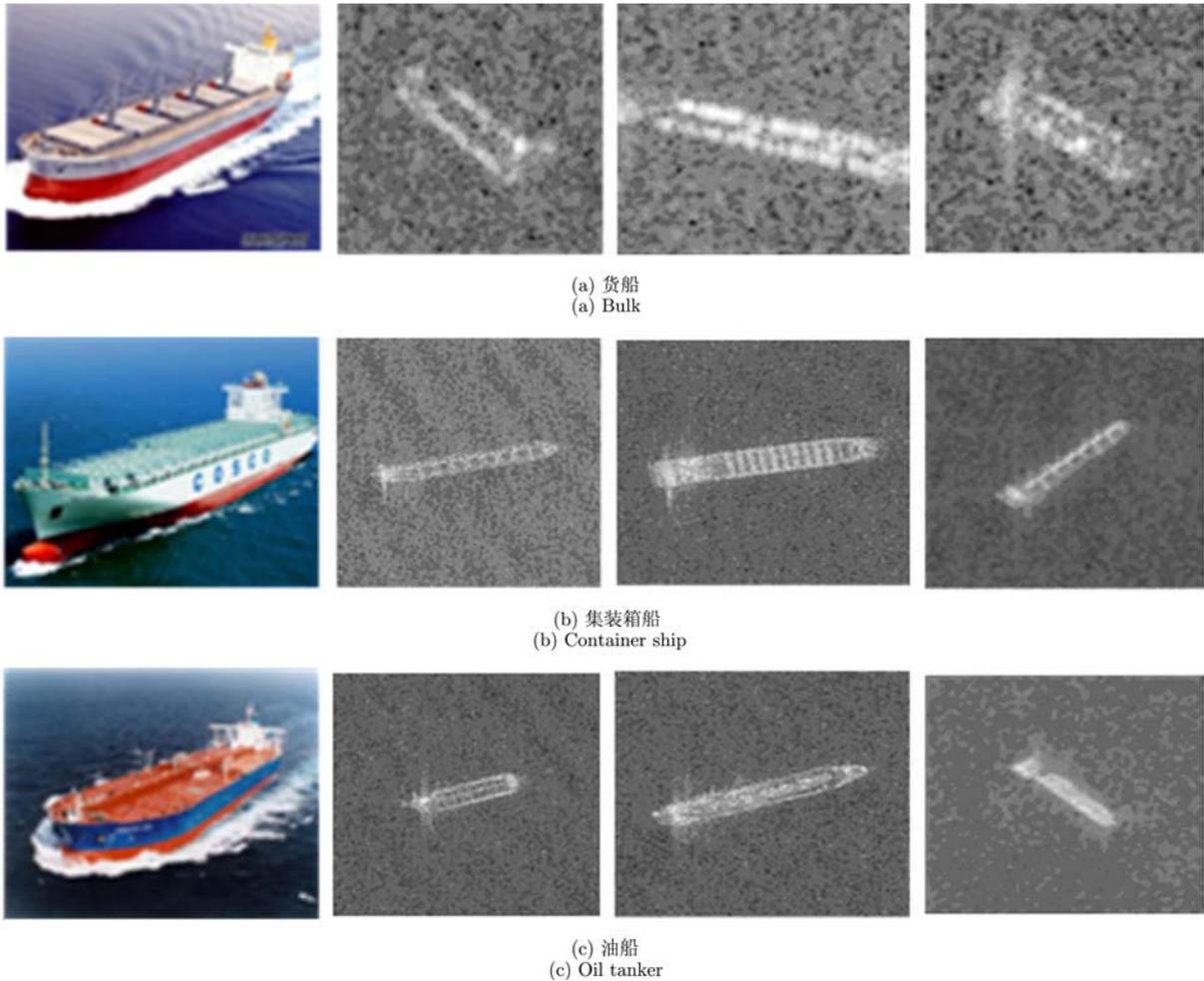


图 13 TerraSAR-X SAR 图像舰船目标切片数据示例

Fig. 13 Ship samples of TerraSAR-X SAR image

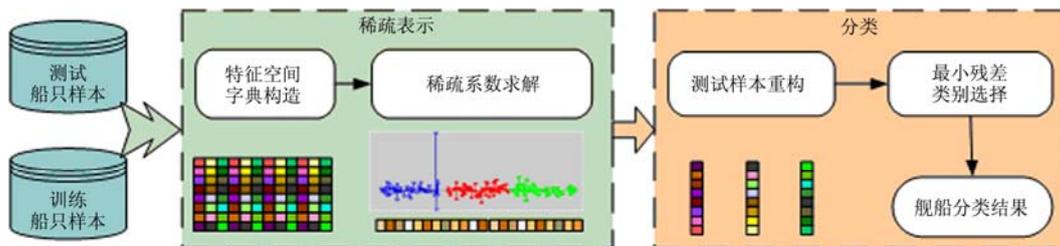


图 14 基于特征空间稀疏表示的 SAR 图像舰船目标分类算法

Fig. 14 Ship classification method on SAR imagery with feature space based sparse representation

表 2 5 种不同算法在图像空间的分类精度(%)和时间性能(s)

Tab. 2 Comparison on the classification accuracy(%) and speed(s) of five methods in image space in image space

输入	TM 算法输出			3-NN 算法输出			Bayes 算法输出			Rbf-SVM 算法输出			SRC 算法输出		
	B	C	OT	B	C	OT	B	C	OT	B	C	OT	B	C	OT
B	93.3	6.7	0	96.7	3.3	0	96.7	3.3	0	100	0	0	96.7	0	3.3
C	16.0	68.0	16.0	24.2	59.7	16.1	24.2	59.7	16.1	23.5	60.8	15.7	15.5	69.1	15.4
OT	0	9.3	90.7	0	4.4	95.6	0	4.4	95.6	1.4	1.4	97.2	0	7.8	92.2
平均分类精度	84.0			84.0			84.0			86.0			86.0		
耗时(s)	0.7898			0.6311			0.3811			0.0006			0.0903		

注: B 表示货船, C 表示集装箱船, OT 表示油船

表 3 5 种不同算法在特征空间的分类精度(%)和时间性能(s)

Tab. 3 Comparison on the classification accuracy(%) and speed(s) of five methods in feature space

输入	TM 算法输出			3-NN 算法输出			Bayes 算法输出			Rbf-SVM 算法输出			SRC 算法输出		
	B	C	OT	B	C	OT	B	C	OT	B	C	OT	B	C	OT
B	100	0	0	100	0	0	100	0	0	100	0	0	96.7	0	3.3
C	0	80.0	20	0	93.7	6.3	0	93.7	6.3	0	97.1	2.9	0	94.9	5.1
OT	22.4	29.6	48	22.3	7.4	70.3	22.3	7.4	70.3	20.3	6.8	72.9	0	15.6	84.4
平均分类精度	76.0			88.0			88.0			90.0			92.0		
耗时(s)	0.5257			0.5482			0.0910			0.0002			0.0868		

注: B 表示货船, C 表示集装箱船, OT 表示油船

的研究取得了一些阶段性的成果, 但结合 HRWS SAR 成像技术的发展和实际应用需求, 下一步需要开展的研究还有很多, 具体表现在以下几个方面:

(1) HRWS SAR 图像舰船目标检测算法性能仍需进一步提高。在实际的舰船目标监视应用中, 特别是在近岸或港口区域, 现有的舰船目标检测结果中仍存在大量虚警。因此, 需要进一步对 SAR 图像舰船目标检测算法开展更深入的研究, 并充分利用目标上下文、多极化散射特性等信息提高检测性能。

(2) 将 HRWS SAR 与极化/极化干涉、全息等成像技术相结合, 进一步提取更为有效、更为本质的舰船目标分类识别特征。在现有的成像模式和图像分辨率条件下, 提取的舰船目标特征只能反映目标的后向散射信息, 如后向散射强度、散射中心的分布等。随着分辨率的提高及其与极化/极化干涉、全息成像等技术相结合, 图像对目标的刻画更为精细, 而且可以进一步分析目标散射中心的散射类型和 3 维分布, 进而获取更有效、更本质的分类识别特征。

(3) HRWS SAR 图像舰船目标分类识别研究的深入开展有赖于 SAR 图像舰船目标数据库的建立。本文对高分辨 SAR 图像舰船目标分类识别进行了初步的研究, 对算法性能的评估主要基于

TerraSAR-X SAR 图像中 3 类典型的舰船目标, 目标种类较少且数据库容量较小。为了更深入地开展舰船目标分类识别的研究, 特别是在特定的应用环境下, 有必要建立针对特定几类舰船目标在不同成像几何、方位角、分辨率、极化方式、成像模式等条件下的图像或特征数据库。

(4) HRWS SAR 与 AIS 的综合将极大提高舰船目标监视性能。AIS 数据提供了舰船目标的静态和航行等多种信息, 是对 SAR 数据的有力补充。SAR 与 AIS 的综合, 一方面有助于对 SAR 图像舰船目标监视技术的验证和评估, 另一方面对 SAR 图像中舰船目标进行快速确认和筛选, 提高 SAR 图像舰船目标监视的效率。因此, 需要进一步开展 SAR 与 AIS 综合的舰船目标监视技术研究。

参考文献

- [1] Moreira A, et al. A tutorial on synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(1): 6-43.
- [2] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J]. *雷达学报*, 2012, 1(1): 1-10.
Deng Yun-kai, Zhao Feng-jun, and Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1-10.

- [3] Ouchi K. Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(2): 716–807.
- [4] Colinas J, Seguin G, and Plourde P. Radarsat constellation, moving toward implementation[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2010: 3232–3235.
- [5] 林幼权. 星载高分辨率宽幅成像技术分析[J]. 现代雷达, 2011, 33(1): 1–6.
Lin You-quan. Analysis of high-resolution wide-swath technology for spaceborne SAR[J]. *Modern Radar*, 2011, 33(1): 1–6.
- [6] 赖涛. 星载多通道 SAR 高分辨宽幅测绘带成像方法研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2010.
Lai Tao. Study on HRWS imaging methods of multi-channel spaceborne SAR[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2010.
- [7] Suess M, Grafmueller B, and Zahn R. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Sydney, 2001, 3: 1013–1015.
- [8] Li Zhe-fang, Wang Hong-yang, Su Tao, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82–86.
- [9] Krieger G, *et al.* Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging[C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 524–527.
- [10] 刘光炎, 孟喆, 胡学成. 非均匀采样 SAR 信号的不模糊成像与重构[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(6): 850–853.
Wang Guang-yan, Meng Zhe, and Hu Xue-cheng. Unambiguous reconstruction and imaging of nonuniform sampling SAR signal[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, 39(6): 850–853.
- [11] Vachon P W. 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.
- [12] Pichel W G and Clemente-Colon P. NOAA coastwatch SAR applications and demonstration[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2000, 21(1): 49–57.
- [13] Wackerman C C, *et al.* Automatic detection of ships in Radarsat-1 SAR imagery[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001, 27(5): 568–577.
- [14] Joint Research Centre (JRC) of the European Community — IMPAST and DECLIMS[OL]. <http://intelligence.jrc.cec.eu.int/marine/fish/index.htm>.
- [15] 张风丽, 张磊, 吴炳方. 欧盟船舶遥感探测技术与系统研究的进展[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 552–562.
Zhang Feng-li, Zhang Lei, and Wu Bing-fang. Progress of ship detection technology and system based on remote sensing technology in European union[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(4): 552–562.
- [16] Greidanus H and Kourti N. DECLIMSWPS Status and Plans[R]. Farnborough, UK, 2005.
- [17] Lemoine G, *et al.* Evaluation of vessel detection system use for monitoring of fisheries activities[C]. ICES Annual Science Conference, Maastricht, 2006: 1–10.
- [18] Margarit G, Tabasco A, and Gomez C. Maritime situational awareness: the MARISS experience[C]. The 3rd International Workshop on Advances in SAR Oceanography from Envisat, ERS and ESA third party missions, Frascati, Italy, 2010:1–8.
- [19] Margarit G, José A, Milanés B, *et al.* Operational ship monitoring system based on synthetic aperture radar processing[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 375–392.
- [20] Teutsch M and Saur G. Segmentation and classification of man-made maritime objects in TerraSAR-X images[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vancouver, Canada, 2011: 2657–2660.
- [21] Estable S, *et al.* Detection and classification of offshore artificial objects in TerraSAR-X images: first outcomes of the DeMarine-DEKO project[C]. Europe Oceans 2009, Bremen, Germany, 1–8.
- [22] 种劲松, 欧阳越, 朱敏慧. 合成孔径雷达海洋目标检测[M]. 北京: 海洋出版社, 2006, 第2章.
Chong Jin-song, Ouyang Yue, and Zhu Min-hui. Ocean Target Detection of Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: Ocean Press, 2006, Chapter 2.
- [23] 张亮. SAR 图像舰船目标检测方法研究[D]. [硕士学位论文], 国防科技大学, 2007.
Zhang Liang. Research on the methods of ship detection from SAR imagery[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2007.
- [24] 邢相薇. SAR 图像舰船目标检测研究[D]. [硕士学位论文], 国防科学技术大学, 2009.
Xing Xiang-wei. Research of ship detection on SAR imagery[D]. [Master dissertation], National University of Defense Technology, 2009.
- [25] Xing Xiang-wei, Ji Ke-feng, Zou Huan-xin, *et al.* A fast ship detection algorithm in SAR imagery for wide area ocean surveillance[C]. IEEE Radar Conference, Atlanta, USA, 2012: 570–574.
- [26] Xing Xiang-wei, Ji Ke-feng, Zou Huan-xin, *et al.* Ship classification in TerraSAR-X images with feature space based sparse representation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1562–1566.
- [27] Zhao Zhi, Ji Ke-feng, Xing Xiang-wei, *et al.* Ship surveillance by integration of space-borne SAR and AIS—Further research[J]. *Journal of Navigation*, 2014, 67(2): 295–309.

- [28] Hu Can-bin, Ferro-Famil L, and Kuang Gang-yao. Ship discrimination using polarimetric SAR data and coherent time-frequency analysis[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(12): 6899–6920.
- [29] 殷雄, 王超, 张红, 等. 基于结构特征的高分辨率 TerraSAR-X 船舶识别方法研究[J]. *中国图象图形学报*, 2012, 17(1): 106–113.
- Yin Xiong, Wang Chao, Zhang Hong, *et al.*. Vessel recognition with high resolution TerraSAR-X image based on structure feature[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2012, 17(1): 106–113.
- [30] Wang Chao, Jiang Shao-feng, Zhang Hong *et al.*. Ship detection for high-resolution SAR images based on feature analysis[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014, 11(1): 119–123.
- [31] 张晰, 张杰, 纪永刚, 等. 基于结构特征的 SAR 船只类型识别能力分析[J]. *海洋学报*, 2010, 32(1): 146–152.
- Zhang Xi, Zhang Jie, Ji Yong-gang, *et al.*. The capability analysis of ship classification by structure feature using SAR images[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(1): 146–152.
- [32] Bruschi S, *et al.*. Ship surveillance with TerraSAR-X[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 1092–1113.
- [33] Margarit G, Tabasco A, and Gomez C. Maritime situational awareness: the MARISS experience[C]. The 3rd International Workshop on Advances in SAR Oceanography from Envisat, ERS and ESA Third Party Missions, Frascati (Rome), Italy, 2010.
- [34] Vinícius M and da Silva Simões. Ship detection performance predictions for next generation spaceborne synthetic[D]. [Ph.D. dissertation], Monterey, California: Naval Postgraduate School, 2001.
- [35] Chaturvedi S K, Yang Chan-su, Song Jung-hwan, *et al.*. Integrarion of SAR data and AIS report for ship detection and identification[C]. Proceedings SPIE 8372 Ocean Sensing and Monitoring IV, Baltimore, Maryland, 2012: 83720A–83720A.
- [36] Greidanus H. DECLIMS requirements for future systems[J]. <http://fishnet.jrc.it/documents/16087/16262/Requirements+for+future+systems.pdf>, 2007.
- [37] Hou Biao, Chen Xing-zhong, and Jiao Li-cheng. Multilayer CFAR detection of ship targets in very high resolution SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(4): 811–815.
- [38] Wang Ying-hua and Liu Hong-wei. A hierarchical ship detection scheme for high-resolution SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 50(10): 4173–4184.
- [39] Qin Xian-xiang, Zhou Shi-lin, Zou Huan-xin, *et al.*. A CFAR detection algorithm for generalized gamma distributed background in high-resolution SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 806–810.
- [40] Velotto D, Soccorsi M, and Lehner S. Azimuth ambiguities removal for ship detection using full polarimetric X-band SAR data[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Munich, Germany, 2012: 7621–7624.
- [41] Wei Ju-jie, Li Ping-xiang, Yang Jie, *et al.*. A new automatic ship detection method using L-band polarimetric SAR imagery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2014, 7(4): 1383–1393.
- [42] Jung C H, *et al.*. Double-step fast CFAR scheme for multiple target detection in high resolution SAR images[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, USA, 2010: 1172–1175.
- [43] Yang Tao-li, Li Zhen-fang, Suo Zhi-yong, *et al.*. Ground moving target indication for high-resolution wide-swath synthetic aperture radar systems[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2014, 8(3): 227–232.
- [44] Ceruti-Maori D and Christoph I S. Detection and imaging of moving objects with high-resolution wide-swath SAR systems[C]. Proceedings of 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Berlin, Germany, 2014: 977–980.
- [45] 邢相薇. HRWS SAR 图像舰船目标监视关键技术研究[D]. [博士学位论文], 国防科学技术大学, 2014.
- Xing Xiang-wei. Research on key technologies for ship surveillance based on HRWS SAR imagery[D]. [Ph.D. dissertation], National University of Defense Technology, 2014.
- [46] Xing Xiang-wei, Ji Ke-feng, Zou Huan-xin, *et al.*. Feature selection and weighted SVM classifier based ship detection in PolSAR imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(22): 7925–7944.
- [47] Xing Xiang-wei, Ji Ke-feng, Zou Huan-xin, *et al.*. Ship classification in TerraSAR-X images with feature space based sparse representation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1562–1566.

作者简介

邢相薇(1985–), 男, 博士, 主要研究方向为 SAR 图像海洋目标检测与识别、模式识别等。

计科峰(1974–), 男, 副教授, 主要研究方向为 SAR 图像解译、SAR 与 AIS 关联、特征提取等。