

基于单极化 SAR 图像的舰船目标检测与分类方法

王兆成¹, 李璐¹, 杜兰¹, 徐丰²

1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 西安 710071

2. 复旦大学电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433

摘要 SAR是一种主动式微波成像传感器,具有全天时全天候高分辨率对地观测能力,被广泛应用于海洋舰船目标检测与分类。随着SAR成像技术的发展,SAR图像的分辨率越来越高,数据量也越来越大,研究鲁棒高效的海洋舰船目标检测与分类方法对于军事及民用领域具有重大意义。总结了现有的针对单极化SAR图像的舰船目标检测及分类方法,分析了各类方法的特点以及存在的问题,展望了未来SAR图像舰船目标检测及分类方法的发展趋势。

关键词 SAR;舰船目标检测;舰船目标分类

海面舰船目标检测与分类技术在海洋监测、海运交通管理、海洋权益维护及海防预警等领域具有重大意义。自1978年美国Seasat卫星发射成功,合成孔径雷达(SAR)成为舰船目标检测与分类的重要手段。相比光学、红外等被动式传感器,SAR作为一种主动式微波成像传感器,具有全天候、全天时、对地高分辨率成像的观测能力,在海洋监测方面得到了广泛应用,并取得了巨大的社会、经济和军事效益。随着SAR成像技术的发展,如2007年加拿大发射的Radarsat-2卫星、德国发射的TerraSAR-X卫星及2016年中国发射的高分三号卫星,SAR图像呈现高分辨率、多极化,大数据量的特点,研究鲁棒高效的海洋舰船目标检测与分类方法对军事及民用领域具有重大意义。SAR的搭载平台分为机载(飞机平台)和星载(卫星平台),其中机载SAR主要实现对小范围区域机动灵活的监视,而星载SAR可以实现对海洋大范围监

测。现有海洋舰船目标检测与分类方法多是针对星载SAR设计,但此方法大多可直接应用于机载SAR上。欧盟资助的Detection and Classification of Marine Traffic from Spacec (DECLIMS)计划评估了各种星载SAR舰船检测系统后指出目前SAR舰船检测系统存在的问题或可通过增加某些先验知识后克服^[1-3]。

图1为SAR图像舰船目标检测与分类的流程图。可以看出,舰船目标检测主要分为3个阶段^[4]:海陆分割、预筛选(候选舰船目标检测)和鉴别。海陆分割可以降低不必要的计算量并显著减少虚警。海陆分割的方法有2种:第1种是将SAR图像与现有的地理信息库进行匹配^[4],第2种是利用图像分割的方法将海岸与陆地分开,常见的海陆分割算法包括基于马尔科夫随机场的海陆分割算法^[5]、基于Snake模型的海陆分割算法^[6]及利用卷积神经网络的分割算法^[7]。舰船目标检

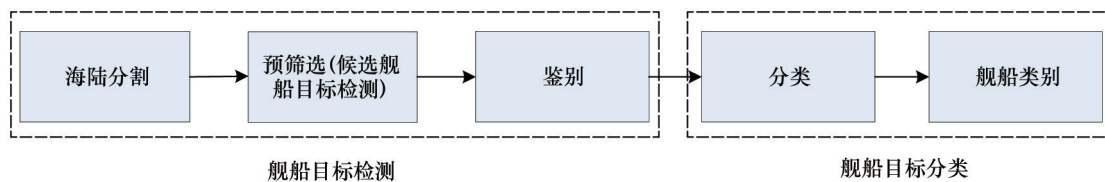


图1 SAR图像舰船目标检测与分类的流程

Fig. 1 Flowchart of ship detection and classification based on SAR images

收稿日期:2017-09-25;修回日期:2017-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(61771362)

作者简介:王兆成,博士研究生,研究方向为SAR图像目标检测与鉴别,电子信箱:zewang199009@163.com;杜兰(通信作者),教授,研究方向为雷达目标识别、统计机器学习理论,电子信箱:dulan@mail.xidian.edu.cn

引用格式:王兆成,李璐,杜兰,等. 基于单极化SAR图像的舰船目标检测与分类方法[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 86-93; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.20.009

测第2步是预筛选,目的是从大场景的SAR图像中筛选出潜在目标像素的同时去掉大部分杂波虚警,该步骤通常要求在保证高检测率的同时虚警尽可能少,而且对算法实时性的要求也较高。关于SAR图像舰船目标现有的大量研究多是针对这一步骤的^[4]。舰船目标检测第3步是鉴别,目的是进一步去除杂波虚警,降低后续分类识别的工作量。舰船鉴别通常依据舰船目标和杂波虚警在形状、尺寸、纹理上的差异进行。

舰船目标分类的目的是对检测到的舰船目标进行分类(如邮轮、集装箱船、散货船、客船、拖船、油船、军舰等),获取舰船目标的类型,以便为战场侦察和海防预警等提供及时有效的情报。舰船目标分类通常需要一定数量的训练数据,然后利用一些复杂度较高的机器学习方法进行分类识别^[8]。本文对现有的部分单极化SAR图像舰船目标检测与分类方法进行归纳总结。

1 舰船检测方法

舰船目标检测可以通过2种途径实现:一种是检测舰船目标本身,另一种是利用舰船尾迹进行检测^[4,9]。由于舰船目标具有更稳定的散射特性,且舰船尾迹并不总是存在^[4],现有方法更倾向于利用舰船目标本身与海洋杂波的后向散射特性差异进行检测。以下将对利用舰船目标本身进行检测的方法进行分析和总结。

1.1 预筛选

预筛选是舰船检测的关键步骤,很多文献称预筛选为检测,下文也称预筛选为检测。经过广泛调研及梳理,将现有的舰船目标检测方法分为:1)基于图像幅度的舰船检测方法;2)基于多分辨率的舰船检测方法;3)基于复图像子孔径相干的舰船检测方法;4)其他方法。

1.1.1 基于图像幅度的舰船检测方法

舰船目标通常由金属制成,包括大量二面角、圆柱散射器,具有很高的后向散射系数。舰船目标在SAR图像上呈现一个或者一簇高亮度的像素值,而海杂波表现为随机分布的亮度较低的相干斑形态。基于图像幅度的检测方法正是利用了舰船目标和海杂波在SAR图像上幅度上的差异特性。

1) 基于恒虚警率的检测方法。

恒虚警率(CFAR)具有虚警率恒定、自适应阈值、计算简单等特点,该类算法是SAR图像舰船目标检测研究最为广泛、最为深入,也是目前最为实用的方法^[10]。CFAR算法应用的前提是舰船目标与杂波具有较强的对比度。CFAR通过滑窗的方式将SAR图像上的待检测像素与某一个阈值比较,达到舰船目标检测的目的,其中这个阈值的确定是在给定虚警率的情况下由待检测像素周围杂波的统计特性决定。图2为CFAR滑窗示意图,杂波区域的设置是为了估计检测阈值,保护区域的设置是为了防止扩展目标的像素点泄漏到杂波区域内影响杂波模型参数估计,保护区域的大小与目标尺寸和图像分辨率有关^[4]。

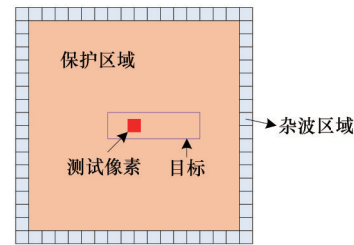


图2 CFAR滑窗示意

Fig. 2 Schematic diagram of sliding window CFAR

(1) 参数化CFAR。

最早用于SAR图像舰船CFAR目标检测的方法是20世纪90年代初由美国林肯实验室Novak等^[11]提出的双参数CFAR,由于该方法假设杂波服从高斯分布,因此更适合低分辨率、均匀杂波的情况,而对较高分辨率、异质杂波的情况拟合精度不足^[12-13]。

基于CFAR的SAR舰船目标检测器的性能由海杂波统计模型拟合的精度决定,海洋杂波分布主要受2方面因素影响:一是雷达设备自身的参数,包括分辨率、成像模式、入射角、极化方式等;二是环境背景和参数,包括风向、风速、雨区、强散射体泄漏的旁瓣等。为了提高在高分辨率、异质杂波情形下CFAR检测器的性能,研究人员提出了一些基于非高斯分布的CFAR,主要有基于对数正态分布^[14]、Gamma分布^[15]、Weibull分布^[14]、 G^0 分布^[16-18]、K分布^[19-21]、广义Gamma分布^[12,22]等CFAR算法。在基于广义Gamma分布的CFAR出现之前,K分布是对单极化SAR图像海杂波拟合程度最好的分布,并且已运用于由加拿大开发的实际海洋监测系统(OMW)^[4]中。然而一些研究表明随着SAR分辨率越来越高,K分布也不是总能够很好地拟合海杂波数据,因此高贵等^[23]于2013年提出了基于广义Gamma分布的SAR舰船目标CFAR检测算法。广义Gamma分布是一种具备能量、形状和尺寸3个参数的分布,在某些情况下可以退化为瑞利、指数、Gamma、对数正态、Weibull等经典分布^[23]。广义Gamma分布对高分辨SAR图像下的海杂波具有非常好的拟合能力^[12],基于广义Gamma的CFAR检测器也是目前SAR图像舰船目标检测较为理想的检测器。

(2) 非参数化CFAR。

对于一幅实际复杂的SAR场景来说,所述的各种参数化模型可能对海杂波的拟合程度不够精确。高贵等^[23]于2011年提出了一种基于Parzen窗核密度估计的非参数化CFAR算法,用于候选舰船目标像素的提取。该算法假定目标只占整个图像的很少部分,将图像中的所有像素用来估计杂波概率密度函数,然而这可能会导致检测阈值变大产生漏警。为了解决这个问题,张颖等^[24]于2015年提出了一种改进的基于Parzen窗的算法。该算法首先利用简单的分割方法得到潜在的目标像素,然后利用Parzen窗核密度估计的方法对剔除潜

在目标像素后的SAR图像进行杂波密度函数估计,最终确定检测阈值完成舰船目标的检测。

2) 基于广义似然比检验的检测方法。

基于恒虚警率的检测算法只对海杂波的统计建模,没有考虑舰船目标的统计特性,是一种次优的检测器^[4]。如果同时把舰船目标的统计特性也考虑进去,就得到最优的检测器,即奈曼-皮尔逊检测器。基于广义似然比检验(GLRT)^[25]的检测方法正是根据这一思想提出的。与基于恒虚警率的检测方法不同的是,基于GLRT的检测方法不仅需要海杂波进行统计建模,而且需要对舰船目标进行统计建模。然而由于SAR图像上舰船目标尺寸、形状、方向各不相同,建立统一的目标统计模型难度较大。因此,该算法在舰船目标检测中应用不多。

1.1.2 基于多分辨率的舰船检测方法

基于多分辨率的舰船检测方法主要是基于小波变换的检测方法^[26-27]。该类方法利用舰船目标和海杂波在不同分辨率下的特征差异完成舰船检测,其应用假设是,相比于海杂波,舰船目标的散射特性在不同分辨率下更为持久。基于多分辨率的检测方法需要对SAR图像进行多尺度分析,不利于对弱小舰船目标的检测,因此该类算法并不适用于低分辨率的SAR图像,而对高分辨率的SAR图像更为有效。

1.1.3 基于复图像子孔径相干的舰船检测方法

子孔径相干法是利用SAR相位信息和幅度信息并基于复图像数据的目标检测算法。该方法利用了目标和杂波在不同子孔径图像下的散射特性差异,即目标回波在方位向上存在各向异性,而杂波回波则表现为各向同性,揭示这种差异可以通过划分子孔径的方法实现^[28]。Souyris等^[29]于2003年提出利用复图像子孔径相干进行目标检测的方法,该方法对原始SAR复图像分解为2幅子孔径图像,然后计算2幅子孔径图像之间的复相干性,得到厄米特内积(IHP)图像,最后对

IHP图像进行阈值分割得到舰船检测结果。2004年Ouchi等^[30]提出利用2个子孔径的SAR图像幅度进行相干,得到多视交叉相关(MLCC)图像,同时尝试将IHP应用到RADAR-SAT-1数据舰船目标检测上,发现舰船目标和海杂波在基于2幅子孔径图像得到的IHP图像难以区分。Wang等^[31]于2012年将IHP图像的得到方式由2幅子孔径图像扩展到多幅子孔径图像,即多厄米特内积(MIHP)图像,并且发现随着子孔径数目的增多舰船目标和海杂波的对比如越来越高,但是由于子孔径数目的增多图像分辨率越来越低,因此需要平衡对比度和分辨率来选择合适的子孔径数目。

图3为实测海面舰船SAR图像和利用MIHP方法得到的复相干后的图像。由图3(a)看出,在原始SAR图像上舰船目标与海杂波的对比如较低,而在图3(b)中经过多个子孔径图像的复相干后舰船目标与海杂波的对比如大大增强。图4给出不同方法的检测结果^[31],相比于其他方法,MIHP检测方法得到的二值图上舰船目标具有更加完整的轮廓和形状,而且虚警像素数也远少于其他检测方法。这主要是因为MIHP同时利用了多个子孔径SAR图像的幅度和相位信息,有利于舰船目标和海杂波背景的分。

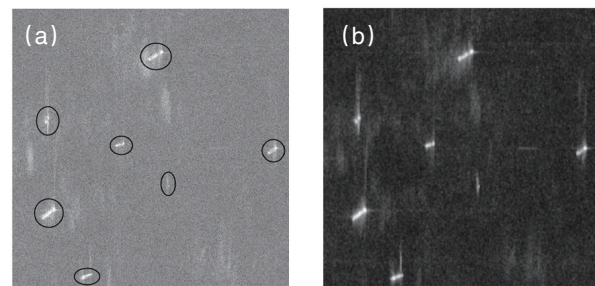


图3 实测SAR图像(a)与MIHP得到的复相干后的图像(b)
Fig. 3 Real SAR image (a) and the complex coherence image obtained by MIHP (b)



(a) MIHP (b) IHP (c) MLCC (d) 双参数CFAR (e) 基于K分布的CFAR

图4 不同方法的舰船目标的检测结果

Fig. 4 Ship target detection results of different methods

1.1.4 其他方法

除上述几类方法外,近几年还有其他几种舰船目标检测算法提出。余映等^[32]于2010年提出一种基于离散余弦变换视觉注意模型的舰船目标检测方法。Borghys等^[33]于2012年提出一种利用多时相重复轨道SAR图像进行港口的舰船目

标检测。冷祥光等^[34]于2015年提出了一种基于双边CFAR的舰船目标检测方法,该方法同时利用了SAR图像的幅度信息和空间信息进行舰船检测。Dai等^[35]于2016年提出一种基于目标候选区域生成的改进CFAR的SAR图像舰船目标检测算法,该算法解决了舰船目标尺寸差异较大而传统CFAR窗长

固定的问题。基于此思想,2017年Kang等^[36]基于深度神经网络,提出一种Faster-RCNN结合CFAR的舰船目标检测算法,该算法对尺寸较小的舰船目标具有较好的检测能力,但是需

要较多的训练数据。

为便于不同舰船检测方法的比较,表1列出了几种典型的舰船检测方法的优点和缺点。

表1 不同舰船目标的检测方法
Table 1 Comparison of different ship detection methods

舰船检测方法	优点	缺点
基于图像幅度	CFAR 虚警率恒定、自适应阈值、计算简单	算法依赖于杂波概率密度函数的估计精度,算法的性能在低对比度条件下较差
	GLRT 同时考虑到舰船目标和杂波的统计特性,是一种最优的检测器	建立统一的目标统计模型难度较大
基于多分辨率	具有多尺度分析的能力,适合于高分辨率SAR图像	对低分辨率SAR图像不适用
基于复图像子孔径相干	同时利用了SAR图像的幅度信息和相位信息,可以实现低对比度条件下的舰船目标检测	由于子孔径的划分,SAR图像的分辨率会降低,对检测精度产生一定影响
其他方法	利用了目标的先验信息和一些机器学习方法,提高了复杂场景下的舰船目标检测能力	多数算法复杂度较高,不利于实时检测

1.2 鉴别

目前关于舰船检测阶段的研究主要集中在候选舰船目标预筛选上。由于海面背景相对简单,杂波虚警较少,舰船鉴别比较容易,用一些简单的方法,如舰船的形状、尺寸等即可去除虚警,基本不需要特别设计鉴别方法,因此舰船鉴别相关研究较少^[37]。除了上述一些简单的虚警去除方法外,最近提出了一些利用特征提取和分类器的方法进行舰船鉴别的方法。陈琪等^[37]于2011年提出了一种港口区域舰船目标检测方法,该方法利用类间类内比大小作为准则对现有和新提出的一些特征进行选择,然后将选择后的特征用加权二次距离鉴别器进行鉴别,区分舰船目标和港口内的其他一些杂波虚警。2012年Wang等^[31]对候选舰船目标切片提取了协方差特征并利用二次距离鉴别器进行鉴别。2016年刘磊^[38]提出一种基于Gabor变换和KPCA的SAR图像舰船目标鉴别,该方法首先对SAR图像中的样本切片进行Gabor变换,获得舰船的纹理特征,将这些特征用KPCA算法降维并提取目标的主成分分量,把最终采集的样本特征通过k近邻分类器进行训练和测试。纯海洋背景的虚警鉴别相对容易,但在复杂海陆背景下的虚警鉴别就相对困难。在近岸、港口区域,有大量的岩礁、人造物、海田、堤坝、养殖物等,其中某些目标的散射强度也很强、形状与舰船目标相似。Ao等^[39]比较这些虚警目标与舰船目标、陆地目标的差异,设计基于最大似然概率的鉴别器剔除这些虚警目标。为了便于不同舰船鉴别方法的比较,表2列出了典型舰船鉴别方法的优点和缺点。

表2 不同舰船鉴别方法比较
Table 2 Comparison of different ship discrimination methods

舰船鉴别方法	优点	缺点
基于舰船形状、尺寸	简单、有效	对于一些和舰船形状尺寸相似的杂波难以去除
基于特征提取和分类器	可以获得较好的鉴别性能	方法较为复杂且需要一定数量的训练数据

2 舰船目标分类方法

由于缺少类似地面车辆识别的MSTAR的公共数据集,研究舰船分类的文献和方法不是很多。因为缺少实测标记训练数据,早期舰船的分类方法基本都是基于仿真数据的,如1997年Osman等^[40]提出的基于BP神经网络的SAR图像舰船目标分类方法和2011年Margarit等^[41]提出的基于模糊逻辑的SAR图像舰船目标分类方法。后来由于RADARSAT-2和TerraSAR-X等卫星的发射,可获取的SAR数据越来越多,各国学者提出了一些基于实测SAR图像的舰船目标分类方法。2013年Xing等^[42]提取了目标的几何结构特征和电磁散射特征并利用稀疏表示的方法进行舰船目标分类。2014年王超等^[43-44]研究和开发了基于散射矩阵、船舶几何结构的SAR舰船目标分类识别方法。2016年Jiang等^[45]提取了舰船主甲板上的一些散射结构特征,然后利用SVM分类器实现了舰船目标的分类。以上基于实测SAR图像分类的方法特征提取和分类器设计是分开进行的,可能会影响到最终分类的性能。为此,Lang等^[46]于2016年提出了一种联合进行特征选择和分类器选择的舰船目标分类方法,相比于单独进行特征提取和分类器设计,该方法具有更好的分类性能。上述各种分类方法针对的舰船目标都是民用舰船(图5),由于不同类型的民用舰船在形状和结构上差异较大,因此提取粗略的特征就可以将它们进行区分,而军用舰船(图6)在形状和结构上差异较小,需要更为精细的特征描述方式。针对这个问题Zhu等^[47]于2017年提出了基于形状上下文的舰船分类方法,该方法同时考虑了不同军用舰船散射点在强度和拓扑结构上的差异,利用提取的散射点的形状上下文特征与模板进行点对点匹配的方法进行舰船分类。为了便于不同舰船分类方法的比较,表3列出了几种典型的舰船分类方法的优点和缺点。

由于近几年深度学习算法的提出,计算机视觉领域取得了里程碑式的进展,深度学习以大量数据为前提,实现了特征提取与分类的同时学习,分类性能极佳。Schwegmann等^[48]

尝试将深度神经网络应用在对于低分辨率SAR图像的海面舰船鉴别上并获得较好的效果。Bentes等^[49]用深度卷积网络实现了TerraSAR-X图像上的舰船与冰山的分类。Odegaard等^[50]则使用深度卷积网络进行复杂背景SAR图像中舰船目标

检测。该研究通过仿真软件生成训练数据,并发现仿真数据可以有效提升网络性能。目前暂未发现有关于利用深度学习算法对舰船目标进行系统分类的相关研究文献,这可能与缺乏大量标注的不同类型的SAR舰船数据有关。

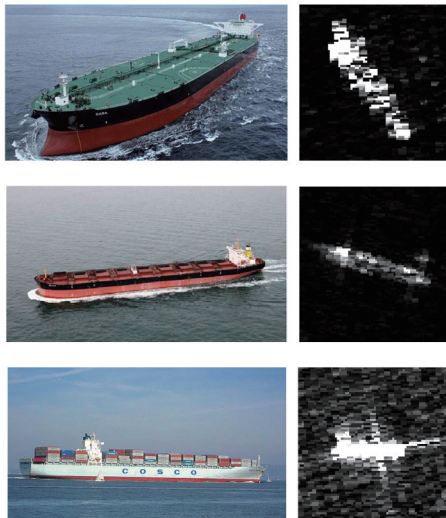


图5 3种类型的民用舰船的光学及SAR图像
Fig. 5 Optical and SAR images of three different types of civil ships



图6 3种类型的军用舰船的光学及SAR图像
Fig. 6 Optical and SAR images of three different types of military ships

表3 不同舰船分类方法比较
Table 3 Comparison of different ship classification methods

舰船检测方法	优点	缺点
基于仿真数据	仿真软件可以产生不同入射角、方位角、分辨率下的大量SAR图像训练样本	对于实测数据,模型易发生失配
基于几何和电磁散射特征的稀疏表示	对于噪声和遮挡的鲁棒性较高	时间复杂度较高,实时性差
基于主甲板散射特征结合SVM	将舰船分为船头、中部、船尾3个部分,不同类型舰船在这3个部分散射特征不同,可分性较好	对船头、中部、船尾3个部分分割精度要求较高
基于实测数据	基于特征和分类器的联合选择	需要提取大量的特征和设计较多的分类器,复杂度较高
基于改进的上下文特征	考虑了不同军用舰船散射点在强度和拓扑结构上的差异,提取了对于军用舰船可分性较强的特征	需要进行点对点的模板匹配,实时性较差

3 发展趋势

3.1 舰船目标检测的发展趋势

1) 海杂波统计模型的研究。对海杂波拟合程度高且参数估计简单快速的杂波统计模型对于提高CFAR的检测性能具有重要意义。

2) 图像多特征的联合使用。传统的CFAR只利用了目标的幅度特征,合理利用幅度之外的其他特征,例如目标的纹理、形状、尺寸、结构等特征,可以有效提高目标检测率的同时减少杂波虚警。

3) 高分辨、多极化检测算法的研究。随着SAR技术的发展,SAR图像呈现高分辨、多极化的特点。因此,设计适合于高分辨、多极化SAR图像舰船目标的检测算法的研究是未来发展的趋势。

4) 基于新体制SAR的舰船检测算法研究。目前发展的SAR雷达新体制包括认知雷达、多输入多输出雷达、量子雷达等^[51]。其中,认知雷达可以适应复杂的电磁环境,达到和目标及环境的最优匹配,提高目标检测的性能;多输入多输出雷达可以发射不同的波形,利用不同的波形观测目标,全方

面地反映目标特性,提高目标和杂波的区分能力;量子雷达利用了量子信息技术,可以提高弱小目标和隐身目标的检测能力。

3.2 舰船目标分类的发展趋势

1) 特征学习和分类器的联合设计。现有多数舰船目标的分类方法都是特征提取和分类器设计独立进行的,特征学习和分类器的联合设计是提高舰船目标分类正确率的一个有效途径。

2) 深度学习技术的使用。近年来深度学习技术在光学目标识别中取得了巨大的成功,许多SAR图像研究人员将深度学习技术应用到SAR目标识别并取得了一些进展。但是深度神经网络的训练需要大量的标注数据集,暂时没有大数据量的SAR舰船数据库,因此深度学习技术在SAR舰船目标的检测识别方法的进展比较缓慢。通过多种观测技术的融合,如利用SAR数据、光学卫星数据、船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据进行SAR舰船自动标注。小样本的深度学习技术也是重要发展方向,如何在标记样本不是特别多的情况下,使用深度学习技术提高舰船目标分类的性能是未来研究的一大热点。

3) 基于多维成像新体制SAR的舰船分类算法研究。传统的SAR通过距离维的脉冲压缩与方位维的合成孔径技术,只得到目标的二维平面信息,却不能获取地面的高度信息。对舰船目标实现三维甚至四维(三维空间域+时间域)成像^[52],可以更全面地反映目标信息,有利于提高不同舰船目标的分类性能。

4 结论

对现有的基于单通道SAR图像的舰船检测与分类的主要算法进行了梳理,并对一些算法的适用条件进行分析,最后对未来SAR图像舰船检测与分类技术的发展进行展望。由于海杂波干扰、舰船型号繁多、实测数据较少等各种因素的存在,现有的SAR图像舰船检测与分类方法研究还远不能满足实际需求。SAR技术的发展,为未来SAR图像舰船检测与分类算法的研究提供了更加丰富有效的信息,而深度学习技术的发展为未来SAR图像舰船检测与分类算法的研究提供了无限的动力与可能。期冀更多研究人员加入该领域,提出更多优秀的算法,为SAR图像舰船检测与分类算法的实用化做出贡献。

参考文献(References)

- [1] Arnesen T N, Olsen R B. Literature review on vessel detection[M]. Norway: Norwegian Defence Research Establishment, 2004: 1-168.
- [2] Vachon P W. Ship detection in synthetic aperture radar imagery[C/OL]. [2017-08-31]. http://www.ibrarian.net/navon/paper/Ship_Detection_in_Synthetic_Aperture_Radar_Imagery.pdf?paperid=17818790.
- [3] Greidanus H, Kourti N. Findings of the DECLIMS project—detection and classification of marine traffic from space[J]. Proceedings of Seasar, 2006, ESA-SP613: 1-9.

- [4] Crisp D J. The state-of-the-art in ship detection in synthetic aperture radar imagery[J]. Organic Letters, 2004, 35(42): 2165-2168.
- [5] 郭颖. 基于马尔科夫随机场的SAR图像处理[D]. 西安: 西安电子科技大学电子工程学院, 2014.
Guo Ying. SAR image processing based on markov random fields[D]. Xi'an: School of Electronic Engineering, Xidian University, 2014.
- [6] Lesage F, Gagnon L. Experimenting level set-based snakes for contour segmentation in radar imagery[J]. Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2000, 4041: 154-162.
- [7] Liu Y, Zhang M H, Xu P, et al. SAR ship detection using sea-land segmentation-based convolutional neural network[C]/International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing. Piscataway, NJ: IEEE, 2017 doi: 10.1109/RSIP.2017.7958806.
- [8] Chen S, Wang H, Xu F, et al. Target classification using the deep convolutional networks for SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(8): 4806-4817.
- [9] 种劲松, 朱敏慧. SAR图像舰船及其尾迹检测研究综述[J]. 电子学报, 2003, 31(9): 1356-1360.
Chong Jinsong, Zhu Minhui. Survey of the study on ship and wake detection in SAR imagery[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1356-1360.
- [10] 雷盼飞, 苏清贺, 杨桃. SAR图像舰船目标检测研究[J]. 影像技术, 2011, 23(4): 40-45.
Lei Panfei, Su Qinghe, Yang Guang. Research on detection of ship target from SAR images[J]. Image Technology, 2011, 23(4): 40-45.
- [11] Novak L M, Owirka G J, Netishen C M. Performance of a high-resolution polarimetric SAR automatic target recognition system[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1993, 6(1): 11-24.
- [12] Qin X, Zhou S, Zou H, et al. A CFAR detection algorithm for generalized Gamma distributed background in high-resolution SAR images [J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(4): 806-810.
- [13] 周伟, 关键, 唐小明, 等. SAR图像舰船检测综述[C]/中国合成孔径雷达会议. 北京: 中国电子学会, 2005: 482-488.
Zhou Wei, Guan Jian, Tang Xiaoming, et al. Review of ship detection in SAR imagery[C]/China Conference on Synthetic Aperture Radar. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2005: 482-488.
- [14] Goldstein G B. False-alarm regulation in log-normal and weibull clutter[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 1973, AES-9(1): 84-92.
- [15] Martíndenicólús J, Jaraboamores M, Matamoya D, et al. Statistical analysis of SAR sea clutter for classification purposes[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10): 9379-9411.
- [16] Gao G, Liu L, Zhao L, et al. An adaptive and fast CFAR algorithm based on automatic censoring for target detection in high-resolution SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2009, 47(6): 1685-1697.
- [17] 鲁统臻, 张杰, 纪永刚, 等. 基于G⁰分布的高海况SAR船只目标检测方法[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(2): 186-195.
Lu Tongzhen, Zhang Jie, Ji Yonggang, et al. Ship target detection algorithm based on G⁰ distribution for SAR images under rough sea conditions[J]. Advances in Marine Science, 2011, 29(2): 186-195.
- [18] 曹峰, 邢相薇, 计科峰. 一种SAR图像舰船目标快速检测方法[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(4): 380-386.
Cao Feng, Xing Xiangwei, Ji Kefeng. A fast method for ship detection in SAR imagery[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(4): 380-

- 386.
- [19] Liao M, Wang C, Wang Y, et al. Using SAR images to detect ships from sea clutter[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 194–198.
- [20] 曲长文, 邓淇元, 江源. SAR图像舰船目标双阈值快速CFAR检测算法[J]. *舰船科学技术*, 2015, 37(11): 136–140.
Qu Changwen, Deng Qiyan, Jiang Yuan. A double threshold fast CFAR ship detection algorithm in SAR images[J]. *Ship Science and Technology*, 2015, 37(11): 136–140.
- [21] 艾加秋, 齐向阳. 一种基于局部K-分布的新的SAR图像舰船检测算法[J]. *中国科学院大学学报*, 2010, 27(1): 36–42.
Ai Jiaqiu, Qi Xiangyang. A new ship detection algorithm based on local K-distribution in SAR images[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(1): 36–42.
- [22] Li H C, Hong W, Wu Y R, et al. On the empirical-statistical modeling of SAR images with generalized gamma distribution[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2011, 5(3): 386–397.
- [23] Gao G. A parzen-window-kernel-based CFAR algorithm for ship detection in SAR images[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 557–561.
- [24] 张颖, 孟祥伟, 刘磊, 等. 改进的基于Parzen窗算法的SAR图像目标检测[J]. *计算机科学*, 2015, 42(11A): 151–154.
Zhang Hao, Meng Xiangwei, Liu Lei, et al. Improved parzen window based ship detection algorithm in SAR images[J]. *Computer Science*, 2015, 42(11A): 151–154.
- [25] Li J, Zelnio E G. Target detection with synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2002, 32(2): 613–627.
- [26] Tello M, Lopez-Martinez C, Mallorqui J J. A novel algorithm for ship detection in SAR imagery based on the wavelet transform[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2005, 2(2): 201–205.
- [27] 张凤丽, 吴炳方, 张磊. 基于小波分析的SAR图像船舶目标检测[J]. *计算机工程*, 2007, 33(6): 33–34.
Zhang Fengli, Wu Bingfang, Zhang Lei. Ship detection in SAR images based on wavelet analysis[J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(6): 33–34.
- [28] 高贵, 周蝶飞, 蒋咏梅, 等. SAR图像目标检测研究综述[J]. *信号处理*, 2008, 24(6): 971–981.
Gao Gui, Zhou Diefei, Jiang Yongmei, et al. Study on target detection in SAR image: A survey[J]. *Signal Processing*, 2008, 24(6): 971–981.
- [29] Souyris J C, Henry C, Adragna F. On the use of complex SAR image spectral analysis for target detection: Assessment of polarimetry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(12): 2725–2734.
- [30] Ouchi K, Tamaki S, Yaguchi H, et al. Ship detection based on coherence images derived from cross correlation of multilook SAR images [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2004, 1(3): 184–187.
- [31] Wang Y, Liu H. A hierarchical ship detection scheme for high-resolution SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2012, 50(10): 4173–4184.
- [32] Yu Y, Ding Z, Wang B, et al. Visual attention-based ship detection in SAR images[M]. Berlin: *Advances in Neural Network Research and Applications*, 2010: 283–292.
- [33] Borghys D, Perneel C, Bouaraba A. Activity monitoring in a commercial harbor using multitemporal repeat-pass interferometric SAR data [C]//*Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 7440–7443.
- [34] Leng X, Ji K, Yang K, et al. A bilateral CFAR algorithm for ship detection in SAR images[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2015, 12(7): 1536–1540.
- [35] Dai H, Du L, Wang Y, et al. A modified CFAR algorithm based on object proposals for ship target detection in SAR images[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, PP(99): 1–5.
- [36] Kang M, Leng X, Lin Z, et al. A modified faster R-CNN based on CFAR algorithm for SAR ship detection[C]//*International Workshop on Remote Sensing with Intelligent Processing*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017: 1–4.
- [37] 陈琪, 陆军, 王娜, 等. 一种基于SAR图像鉴别的港口区域舰船目标新方法[J]. *宇航学报*, 2011, 32(12): 2582–2588.
Chen Qi, Lu Jun, Wang Na, et al. An SAR images-based new method for ship discrimination in harbor region[J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(12): 2582–2588.
- [38] 刘磊. 基于Gabor变换和KPCA的SAR图像舰船目标鉴别[J]. *舰船电子工程*, 2016, 36(11): 34–36.
Liu Lei. Ship targets discrimination in SAR images based on Gabor and KPCA[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2016, 36(11): 34–36.
- [39] Wei A, Feng X, Li Y C, et al. Detection and discrimination of ship targets in complex background from spaceborne ALOS2 SAR images[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing*, 2017, in press.
- [40] Osman H, Pan L, Gagnon L, et al. Classification of ships in airborne SAR imagery using backpropagation neural networks[C]//*SPIE-Radar Processing Technology Applications II*. San Diego: SPIE, 1997: 126–136.
- [41] Margarit G, Tabasco A. Ship classification in single-pol SAR images based on fuzzy logic[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3129–3138.
- [42] Xing X, Ji K, Zou H, et al. Ship classification in TerraSAR-X images with feature space based sparse representation[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1562–1566.
- [43] 王超. 高分辨率SAR图像船舶目标检测与分类[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 1–178.
Wang Chao. Detection and classification of ship targets in high-resolution SAR images[M]. Beijing: Science Press, 2013: 1–178.
- [44] Wang C, Zhang H, Wu F, et al. A novel hierarchical ship classifier for COSMO-SkyMed SAR data[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2013, 11(2): 484–488.
- [45] Jiang M, Yang X, Dong Z, et al. Ship classification based on superstructure scattering features in SAR images[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, 13(5): 616–620.
- [46] Lang H, Zhang J, Zhang X, et al. Ship classification in SAR image by joint feature and classifier selection[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2016, 13(2): 212–216.
- [47] Zhu J W, Qiu X L, Pan Z X, et al. An improved shape contexts based ship classification in SAR images[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 145.
- [48] Schwegmann C P, Kleynhans W, Salmon B P, et al. Very deep learning for ship discrimination in synthetic aperture radar imagery[C]//*Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016: 104–107.
- [49] Bentes C, Frost A, Velotto D, et al. Ship-iceberg discrimination with convolutional neural networks in high resolution SAR images[C]//*OL*. [2017–08–31]. http://elib.dlr.de/99079/2/2016_BENTES_Frost_

- Velotto_Tings_EUSAR_FP.pdf.
- [50] Ødegaard N, Knapskog A O, Cochin C, et al. Classification of ships using real and simulated data in a convolutional neural network[C]// Radar Conference. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, doi: 10.1109/RADAR.2016.7485270.
- [51] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标探测技术[J]. 科技导报, 2017, 35(11): 30-38.
Chen Xiaolong, Guan Jian, Huang Yong, et al. Radar low-observable target detection[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(11): 30-38.
- [52] 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 Yunkai, Zhao Fengjun, Wang Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 1-10.

Ship detection and classification baser on single-polarization SAR images

WANG Zhaocheng¹, LI Lu¹, DU Lan¹, XU Feng²

1. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China
2. Key Lab for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200433, China

Abstract The SAR is an active microwave imaging sensor, which can work day and night, under all weather conditions, and with a high-resolution earth observation capability. It is widely used for ship detection and classification. With the development of the SAR imaging technology, the resolution of the SAR image is becoming higher and higher, thus the robust and efficient ship detection and classification methods are very important for military and civil applications. This paper reviews the current ship detection and classification based on single-polarization SAR images, analyzes their features and shortcomings, and make aprediction of the future developments.

Keywords SAR; ship target detection; ship target classification

(责任编辑 傅雪)