

极化 SAR 海面船只检测技术的研究进展

陈曦, 吴涛, 阮祥伟

(中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽合肥 230031)

摘要:极化 SAR 技术是近年 SAR 领域的研究热点。首先介绍了不同极化方式对船只、海洋杂波以及船只尾迹在 SAR 图像上的成像影响, 详细概括和总结了目前应用于海洋船只监测的各种极化 SAR 技术特点, 最后分析了极化 SAR 海洋船只监测技术的应用前景。

关键词:SAR; 极化 SAR; 船只检测

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2009)06-0841-08

1 引言

通过机载 SAR 和星载 SAR, 得到大量高分辨率的 SAR 海洋图像, 船舶目标以及船舶的航迹在 SAR 图像中清晰可见。从 SAR 图像中检测船舶目标, 进一步可以提取大量的有用信息, 这项工作有着很广泛的应用前景, 例如对特定海域、海湾和重要港口进行检测, 近实时地检测出感兴趣的海域、港口的船舶目标并估计出响应的尺寸、航向等参数。应用于军事上, 可以用来提高海防预警能力; 在民用领域, 对海运监测和管理、非法捕鱼、非法走私等检测和管理都很有意义。SAR 图像由于具有相对光学图像较高的重复观测频率, 以及受气候和天气影响较小等优点, 因而成为对海洋舰船监测的主要手段之一^[1-4]。

以往船只检测的研究通常集中在 Radarsat-1, ERS-1/2 等 SAR 数据^[5-7], 然而传统的单极化 SAR 数据只包含强度信息, 不能完整地表现船只本体与海面杂波散射机制的异同。极化合成孔径雷达可以工作在不同的收发极化组合下, 具有比单极化 SAR 信息含量高的特点。通过测量的极化散射矩阵可以完全表征在特定姿态和观测频率下目标的极化散射特性, 而且电磁波的极化组合对目标的形状、尺寸、结构、材料等比较敏感, 因而极化 SAR 可以极大地提高成像合成孔径雷达对目标各种信息的获取能力。早在 1985 年, 美国 JPL 实验室研制出第一部真正意义上的机载极化 SAR 系统-JPL/CV-900, 开

创了极化成像雷达研究的新纪元。目前极化 SAR 系统发展水平的高低已经成为衡量一个国家军事力量与综合国力水平的重要标志之一, 其发展受到各国越来越多的重视。随着极化 SAR 理论和技术的同步发展, 极化 SAR 迅速成为 SAR 的主流发展方向之一, 针对极化 SAR 的研究和应用已成为国内外雷达同行热烈讨论的前沿课题。但是在应用领域, 仍有一些急待解决的问题。国内由于极化数据源的问题, 在这方面开展的相关研究工作相对较少。

2 目标的极化散射特性

2.1 海洋杂波

由 SAR 海洋成像的 Bragg 散射模型可知, 随着雷达频率和局部入射角的变化, Bragg 波波长也将相应发生变化。从而对雷达频率和入射角对后向散射系数产生影响。随着入射角的增加, 雷达后向散射大幅度降低。类似的, 雷达后向散射将随雷达频率的增加而减小。需要注意的是, 尽管 Bragg 散射模型可以解释许多 SAR 海洋散射特性, 这个模型仍然存在一些缺陷, 例如, 这个模型无法解释雷达入射波的极化特性对海洋后向散射的影响。观测数据表明, 对雷达入射角不太小, 而海面风浪较小的平静海面, 有 HH 极化雷达波的海洋后向散射要小于 VV 极化的海洋雷达波, 其后向散射系数的比值 σ_{HH}/σ_{VV} 受到雷达入射角和波长以及海面粗糙度的影响, 并且有实验数据表明在以小入射角观测非常粗糙的海面时, 存在 $\sigma_{HH} > \sigma_{VV}$ 。对于交替极化的雷

达波,一般认为在任意相同条件下, σ_{HV} 比 σ_{HH} 和 σ_{VV} 都要小,比值 $\sigma_{\text{HV}}/\sigma_{\text{HH}}$ 和 $\sigma_{\text{HV}}/\sigma_{\text{VV}}$ 也受雷达入射波的人射角、波长以及海面粗糙度的影响。

另一个影响海面后向散射回波的因素是海洋表面风场。一般认为,在忽略其它因素影响的条件下,海洋的后向散射与海面风速成正比。较大的风速,将会产生一个较为粗糙的海洋表面,导致较为强烈的 Bragg 共振散射,使得海面后向散射回波较强,从而在 SAR 图像上则表现为较亮的区域;而较低的风速则会产生一个近似于镜面的反射表面,这个反射面将会导致强烈的镜面反射,而后向散射能量则被大大削弱了,因此在 SAR 图像中将表现为较暗的区域。为定量评估海洋风场对海洋后向散射强度和海洋 SAR 图像的影响,需要建立一个关于雷达后向散射系数、海洋风场风速、风向以及其它相关因子的精确数学模型,不幸的是,到目前为止,对于他们之间的关系所知还极为有限,这些因素间的作用机制仍不十分清楚。1997 年,Vachon 在建立海洋雷达后向散射模型方面做了大量深入细致的工作之后,提出了一个关于海面风场与 σ^0 关系的经验模型^[8],并指出:① 对任意风速和风向,C 波段 VV 极化的 σ^0 值均大于 HH 极化的 σ^0 值;② C 波段 HH 极化的 σ^0 减小速度要快于同波段的 VV 极化。

2.2 船只目标

极化方式对船只目标散射特性的影响同时表现在对其后向散射强度和目标结构的敏感程度上。一般认为,船只目标对 HH 极化波具有较强的后向散射能力,而对于 VV 极化的雷达入射波则较弱,入射波为交叉极化 HV 和 VH 极化波的船只后向散射最弱。同时,不同极化波对于不同的船只结构,其敏

感程度也不一样。ESA^[9]在 2004 年的 IMPAST 项目年度报告中曾经指出,HH 极化的雷达波对船只的水平结构较为敏感,船只的水平结构越丰富,则其后向散射强度越大,而 HV 则对船只的垂直结构较为敏感,船只的垂直结构越丰富,则船只的后向散射强度越大。需要注意的是这里所指的垂直结构和水平结构还与船只的朝向有关,而并非是单纯的船只本体的特征。

一般来说,VV 极化的雷达波对海洋表面的粗糙度要比 HH 极化的雷达波更为敏感,因此在大多数情况下,VV 极化 SAR 图像的海洋回波强度要大于 HH 极化的 SAR 图像。而舰船目标受 HH 和 VV 极化波极化特性的影响则较小,VV 极化和 HH 极化的 SAR 图像中的舰船目标均具有极强的散射强度。这就使得在 HH 极化模式得到的 SAR 图像具有较大的船—海对比度,舰船目标比较容易识别^[10]。而在 VV 极化 SAR 图像上,舰船目标容易被海面杂波掩盖,舰船目标的提取和识别相对较为困难。因此在一般的舰船检测工作中,HH 极化 SAR 图像被用于检测和识别舰船本体,而 VV 极化 SAR 图像则被用于识别舰船在运动中产生的尾迹。这也是为什么大多数船只检测研究多采用 Radar-sat-1(HH 极化)数据而不是 Envisat(VV 极化)数据。HV 极化(或 VH 极化)的情况则相对较为复杂。与 HH 极化相比,交替极化方式具有更为强烈的抑制海洋背景后向散射的能力。

例如,图 1 中 HH 极化 SAR 图像中尖峰代表的船只在 HV 图像中就不可见。但是同时 HV 极化对于舰船目标的散射回波同样也具有抑制的作用,这使得某些在 HH 图像中可见的舰船在 HV 极

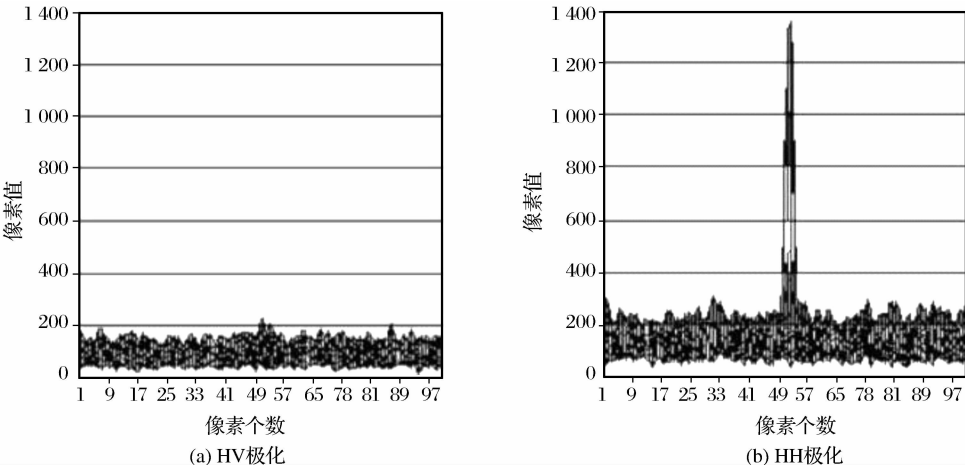


图 1 Envisat ASAR 中同一区域的 SAR 强度剖面
Fig. 1 SAR intensity profiles of the same region in Envisat ASAR

化图像中不可见。在高海况的情况下,由于 HV 对海洋杂波的强烈抑制作用,某些在 HH 图像中较弱甚至是被海洋杂波掩盖的舰船目标,在 HV 图像中

具有较大的强度和船—海对比度。图 2 显示了在高海况情况下 HV 极化对海洋杂波的抑制和对船—海对比度的增强。图中最高的尖峰代表图中的一艘

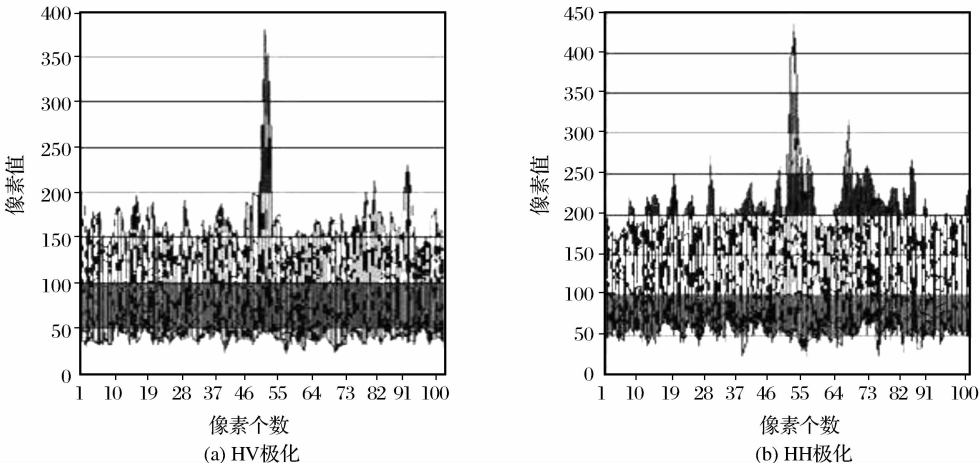


图 2 高海况下 Envisat ASAR 中同一区域的 SAR 强度剖面

Fig. 2 SAR intensity profiles of the same region in Envisat ASAR

舰船,显然 HV 图像中的舰船目标较为突出,受背景杂波的干扰小,而 HH 图像则目标与背景反差较小,容易造成漏检。

2.3 船只尾迹

运动船只在水面留下的痕迹称为舰船尾迹。在光学图像和 SAR 图像上常常可以观测到舰船尾迹。随着海洋环境和 SAR 传感器特性的不同,舰船尾迹在 SAR 图像上具有不同的表现形式,大体上分为 3 类:船产生的表面波,海洋表面由船只运动造成的湍流和漩涡,由船只形成的内波。其中表面波尾迹又分为两个子类,分别为 Bragg 波尾迹和 Kelvin 尾迹。表 1.3.1 显示了舰船尾迹各类别及其各类别的基本特征。

不同极化方式得到的船只尾迹图像也是迥然不同的。由于海面多次散射现象较少,因此在交替极化 SAR 图像上尾迹回波较少,图像不明显。而对同极化波来说,在相同条件(雷达波长、入射角和海况、风速等条件均相同)下,VV 极化的海洋表面回波要强于 HH 极化波,因此一般说来 VV 极化图像上的舰船尾迹特征比 HH 图像上的尾迹明显。但是需要注意的是,由于倾斜调制受到不同极化波的

影响,因此尽管 HH 极化的海洋雷达截面小于 VV 极化,但 HH 极化的倾斜调制强于 VV 极化。Alpers^[11]等指出在高雷达频率及 HH 极化方式下 Kelvin 尾迹更清晰。Hennings^[12]等也通过仿真和分析,得出 Kelvin 尾迹尖头波在 HH 极化上的可见性要高于 VV 极化的结论。因此对于 Kelvin 尾迹 HH 极化成像方式要优于 VV 极化波。

3 极化船只监测技术

3.1 极化通道融合

充分利用多通道极化信息的一个简单方法就是对各极化通道采用非线性加权方式得到极化融合数据。最常用的 SPAN(功率)图就是利用各通道极化数据得到极化总功率图像,同时也对相干斑噪声进行了抑制,已被广泛应用,使用了各个极化通道的加权非相干和

$$\text{SPAN} = |HH|^2 + 2|HV|^2 + |VV|^2 \tag{1}$$

PMS(Power Maximization Synthesis)也称功率最大组合,是为改进全通道数据融合而提出的,其组合形式为:

$$\text{PMS} = \frac{1}{2} \left[\text{SPAN} + \sqrt{(|HH|^2 - |VV|^2)^2 + 4|HH^* \cdot HV + VV \cdot HV^*|^2} \right] \tag{2}$$

1989 年,Novak 利用典型地物目标和草杂波的极化测量数据进行了静止目标的检测。在假定杂波和目标分布后,推导了最优极化检测器(OPD),并利用杂波的乘积模型衡量了这种方法和其它几种检测器的检测性能,给出了在不同参数下的虚警概率

和检测概率的关系。OPD 检测器是 Neymann-Pearson 准则下最优的检测器,它的检测性能是所有检测器的上限。但是。OPD 检测器需要已知杂波和目标的极化协方差,这在实际情况中往往是不可能的,因此 OPD 只能是一种理想情况。

在实际应用中,通常可以从场景估计出背景杂波的协方差。当与已知背景杂波一致时,认为是背景杂波,否则认为是目标。1990 年,Novak 和 Burl^[13]等提出了不同杂波背景下的极化白化滤波(PWF)算法,在保持图像分辨率不变的同时,降低极化 SAR 图像中的相干斑因子,等效于传统的三视处理结果,因此也提高了目标的检测能力。最后,将 PWF 检测器、张量(SPAN)检测器和单通道检测器的检测性能和 OPD 检测器进行了比较。1990 年底,Chaney^[14]等比较了 OPD、PWF 等 6 种不同的检测器性能。1993 年,Novak 等利用林肯实验室实际极化 SAR 数据进行实验,分别使用常规 PWF 和自适应 PWF(APWF)算法得到滤波图像来检测目标。PWF 滤波器是一种平方律检波器。研究表明,PWF 在 SAR 图像中的杂波背景噪声或等效视数(标准偏差与平均值的比值)降到了最低,因此可以增强目标检测的能力。国内,韩昭颖^[15]等在 PWF 算法中引入同质区域的自适应估计,提出 IPWF(改进的 PWF)算法,利用 SIR-C 全极化 SAR 数据进行船只检测实验,提高了船舶目标的检测率,控制了虚警率,同时可以更好地保持船舶目标的结构信息。由于 PWF 检测器只需要已知背景杂波的情况,与 OPD 相比只能得到次优的检测结果,但更符合实际的情况。

此外,2007 年,种劲松^[16]针对 Envisat ASAR 交替极化数据将全极化 OPD、PWF 和 SPAN 检测器推广到双极化组合情况,从而实现了双极化信息对目标检测性能改善的定量分析。意大利学者 Sciotti M^[17]等于 2001 年提出中心化和非中心化两类检测融合方法:中心化方法是先融合各极化通道,再对融合后的图像进行检测;非中心化方法为先分别检测不同极化通道的图像,再对检测结果进行融合处理。

基于极化通道融合的船只检测技术是一种极化信息的简单组合利用,很多情况不但可以获得在单极化下无法显现的目标,同时还能降低图像的相干斑噪声,适用于快速检测需求或海况不复杂的情况。

3.2 极化统计分布

就每一极化组合图像而言,其统计特性与单通道单极化 SAR 图像的统计特征没有差别,即正交双通道采样是具有零均值和等方差的高斯随机变量,因此多极化 SAR 单视图图像的幅度和回波功率可分别用瑞利分布和指数分布来描述,极化散射向量服从多元复高斯分布。而对于经过 n 视处理后的多视

情况,每一个极化通道的信号幅度和图像强度将分别服从 $2n$ 个自由度的分布,多视协方差矩阵服从复 Wishart 分布^[17]。因此,为了充分利用多极化数据信息,可以将传统的单极化统计分布检测推广到多极化情况。

2001 年由 Sciotti M^[18]等针对 SIR-C 全极化 SAR 图像进行了舰船目标检测研究,提出了一个类似于基于高斯分布的单通道最大似然 CFAR 算法的多通道检测器,即 PG-GLRT 检测器,也称为极化高斯广义似然比检测器。该算法采用一个滑动窗口,并假设图像样本统计独立且在极化通道中各像素独立同分布,但对于该检测其中的二级数据如何获取则缺乏相关资料的说明。Sciotti M^[19]等在 2002 年讨论了海面统计分布不均匀特性对检测虚警率的影响,认为先分割后检测的思路可以有效地控制检测虚警概率。

2005 年,加拿大学者 Liu^[20]等假设极化向量 X 服从复高斯分布,给出了双极化情况下 CFAR 检测决策阈值的解析表达式,用实际全极化 SAR 数据指导仿真参数,进行了舰船目标检测研究,比较了单极化、双极化以及全极化情况下的检测性能。指出对于 CFAR 方法,极化数据比任何单极化通道船只检测都有优势,包含幅度和相位信息的单极化数据比只包含幅度的单极化数据更有利于船只检测。

2007 年,李海艳^[21]采用模糊聚类方法进行海上目标分类研究,考察了极化散射矩阵、极化散射矩阵元素以及极化协方差矩阵对区分船只、防波堤、海杂波以及船尾迹的影响。实验结果表明采用 Wishart 分布距离要优于 Euclidean 距离,输入是协方差矩阵还是其对角元素对分类结果的影响不大。

常规的 CFAR 技术在 SAR 目标检测中一直是最有效且常用的技术之一,具有重要的理论和实用意义。基于极化统计分布模型的技术实际上是单极化 CFAR 目标检测技术在多极化情况下的推广应用,其关键也是选择合适的海洋杂波极化统计分布模型。由于研究起步较晚,也注意到极化统计分布模型的复杂性,因此极化统计分布模型远不如常规 SAR 那样具有众多适用于不同场景的统计分布模型,这也是基于极化统计分布技术需要改进和发展的地方,同样也是难点所在。

3.3 极化目标分解

极化合成孔径雷达通过测量地面每个分辨单元内的散射回波,进而获得其极化散射矩阵、Mueller 矩阵或 Stokes 矩阵。目标的极化特性与其形状结

构有着本质的联系,可反映目标表面粗糙度、对称性和取向等其它雷达参数不能提供的信息,是完整刻画目标特性不可或缺的。极化目标分解理论是为了更好地解译极化数据而发展起来的^[22]。目标分解定理最早由 Huynen^[23]提出,它有助于利用极化散射矩阵揭示散射体的物理机理,促进对极化信息的充分利用,是从极化 SAR 图像数据中提取出目标极化散射特性的一种有效手段。

1999 年 Ringrose^[24,25]等首次采用 Cameron 极化目标分解方法对 SIR-C 极化数据进行船只检测方面的研究,开创了极化数据目标分解方法用于船只检测的先河。他们还分析了利用目标散射特性进行舰船检测的可行性,同时指出海洋主要由柱面散射构成,而船只主要由二面角、窄二面角以及 1/4 波散射构成。2001 年,Jeremy^[26]在关于海面监测的论文中认为 Cloude 极化目标分解技术适合海洋环境,并与 Van Zyl 分解法结合起来进行船只检测和识别,得到了较好的结果。

1999 年和 2000 年,加拿大学者 Touzi^[27,28]等在 Von Neumann 熵的概念的基础上引入了一种新的极化熵定义 PE ,利用极化熵方法对 CV580 的机载极化数据进行了不同雷达入射角下舰船目标检测的研究,说明极化熵可以大大增强目标和背景的对比度,从而提高检测效率。作为 PE 的自然的推广,Touzi 又引入 Touzi 极化各向异性 PE^C ,由定义 $PE^C = 1 - PE$ 得出。船只散射机制相对于海面通常更加不同,船只具有更高的极化各向异性。因此极化各向异性的计算是一个提高船海对比度的预处理算法。结果显示极化各向异性 PE^C 相对于单通道极化来说在提高船海对比方面有一个显著的提高。同时发现 PE^C 在应用于有风海面时效果降低,在这种情况下,它只是比 HV 单通道稍微好一些。同时发现掠射入射角大于 60° 时作为增强船只信号的方法丝毫不起作用。

由于 Cameron 分解是基于极化散射矩阵,且没有检验目标散射的相干性,因此,在非相干目标的情况下将会得到错误的结论。因此,在进行所有的相干目标分解之前,有必要进行相干性的判断,只有对相干目标才能使用相干目标分解方法。为了弥补 Cameron 分解的这些缺陷,2002 年 Touzi^[29,30]通过引入了分布目标的相干性验证改进了 Cameron 分解方法,并称之为 SSCM(对称散射特征方法)。2004 年,Touzi^[31]等利用 SSCM 方法对 CV580 极化数据进行船只目标识别,取得了理想

的实验结果。

2007,王文光和李海艳^[32]等针对极化熵检测的不足,在极化特征分解的基础上,提取多种表示船海对比度的特征矢量,然后直接使用这些特征矢量对像素进行非监督分类,并以 NASA/JPL 的 L 波段的 AIRSAR 数据作为试验数据,进行海上船只检测,最终保留包括船只目标在内的 4 类地物。虽然船只被单独地保留在某类,但由于采用的非监督分类,除非人为选定船只类别,否则还无法确认哪类才是船只目标。

值得一提的是,2004 年西班牙的 Margarit G^[33]等利用模拟极化 SAR 和极化 ISAR 数据开展了船只的散射机制研究,通过 SDH 分解,即分解成球体、二面角和螺旋体,将船只结构与极化散射特征联系起来,试图建立船只的极化模型库来实现船只的检测或辨识。虽然,这种方法类似于 SAR 目标识别中的模型匹配方法,理论上可以快速、准确地对船只进行分类,但仍然存在无法建立全面且完整的极化船只模型库的问题,因此目前只能开展初步的模拟研究,实际应用还有一段距离。

极化目标分解技术包括极化相干目标分解和极化非相干目标分解,目前已广泛应用于极化散射特征信息的提取以及后续的目标检测和分类。通过极化目标分解可以提供目标的“高分辨信息”,即基本散射目标组成,因此可以很好地根据海上船只与海洋杂波之间极化散射特性差异来检测船只。然而,人们不可能完全准确地理解目标在任何环境下所应具有极化散射特性,这种理论模型与实际情况的差距导致了建立完整的极化散射特征库来进行船只检测和分类还需要很长一段时间。

3.4 极化时频分析

小波变换是一种根据时频特性提供多尺度分析的工具。一幅图像经二维离散小波变换后可以构造四组二维小波系数,即 LL, LH, HL, HH,其中 L 表示低通,H 表示高通。考虑到船只目标与海面杂波之间后向散射强度和相关性的差异,船只目标表现为较亮像素点的集合,经二维小波变换后,其在各个子带图像上对应的像素可能仍然很亮,在空间上的相关性较强,而海面杂波由于其形成的随机性,空间相关性往往很小,其能量均匀地分布在各个子带中,对应的小波系数几乎不可能都较大。2005 年,Tello^[34]等利用扫描模式的 Radarsat-1 数据和模拟数据开展了船只检测研究,提出用静态小波变换进行船只检测,这种算法在每一次低通或高通滤波后不

进行抽采,然后通过 4 个通道小波系数之间的乘积大幅度提高了船海对比度。2006 年,Tello^[35]等将小波变换方法扩展到了 Envisat 交替极化数据,采用了类似于中心化和非中心化融合方法来综合双极化通道的检测结果。2007 年,国内的李晓玮和种劲松^[36]也开展了小波变换在船只检测中的研究,但由于数据源限制,只在 1994 年 SIR-C C 波段菲律宾近海单极化图像上进行实验和分析。大量文献表明,小波变换方法在增强船海对比度和提高检测品质因数方面效果明显。

另一方面,子孔径分解技术也开始应用于目标识别中^[37,38]。在子视图像中,由于海面由许多小于图像分辨率单元的细小波纹组成,因此它们在子视图像间的相关性较小,而对于那些尺寸大于图像分辨率单元的船只目标,在子视图像间的相关性就比较大,即使海上船只处于运动状态,船只目标在子视图像间的相关性也比较大。基于这种假设,2001 年和 2004 年,Iehara 和 Ouchi^[39,40]等利用 Radarsat-1 数据进行子孔径分解,并通过计算两个子孔径图像之间的二维互相关函数(cross-correlation function)来检测海上船只。

2003 年,Souyris^[41]等将子孔径分解技术从单极化数据推广到多极化数据情况,通过对多极化数据的子孔径分解可以得到类似于极化干涉数据的组合,然后采用与极化干涉相干最优技术的相同思想,在整个极化空间寻找最优的极化组合,从而可以获得两组极化子视图之间的最优相关函数,最大化目标与背景的对比如^[42]。

2006 年,Greidanus H 用频谱相互不重合的 3 个子孔径图像,研究了这 3 个通道之间的 8 种组合方式,当船只具有严重的方位模糊时,这 8 种组合方式并不能比一幅多视图带来更好的检测结果。并认为二维互相关函数(cross-correlation function)在增强船只目标的同时,也可能会增加杂波。然而,需要注意的是,Greidanus 在计算互相关系数时并没有对 3 个子频谱做平移重叠处理。

高分辨率 SAR 下,一方面带来了船只目标更多的细节特征,但同时也增加了目标识别的复杂度^[44]。因此并不是所有目标都在高分辨率下更易于识别,但同时也应存在一个最优的识别尺度,这也是时频分析技术的基本思想。极化时频分析技术充分利用了极化信息与时频分析的优点,试图在一定尺度下获得更优的船海对比度用来提高船只检测概率。但由于它是新近发展起来的一种技术,相关的

研究还未及时开展,其船只检测的真实有效性还有待更多的实验验证。

4 结 语

本文首先分析了不同极化方式对海洋杂波、船只目标以及船只尾迹 SAR 成像的影响,对于不同的海洋应用,应选择能突显感兴趣目标的极化方式。然后归纳和总结了四大类极化船只检测技术,同时分别给出了这几种极化船只检测方法的技术特点。近年成功发射的多颗商业星载极化 SAR 系统,如日本的 ALOS-PALSAR(2006),意大利的 Cosmo-Skymed(2007),德国的 TerraSAR-X(2007),加拿大的 Radarsat-2(2007)等,大大拓展了极化 SAR 数据源,方便了国内外研究学者获取足够的数据用于新理论、新方法的研究,这也是利用极化信息进行海面船只监测的机遇和挑战,本文在这方面给出了当前各种极化 SAR 船只检测技术的发展思路和特点,期望能起到抛砖引玉的效果。相信在不久的将来,通过各国学者的不懈努力将推动极化 SAR 海洋应用研究进入一个快速发展的阶段。

参考文献:

- [1] Eldhuset K. An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Space-borne SAR Images in Coastal Regions[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1996,34(4):1010-1019.
- [2] Lombardo P, Sciottii M. Segmentation-based Technique for Ship Detection in SAR Images[C]. IEE Proceedings, Radar, Sonar & Navigation, 2001,148(3):147-59.
- [3] Henschel M D, Rey M T, Campbell J W M, *et al.* Comparison of Probability Statistics for Automated Ship Detection in SAR Imagery[C]. Proceedings of SPIE, 1998,3491,986-91.
- [4] Jiang Qingshan, 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.
- [5] Lin I I, Leong K K, Lin Y C, *et al.* Ship and Ship Wake Detection in the ERS SAR Imagery Using Computer-based Algorithm[C]. Proceedings of IEEE 1997 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'97): 1997, 151-153.
- [6] Robertson N, Bird P, Brownsword C. Ship Surveillance Using Radarsat ScanSAR Images[C]. Alliance for Marine Remote Sensing (AMRS) Workshop on Ship Detection in Coastal Waters, 2000.
- [7] Cusano M, Lichtenegger J, Lombardo P, *et al.* A Real Time Operational Scheme for Ship Traffic Monitoring Using Quick Look ERS SAR Images[C]. Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium

- (IGARSS00):2000,7:2918-2920.
- [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] Vachon P W, Thomas S J, Cranton J, *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.
 - [10] Huang Weigen. Polarization for Sea Surface Ship Detection with SAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(1): 34-44. [黄韦良. 水面船只 SAR 探测的极化方式研究[J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(1): 34-44.]
 - [11] Alpers W, Romeiser R. On the Radar Imaging Mechanism of Kelvin Arms of Ship Wakes[C]. Proceedings of IEEE 1998 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS98): 1998, 4: 1932-1934.
 - [12] Hennings. Radar Imaging of Kelvin Arms of Ship Wakes[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(13): 2519-2543.
 - [13] Novak L M, Burl M C. Optimal Speckle Reduction in Polarimetric SAR Imagery[J]. IEEE Trans. AES, 1990, 26(2): 293-305.
 - [14] Chaney R D, Bud M C, Novak L M. On the Performance of Polarimetric Target Detection Algorithms [C]. IEEE. AES Magazine, Nov. , 1990, 10-15.
 - [15] Han Zhaoying, Chong Jinsong. Ship Detection Algorithm in Polarimetric SAR Images[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2006, 20(1): 65-70. [韩昭颖, 种劲松. 极化合成孔径雷达图像船舶目标检测算法[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 65-70.]
 - [16] Chong Jinsong, Li Xiaowei, Han Zhaoying. Analysis of Target Detection Performance on ENVISat ASAR Alternating Polarization Mode[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(10): 2359-2362. [种劲松, 李晓玮, 韩昭颖. ENVISat ASAR 交替极化模式目标检测性能分析[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2359-2362.]
 - [17] Lee J S, Hoppel K W. Intensity and Phase Statistics of Multi-look Polarimetric and Interferometric SAR Imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32(5): 1017-1027.
 - [18] Sciotti M, Pastina D, Lombardo P. Polarimetric Detectors of Extended Targets for Ship Detection in SAR Images[C]. Proceedings of IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS01): 2001, 7: 3132-3134.
 - [19] Sciotti M, Pastina D, Lombardo P. Exploiting the Polarimetric Information for the Detection of Ship Targets in Non-homogeneous SAR Images[C]. Proceedings of IEEE 2002 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'02): 2002, 3: 1911-1913.
 - [20] Liu C, Vachon P W, Geling G W. Improved Ship Detection with Airborne Polarimetric SAR Data [J]. Can. J. Remote Sensing, 2005, 31(1): 122-131.
 - [21] Li Haiyan. Ship Detection with Polarimetric SAR Data[D]. Ph. D. Dissertation, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2007. [李海艳. 极化 SAR 海面船只监测方法研究[D]. 博士论文, 中国科学院海洋研究所, 2007.]
 - [22] Cloude S R, Pottier E. A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498-517.
 - [23] Huynen J R. Phenomenological Theory of Radar Targets[D]. Ph. D. Dissertation, Delft University, 1970.
 - [24] Cameron W L, Youssef N N, Leung L K. Simulated Polarimetric Signatures of Primitive Geometrical Shapes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34: 793-803.
 - [25] Ringrose R, Harris N. Ship Detection Using Polarimetric SAR Data[C]. CEOS SAR Workshop 2001, 26-29 October, 1999. Toulouse, France.
 - [26] Jeremy M, Campbell J W M, Mattar L, *et al.* Ocean Surveillance with Polarimetric SAR[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27(4): 328-344.
 - [27] Touzi R. On the Use of Polarimetric SAR Data for Ship Detection[C]. Proceedings of IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS99): 1999, 2: 812-814.
 - [28] Touzi R. Calibrated Polarimetric SAR Data for Ship Detection [C]. Proceedings of IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS00): 2000, 1: 144-146.
 - [29] Touzi R, Charbonneau F. Characterization of Target Symmetric Scattering Using Polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 40(11): 2507-2516.
 - [30] Touzi R, Charbonneau F. The SSCM: An Adaptation of Cameron's Target Decomposition to Actual Calibration SAR Requirements[C]. Proceedings of CEOS Working Group on Calibration/Validation SAR Workshop, London, United Kingdom, 2002.
 - [31] Touzi R, Charbonneau F, Hawkins R K, *et al.* Ship Detection and Characterization Using Polarimetric SAR [J]. Canada Journal of Remote Sensing, 2004, 30(3): 552-559.
 - [32] Wang Wenguang, Wang Jun, Mao Shiyi, *et al.* Ship Detection Based on Classification of Polarimetric SAR Images[J]. Signal Processing, 2007, 23(5): 676-679. [王文光, 王俊, 毛士艺, 等. 基于极化 SAR 图像分类的海上舰船检测[J]. 信号处理, 2007, 23(5): 676-679.]
 - [33] Margarit G, Fabregas X, Mallorqui J J. Study of the Polarimetric Mechanisms on Simulated Vessels with SAR and ISAR Imaging[C]. EUSAR 2004.
 - [34] 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 and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 201-205.
 - [35] Tello M, Lopez-Martinez C, Mallorqui J J. Automatic Vessel Monitoring with Single and Multidimensional SAR Images in

the Wavelet Domain[C]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing,2006,61:260-278.

[36] Li Xiaowei,Chong Jinsong. A Ship Detection Method of SAR Images Based on Wavelets and K-Distribution[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2007, 21 (4) : 350-354. [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.]

[37] Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E. Scene Characterization Using Subaperture Polarimetric SAR Data[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(10):2264-2276.

[38] Schneider R Z, Papathanassiou K P, Hajnsek I, *et al.* Polarimetric and Interferometric Characterization of Coherent Scatterers in Urban Areas[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,2006,44(4):971-983.

[39] Iehara M,Ouchi K,TakamiMI,*et al.* Detection of Ship Using Cross-correlation of Split-look SAR Images[C]. IGARSS'01, Sydney, Australia,2001,4:1807-1809.

[40] Ouchi K,Tamaki S,Yaguchi J,*et al.* Ship Detection Based on Coherence Images Derived from Cross Correlation of Multi-look SAR Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2004,1(3):184-187.

[41] Papathanassiou K P,Cloude S R. Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(11):2352-2363.

[42] Souyris J C,Hery C,Adragna F. On the Use of Complex SAR Image Spectral Analysis for Target Detection:Assessment of Polarimetry[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing,2003,41(12):2725-2734.

[43] Greidanus H. Sub-aperture Behavior of SAR Signatures of Ships[C]. IGARSS'06.

[44] Pastina D,Lombardo P,Farina A,*et al.* Super-resolution of Polarimetric SAR Images of Ship Targets[J]. Singal Prccessing,2003,83:1737-1748.

Updated Progress in Polarimetric SAR Techniques on Vessel Detection

CHEN Xi,WU Tao,RUAN Xiang-wei

(No. 38 Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation,Hefei 230031,China)

Abstract: Recently,Polarimetric SAR (PolSAR) techniques have been much studies as hot research topics in the area of Synthetic Aperture Radar (SAR). In this paper,the effect of the different polarization channels on SAR imaging of vessel,sea,and tracking are introduced firstly,and then the characteristics of all kinds of polarimetric SAR techniques on vessel detection are illustrated and summarized. Finally,the application development of polarimetric SAR techniques is analyzed.

Key words: SAR;PolSAR;Ship detection