

文章编号: 1007-4619(2007)04-0552-11

欧盟船舶遥感探测技术与系统研究的进展

张凤丽, 张 磊, 吴炳方

(中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101)

摘 要: 船舶探测与监视有着广泛的军事和民用意义, 遥感技术是船舶探测的有效手段。近年来, 在渔业活动监测的推动下, 欧盟开展了一系列的船舶遥感探测研究, 特别是 MPAST 和 DECLMS 项目, 集中了欧盟内外多家相关领域的研究力量, 发展和完善了一系列船舶遥感探测、分类及识别的方法和技术, 评估了现阶段船舶遥感探测技术的发展现状和水平, 指出了现阶段普遍存在的问题, 并对未来 SAR 系统的研制提出了需求。此外, 目前在欧盟范围内已经建立了多个船舶遥感探测和监视系统, 包括在 MPAST 和 DECLMS 项目执行过程中发展起来的英国 QinetiQ 的 MaST 挪威 FFI 的 Ehhuset 挪威 Kongsberg 的 MeosView 欧盟 JRC 的 VDS 法国 Keruejenn 的 CLS 和法国 BOOST 船舶遥感探测系统等; 此外, 还有非项目合作单位所发展的系统, 如英国 DERA 罗马大学和意大利 Alenia Aerospazio 公司的船舶探测系统等。文章对这些系统的构成和运行情况进行了详细介绍。最后, 文章分析了欧盟船舶遥感探测技术和系统发展现状对我国的借鉴意义。

关键词: 欧盟; 船舶探测与监视; 遥感技术; MPAST; DECLMS

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Progress of Ship Detection Technology and System Based on Remote Sensing Technology in European Union

ZHANG Feng-li, ZHANG Lei, WU Bing-fang

(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Ship detection and surveillance are of great significance in military and civilian domain for which remote sensing technology serves as an efficient method. In recent years European Union has carried out a series of research on ship detection using remote sensing technology driven by fishery activity monitoring. Especially under the MPAST and DECLMS programs many research institutes within and outside European Union have been concentrated together. Through the two programs a series of methods on ship detection, classification and identification have been developed and improved. State of the art and common problems in ship detection based on remote sensing have been found, and technical requirements for future SAR system are proposed. Besides, many ship detection and surveillance systems have been set up within European Union, including QinetiQ's MaST, FFI's Ehhuset, Kongsberg's MeosView, JRC's VDS, Keruejenn's CLS and BOOST's ship detection system, which are developed under MPAST and DECLMS programs, as well as several systems developed apart from those two programs such as ship detection system developed by DERA, Rome University and Alenia Aerospazio company. This paper introduces the composition and function of these systems in detail. In the end, the paper analyzes the reference meaning for China of EU's ship detection technology and system development.

Key words: European Union; ship detection and surveillance; remote sensing technology; MPAST; DECLMS

收稿日期: 2006-05-19 修订日期: 2006-10-12

基金项目: 科技部中欧合作项目 (编号: EVC2-2001-00048)。

作者简介: 张凤丽 (1978—), 女, 博士, 现在中国科学院遥感应用研究所进行博士后研究。主要研究领域为遥感数据处理与模式识别。

E-mail: flizhang@irsa.ac.cn wub@irsa.ac.cn

1 引言

船舶探测与监视是世界各海岸带国家的传统任务,在军事、民用部门有着广泛的应用^[1]。军事防御应用主要包括战场环境评估、战时海上监视、恐怖活动监视及非法移民等;民用领域包括渔业监测、水上交通监管、港口监视及海洋污染监测等。

围绕船舶遥感探测技术在渔业监测、溢油污染监测、海岸安全以及军事中的应用,从 2002 年至今,欧盟组织多家单位开展了一系列的研究工作。其中影响最大的是 MPAST (Improving Fisheries Monitoring Through Integrating Passive and Active Satellite Based Technologies) 研究项目和欧盟第 5 框架 DECLMS (Detection and Classification of Marine Traffic from Space) 项目。

MPAST 和 DECLMS 项目的开展有力地推动了船舶遥感探测技术的发展,在项目实施过程中,有多家合作单位建立了较为出色的船舶遥感监视系统。特别值得指出的是,中国科学院遥感应用研究所作为 DECLMS 项目的参加单位,一方面在国内开展了大量的研究工作,另一方面,通过国际合作,全面了解了欧盟船舶遥感探测技术的发展现状。下面就欧盟近年来在船舶遥感探测技术方面取得的进展和所形成的船舶监视系统加以介绍。

2 MPAST 和 DECLMS 项目简介

2.1 MPAST 项目

在欧盟,渔业资源面临严重威胁,渔业活动监测和管制已成为保护海洋渔业资源的必要组成部分^[2]。船舶监测系统 (Vessel Monitoring System, VMS) 是 20 世纪 90 年代发展起来的一种渔业活动监测系统,该系统每 30 min 或者 1 h 记录一次船的位置、速度、方向和捕鱼状态,并将信息发送至渔业监测中心 (Fisheries Monitoring Center, FMC)。自 2000 年 1 月 1 日起,欧盟要求所有垂线间长超过 20 m 或总长度超过 24 m 的渔船必须配备 VMS。现在在欧盟海域作业,长度大于 15 m 的渔船都已被强制配备 VMS。VMS 自得以应用以来,已经成为非法渔业监测的中枢,但同时也存在一些缺点和不足:(1) 非欧盟内部船舶可能会闯入欧盟海域作业;(2) 一些小型船舶可能不受 VMS 管制;(3) 在某些情况下 VMS

可能会失效或被关闭;(4) 可能会由于软件的原因引起位置报告出错等。鉴于这么多不利因素的影响,欧盟积极寻求更为有效的船舶监测手段,并将遥感技术作为实现这一目标的首选^[3,4]。

2001 年, COURT 指出了将 SAR 与 VMS 数据相结合进行渔业监测的可能性^[5]。与此相关的研究结论包括:(1) 如果 VMS 数据可以保证每小时获取一次的频率,综合 SAR 和 VMS 数据,对非法船舶的正确识别率最高可达 92%;(2) SAR 数据探测到的船舶位置与 VMS 记录值的平均差异不超过 0.6 km;(3) 分析结果应在 2 h 之内送至有关当局,因此快速图像处理及通信是非常必要的。为进一步解决 SAR 遥感在渔业监测应用中所存在的问题,2002 年 1 月,MPAST 项目启动^[6],项目目标是利用遥感技术开发近实时船舶探测运行系统,以改善渔业监测效果。MPAST 项目为期 3 年*,包括 14 个研究机构和商业伙伴,其中欧盟 JRC 英国 QinetiQ 和西班牙 UPC 负责 SAR 图像分析工具的开发。JRC 开发了 SUMO 探测算法,QinetiQ 开发了 MAST 算法,而 UPC 主要负责船舶 SAR 成像模拟研究,并且为船舶分类算法提供训练样本。Radarsat 是 MPAST 项目的主要数据源,同时也兼顾了 Envisat 数据。

MPAST 项目的主要成果是形成了一个完整的实用船舶探测示范系统^[2],所面临的主要困难是渔船和非捕鱼船的识别及 VMS 不报告和误报告问题。

2.2 DECLMS 项目

在 MPAST 项目的基础上,欧盟第 5 框架项目 DECLMS 于 2003 年 5 月启动^[7]。DECLMS 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船舶探测、分类和识别的研究,以便更好地了解这类系统的能力,弄清不同方法的优缺点,加强基础设施建设,满足用户需求,并且推动新型传感器和平台的研制,满足船舶监测的实用化要求。DECLMS 项目每半年召开一次项目会议,各家合作单位介绍研究成果并交流经验,同时讨论下一步工作计划。

由于船舶探测水上遥感试验比较复杂,目前开展过水面试验的国家仅包括美国、加拿大、挪威、英国、意大利、新加坡等^[8]。针对这种情况,DECLMS 项目采用了 Benchmark 试验方法,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

* http://fish.jrc.ce.jrc.int/fisheries_in_posy/index.html

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。DECLMS项目拥有多个协调单位,IRC是科学问题协调单位,英国 QinetiQ是财务协调单位,荷兰 TNO是项目管理协调单位,这样至少可以充分发挥三家单位的积极性。项目建有专门的项目网站 (<http://Page.jrc.cece.eu.in>),在网站上发布所有的报告、相关软件和说明,以便各个合作伙伴在共同的基础上针对各自要解决的问题,提出新的方法,并与大家共享。同时,DECLMS项目拥有开放的组织方式,欧盟每年都要对合同重新修订,以便不断吸纳新的感兴趣的合作伙伴,现在 DECLMS项目的合作单位已由最初启动时的 16家发展到 24家。

DECLMS项目于 2006年 6月结束,项目成果将作为欧空局 Sentinel卫星计划的重要参考文件。之后将形成一个松散的合作方式,IRC将继续保持项目网站的更新,在现有研究基础上继续发展新的算法,并将联合争取 FP7计划的支持。

3 欧盟船舶遥感探测关键技术研究的进展

3.1 基于光学遥感数据的船舶探测技术研究的进展

MPAST和 DECLMS项目所涉及的遥感数据包括光学和 SAR遥感数据,对光学遥感数据的试验表明^[8],高分辨率光学遥感图像适用于小范围天气较好时的船舶探测,在人为干预的情况下,利用 SPOT 5、KONOS QuickBird等高分辨率光学遥感数据可探测出 5m左右的船舶,并可对大于 15m的船舶目标分类,但对长度小于 10—15m的船舶分类仍十分困难。船舶目标在光学图像上的特征,取决于图像获取的时间、视角、空间分辨率、船舶速度、船舶颜色、海况特征等因素,利用光学遥感图像对船舶目标检测和分类的流程包括图像切片提取、水陆分离和去云处理、船舶目标检测、特征提取与分类等,所用到的关键技术是目标检测、聚类、特征提取和分类等技术^[8]。

德国的 Definens以 eCognition软件为基础^[9],利用 KONOS Pan-sharpened图像检测停靠在港口的船舶,自动识别率可达 90%左右,并可利用长度信息对船舶目标分类。Definens基于光学遥感数据的船舶检测和分类算法包括以下步骤:(1)利用 eCognition软件和 GIS数据进行水陆分离;(2)自动检测水上目标,对每个检测到的目标赋予一个相应的检测率,标记出检测率较低的船舶目标,进行人工

后处理;(3)对所有可能的船舶目标,根据其尺寸、形状和纹理特征进行分类;(4)对检测结果进行人工后处理和检验;(5)以分类图像、GIS矢量图层、统计数据或 HTML报告格式输出分析结果。

法国的 IRD基于光学遥感数据的自动检测算法主要包括预检测、特征提取与选择、分类和决策等步骤。在预检测阶段,首先采用双参数检测器检测亮像元,接下来是区域增长,最后是对相邻区域进行聚类。对于每个所检测出的对象,IRD提取 28个特征,其中包括统计特征(如均值、标准方差、最大值、偏度)、形态特征(周长、面积、密实度、对称性)、纹理特征(灰度共生矩阵)以及其他特征,如尾迹等。为减少计算复杂度,简化分类模型,IRD采用遗传算法(Genetic Algorithm)进行特征选择,利用误差后向传递多层感知器神经网络方法,对船舶目标进行分类,并且用 GA算法代替 BP算法来选择神经网络的最优权重^[8]。

法国的 SPOT资料指出,利用高分辨率光学遥感数据可以实现对船舶目标的精确定位,基于 SPOT 5图像的船舶定位精度优于 35m^[10]。此外,对 SPOT的研究认为一个完整的监测系统,可能需要综合应用雷达和光学传感器,其中光学遥感数据可用于描述所检测目标的特征,与其他监测系统(如 AIS(Automatic Identification System),VMS)相结合,还可以实现对目标的识别。

因为具有较高的分辨率,利用光学遥感数据对船舶分类和识别具有一定的优势,但也只有当图像分辨率与目标尺寸相匹配时才能获得理想结果。较高的空间分辨率有利于反映船舶目标的纹理和结构特征,但同时也使得水面背景更为复杂,可能会引起更多的虚警。总的来说,目前基于光学遥感数据的船舶目标自动检测算法相对较少,且光学传感器易受天气影响,覆盖范围有限,因此更适用于港口、近海区域。

3.2 基于 SAR遥感数据的船舶探测技术研究的进展

海洋易受云雨天气影响,这对光学传感器成像不利,而 SAR遥感具有全天时、全天候、大范围、多参数等特点,近年来被广泛用于渔业活动监测和军事防御^[3]。目前 SAR已成为水上船舶监视最有效的手段之一^[11],基于 SAR图像的水上船舶目标探测技术也取得了一定的进展^[12-19],但存在的普遍问题是实用程度相对较低^[20]。欧盟开展的 MPAST和 DECLMS项目,集中了多方面的研究力量,有力地推动了船舶遥感探测技术的发展^[3,5]。

MPAST项目的主要数据源是 Radarsat 1 和 Envisat ASAR 数据, 所解决的主要问题是: (1) 近实时的卫星遥感图像分析; (2) SAR 遥感数据检测结果与 VMS 船舶位置报告数据的整合。SAR 遥感数据也是 DECLMS 项目的重要数据源, 就船舶监测而言, 所涉及到的主要技术包括船舶目标探测、尾迹探测、船舶分类和识别等技术。

3.2.1 船舶目标直接检测算法

DECLMS 项目各合作单位所开发的船舶探测算法的一般步骤包括^[21]: (1) 利用轨道参数进行地理编码; (2) 陆地隔离; (3) 背景参数估算; (4) 阈值探测; (5) 对所探测到的船舶目标聚类; (6) 去除虚警; (7) 船舶目标参数提取; (8) 尾迹探测; (9) 利用尾迹进行船舶速度估算; (10) 结果输出。

恒虚警率 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 算

法是船舶目标探测最常用的算法^[22], 该方法在欧盟范围内也被广泛采用, 但具体算法在背景和区域设置、背景统计模型估计及虚警去除等方面存在差异。此外, MPAST 和 DECLMS 项目所发展的 SAR 遥感图像目标探测算法, 还包括基于模板匹配的检测方法、基于小波分析的检测算法、基于子孔径分析的方法等^[20]。

(1) CFAR 及改进算法

在 MPAST 和 DECLMS 项目执行过程中, CFAR 算法也被广泛采用, 但具体算法在背景和区域设置、背景统计模型估计及虚警去除等方面存在差异。如图 1 所示, BOOST 根据目标在方位向和距离向的点扩散函数将检测窗口设置为如图 1(a) 所示的形状^[23], TNO 则采用如图 1(b) 所示的窗口, 分别在行和列两个方向上检测船舶目标^[24]。

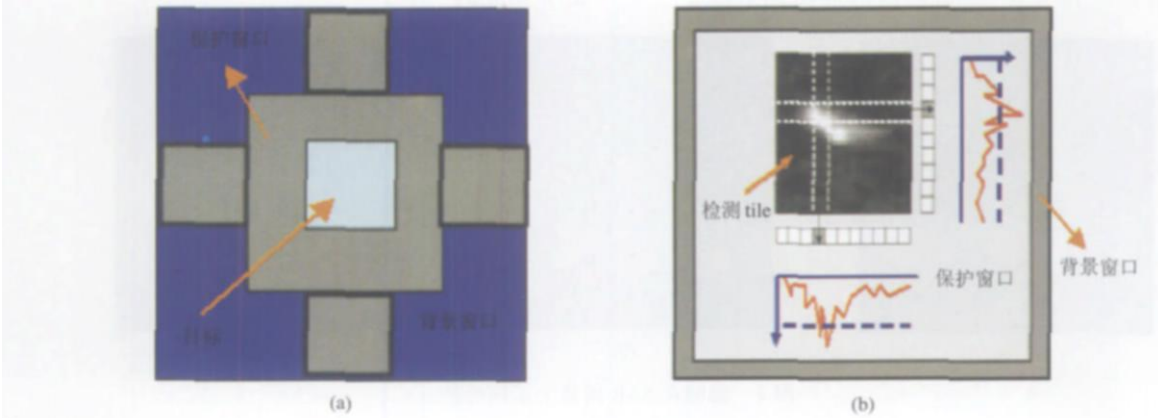


图 1 CFAR 检测窗口的变形

Fig 1 Transform of CFAR detection window

此外, 假设海洋杂波服从 K 分布也是欧盟范围内检测船舶目标的常见做法之一^[20], 其中美国 General Dynamic 的做法是预先计算给定虚警率下的阈值, 建立查找表; 然后假设海洋杂波服从 K 分布, 将图像划分成若干区域, 沿图像行方向进行一维中值滤波, 剔除过亮的像元; 接下来对每个图像块进行统计并通过与阈值的比较确定目标像元, 最后聚类形成船舶目标^[25]。

(2) 基于模板匹配的船舶目标检测算法

欧盟 JRC 基于船舶目标像元分布模型发展了 SUMO (Search for Unidentified Maritime Objects) 算法。这是一种模板匹配方法, 由一个 4×4 的窗口组成, 并利用 3 个阈值限定检测规则^[26]。该算法首先对水陆分离的 SAR 遥感图像进行 tile 处理, 将图像切割成大小约为 1500×400 的切片; 接下来对每个

图像切片进行检测。假设对于某个图像切片, 亮度均值为 μ 标准方差为 σ , 则采用如图 2 所示的检测

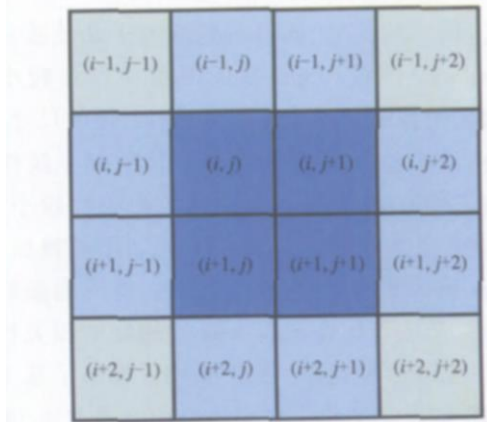


图 2 SUMO 算法检测窗口设置示意

Fig 2 Detection window of SUMO algorithm

窗口和式(1)所示的3个阈值进行检测:

$$\begin{aligned} \text{thresh}_1 &= 3.0 * (\sigma + \sigma) \\ \text{thresh}_2 &= 1.9 * (\sigma + \sigma) \\ \text{thresh}_3 &= 1.4 * (\sigma + \sigma) \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)中因子3.0、1.9和1.4是通过试验得到的,但具体取值可根据具体图像来确定。此外, SUMO还设计了一种拉长的窗口来改善小目标的检测效果。

(3) 基于小波分析的船舶目标检测算法

UPC提出了基于小波分析的船舶目标检测算法^[27-28]。对于一个通道的 SAR数据,基于某一尺度上小波分量间的相关运算实现对船舶目标的检测。对多种极化的 Envisat数据,UPC指出船舶目标在不同极化数据间(特别是交叉极化与同极化数据间)的相关性仍然比背景杂波强,并且提出两种基于小波分析的多极化 SAR遥感数据目标检测方案。一

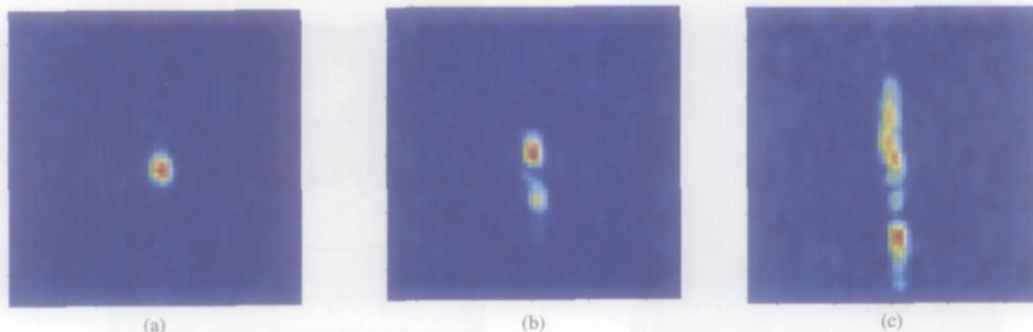


图 3 渔船在 SAR图像上不同特征

Fig 3 Characteristics of fishing vessel in SAR image

种方案是先分别对各通道极化数据利用小波变换分量相关运算进行检测,再对各通道的检测结果进行点积运算;第二种方案是先对各通道极化数据进行点积运算,再利用小波变换及尺度内相关运算进行目标检测。此外,UPC还提出了利用小波变换检测线状地物的方法,并指出可用于水陆边界提取。

对于 SAR成像系统,假设天线波束带宽为 $2f(f - f)$,将 look 1的参考函数定义为为中心频率为 $-f/2$,带宽为 $f(f - 0)$ 的调频信号;将 look 2的参考函数定义为为中心频率为 $f/2$,带宽为 $f(0 - f)$ 的调频信号,则可得到两幅子孔径或分裂视(Split look)图像。Split look图像间存在较小的时间延迟,图像间的相关性取决于散射体的尺寸,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 Split look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舶目标,在 Split look图像间的相关性就比较大,即使船舶处于运动状态,船舶目标在 Split look图像间的相关性也比较大。基于这种现象,日本的 MH提出了基于分裂视 SAR图像交叉相关技术的船舶检测方法,采用二维交叉相关函数定量描述 Split look图像相关性的大小^[30]。假设两幅 Split look图像分别为

种方案是先分别对各通道极化数据利用小波变换分量相关运算进行检测,再对各通道的检测结果进行点积运算;第二种方案是先对各通道极化数据进行点积运算,再利用小波变换及尺度内相关运算进行目标检测。此外,UPC还提出了利用小波变换检测线状地物的方法,并指出可用于水陆边界提取。

(4) 子孔径分析及 Split look图像交叉相关技术

在不同 SAR遥感图像上,船舶目标可能存在较大分异,某些情况下很难判断所检测到的是一个还是两个船舶目标。如图3所示,(a)中的船舶较容易判断,但对于(b)和(c)就难判断检测到的是具有2个散射中心的1个较大目标,还是靠得较近的2个船舶目标。为此,Iehara等曾提出 Split look检测技术,指出在两个子孔径图像上,目标相关,但杂波是不相关的^[29]。

$f(x, y)$ 和 $f(x, y)$,则二维交叉相关函数为:

$$\text{CCF}(x, y) = \iint f(x, y) f(x+x, y+y) dx dy \quad (2)$$

当 look 1和 look 2图像间不相关时,得到的CCF图像较为平坦,若CCF图像存在尖峰,则暗示着图像中可能包含目标。

但对于这种基于分裂视图像相关运算的船舶目标检测方法,IRC给出了不同的结论^[31-32]:IRC分析了S和S模式的Radarsat图像,将其处理成3个独立的不重叠的子孔径图像,并借助VMS数据对结果进行比较分析。结果表明,由于不同视之间的视线角的差异、船舶运动、海面—船舶之间的相互作用等因素的影响,在大多数情况下,船舶目标在不同子孔径图像间的相关性并不好;除了常用的多视处理技术外,利用子孔径技术并不能改善船舶的检测效果。

3.2.2 基于尾迹的船舶目标检测算法

水上船舶目标探测也可以基于尾迹检测实现,

并且尾迹的相关特征可用于船舶航速、航向的估算。目前常用的尾迹探测方法包括 Hough 变换、Radon 变换和基于扫描的算法^[1]。

尾迹在 SAR 图像上的特征与三个方面因素有关^[33]: 船舶因素 (船体类型、发动机系统和航速)、SAR 系统因素 (波长、极化、飞行与观测方向) 和海洋环境因素 (海面风速、风向、海流)。Cope land^[34] 将 SAR 图像上运动船舶的尾迹分为开尔文 (Kelvin) 尾迹、窄 V 型尾迹、湍流尾迹和内波尾迹 4 种形式。但在实际应用中, 受工作波段、极化方式、观测模式等因素的影响, 不同 SAR 系统在尾迹检测能力方面存在差异, 目前对于有没有必要探测尾迹仍存在争议^[1]。尽管目前基于流体力学和电磁学的尾迹信号模拟非常接近实际情况^[35], 但 DECLMS 项目没有一家合作单位具备实用的尾迹探测能力, 大都将其作为船舶目标探测的补充。

3.2.3 相关结论

对于各类用户来讲, 明确知道特定情况下船舶的探测率是非常重要的。SAR 图像船舶探测率取决于诸多因素, 如船舶特性 (船舶尺寸、材质、形状和行驶速度等)、雷达特性 (分辨率、有效视数、入射角、极化方式、雷达方位) 以及环境因素 (风速、风向, 以及波浪长度、高度和方向) 等。在这么多互相独立因素的影响下, 精确预测探测的效果是非常困难的, 特别是由于缺乏独立的水上同步数据, 验证工作更难以开展。针对这种情况, DECLMS 项目组织合作单位开展了 Benchmark 试验。结果表明: 在较为有利的情况下, 利用卫星 SAR 遥感数据可获得 > 97% 的探测率, 一般情况下探测率约在 85%—95% 之间, 在较为不利的条件下, 探测率可能下降到 70%—80%^[20]。

关于利用 SAR 遥感数据对船舶目标的分类和识别, DECLMS 项目的工作仍主要局限于对船舶目标大小的估算^[7, 36], 相关方法包括聚类分析和最小二乘回归^[37]、小波变换^[28]、基于 RCS 进行估算^[38]、基于扫描的方法^[39]、基于上下文信息和先验知识的方法等^[40]。Benchmark 试验表明, 在比较有利的情况下, 利用现有 SAR 卫星遥感数据可对尺寸大于 70 m 的船舶大小做出估计, 但在海况较为复杂时, 这也变得非常困难。拖尾效应常使得目标估计尺寸比实际尺寸偏大, 特别是对于较小的船舶尤其如此。第 2 次 Benchmark 试验表明, 利用 8 m 分辨率 Fine 模式 Radarsa 图像对船舶尺寸的估算效果, 稍好于 25 m 分辨率的 Standard 模式, 但总体来说利用各种

算法从 Radarsa 图像提取的船舶目标尺寸, 与目视解译尺寸、真实尺寸的相关性都不好^[36]。

DECLMS 项目对多模式、多极化 Envisat ASAR 数据的分析表明^[41], 对于小入射角模式, 交叉极化 (HV) 数据对目标探测的效果较好, 对于中等和较大入射角成像模式, 同极化 (HH) 数据对目标探测的效果较好。但这也不是绝对规律, 如对于 IS 和 IS 模式图像上的较大目标而言, 同极化和交叉极化探测效果差异较小。对于极化信息来讲, HV 极化可比 HH 极化更好地描述目标轮廓, 因此有助于分类。总的来说, Envisat ASAR 的多极化信息可互为补充, 为改善船舶探测效果提供了宝贵的数据源。但 DECLMS 的相关模拟研究表明^[42], 极化信息必须与足够高的空间分辨率结合才能达到预期效果, 而现有 SAR 遥感数据的空间分辨率使得船舶的全极化信号存在很大变异, 因此到目前为止, DECLMS 项目没有任何实用系统可以提供船舶目标的类型信息, 而且近期也不会具备这种能力。

通过 MPASI 和 DECLMS 项目的执行, 明确了现阶段利用 SAR 遥感数据进行船舶探测所面临的主要问题, 包括地理校正和陆地隔离误差、方位向模糊、旁瓣效应、多目标问题、方位向拖尾效应、复杂海洋环境下船舶目标的检测等^[36, 43]。

3.3 对新型 SAR 系统的技术指标需求

由此可见, 现阶段欧盟范围内 SAR 遥感数据仍主要用于船舶目标的检测, 与船舶目标分类与识别相关的研究主要集中于船舶目标尺寸的估算, 但效果仍不理想。在欧盟范围内, VMS AIS 或岸基雷达数据等常规水上监测手段, 是遥感技术用于船舶探测的有益补充, 并且为遥感方法验证提供了宝贵数据源。尽管不同系统之间存在偏差, 但 DECLMS 项目通过对第 2 次 Benchmark 试验数据的分析表明, 若将遥感图像所检测到目标的位置与实际位置的误差范围放宽到 2 km, VMS 记录到的 90% 以上的船舶目标可以利用遥感图像检测得到^[36]。

对于海洋船舶遥感探测技术发展和运行系统建设而言, 基于 SAR 遥感数据的方法是非常有效的, 但目前来讲, 突破现有 SAR 传感器本身的限制仍是关键。为此, 在对研究成果汇总的基础上, DECLMS 项目向欧空局提交了 SAR 传感器应用需求草案, 给出了渔业监测应用中船舶遥感探测和分类对于 SAR 传感器的技术指标需求 (表 1), 并希望预计于 2008 年发射的 ESA Sentinel 卫星能够相应地有所改进^[7]。

表 1 渔业监测对于 SAR 系统的技术指标需求
Table 1 Technical requirements for SAR system
of fishery monitoring

	海洋		海岸	
	最低要求	目标	最低要求	目标
重访周期 / d	3	1	3	1
分辨率 / m	50	30	25	10
有效视数	3	5	3	5
幅宽 / km	300	400	100	150
入射角 / (°)	> 30	> 35	> 35	> 35
极化方式	HH	HH+HV	HH	HH+HV
精度 / m	300	150	150	50
时间延迟 / min	60	15	60	15

4 欧盟船舶遥感监测系统及其运行机制

MPASI和 DECLMS项目的实施不仅推动了技术的发展,而且大大促进了欧盟范围内船舶遥感监视系统的建设,目前在欧盟范围内已经形成了多家船舶遥感监视系统。

4.1 英国 QinetiQ的 MaST系统

英国的 QinetiQ开发了海洋监视工具 (Maritime Surveillance Tool MaST),该系统是在 MPASI计划下发展起来的,并且在 DECLMS项目执行过程中不断得到完善^[44]。MaST目前已经商业化,可提供船舶和溢油探测服务。MaST的数据处理流程是:利用 QinetiQ或其他地面站接收 SAR图像,经处理后输入 MaST系统进行自动分析,最后将分析结果通过电子通讯系统近实时地发送给用户。

MaST系统进行船舶目标探测时,首先利用海岸线数据库将陆地隔离;接下来是目标探测,利用 CFAR探测算法探测亮像元,然后利用聚类算法减小虚警。对于探测到的船舶目标, MaST自动提取其坐标、尺寸、亮度等信息,并提取每个目标的图像切片。MaST系统开发了图形用户界面,并且可以通过 Internet访问。

除对船舶目标监视外, MaST还提供海冰、波浪、溢油等信息,其输出结果还可以与其他辅助数据如 VMS常规巡逻数据、溢油定位数据及气象数据等融合,形成不同的产品。MaST下一步的发展方向是开

展其他海洋特征的探测和分析。

4.2 挪威 FF的 Eldhuset系统和 Kongsberg的 MeosView系统

在欧空局一系列项目的资助下^[45-46],挪威 NDRE(Norwegian Defence Research Establishment)的 FF开发了基于 SAR技术进行渔业监测的 Eldhuset系统^[47],目前该系统已达实用化水平,并且在不断发展中^[48-49]。

Eldhuset系统包括 5个模块。前两个模块分别是 SAR图像地理校正和陆地隔离;第 3个模块利用单元平均 CFAR探测算子探测船舶并利用船-海条件测试去除虚警;第 4个模块是尾迹探测和分析;最后一个模块综合分析船舶和尾迹探测结果,进一步剔除虚警。验证表明, Eldhuset系统利用 Seasat和 ERS数据对船舶监视可取得很好的效果^[47,50]。

挪威 Kongsberg开发了 MeosView系统^[44]。该系统主要基于 Radarsat和 Envisat ASAR图像,船舶探测模块建立在 NDRE所开发之船舶自动探测实用系统原型的基础上。为了同样适用于近岸水域, MeosView系统增加了陆地隔离步骤,然后探测船舶目标,接下来是在所探测到的船舶目标周围探测尾迹^[23]。此外, MeosView系统还具有溢油探测功能。

4.3 欧盟 JRC的 VDS系统

JRC与几家欧盟成员合作开发了 VDS(Vessel Detection System)系统^[51]。该系统将 SAR遥感数据作为 VMS信息的有效补充实现对渔业活动的监测。VDS系统的数据源是 Radarsat1和 Envisat ASAR数据,探测算法包括模板匹配和基于 K分布的 CFAR阈值探测算法,船舶目标分类主要包括船舶长度、宽度、航向提取。

JRC船舶探测系统利用的是 SUMO算子,该算子利用 Java开发,处理流程为:(1)陆地隔离,该过程最初手工完成,后改为利用 GSHHS(Global Self-consistent Hierarchical High-resolution Shoreline)数据库实现,为了减小误差,推荐预留一定的缓冲区;(2)将图像分成许多块,对每个子区利用模板匹配或 CFAR算法进行探测;(3)对所探测到的目标像元进行聚类,剔除虚警;(4)目标辨识。SUMO下一步的发展目标是开发最佳阈值参数自动选取方法、改善对目标的辨识/分类能力以及增强对 Envisat数据的处理能力。

VDS的具体运行情况如图 4所示^[52,53];商业运

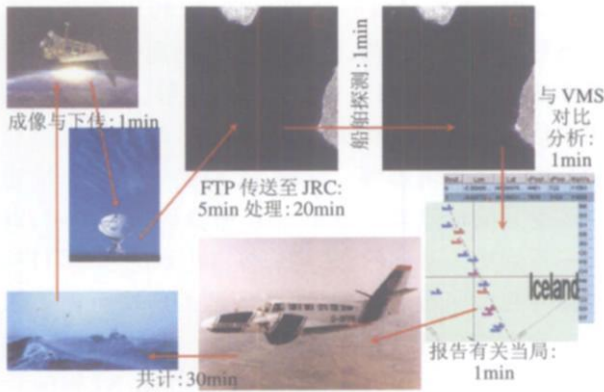


图 4 欧盟 VDS 系统示意图

Fig 4 Illustration of VDS in European Union

行的地面站将所接收和处理的 SAR 图像利用 FTP 传输到 JRC, 然后 JRC 利用 SUMO 算子进行船舶目标探测; 根据 VMS 所记录的船舶位置信息, 并考虑船舶最大航行速度与方向、VMS 报告与 SAR 图像接收时间差等设定不确定范围, 剔除那些合法目标; 将可疑目标和分析结果发送给相关机构以供决策, 整个过程约 30min, 这对于常规督察跟踪还是可以接受的。下一步, VDS 系统将考虑把 AIS (Automatic Identification System) 数据作为 VMS 的补充, 提高水面船舶位置信息记录的频率。

4.4 法国 Kerguelen 的 CLS 运行系统

法国南印度洋 Kerguelen 的 CLS (Collecte Localisation Satellites) 系统, 最初于 1986 年启动, 主要为法国渔业当局服务。该系统综合利用 SAR 和 VMS 数据识别非法目标, 以使巡逻船能更高效、及时地截获它们。

CLS 系统为渔船配备的 VMS 采集设备是 MAR-GI 发射机, 一旦安装后可连续向 Argos 卫星发送信号; 此外, 在 Kerguelen 岛更新和配置了 DSAT 公司生产的便携式 SENTRY 地面站, 可自动获取、处理、分析 Radarsat 1 和 Envisat 卫星 SAR 数据。CLS 的具体运行情况是^[54]: 每天接收 Radarsat 和 Envisat 过境数据; 对 Radarsat 数据利用 OMW 算子、Envisat ASAR 数据利用 KSPT 算子进行自动处理和分析, 然后将结果以 JPEG 图像的形式发送至图卢兹; 在图卢兹对这些图片进行目视解译, 然后将可疑目标报告至留尼旺岛的 FMG; 在留尼旺岛将其与 Argos 所记录船舶位置进行比较, 锁定非法目标并指导巡逻船的行动。CLS 系统每天可以自动生成 4 次船舶报告, 每次报告都在卫星过境后的 2 个小时之

内完成。CLS 系统的运行情况如图 5 所示。

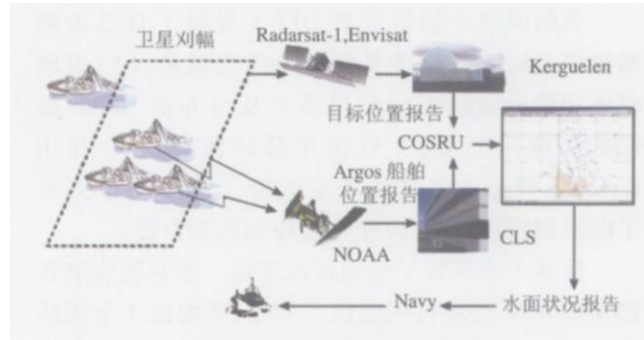


图 5 CLS 系统运行概况

Fig 5 System overview of CLS

CLS 系统自 2004 年 1 月开始连续运行, 一年费用约 100 万欧元, 对 2004 年 3 月到 2005 年 3 月的统计结果分析表明, 该系统确实可以有效地打击非法渔业活动^[55]。CLS 下一步的工作目标是更好地改进可视化效果, 开展目标探测和分类、风和波浪数据的提取、极化数据和 Radarsat 2 数据的应用研究等。

4.5 法国 BOOST 船舶探测系统

法国的 BOOST 公司主要致力于海洋环境监测, 开展了一系列基于 SAR 遥感数据的海洋应用研究, 包括海洋溢油污染探测、船舶探测、船舶交通管理、风波浪洋流测量、海岸线勾绘等^[56]。BOOST 将 AIS 数据作为辅助信息, 进行溢油和船舶目标探测。

BOOST 利用 SAR 图像进行船舶探测的步骤包括: (1) 陆地隔离; (2) 根据 SAR 产品类型采用合适的 CFAR 算法进行目标探测; (3) 根据到海岸线的距离调整探测结果; (4) 通过对复数产品的分析剔除虚影目标。BOOST 强调探测结果的可靠性, 因此仅利用高分辨率产品进行船舶目标大小的估算, 并对后向散射系数较低的目标特别标记。BOOST 利用局部扫描法自动探测算法或基于 IDL 开发的 SARTOO 软件包, 手工探测尾迹并进而估算速度。BOOST 船舶探测系统分析一景 PR 图像大约需要 10—15min, 分析一景 SLC 图像所需时间一般大于 25min。BOOST 认为现阶段利用 SAR 数据进行船舶目标探测存在的问题包括: (1) 地理定位误差; (2) 图像定标误差; (3) 方位向模糊等。BOOST 下一步的工作是利用 SAR 遥感数据进行海洋表面洋流测量。

除以上介绍的在 MPAST 和 DECLMS 项目内部所发展的船舶遥感监视系统外, 在欧盟范围内还

建立了一些其他的船舶遥感探测系统:

英国国防评估研究署 DERA 发展了自己的船舶探测系统^[49-57]。该系统的处理流程是: (1) 地理校正和陆地隔离; (2) 利用基于 K 分布的 CFAR 探测算法探测船舶, 并且使用移动窗口; (3) 利用 Kohonen 神经网络算法减小虚警^[57]。该系统开发了图形用户界面, 可以指定图像和探测参数。

罗马大学开发了船舶探测系统。该系统安装在 ESA-ESRIN 处理快视图像^[58-62]。系统由 4 个模块组成: 陆地隔离、船舶探测、尾迹探测以及船舶分类和结果显示。前 2 个模块应用于整幅图像, 而后 2 个模块根据操作者需要应用于特定目标。该系统探测算子主要基于单元平均 CFAR 探测算法并进行修改, 以适应海面散射变化剧烈的情况。系统根据船舶和尾迹探测结果估算船舶速度, 但对船舶分类较为粗糙, 仅利用了船舶尺寸和速度。验证表明, 该系统性能良好。未来研究方向包括: (1) 将上下文分析与 CFAR 探测相结合, 改善探测算法; (2) 改进尾迹探测和分析模块; (3) 开发基于分割的方法, 根据像元散射特征划分出不同区域, 对不同区域应用不同的探测算子。

意大利 Alenia Aerospazio 公司建立了自己的船舶探测系统^[63-65], 系统目标是探测运动船舶, 其基本步骤是: (1) Speckles 滤波、海岸线探测、陆地隔离等; (2) 利用单元平均 CFAR 算子或有序统计量 CFAR 算子探测船舶目标像元; (3) 对船舶像元目标进行聚类, 并计算其长度和宽度; (4) 将探测结果传递到尾迹探测模块, 利用 Hough 变换进行尾迹探测, 并且抛弃探测不到尾迹的目标; (5) 对船舶航向和速度进行估算。目前该系统缺少足够的验证。

5 总结与建议

利用遥感数据进行船舶目标探测在军事和民用领域都有着巨大的现实意义。在欧盟, 受渔业活动监测的推动, 近年来在船舶遥感探测方面取得了卓有成效的成果。特别是 MPASI 和 DECLMS 项目的开展, 集中了欧盟内外的多家研究力量, 发展和改进了船舶遥感探测、分类和识别方法, 指出了现阶段存在的共同问题, 并对未来 SAR 系统的技术指标给出了具体建议。在此基础上, 欧盟范围已建立了多个船舶遥感监视系统, 这些系统可同时监视船舶目标和海洋环境, 在与 VMS 和 AIS 等辅助数据的配合下, 可有效用于渔业活动监测。

同时, 欧盟的研究结果也指出, 利用现有 SAR 遥感数据对船舶探测、识别和分类仍面临一些比较基本的问题, 如对尾迹的探测能力不够, 因此谈不上用来估算船舶航速和航向; 利用现有 SAR 数据对船舶分类仍较为困难等。此外, 实用船舶探测系统建设还受到陆地隔离误差和 SAR 图像伪影的影响, 以及一系列更为基础的, 尤其是与雷达系统、运动目标成像等相关问题的影响, 这些问题的解决可能要依赖于新方法、新数据源的出现及进一步深入地研究。相信随着 Radarsat2(加拿大), TerraSAR X(德国), Cosmo Skymed(意大利)等卫星的发射和运行, 船舶探测将拥有更为丰富和有效的数据源, 必将推动船舶遥感探测技术在各个相关领域的应用。

中国通过与欧盟的合作, 掌握和发展了一系列船舶遥感探测方法和技术, 为下一步利用遥感技术服务于中国渔业监测建立了技术储备。从欧盟渔业活动遥感监测的现状可以看出, VMS 和 AIS 等辅助数据仍是非法渔业活动监测必不可少的组成部分, 而对于中国大部分水域来讲, VMS 和 AIS 等基础设施建设还相对薄弱, 因此一方面需要加强新型遥感器的应用, 另一方面应将水上常规监测系统建设与遥感技术发展同时并举, 将两者有机结合实现对非法渔业活动的监测。目前, 作者正在开展与上海海事局的合作, 利用长江口的 AIS 系统进行船舶遥感探测、分类和识别方法的研究与验证。

参 考 文 献 (References)

- [1] Cheng J S, Zhu M H. Survey of the Study on Ship and Wake Detection in SAR Imagery [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(9): 1356-1360. [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.]
- [2] Lemoine G G, Greidanus H, Shepherd I M, et al. Developments in Satellite Fisheries Monitoring and Control [A]. The 8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environment [C]. Halifax, Canada, 2005.
- [3] Greidanus H. Assessing the Operationality of Ship Detection from Space [A]. EURSY Symposium New Space Services for Maritime Users: The Impact of Satellite Technology on Maritime Legislation [C]. Paris, France, 2005.
- [4] Lemoine G, Chesworth J, Schwarz Juste G, et al. Near Real Time Vessel Detection Using Spaceborne SAR Imagery in Support of Fisheries Monitoring and Control Operations [A]. IGARSS 2004 [C]. Alaska, America, 2004.
- [5] Kouri N, Shepherd I, Schwarz G. Integrating Spaceborne SAR Imagery into Operational Systems for Fisheries Monitoring [J]. Canadian Journal Remote Sensing, 2002, 27(4): 291-305.

- [6] Wagner M J. From Ships to Shores to Satellite Images [J]. *Sea Technology* 2003 44(3): 38—41.
- [7] Greidanus H, Kourti N. DECLMSWPS Status and Plans [R]. The Fifth Meeting of the DECLMS Project. Famborough, UK, 2005.
- [8] Marie F. Automatic Vessel Detection System on SPOT-5 Optical Imagery: A NeuroGenetic Approach [R]. The Fourth Meeting of the DECLMS Project. Toulouse, France, 2004.
- [9] Heynen M. Coastal Mapping & Ship Detection from VHR Satellite Imagery [R]. The Fifth Meeting of the DECLMS Project. Famborough, UK, 2005.
- [10] Olivier Pronjez. Optical Data for Ship Detection [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [11] Zhang Y, Zhang Y G, Huang W G. The Technology Researching for Ship and Ship Wake Detection Using Spaceborne SAR Images [J]. *Remote Sensing Technology and Application* 2003, 18(1): 31—35 [张宇, 张永刚, 黄伟良. 星载 SAR 船舶及尾迹探测技术研究 [J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(1): 31—35]
- [12] Tonje A N, Richard O B. Literature Review on Vessel Detection [R]. The Fourth Meeting of the DECLMS Project. Toulouse, France, 2004.
- [13] Eldhuset K. An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Spaceborne SAR Images in Coastal Regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1996 34(4): 1010—1019.
- [14] Vachon P W, Campbell J W M, Bjerke Lund C A, et al. Ship Detection by the Radarsat SAR: Validation of Detection Model Predictions [J]. *Canadian Journal Remote Sensing* 1997, 23: 48—59.
- [15] Vachon P W, Thomas S J, Cranon 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.
- [16] Friedman K S, Wackeman C, Funk F, et al. Validation of an Automatic Vessel Detection Algorithm Using SAR Data and Known Vessel Fleet Distributions [J]. *IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]*, 2000 5: 2071—2073.
- [17] Montgomery D R. International Fisheries Enforcement Management Using Wide Swath SAR [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest* 2000 21(1): 141—147.
- [18] Wackeman C, Friedman K S, Pichel W G, et al. Automatic Detection of Ships in Radarsat SAR Imagery [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing* 2001, 27: 568—577.
- [19] Funk F C, Byrne L C, Pichel W. Satellite Radar Applications to Alaskan Crab Fisheries [J]. *Crab 2001: Crabs in Cold Water Regions* 19th Lowell Wakefield Symposium [C], America, 2001.
- [20] Greidanus H, Clayton P, Indregard M. Benchmarking Operational SAR Ship Detection [A]. *GARSS 2004 [C]*. Alaska, America, 2004.
- [21] Greidanus H, Kourti N. State of the Art Vessel Detection in SAR Imagery [A]. 2nd Workshop Marine SAR [C]. Svalbard, 2003.
- [22] Hou S G, Zhang H, Wang C, et al. A Novel Method for Ship Detection in SAR Images [J]. *Journal of Remote Sensing* 2005 9(1): 50—56 [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—56]
- [23] Boost Technologies. Ship Detection Using SAR Imagery [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [24] Arthur Smith. Ship Detection with Envisat's Alternating Polarisation Mode [R]. The Fourth Meeting of the DECLMS Project. Toulouse, France, 2004.
- [25] Chris Wackeman. GD-AIS Ship Detection Progress [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [26] Ham Greidanus. Developments in Detection Algorithms at JRC [R]. The Third Meeting of the DECLMS Project. Vancouver, BC, 2004.
- [27] Marim Tello, Carlos Lopez Martinez, Jordi J Mallorqui. 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.
- [28] Marim Tello, Carlos Lopez Martinez, Jordi J Mallorqui. Wavelet Ship Detection and Classification by Means of Multiscale Time-Frequency Techniques [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [29] Ichihara M, Kouchi I, Takami, et al. Detection of Ships Using Cross-Correlation of Split-Look SAR Images [A]. *IEEE Trans on Geosc and Rem Sens Symp (GARSS 01) [C]*, 2001 4: 1807—1809.
- [30] DECLMS Consortium. DECLMS State of the Art and User Needs [R]. November, 2005.
- [31] Ham Greidanus. DECLMS Annual Report Year 2 [R]. August, 2005.
- [32] Ham Greidanus, Elena Aresi. Sub-aperture Analysis for Ship Detection [R]. The Fourth Meeting of the DECLMS Project. Toulouse, France, 2005.
- [33] Hennings J, Romeiser R, Alpers W. Radar Imaging of Kelvin Arms of Ship Wakes [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1999, 20(13): 2519—2543.
- [34] Copeland A C. Localized Radon Transform-based Detection of Ship Wakes in SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1995 33(1): 35—45.
- [35] Tunalety J K E. Status of Ship Wake Modeling for Radar Imagery [R]. The Fifth Meeting of the DECLMS Project. Famborough, UK, 2005.
- [36] Greidanus H. SAR Classification Benchmark BMK2 [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [37] François Xavier Thorens, Ham Greidanus. Extraction of Target Parameters from SAR Images [R]. The Fifth Meeting of the DECLMS Project. Famborough, UK, 2005.
- [38] Tonje Nanette Amesen. FFI BMK2 Results [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [39] Kongsberg. BMK2 Result of KSAT [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.

- [40] Gordon Staples. Ship Classification with Radarsat-1 Data [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [41] Tonje A N. Ship Detection Using SAR Data from Civilian Radar Satellites [R]. The Fifth Meeting of the DECLMS Project. Farnborough, UK, 2005.
- [42] Gerard Margarit, Jordi Mallorqui, Juan M Ruiz, et al. Vessel Modeling and SAR Response Simulation: Application to Vessel Classification [R]. The Sixth Meeting of the DECLMS Project. Ispra, Italy, 2006.
- [43] Ham Greidanus. First SAR Detection Benchmark [R]. The Third Meeting of the DECLMS Project. Vancouver, BC, 2004.
- [44] Greidanus H. Findings of the DECLMS Project: Detection and Classification of Marine Traffic from Space [A]. SEASAR 2006 [C]. Italy, 2006.
- [45] Wahl T, Eldhuset K, Aksnes K. SAR Detection of Ships and Ship Wakes [A]. The SAR Applications Workshop [C]. Frascati, Italy, 1986.
- [46] Wahl T, Eldhuset K, Skjerve K. Ship Traffic Monitoring using the ERS-1 SAR [A]. First ERS-1 Symposium. Space at the Service of our Environment. Cannes [C]. France, 1993.
- [47] Eldhuset K. An Automated Ship and Ship Wake Detection System for Spaceborne SAR Images in Coastal Regions [J]. IEEE Trans Geosci & Remote Sensing, 1996, 34: 1010—1019.
- [48] Olsen R B, Wahl T. The Role of Wide Swath SAR in High-latitude Coastal Management [J]. Johns Hopkins APL Technical Digest, 2000, 21(1): 136—140.
- [49] Vachon P W, Olsen R B. Ship Detection with Satellite-based Sensors: A Summary of Workshop Presentations [R]. Backscatter, 2000.
- [50] Olsen R B, Wahl T. The Ship Detection Capability of ENVISAT's ASAR [A]. IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Toulouse, France, 2003.
- [51] Greidanus H, Lemoine G, Kourti N. Satellite Ship Detection for Fishery Control [A]. NURC International Symposium Remote Sensing Applications to support NATO Expeditionary Operations. Lericq [C]. Italy, 2005.
- [52] Lemoine G G, Schwartz Juste G, Kourti N, et al. An Open Source Framework for Integration of Vessel Positions Detected in Spaceborne SAR Imagery in Operational Fisheries Monitoring and Control [A]. Proc of ENVISAT/ERS Symposium [C]. Salzburg, Austria, 2004.
- [53] Lemoine G G. Vessel Detection System: a Blueprint for an Operational System [R]. Technical Note J 05 14. European Commission Joint Research Centre, 2005.
- [54] Marcell, Jean-Pierre C. Update on Kerguelen Station Operations [R]. The Fourth Meeting of the DECLMS Project. Toulouse, France, 2005.
- [55] Marcell, Philippe S. Operational Use of Ship Detection to Combat Illegal Fishing in the Southern Indian Ocean [A]. The Eighth International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments [C]. Halifax, Canada, 2005.
- [56] Vincent K, Guillaume H. Surveillance of Coastal and Marine Offshore Areas using Satellite Imagery [R]. The Fifth Meeting of the DECLMS Project. Farnborough, UK, 2005.
- [57] Robertson N, Bird P, Brownsword C. Ship Surveillance Using RADARSAT ScanSAR Images [R]. In Alliance for Marine Remote Sensing (AMRS) Workshop on Ship Detection in Coastal Waters, 2000.
- [58] Cusano M, Lichtenegger J, Lombardo P, et al. A Real Time Operational Scheme for Ship Traffic Monitoring using Quick Look ERS SAR Images [A]. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. 2000, 7: 2918—2920.
- [59] Lombardo P, Scioti M. Segmentation-based Technique for Ship Detection in SAR Images [A]. IEEE Proceedings: Radar, Sonar & Navigation [C]. 2001, 148(3): 147—159.
- [60] Scioti M, Lombardo P. Ship Detection in SAR Images: a Segmentation-based Approach [A]. Proceedings of the 2001 IEEE Radar Conference [C], 2001.
- [61] Scioti M, Lombardo P. Polarimetric Detectors of Extended Targets for Ship Detection in SAR Images [A]. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. 2001, 7: 3132—3134.
- [62] Scioti M, Pastina D, Lombardo P. Exploiting the Polarimetric Information for the Detection of Ship Targets in Non-homogeneous SAR Images [A]. IEEE 2002 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. 2002, 3: 1911—1913.
- [63] Ferrara M N, Gallon A, Torrici A. Improvement in Automatic Detection and Recognition of Moving Targets in ALENIA Aerospazio Activity [A]. Proceedings of SPIE EUROPIO Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing [C]. 1998, 3500: 96—103.
- [64] Ferrara M N, Torrici A. Automatic Moving Targets Detection using a Rule-based System: Comparison between Different Study Cases [A]. IEEE 1998 International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. 1998, 3: 1593—1595.
- [65] Ferrara M N, Torrici A. ALENIA Aerospazio Activity on SAR Data Analysis and Information Extraction [A]. Proceedings of SPIE [C]. 1997, 3217: 65—75.