

# SAR 图像舰船及其尾迹检测研究综述

种劲松,朱敏慧

(微波成像技术国家重点实验室,中国科学院电子学研究所,北京 100080)

**摘要:** 近年来,利用合成孔径雷达(SAR)图像进行舰船检测的研究在海洋遥感领域得到高度重视.本文回顾了 SAR 图像舰船及其尾迹检测的起源与发展,分析了影响舰船和尾迹的物理因素,分别对舰船检测算法和尾迹检测算法进行综述、总结和对比,并对今后的研究发展方向进行展望.

**关键词:** 合成孔径雷达;目标检测;自动目标识别

**中图分类号:** TN975 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 09-1356-05

## Survey of the Study on Ship and Wake Detection in SAR Imagery

CHONG Jin-song, ZHU Min-hui

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In recent years, researches of ship detection using synthetic aperture radar (SAR) images have received considerable attentions in the area of marine remote sensing. The origin and development of ship detection in SAR imagery is reviewed. The physical factors that would affect ship and wake are analyzed. The ship detection algorithms and wake detection algorithms are reviewed, summarized and contrasted respectively. The future direction of research and development is viewed.

**Key words:** synthetic aperture radar; target detection; automatic target recognition

### 1 引言

舰船检测与监视是世界各海岸地带国家的传统任务,在民用及公安部门有广泛的应用,例如:舰船的寻找和救助、捕渔船监视、非法移民、保卫领土、反毒品、舰船非法倾倒油污的监视等等.

合成孔径雷达(SAR)具有全天时和全天候的观测能力,能够宏观、长期、动态、实时地对陆地和海洋进行观测.近年来,利用 SAR 图像进行舰船检测的研究和技术开发在海洋遥感领域得到高度重视,成为 SAR 数据最重要的海洋应用之一.

在 SAR 图像上可以观测到舰船的船体及其尾迹二种形式.舰船主要由金属制成,其上层建筑构成许多角反射器,使得舰船成为极强的雷达反射器,在 SAR 图像上形成非常亮的目标.1978年在 SEASAT 的 SAR 图像上,人们第一次发现海洋表面延伸 20 公里长的舰船尾迹<sup>[1]</sup>,自此,科学家们逐渐对 SAR 图像舰船尾迹表示关注并进行研究.

利用 SAR 图像检测舰船及其尾迹,是在不同气象条件下监视舰船的自动化手段.目前国际上已经发展了众多的星载 SAR、机载 SAR,获得了越来越多的 SAR 图像数据.当海量的 SAR 图像用于舰船及其尾迹检测时,需要开展自动检测算法方面的研究.

### 2 起源与发展

世界各国对于利用 SAR 进行舰船目标及其尾迹检测都十分重视.1986年挪威国防研究院(NDRE)的科学家与欧空局(ESA)签订合同<sup>[2]</sup>,开展了名为“舰船和舰船尾迹 SAR 检测”的研究项目,当时使用 SEASAT 图像进行研究;1986年在 F-GARSS 86会议上,美国科学家 Lyden 发表 SAR 图像舰船尾迹类别和产生机理的研究论文<sup>[3]</sup>;英国科学家 Murphy 在“模式识别快报”中发表文章来研究 SAR 图像尾迹检测<sup>[4]</sup>.

1988年在 IGARSS 88会议上,挪威科学家 Eldhuset 发表利用 SAR 图像进行舰船及其尾迹检测的方法研究<sup>[5]</sup>,挪威科学家 Skoelv 等人发表舰船尾迹成像的模拟研究<sup>[2]</sup>,英国科学家 Hendry 等人<sup>[6]</sup>在“SAR 图像自动线性检测”文章中也进行了 SEASAT 的拖网渔船船队的尾迹检测.

此后的 IGARSS 89会议上出现了 6 篇关于 SAR 图像舰船及其尾迹的研究文章,其中有 4 篇是加拿大科学家的文章.目前,已有大量有关文章发表在期刊及会议上,除美国、挪威、加拿大外,已经开展此项工作的其他国家有英国、意大利、新加坡等.

2000年5月30日到6月1日,在加拿大新斯科舍省 Digby 城,由海洋遥感联盟(AMRS)召集,专门召开了世界上第一次关于海岸水域舰船检测的专题讨论会“Ship Detection in Coastal

Waters Workshop 2000”,来自加拿大、美国、意大利、英国、挪威等国家的科学家发表了约 30 篇文章,讨论了各种检测舰船的传感器(包括 SAR、高频表面波雷达、声学方法、光学传感器)、检测平台和检测算法。从此次专题讨论会中选出 10 篇文章,出版于加拿大遥感杂志 2001 年第四期(海岸水域的舰船检测特刊),其中有 4 篇涉及到利用 SAR 进行检测。由此可见,世界各国对于舰船检测问题的重视。

近年来,在加拿大遥感中心(CCRS)、渔业和海洋部(DFO)、加拿大海岸警卫队(CCG)、国防部(DFD)和加拿大空间局(CSA)的经费和技术支持下,在海洋学者、计算机科学家和图像分析员共同努力下,加拿大 Satlantic 公司成功地开发了 RADARSAT 海洋监视工作站(Ocean Monitoring Workstation,简称 OMW)<sup>[7]</sup>,包括舰船检测模块、油膜检测模块、海洋波谱模块、海洋风模块、海况分析模块。OMW 目前已经成为商用软件。

### 3 舰船及其尾迹检测的实地实验研究

由于经常缺少海洋和舰船的地面真实数据,SAR 在海洋环境及舰船检测方面的应用受到局限<sup>[8]</sup>。利用 SAR 图像进行舰船检测和海洋特征研究时,很少有三只以上的舰船或三个浮标是有地面真实数据的,这主要是由于海洋范围很大,要求在 SAR 图像海洋区域上有足够的地面真实数据采样是十分困难的,并且花费昂贵。根据现有文献,进行实地实验的国家有挪威、英国/美国、加拿大。

#### 3.1 挪威 NORCSEX 88 实验

为了将舰船检测软件应用于当时尚未发射的 ERS-1 卫星,1988 年 3 月在挪威海岸 Haltenbanken 进行了 NORCSEX 88 的实验<sup>[9]</sup>,由加拿大机载 CV580 的 C 波段 SAR 提供数据。实验的目的为:(1)研究典型渔船及尾迹的 SAR 成像(2)研究舰船及尾迹的 C 波段后向散射变化(3)得到尾迹的资料记录,用于与仿真的模型相比较。

#### 3.2 英国/美国联合 Linnhe 实验

1989 年在苏格兰的 Linnhe 湖上,英国/美国联合进行实验<sup>[10,11]</sup>,由 JEL 实验室的 NASA/JEL DC-8 机载多频(P 波段、L 波段、C 波段) SAR 同时对舰船内波尾迹进行观测,得到不同的尾迹张角,他们将实验和理论研究结合,验证内波尾迹理论的适用性。

#### 3.3 加拿大 MARCOT 98 实验

1998 年 6 月,加拿大国防部(DND)在加拿大东海岸进行了 MARCOT '98 (Maritime Combined Operational Training)实时演习和 NATO Unified Spirit 海军训练<sup>[12]</sup>,目的是对 OMW 进行评估。演习包括了 15000 名人员和 10 个国家的 40 艘战舰,演习中使用 OMW 处理分析了近 30 幅各种波束模式的 RADARSAT 卫星 SAR 图像。实验联合使用了侦察机、船载 GPS、加拿大海岸警卫(CCG)的舰船交通服务雷达(VTS)和自动识别系统(AIS)来辅助给出舰船实际位置。除 RADARSAT 图像数据外,还获得了一系列的海况数据。演习的输出为舰船位置信息的 NATO 标准报告,这个报告可以直接输入到海军海事监测数据库。

## 4 舰船目标检测

### 4.1 影响舰船目标检测的因素

影响舰船检测能力的物理因素有舰船因素、SAR 系统因素和海洋因素<sup>[13,14]</sup>。舰船本身因素包括舰船的结构、形状、尺寸等;SAR 系统因素包括极化方式、入射角和雷达波束与舰船之间的夹角等;海洋因素指总体海况,当海风增大时,海洋表面的后向散射增加,舰船与海洋表面回波的亮度对比减小。

图 1 是入射角对舰船目标反射回波影响的示意图,图 1(a)比图 1(b)的入射角小,从图中可见入射角越大,SAR 接收到的舰船反射回波越强。

入射角相同情况下,海况对反射回波影响的示意图参见图 2。图 2(a)对应的海面比较平静,图 2(b)对应的海面风浪较大。从图中可见,当海面比较平静时,海面回波信号比较弱,此时背景很暗;而海风比较强烈的情况下,海面回波信号较强,此时背景偏亮;另一方面,海风强烈的情况下,SAR 接收到的舰船反射回波较弱,从而舰船与海面背景的对亮度降低。

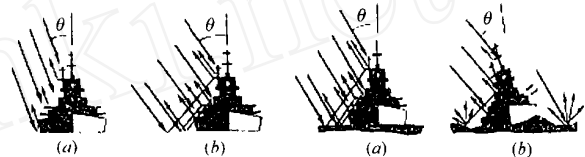


图 1 入射角对反射回波的影响 图 2 海况对反射回波的影响

不同的 SAR 系统,极化方式、入射角各不相同,对于舰船目标观测能力不同。图 3 给出了不同 SAR 系统之间最小检测船长能力的比较<sup>[13]</sup>,其中 ERS-1 的检测能力最差,RADARSAT 的 S1、S3 和 S7 模式中,S7 模式的检测能力较好,检测能力最好的是机载 Convair SAR。从图 3 中还可以看出,随着海面风速的提高,SAR 系统的舰船检测能力明显下降。

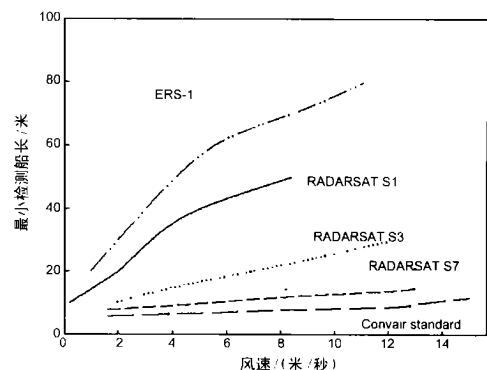


图 3 不同 SAR 系统最小检测船长之间的比较

SAR 系统不同,对于舰船目标的检测能力有所不同,同一 SAR 卫星,其观测模式不同,舰船目标的检测能力也不相同。Vachon 等人<sup>[7]</sup>对 RADARSAT 不同模式的图像进行验证实验,指出:最不适合检测舰船的模式有 S1-3, W1, W2,舰船检测比率为 77%;当既要求有宽覆盖区域,又要求有高的舰船检测能力时,可以使用 SCANSAR Narrow Far 模式,舰船检测比率为 81%;舰船检测的推荐模式是大入射角的单波束模式,如: W3, S4-S7, F1-F5, EH1-EH6,舰船检测比率为 97%。

## 4.2 舰船目标检测算法

SAR 海洋图像的背景为广阔的海面,舰船目标多为运动目标,运动舰船淹没在随机变化的海杂波之中.由于海况变化复杂,舰船与海面背景的对比如也随其变化,因此不能简单地使用常数阈值来检测,需要具有自适应能力的检测算法,同时保持恒定的虚警率(CFAR).

在舰船检测方面的研究很多,本文将它们归纳为四类:双参数 CFAR 算法、基于  $K$  分布的 CFAR 算法、多极化检测算法、其他检测算法.

### 4.2.1 双参数 CFAR 方法

双参数 CFAR 方法是经典的目标检测算法,它基于背景杂波是高斯分布的假设,使用三个滑动窗口:目标窗口、保护窗口、背景窗口,此算法数学模型简单.

挪威 Eldhuset<sup>[5,14]</sup>最早对于 ERS-1 图像使用此方法;美国 Cassent 等人<sup>[15]</sup>使用此方法对于 50 米分辨率的 SIR-C 数据进行舰船检测;美国 Wakeman 等人<sup>[16]</sup>使用此方法对 50 米和 100 米分辨率的 RADARSAT ScanSAR 图像进行舰船检测.

### 4.2.2 基于 $K$ 分布 CFAR 方法

近年来提出的  $K$  分布模型由于提供了精确的海洋杂波描述而被广泛接受.此方法首先估计出背景  $K$  分布模型中的参数,然后根据给定的虚警概率,通过求解虚警概率方程来求出检测阈值.

加拿大 Vachon 等人<sup>[13]</sup>使用此方法作为 RADARSAT 舰船检测算法;加拿大的商用软件 OMW<sup>[7]</sup>使用此方法进行舰船目标检测;加拿大 Jiang 等人<sup>[17]</sup>也使用此算法检测 RADARSAT 图像.

### 4.2.3 多极化检测算法

多极化信息可以用于目标检测,由于目前获取舰船多极化图像的限制,多极化检测算法尚处于研究过程中.

加拿大 Touzi<sup>[18,19]</sup>对机载 Convair-580 的 SAR 数据利用多极化特性进行舰船检测;英国 Ringrose 等人<sup>[20]</sup>使用 SIR-C 图像利用多极化特性进行舰船检测.

### 4.2.4 其他方法

新加坡 Lin<sup>[21]</sup>在检测 ERS 图像时采用简单阈值法,对于 8 位图像,简单地设定阈值为 250,即像素值大于 250 的即认为是船目标;意大利 Argenti 等人<sup>[22]</sup>和 Luciano Alparone 等人<sup>[23]</sup>均使用模糊决策对 SEASAT 图像进行舰船检测;意大利 Lombardo 等人<sup>[24]</sup>对于 ERS 快视图像和 SIR-C/X-SAR 单视图像采用基于分割的模拟退火算法进行检测.

对于上述归类的这些算法,通过归纳分析可以得出如下结论:双参数 CFAR 算法的应用集中于分辨率较低的 SAR 图像; $K$  分布 CFAR 算法的应用集中于 RADARSAT 图像;多极化检测算法只能应用于具有同时多极化观测的 SAR 图像;其他算法中:简单阈值法和模糊决策法都不具备自适应(即检测域值的选择自适应于不同图像海洋背景的变化)能力,而基于分割的模拟退火算法适用性有限.

## 5 尾迹检测

### 5.1 尾迹检测的作用

当舰船在 SAR 图像上存在尾迹时,进行尾迹检测有以下

几个作用.

(1)对于小船或海况系数高时有助于舰船目标检测

大尺度观测时,如果舰船很小,在 SAR 图像上很难分辨,或者海况系数高时,舰船可能淹没在海洋背景杂波中.而舰船尾迹的尺度比舰船本身大得多,在图像上容易辨别.

(2)有助于估计运动舰船的实际位置、航速和航向

对于 SAR 图像,运动舰船在图像上与真实位置有方位向的偏移.舰船运动时,其尾迹提供了舰船的实际位置,即在尾迹的尖端.根据舰船在方位向的偏移量可以计算出舰船的航速,同时根据尾迹可以判断出舰船航向.

另一方面,有些科学家们认为不需要检测尾迹.1988 年挪威 Eldhuset<sup>[5]</sup>认为检测舰船比检测尾迹更重要,他的理由是:(1)尾迹由舰船产生,所有观测到的尾迹均与舰船同时存在;(2)在不同的风速、海况、入射角情况下,舰船目标均比尾迹目标稳定;(3)有些舰船不存在尾迹,如正在捕鱼的渔船;(4)舰船检测简单有效,尾迹检测比较费时.

1996 年 Eldhuset<sup>[14]</sup>经过统计得出:(1)对于 ERS-1 和 SEASAT:37%的舰船没有尾迹;(2)对于 RADARSAT:由于其大入射角,这个数字还要大;(3)对于 JERS-1:由于大入射角和较长的波长,根本看不到尾迹.据此统计数据,加拿大 Vachon 认为<sup>[13]</sup>:对于 RADARSAT 卫星,关键是舰船目标检测,而不是尾迹线性目标检测.

由于舰船检测和尾迹检测各有优势,因此本文认为,对此一定要根据 SAR 图像来进行决定:存在尾迹的图像,可以进行尾迹检测,如 SEASAT 和 ERS 卫星图像;尾迹特征在大多数图像上不存在时,不需要尾迹检测步骤,如 JERS 卫星图像;对于 RADARSAT 卫星图像,需要根据观测模式决定是否进行尾迹检测.我们注意到加拿大的海洋监视工作站 OMW 软件上不进行尾迹检测.

### 5.2 影响舰船尾迹的因素

与影响舰船目标检测能力的因素相类似,舰船尾迹的产生也与三个方面因素有关:舰船因素、SAR 系统因素、海洋因素.

Hennings 等人<sup>[25]</sup>开展了舰船尾迹的研究工作,发现影响舰船尾迹雷达特征的舰船因素包括船体类型、发动机系统和船速等.目前尚没有文献对于舰船因素具体如何影响尾迹的问题进行解释.

不同的 SAR 系统,由于波段、极化方式、观测模式的各不相同,对于海面背景的观测能力不同,对尾迹的观测能力也不同. Eldhuset 指出舰船尾迹在某些卫星的 SAR 图像上不存在(如 JERS-1)<sup>[14]</sup>. Stapleton<sup>[10]</sup>在英/美联合 Linnhe 机载实验中发现,在不同波段的 SAR 图像上,船体的图像没有什么分别,但尾迹的图像是有区别的.在其实验中,渔船的尾迹在 P 波段和 L 波段的图像上显示出不同的张角,并且在 C 波段的图像上没有尾迹.

与影响舰船检测能力的海况因素不同的是,除海况因素外,海洋环境(如层化条件等)对尾迹观测的影响也很大<sup>[25]</sup>.

### 5.3 SAR 图像上舰船尾迹类型

Copeland 总结出 SAR 图像上运动舰船存在四种尾迹表现形式<sup>[26]</sup>:

(1) 经典的开尔文 (Kelvin) 尾迹: 由尖波、发散波、横波组成, 半张角 19.5 度。

(2) 湍流尾迹: 舰船轨迹后的湍流区域。

(3) 窄 V 型尾迹: 环绕重力波与湍流尾迹互相作用, 增加环绕波而形成, 半张角 2 到 3 度。

(4) 舰船产生的内波尾迹: 舰船行进中, 对密度跃层和温度跃层进行扰动, 从而产生内波尾迹。

上述四种尾迹中, 除开尔文尾迹具有确定的理论模型外, 其他三种尾迹在 SAR 图像产生的机理目前还有许多争论与不确定之处。

#### 5.4 尾迹检测算法

SAR 图像上尾迹检测算法需要考虑的问题有: (1) 尾迹是具有一定宽度的线性特征体; (2) 尾迹的灰度可能比海面背景亮, 也可能比海面背景暗; (3) 尾迹不一定笔直; (4) SAR 图像具有内在的相干斑噪声; (5) 图像中可能存在其他非尾迹的线性结构。这些都给尾迹检测算法的研究增加了难度。

近年来, 关于尾迹检测的研究很多, 本文将它们归纳为二类: 基于 RADON 变换的算法、基于扫描的算法。

##### 5.4.1 基于 RADON 变换的算法

RADON 变换通过计算图像沿各个方向的投影来检测尾迹, 由于 RADON 变换在线性特征提取方面的独特能力, 大多数研究以 RADON 变换为主要数学工具。

加拿大 Rey 等人<sup>[27]</sup>将 RADON 变换算法用于 SEASAT 图像尾迹检测, 这个方法结合高通滤波、常规的 RADON 变换和 Wiener 滤波器进行; 美国 Copeland 等人<sup>[26]</sup>描述了尾迹检测的局部 RADON 变换方法, 方法的关键是对短的线段使用 RADON 变换, 而不是对整个图像, 开发了称为特征空间线性检测器 (FSLD) 的算法; 新加坡 Lin 等人<sup>[21]</sup>针对 ERS 图像, 使用形态滤波、RADON 变换和一些尾迹检验规则进行检测; 美国 Fitch 等人<sup>[28]</sup>对 NASA-JPL 机载 AirSAR 图像, 使用人工神经网络的方法帮助判读 RADON 变换后的尾迹; 加拿大 Rey 等人<sup>[29]</sup>针对文献 [27] 算法中虚警率高的缺点, 使用 Dempster-Shafer 算法降低尾迹检测的虚警。

国内目前也逐渐开展了 SAR 图像尾迹检测算法的研究。王世庆等人<sup>[30]</sup>使用 RADON 变换结合形态学图像处理技术进行检测; 周红建等人<sup>[31]</sup>利用 RADON 变换检测窄 V 型尾迹; 汤子跃等人<sup>[32]</sup>基于 RADON 变换实现了尾迹 CFAR 检测。

##### 5.4.2 基于扫描的算法

这个算法是在检测到的舰船目标附近, 计算 180 度之内每个方向上的亮度均值, 从而得到一个扫描曲线, 根据这个曲线判断出可能的尾迹方向。

挪威 Eldhuset<sup>[5,14]</sup>使用此方法对 ERS 图像进行尾迹检测; 意大利 Cusano 等人<sup>[33]</sup>也使用此方法对 ERS 快视图像进行尾迹检测。

基于扫描的算法使用了运动舰船在方位向产生位移的先验知识, 在舰船方位向附近有限的若干点上扫描检测, 在检测的同时可以计算出舰船与尾迹之间的位移量, 因此算法相对于基于 RADON 变换的算法要简单; 基于 RADON 变换的方法优势在于不需要事先知道舰船位置, 但二种方法都同时

存在着检测结果可能是非尾迹线性结构的问题, 因此必须附加检测规则来减少虚警率。

#### 5.5 根据尾迹估计航速

利用 SAR 图像舰船尾迹估计航速有三种方法<sup>[3]</sup>。

##### (1) 根据舰船方位向位移计算

根据运动目标 SAR 成像的特点, 运动舰船的航速  $V_{\text{ship}}$  可以通过舰船在方位向的位移  $d$  计算,

$$V_{\text{ship}} = \frac{dV_{\text{sat}}}{H \tan \phi} \quad (1)$$

其中,  $d$  为舰船方位向位移,  $\phi$  为舰船运动矢量与距离向之间的夹角,  $H$  为 SAR 平台的高度,  $\theta$  为入射角,  $V_{\text{sat}}$  为卫星速度。

##### (2) 根据窄 V 型尾迹夹角计算航速

根据窄 V 型尾迹夹角计算舰船航速的公式为

$$V_{\text{ship}} = \frac{\sin \theta}{2 \tan \alpha} \sqrt{\frac{g}{\sin \theta}} \quad (2)$$

其中,  $\lambda$  为雷达波长,  $g$  为重力加速度,  $\theta$  为入射角,  $\alpha$  为雷达侧视方向与舰船航迹之间的夹角,  $\alpha$  为窄 V 型尾迹的半张角。

##### (3) 根据开尔文尾迹中横波波长计算

根据开尔文尾迹横波波长计算舰船航速的公式为

$$V_{\text{ship}} = \sqrt{Lg/2} \quad (3)$$

其中  $L$  为开尔文尾迹中横波的波长,  $g$  为重力加速度。

Wahl 指出<sup>[9]</sup>, 当图像中既存在舰船在方位向位移, 又存在开尔文尾迹横波时, 分别使用公式 (1) 和公式 (3) 计算出的舰船速度相互吻合。

## 6 结束语

在 SAR 图像上, 舰船目标清晰可见, 进行舰船及其尾迹检测具有广阔的应用前景。近年来, SAR 逐渐发展到高分辨率、多极化等方式, 随着 SAR 技术的不断发展, 检测算法将随之而变化, 利用 SAR 图像进行舰船及其尾迹检测将具有更大的发展空间, 研究工作将可以扩展到后续的舰船目标分类与识别。

另外, 如果我国能够利用机载 SAR (最好是多波段、多极化同时成像) 组织开展针对若干个已知舰船目标的实地实验, 获取 SAR 图像、同步海洋观测数据、舰船目标各种特征参数信息, 可以有助于推动我国舰船目标检测与监视技术的深入研究和系统工程实现。

#### 参考文献:

- [1] Munk W H. Ships from space [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1987, A412(8): 231 - 254.
- [2] Skoelv A, et al. Simulation of SAR imaging of ship wakes [A]. Proceedings of IGARSS 88 [C]. Edinburgh, Scotland: IGARSS, 13 - 16 Sept, 1988. 851 - 854.
- [3] Lyden J D, et al. Analysis of synthetic aperture radar imagery of surface ship wakes [A]. Proceedings of IGARSS 86 [C]. Zurich: IGARSS, 8 - 11 Sept, 1986. 801 - 805.
- [4] Murphy L M. Linear feature detection and enhancement in noisy images via the radon transform [J]. Pattern Recognition Letters, 1986, 4(4):

- 279 - 284.
- [ 5 ] Eldhuset K. Automatic ship and ship wake detection in spaceborne SAR images from coastal regions [A]. Proceedings of IGARSS 88 [C]. Edinburgh, Scotland: IGARSS, 13 - 16 Sept, 1988. 1529 - 1533.
- [ 6 ] Hendry A, et al. Automated linear feature detection and its application to curve location in synthetic aperture radar imagery [A]. Proceedings of IGARSS 88 [C]. Edinburgh, Scotland: IGARSS, 13 - 16 Sept, 1988. 1521 - 1524.
- [ 7 ] Vachon P W, 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.
- [ 8 ] Yereny M. Ocean surveillance with polarimetric SAR [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27(4) :328 - 344.
- [ 9 ] Wahl T, Skoelv A. SAR imaging of ships and ship wakes during NORCEX 88 [A]. Proceedings of IGARSS 89 [C]. Vancouver, Canada: IGARSS, 10 - 14 July, 1989. 366 - 368.
- [ 10 ] Stapleton N R. Ship wakes in radar imagery[J]. Int J Remote Sensing, 1997, 18(6) :1381 - 1386.
- [ 11 ] Ouchi K, et al. Multi-frequency SAR images of ship-generated internal waves [J]. Int J Remote Sensing, 1997, 18(18) :3709 - 3718.
- [ 12 ] Henschel M, et al. Vessel detection with wide area remote sensing [J]. Sea Technology, 1998, 39(9) :36 - 40.
- [ 13 ] Vachon P W, et al. Ship detection by the RADARSAT SAR: validation of detection model predictions [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1997, 23(1) :48 - 59.
- [ 14 ] Eldhuset K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions [J]. IEEE Trans, 1996, GRS-34(4) :1010 - 1018.
- [ 15 ] David C, et al. SAR ship detection using new conditional contrast box filter [A]. SPIE Conference on Algorithms for SAR Imagery V [C]. Washington: SPIE Vol. 3721, 1999. 274 - 284.
- [ 16 ] Wakerman C, et al. Automatic ship detection of ships in RADARSAT SAR imagery [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27(5) :371 - 378.
- [ 17 ] Jiang Q, et al. Automatic detection for ship target in SAR imagery using PNN-Model [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(4) :297 - 305.
- [ 18 ] Touzi R. On the use of polarimetric SAR data for ship detection [A]. Proceedings of IGARSS 99 [C]. Hamburg, Germany, 28 June-2 July, 1999. 812 - 815.
- [ 19 ] Touzi R. Calibrated polarimetric SAR data for ship detection [A]. Proceedings of IGARSS2000 [C]. Hawaii, US, 24 - 28 July, 2000. 144 - 146.
- [ 20 ] Ringrose R. Ship detection using polarimetric SAR data [A]. CEOS 99 SAR Workshop [C]. Netherlands: ESA Publications Division, 1999. 687 - 692.
- [ 21 ] Lin F I, et al. Computer-based algorithm for ship detection from ERS SAR imagery [EB/OL]. <http://www.ers-symposium.org/papers/participants/data/lini/>, 1997 - 03 - 18.
- [ 22 ] Argenti F, et al. Automatic ship detection in SAR images [A]. Proceedings of the International Conference: Radar 92 [C]. London: Artech House, 1992. 468 - 471.
- [ 23 ] Luciano A, et al. A fuzzy complete SAR processing chain for ship detection and velocity estimation[J]. European Trans on Telecommunications and Related Technologies, 1991, 2(6) :689 - 693.
- [ 24 ] Lombardo P, et al. Segmentation-based technique for ship detection in SAR images[J]. IEE Proc Radar, Sonar, Navig, 2001, 148(3) :147 - 159.
- [ 25 ] Hennings I, et al. Radar imaging of Kelvin arms of ship wakes [J]. Int J Remote Sensing, 1999, 20(13) :2519 - 2543.
- [ 26 ] Copeland A C. Localized radon transform-based detection of ship wakes in SAR images [J]. IEEE Trans, 1995, GRS - 33(1) :35 - 45.
- [ 27 ] Rey M T, et al. Application of radon transform techniques to wake detection in Seasat-A SAR images [J]. IEEE Trans, 1990, GRS-28(4) :553 - 360.
- [ 28 ] Fitch J P, et al. Ship wake-detection procedure using conjugate gradient trained artificial neural networks [J]. IEEE Trans, 1991, GRS-29(5) :718 - 725.
- [ 29 ] Rey M. Use of the Dempster-Shafer algorithm for the detection of SAR ship wakes[J]. IEEE Trans, 1993, GRS-31(5) :1114 - 1118.
- [ 30 ] 王世庆, 金亚秋. SAR 图像船行尾迹检测的 RADON 变换和形态学图像处理技术[J]. 遥感学报, 2001, 5(4) :289 - 294.
- [ 31 ] 周红建, 陈越, 等. 应用 RADON 变换方法检测窄 V 型船舶航迹[J]. 中国图像图形学报, 2000, 5A(11) :901 - 905.
- [ 32 ] 汤子跃, 朱敏慧, 等. 一种 SAR 图像舰船尾迹的 CFAR 检测方法[J]. 电子学报, 2002, 30(9) :1336 - 1339.
- [ 33 ] Cusano M. A real time operational scheme for ship traffic monitoring using quick look ERS SAR images [A]. Proceedings of IGARSS2000 [C]. Hawaii, US: IGARSS, 24 - 28 July, 2000. 2918 - 2920.

#### 作者简介:



**种劲松** 女, 1969 年 4 月出生于北京, 博士, 现为中国科学院电子学研究所副研究员, 从事遥感图像信息处理、合成孔径雷达图像应用等方面的研究工作。



**朱敏慧** 女, 1943 年 4 月出生于上海, 研究员, 博士生导师, 微波成像技术国家重点实验室主任, 中科院电子所学术委员会主任, 电子与信息学报主编, 主要从事 SAR 技术领域的研究工作。