

文章编号: 1007-4619 (2001) 04-0289-06

SAR 图像船行尾迹检测的 Radon 变换和 形态学图像处理技术

王世庆, 金亚秋

(复旦大学 波散射和遥感中心、信息科学与工程学院, 上海 200433)

摘 要: 该文提出了一种由 Radon 变换与形态学图像处理技术检测船行尾迹的算法 SWDRM (Ship Wake Detection Algorithm based on Radon transformation and Morphologic image processing technology)。算法特点是: 在 Radon 空间进行处理后, 得到逆变换图像。通过图像后处理, 可得到二值图像, 以用于尾迹自动检测。对海洋卫星合成孔径雷达 (SEASAT SAR) 图像及模拟乘性斑点噪声中舰船尾迹进行了检测。结果表明, SWDRM 具有很好的鲁棒性, 能够适应不同水平的噪声环境。同时, 对阈值系数和工作窗口宽度的选择范围都比较大, 在一定的噪声水平范围, 给定阈值系数后, 得到近似于恒虚警率的检测结果, 结合图像后处理, 可得到二值图像用于自动尾迹检测。

关键词: Radon 变换; 形态学图像处理; 船迹检测

中图分类号: TP721.2/TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

当水面舰船运动时, 将产生以 V 字形 Kelvin 臂为特征的船行尾迹, 它是由发散波与横向波相互作用而构成的, 船尾后部海面紊流区域可能延伸长达十多公里^[1]。尾迹的早期研究主要是在产生舰船尾迹的流体力学机理上。随着合成孔径雷达的空对地观测技术的发展, 在 SAR 图像中有可能观察到尾迹的存在。它与 SAR 的波长、极化、SAR 飞行与观察方向以及海面风速、风向、海流等海洋环境有关。此外, 不同舰船形状及驱动系统也可能产生不同形态的尾迹。因此, 如何从 SAR 图像中检测船行尾迹并进而获得舰船航向、航速及舰船种类等信息在军事及航运管制等民用领域都有很大意义, 日益引起人们的重视^[2-5]。

尽管 SAR 图像上观察到的尾迹受到许多种因素的影响, 但尾迹的直线特征基本是保持的。因此, Radon 变换被认为是尾迹检测的有效手段。但是, 有两个问题值得注意, 首先是传统的 Radon 变换是在整个图像区域进行的, 对短尺度线形纹理的检测

不太有效^[3]。其次, 如何区别舰船尾迹与由其它自然因素如海面风场、海底地形产生的雷达回波线形特征, 从而提高检测概率并降低虚警概率? 现在, 大多数采用在 Radon 域设定阈值, 然后给出由二值图像表示的检测结果, 这种方法受一定的人为经验因素的限制, 不同海洋状况和噪声环境都可能对检测结果产生相当大的影响。

本文提出了 Radon 变换和形态学图像处理技术结合的船行尾迹检测算法 (以下称为 SWDRM 算法), 研究了在 SAR 图像中船行尾迹的检测问题。SWDRM 算法应用 Radon 变换与数学形态学图像处理技术, 在 Radon 空间经过自适应阈值选取, 然后利用数学形态学图像处理方法可剔除非尾迹峰值点的干扰, 从而减小虚警概率。Radon 逆变换得到灰度值图像后, 通过图像线形纹理强度、长度、宽度及相互关系等分析, 用于舰船尾迹识别。采用形态学滤波器后, 由自然因素及海底地形结构可能产生的雷达线形纹理仍然可能被检测出来。将 SWDRM 算法用于 SEASAT SAR 图像和强噪声情形的模拟图像, 表明本算法有很好的适应性。

收稿日期: 2000-09-25; 修订日期: 2000-11-09

基金项目: 国家自然科学基金 49831060, 国防预研基金项目资助。

作者简介: 王世庆(1963—), 男, 助理研究员, 1984年获四川师范大学物理学学士学位, 1991年获西南物理研究院等离子体专业硕士学位, 1999年获西南交通大学交通信息管理及控制博士学位, 现为复旦大学电子科学与技术站博士后, 主要从事信号分析, 电磁场数值计算。发表论文 10 余篇。

2 Radon 变换与数学形态学图像处理

2.1 Radon 变换

Radon 变换与计算机视觉中的 Hough 变换是一致的。将 (x, y) 图像平面的一条直线 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 映射成 Radon 空间一个点 (ρ, θ) , 连续图像的 Radon 变换则定义为:

$$R(\rho, \theta) = \iint_D f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (1)$$

这里 D 为整个图像平面, $f(x, y)$ 为图像上 (x, y) 像素点灰度值, δ 为狄拉克 δ 函数, ρ 为 (x, y) 平面直线到原点距离, θ 为原点到直线的垂线与 x 轴的夹角。对 Radon 空间点 (ρ, θ) , 可以使用下式重构原图像空间直线:

$$y = (\rho / \sin \theta) - x \cot \theta \quad (2)$$

Radon 变换后, (ρ, θ) 平面的 $R(\rho, \theta)$ 呈现极大或极小的峰值点对应着 (x, y) 平面上较明或较暗直线段。SAR 图像往往受到噪声的污染, 在 Radon 域设置一定的阈值, 有可能在 (ρ, θ) 平面将噪声分量减小, 从而提高信噪比。

2.2 数学形态学图像处理

数学形态学图像处理是利用适当的结构单元 S 与图像 B 相互作用, 突出所需要的信息, 得到二值图像。基本的形态学图像处理是膨胀与腐蚀, 定义如下^[6]

$$\text{膨胀: } D = B \oplus S = \{x, y \mid S_{xy} \cap B \neq \Phi\} \quad (3)$$

$$\text{腐蚀: } E = B \otimes S = \{x, y \mid S_{xy} \subseteq B\} \quad (4)$$

D 与 E 分别为结构单元 S 在图像窗口上滑动时, 在 (x, y) 处 S 与 B 相互作用, 得到的二值图像。膨胀算法将 Radon 域邻近对象组合在一起, 而腐蚀算法可将小于一定尺度的对象滤除。

3 SWDRM 算法

一般地说, 舰船的雷达回波比海面杂波强, 但由于尾迹的尺度远大于舰船, 往往在海面 SAR 图像上更容易分辨, 因此, 先检测尾迹而不是舰船往往更为有利^[2]。另外, 传统的 SAR 图像重构技术总是假定图像中的物体是没有运动的, 因而海面运动船只在 SAR 图像中的位置与其真实位置在方位上实际上有

偏移, 采用尾迹检测更能得到舰船真实位置的估计。基于 Radon 变换与形态学图像处理技术的 SWDRM 算法, 其算法流程如图 1 所示。

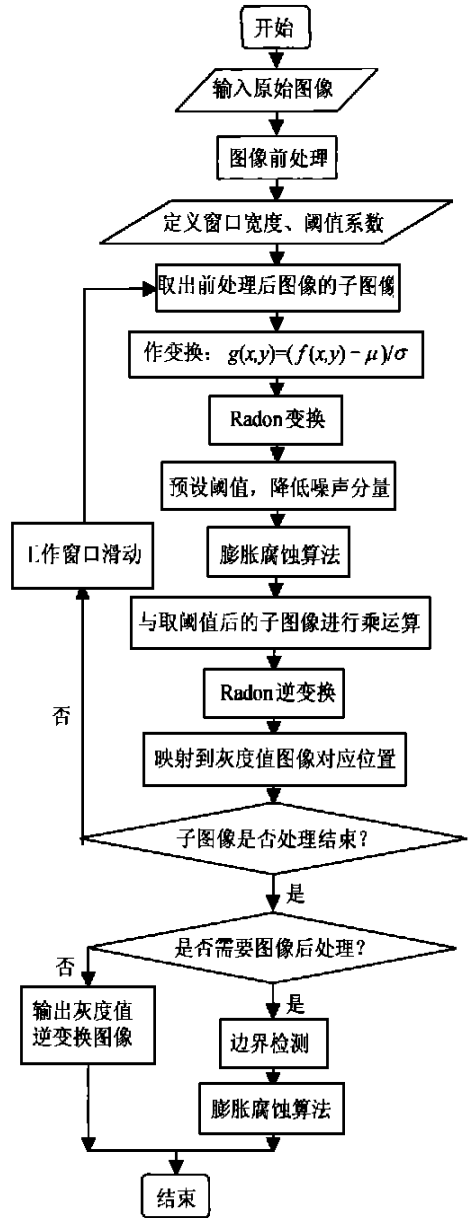


图 1 本算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the algorithm

主要可分为如下步骤: 首行, 以原始图像进行前处理, 屏蔽掉陆地, 经过中值滤波, 去除孤立的噪声斑点, 初步提高图像信噪比; 第二步, 通过方形工作窗口取出子图像, 每个像素点灰度值减去了图像均值, 并用子图像标准差归一化。即是:

$$g(x, y) = (f(x, y) - \mu) / \sigma \quad (5)$$

其中 μ, σ 分别为子图像空间均值和标准差。众所周知, 直接利用 Radon 变换, 即使对于灰度值完全相同的图像, 也会在变换域产生 X 形峰线, 对在变换

域进行进一步处理是相当不利的。这一步能够很好地解决这个问题。同时,还能够在重构灰度值图像过程中,减小由于工作窗口的滑动产生的马赛克图纹,对船迹的自动识别也是重要的;第三,对于图像进行 Radon 变换,在变换域,预设阈值上下限,保留高于上限或低于下限的信息,而将其它像素值置零,即

$$R(\rho, \theta) = 0 \quad \text{当} \quad -\mu_R - K_1 \sigma_R \leq R(\rho, \theta) \leq \mu_R + K_2 \sigma_R \quad (6)$$

这里的 μ_R 、 σ_R 分别是 Radon 域均值和标准差, K_1 、 K_2 为预设的正阈值系数,分别对应于 Radon 域明暗峰值的检测; Radon 变换将线形船迹检测转化为 Radon 空间 (ρ, θ) 点的检测,而设定阈值将减小由海面背景噪声分量。第四,通过数学形态学图像处理技术,也就是膨胀和腐蚀算法,减少由于不同海洋状况可能产生的非尾迹线形纹理在 Radon 域产生的孤立峰值点。由于膨胀与腐蚀算法实际上返回的是二值图像,我们还必须与子图像对应像素点进行乘运算,才能保留 Radon 空间的强度信息;第五,逆 Radon 变换得到去除噪声后的子图像,将其映射到原始图像对应位置。工作窗口在原始图像上滑动,依次取出子图像进行处理。工作窗口在水平和垂直方向移动时,将有 30% 的窗口重合以提高检测概率。重复步骤二至步骤五,得到整个图像的去噪灰度图像,增强了舰船尾迹特征。通常此时已经容易人工识别船迹并得到舰船位置及其它信息。最后,如果有必要,进行图像后处理,得到二值图像用于尾迹自动检测。

SWDRM 算法主要特点在于经过 Radon 域自适应阈值选取和膨胀腐蚀算法后得到 Radon 逆变换灰度值图像,由于保留了 Radon 域强度信息,因此,对逆变换灰度图像线形纹理强度、长度、宽度及相互关系等分析,可减少由其它自然因素产生的直线纹理误判为船迹的可能性,同时提高发现船迹及其它感兴趣信息的能力。最后,可采用许多比较成熟算法进行图像后处理,用于舰船尾迹自动识别。

4 SWDRM 算法在 SAR 图像船行尾迹检测中的应用

图 2 是由西欧北海南部海湾附近 ($51^{\circ}10'21''N$, $1^{\circ}50'15''E$) 含有两艘舰船的 SEASAT SAR 数据得到的含有 850×750 个像素的灰度值局部放大图^[1], 船行方向与雷达观察方向夹角为 228° 。仔细观察不难

看到由两艘舰船运动形成的 Kelvin 臂与船尾紊流波构成的典型尾迹。

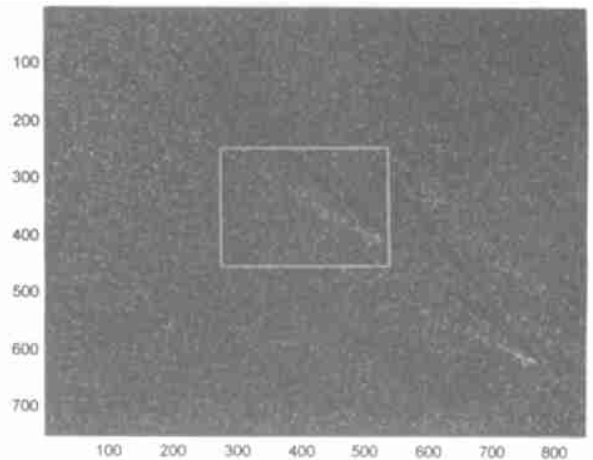


图 2 SEASAT SAR 局部放大图像

Fig. 2 Enlarged section of SEASAT SAR image

图 3 为算法结果。取滑动工作窗口含 100×100 像素点,图 2 中矩形框部分作为测试图像,它含有 250×200 像素点,如图 3(a)所示。经过中值滤波后得到图 3(b),可以看到背景噪声起伏得到平滑,同时,孤立噪声斑点将被剔除。为比较,我们给出没有经过膨胀、腐蚀形态学滤波算法得到的 Radon 逆变换重构图像,如图 3(c)所示。可以看到,除存在明显的舰船尾迹外,还有许多不需要的杂乱条纹。而经过膨胀、腐蚀算法后得到的逆变换图像如图 3(d)所示。考虑到尾迹一般有几个像素宽度,这里膨胀长度取为 4 个像素,腐蚀长度应该比膨胀比度大一个像素为 5 个像素从而可剔除孤立峰值点。由图 3(d)可见此时杂乱条纹显著减小,提高了检测的准确性,降低了虚警概率。另外在 Radon 空间所取的阈值系数 $K_1=3.4$, $K_2=4.5$ 。事实上,我们发现,当 $K_1 \in (2.5, 4)$ 和 $K_2 \in (3, 4.8)$ 的范围内都能得到比较满意的结果。值得说明的是,增加阈值将同时减小虚警概率和发现概率,反之,降低阈值会使虚警概率和发现概率增大,阈值系数的选取可以根据实际需要而定。

通过图像后处理,能够得到二值图像,以利于自动检测。比如对图 3(d)作边界检测,结果如图 3(e)所示,进行膨胀腐蚀迭代算法后,得到非常好的检测结果,如图 3(f)所示。

图 4(a)、(b)是图 2 SEASAT SAR 图像最终尾迹检测结果。在图 4(a)中,容易分辨出两艘舰船产生的包括明暗 V 字形 Kelvin 臂和中间由紊流波组成的暗

条纹尾迹。尽管除此之外,还有许多杂乱线纹,但不会引起误判。同时,逆变换灰度图像也提供了从中得到其它有用信息的可能性。图 4(b)为经过后处理后的二值图像。下面,我们将不再讨论图像后处理。

图 5(a)也是与图 2 同一时间由西欧北海南部海湾附近(51°28'17"N, 2°05'26"E)的 SEASAT SAR 数据

得到的有 905×485 个像素的局部灰度值图像^[1],但船行方向与雷达观察方向夹角为 260°,另外,风向与船行方向夹角也不同于图 2 情形。同样能够看到两艘舰船尾迹,采用与前面完全一样的阈值和相同的滑动工作窗口,经过检测后得到的灰度图像如图 5 (b)所示,容易从中找到尾迹,进而确定舰船位置和航向。

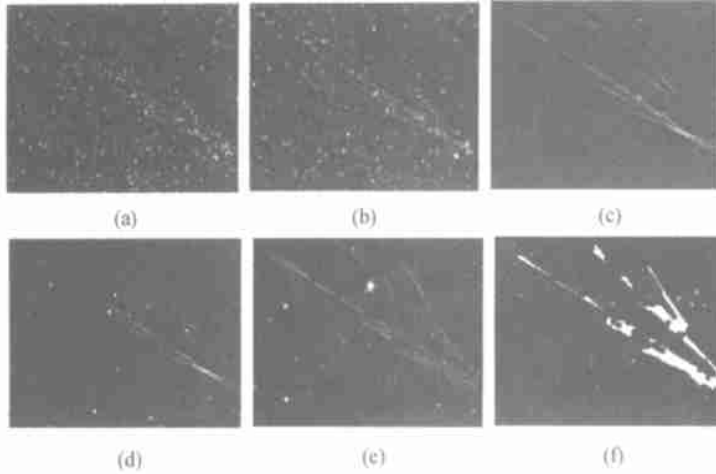


图 3 测试图像及处理后的图像

Fig. 3 Testing image and results of the SWDRM algorithm on testing image

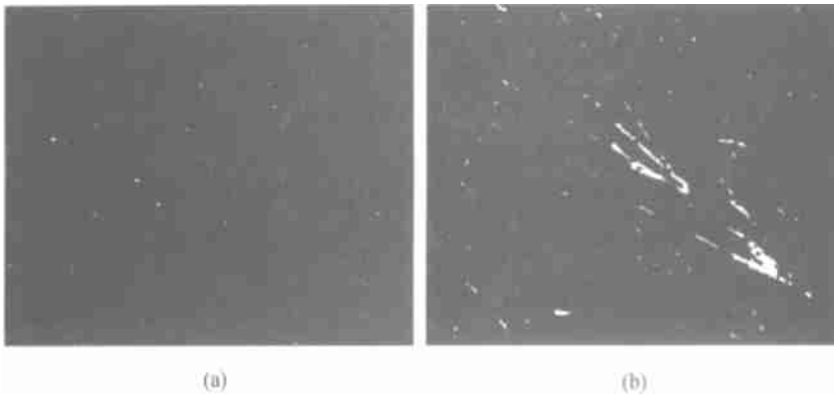


图 4 Radon 逆变换灰度值图像和二值图像

Fig. 4 Gray level image after inverse Radon transform and binary image

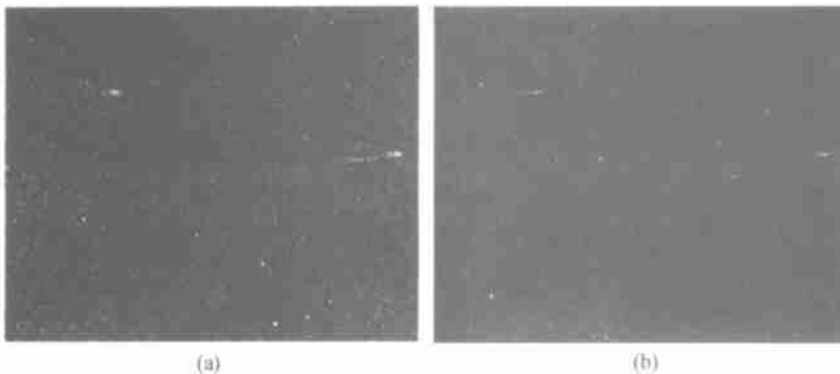


图 5 SEASAT SAR 局部放大图像及其逆变换图像

Fig. 5 Enlarged section of SEASAT SAR image and it's inverted image

SAR 图像易于受噪声尤其是乘性斑点噪声的影响^[7],海面杂波对 SAR 观察通常也有着比较大的影响。因此 SAR 图像常常呈现噪声特征。所幸的是, Radon 变换通过沿特定方向的积分(或累积求和),对噪声起着平滑作用,有可能在强噪声环境中,得到淹没在噪声中的舰船尾迹。因此在强噪声环境中, SWDRM 算法也具有较好的直线纹理检测能力。

下面考察在噪声环境下, SWDRM 算法有适应性。在 SEASTAT SAR 图像 5(a) 上加入原图像两倍方差的乘性斑点噪声,如图 6(a) 所示。从视觉上已很难直接观察到有无运动舰船,至少难以判断舰船尾迹特征,舰船航向。采用 SWDRM,滑动工作窗口仍为 100×100 , 阈值系数与前面一样时,即 $K_1 = 3.4$, $K_2 = 4.5$, 得到的逆变换图像如图 6(b) 所示。在图 6(b) 中,图像左上角舰船尾迹及其位置和航向都是容易确定,图像右侧舰船产生的其中一条 Kelvin 臂非常清楚,而较暗一条 Kelvin 臂仔细观察仍能发现,因此舰船位置和航向仍然可以确定。表明在噪声环境下, SWDRM 算法有很好的适应性。

图 6(c) 是 $K_1 = 2.7$, $K_2 = 3.5$ 时结果。随着阈值系数的减小,发现概率随之增大。在图 6(c) 中,可以观察到图像右侧的两条 Kelvin 臂及紊流波纹,但此时,逆变换图像出现了许多杂乱纹理,增加

了虚警概率。

在前面算例中,我们所取工作窗口比较小,这是考虑到当舰船转弯情形,有利于检测弧线尾迹。事实上,如果选择与直线尾迹长度相匹配工作窗口,能得到更加好的结果。如选择 150×150 的工作窗口,阈值系数 K_1 、 K_2 仍然是 3.4 与 4.5, 得到图 6(d) 所示的结果。在实际应用中,方形工作窗口宽度可以在 70×70 到 200×200 调整。比较图 5(b) 与图 6(b, d), 我们注意到, SWDRM 算法给出的结果并不因噪声的增加或者工作窗口的变化而使虚警率明显增加,这是因为 SWDRM 算法有随子图像方差变化而自适应调整的阈值上下限,因此,在给定阈值系数后,噪声水平在一定的范围时,可得到近似于恒虚警率的检测结果。

对于 SWDRM 算法中阈值系数和窗口大小的选取,可根据实际的需要而定。如为了增大检测概率,应该取较小的阈值系数。为了检测较短的船行尾迹或弧线尾迹,则要取较小窗口宽度。对于多数情形 $K_1 = 3.5$, $K_2 = 4.5$ 左右,工作窗口宽度为 150 个像素点是适合的。

在内存为 32 M, 微处理器为赛场 400 微机,本算法处理 1000×1000 的 SAR 图像大约需要 20 min。

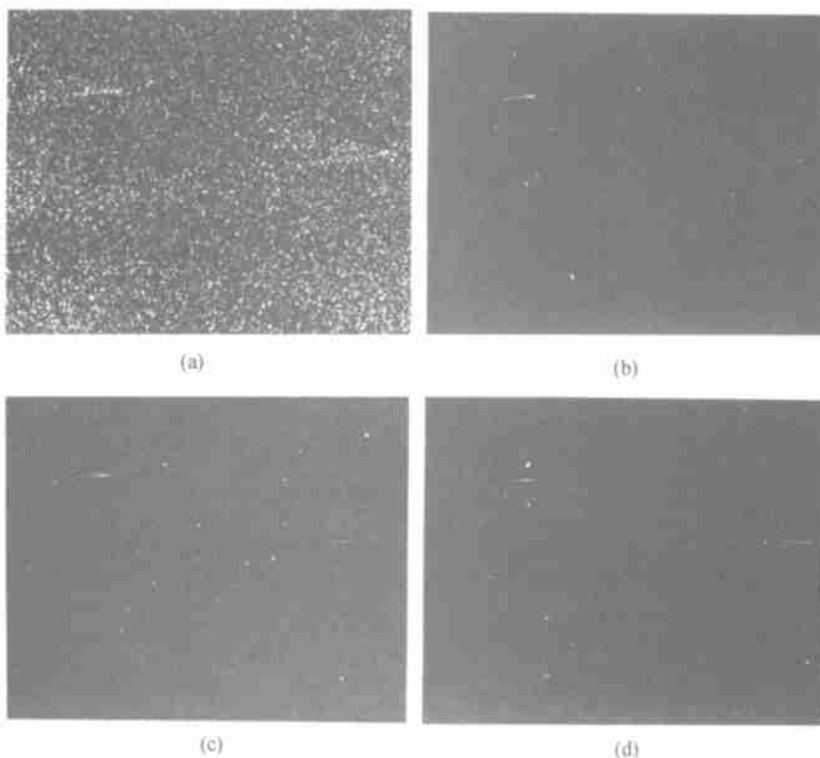


图 6 受乘性斑点噪声污染图像及 Radon 逆变换图像

Fig. 6 Image corrupted by multiplicative speckle noise and different inverse Radon images

5 结 论

本文提出了基于 Radon 变换和形态学图像处理技术的船迹检测算法(SWDRM)。由于在 Radon 空间减小了噪声分量并保留了重要的强度信息,其 Radon 逆变换灰度值图像中的尾迹特征得到了加强,通过图像线形纹理强度、长度、宽度及相互关系等分析,可得到船迹准确的检测结果,减小了传统二值图像判别中容易受人为因素的影响。对 SEASAT SAR 及模拟斑点噪声 SAR 图像中舰船尾迹进行了的检测结果表明,SWDRM 具有很好的鲁棒性,能够适应不同噪声水平的环境,对阈值系数和工作窗口宽度的选择范围都比较大,给定阈值系数后,当噪声水平在一定范围,得到近似于恒虚警率的检测结果。结合图像后处理,仍可得到二值图像用于自动尾迹检测。

参 考 文 献 (References)

[1] Hennings I, Romeiser R, Alpers W, A. Voila. Radar imaging of

Kelvin arms of ship wakes [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1999, **20** (13): 2519—2543.

[2] Rey M T, Tunaley J K E, Folinsbee J T. *et al.* Application of Radon transform techniques to wake detection in Seasat-A SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1990, **28**(4): 553—560.

[3] Copeland A C, Ravichandran G, Trivedi M M. Localized Radon Transform-Based Detection of ship wakes in SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(1): 35—45.

[4] Lin I I, Kwok L K, Lin Y-C, V. Khoo. Ship and ship wake detection in the ERS SAR imagery using computer-based algorithm [A]. In Proceedings of IEEE IGARSS '96 [C]. 1996, 151—153.

[5] Eldhuset K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal region [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 1010—1019.

[6] Castleman K R. Digital image processing [M]. Printice Hall, Inc., 1996.

[7] Ulaby F T, Kouyate F, Brisco B, Williams T. Textural information in SAR images [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1986, **20**(2): 35—45.

[8] Ward K D, Watts S. Radar sea clutter [J]. *Microwave J.*, 1985, **28**(6): 109—121.

Ship Wake Detection in SAR Images Based on Radon Transformation and Morphologic Image Processing

WANG Shi-qing JIN Ya-qiu

(Centre for Wave Scattering & Remote Sensing, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: An algorithm for ship wake detection, based on Radon transformation and mathematical morphologic image processing (called as SWDRM) is developed. The important information from observation are kept in the inverted gray-level image after being manipulated in Radon space. Ship detection can be achieved from a binary image. It is applied to automatic detection for ship moving from the SEASAT SAR images.

The effect due to high-level multiplied speckle noise is also discussed. The results show that this algorithm is well robust in noise presence, and is not very sensitive to the threshold parameters and the width of working window.

Key words: radon transform; morphological image processing; ship wakes detection