

## 一种基于图像分割和归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像舰船尾迹 CFAR 检测算法

艾加秋<sup>①②</sup> 齐向阳<sup>①</sup> 禹卫东<sup>①</sup> 刘凡<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘要:** 该文提出了一种新的 SAR 图像舰船尾迹的恒虚警检测算法。该方法首先检测出舰船并将舰船部分用图像灰度均值代替; 分别以舰船重心为中心分割出一定尾迹长度的正方形区域并以舰船重心为中心将图像分割成 4 个子图像, 对各子图像进行归一化灰度 Hough 变换, 分割后的尾迹在子图像中的对比度得到了提高。在各子图像变换域依概率模型进行统计建模实现了 CFAR 检测, 最后将 4 个子图像的检测结果进行融合得到最终的检测结果。检测结果更好地提取出了尾迹, 并且实现了尾迹的 CFAR 检测。仿真结果验证了算法的有效性。

**关键词:** SAR; 图像分割; 尾迹检测; 恒虚警; 归一化 Hough 变换

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)11-2668-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01527

## A New Ship Wake CFAR Detection Algorithm in SAR Images Based on Image Segmentation and Normalized Hough Transform

Ai Jia-qi<sup>①②</sup> Qi Xiang-yang<sup>①</sup> Yu Wei-dong<sup>①</sup> Liu Fan<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A new ship wake CFAR detection algorithm is proposed in SAR images. The algorithm first detects all the ships and replaces the pixels' gray value of the detected ship with the gray mean value; Then, with the ship barycenter as the center, a square image with a certain length is got and the image is segmented into four sub-images and to perform Normalized Hough Transform on every sub-image; The gray contrast of wake to clutter in the sub-image is enhanced. The probability model in the transform domain of each sub-image is constructed to realize CFAR detection; Finally, the detection results of the sub-images are fused to get the final detection. The detecting results are much better and can be used for CFAR detection. The simulation experiment proves the effectiveness of the algorithm.

**Key words:** SAR; Image segmentation; Ship wake detection; CFAR; Normalized Hough transform

### 1 引言

合成孔径雷达是一种高分辨率成像传感器, 具有全天时和全天候的观测能力。是海洋监测的重要手段, 由于舰船金属的后向散射系数很大, 因此舰船目标在 SAR 海洋图像中呈现很亮的目标<sup>[1-3]</sup>, 而运动的舰船后会留下很长的一段尾迹, 并且和周围海域的对比度很大而形成一条直线<sup>[4-5]</sup>。由于舰船尾迹区域面积较大, 特征比较明显, 利用尾迹检测可以检测出舰船的航向、航速, 还可以实现隐身目标(潜艇)的检测<sup>[6]</sup>。因此利用 SAR 图像进行舰船目标与尾迹检测与监视得到高度重视, 并且取得了很大成就。尾迹检测的最新方法有: 汪海洋等提出了

一种基于方向极傅里叶频谱而为主成分分析的尾迹自动检测算法<sup>[7]</sup>, 它是一种识别的方法, 通过对训练样本图像的纹理特征进行方向极傅里叶变换并对其频谱进行 2 维 PCA 变换得到特征向量, 再对检测图像进行识别。王连亮等提出了基于递归修正 Hough 变换域的舰船多尾迹检测方法<sup>[8]</sup>, 该方法通过 Hough 变换域最大峰值检测出最明显的尾迹, 再去掉 Hough 变换域最大峰以突出次大峰来检测第 2 条尾迹, 由此递归修正 Hough 变换域多峰结构, 直到检测完高于设定阈值的尾迹, 从而实现线段时比度与宽度不同的舰船多尾迹检测。法国 Courmontagne 提出了基于 Radon 变换的一种改进尾迹检测算法<sup>[9]</sup>。

传统的舰船尾迹检测方法中主要分为两类: 一种是全局的检测算法, 还有一种就是基于局部的检

测算法,全局的检测算法对整幅图像进行 Radon 变换,在变换域中选取峰值点或谷值点并进行反 Radon 变换从而得到检测直线,这种全局的检测方法充分利用了尾迹的完整性及其与周围海域的灰度对比,但是它由于容易受到尾迹所在直线的杂波的影响,因此得到的检测结果往往并不准确,而且不能得到尾迹的端点和舰船的行驶方向。而基于局部的尾迹检测方法<sup>[10]</sup>选取一定的窗口并将窗口在图像上滑动,并通过 Radon 变换检测窗口中的直线,虽然该方法能够得到尾迹的端点,但是它没有利用尾迹的整体直线和周围海域的对比度信息,容易受到海洋复杂性因素的影响,不好控制,速度慢。而且上述两种方法都没有实现恒虚警检测。

针对以上检测算法的局限性,本文在归一化灰度 Hough 变换的基础上予以改进,提出了一种基于图像分割和归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像海洋舰船尾迹 CFAR 检测算法,实现了尾迹的 CFAR 检测,其原理框图如图 1 所示。

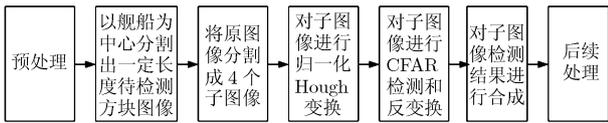


图 1 尾迹检测原理框图

## 2 预处理

SAR 图像尾迹检测的预处理工作主要包括:陆地及岛屿屏蔽、舰船检测及舰船区域屏蔽、斑点噪声抑制和图像分割。陆地与岛屿屏蔽部分可以利用地理信息系统来进行。

舰船检测可以应用常用的恒虚警检测算法:双参数 CFAR 检测、基于概率模型分布的 CFAR 检测等。将检测后得到的舰船区域赋均值屏蔽掉,这样尾迹的检测就不受舰船的影响。

而屏蔽陆地岛屿和舰船后的图像还会存在强斑点噪声,这些强斑点噪声将影响到尾迹的检测,应该予以抑制,抑制斑点噪声常用的方法有:Lee 滤波, Kuan 滤波, Frost 滤波, Gamma-MAP 滤波和 Sigma 滤波,本文使用 Sigma 滤波方法来去除强斑点噪声,取窗口大小为  $3 \times 3$  或者  $5 \times 5$ ,应用此方法可以很好地抑制强斑点噪声。

经过上述预处理后就可以对图像进行尾迹检测了。将经过上述处理后的图像以舰船为中心分割出一定长度的待检测方块图像。

下面将介绍本文的核心部分:基于分割的图像的舰船尾迹检测。

## 3 基于分割子图像归一化 Hough 变换的 CFAR 检测

本文检测算法是先对每个待检测图像进行分割:以舰船重心为中心分割成 4 个子图像,再对每个子图像进行归一化 Hough 变换,在变换域进行统计建立概率分布模型并根据给定的虚警率得到阈值提取出峰值和谷值点,然后反变换得到各个子图像的检测结果,最终将子图像按分割时的反过程进行拼接。

### 3.1 Hough 变换原理及在尾迹检测中的应用

Hough 变换是 Paul Hough 于 1962 年在其专利<sup>[11]</sup>中引入来检测直线,它在图像处理和计算机视觉中有很多应用,如:直线检测、圆或椭圆的检测、边界提取等。2 维欧式空间中 Hough 变换的定义为

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

其中  $D$  为整个  $x-y$  平面,在本文的舰船尾迹检测中,  $D$  为整个图像区域,  $x-y$  为以图像中心为坐标的 2 维欧式平面;  $F(x, y)$  为图像上点  $(x, y)$  的灰度值;  $\delta$  为狄拉克函数;  $\rho$  为原点到直线的距离;  $\theta$  为直线法线与  $x$  轴的夹角,取值范围为:  $0 - 180^\circ$ 。其原理如图 2。  $x-y$  平面的一个点对应着  $\theta-\rho$  平面的一条曲线,而当很多点组成一条直线时,那么这些点对应的变换域  $\theta-\rho$  平面的曲线将相交于一点,这点就代表了这条直线。

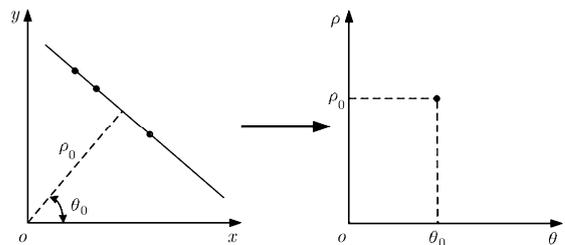


图 2 Hough 变换原理图及坐标系几何对应

常用的尾迹检测方法正是利用了以上的特性,式(1)中的  $F(x, y)$  为像素点  $(x, y)$  的灰度值,变换后  $\theta-\rho$  平面值  $f(\theta, \rho)$  变成了点  $(\theta, \rho)$  对应的  $x-y$  平面的几何直线上所有像素点的灰度累积值。由于尾迹的灰度对比特性,尾迹检测也就变成了  $\theta-\rho$  平面提取峰值或谷值点。但是由于直线的长度不同,这种直线灰度累加的方法往往会产生误检,图 3 中的直线 1 和直线 2 的长度不一,假设直线 1 为真实的暗尾迹,而由于直线 2 的长度短,它所变换得到的点的值会比直线 1 变换得到的点的值小,因此直线 2

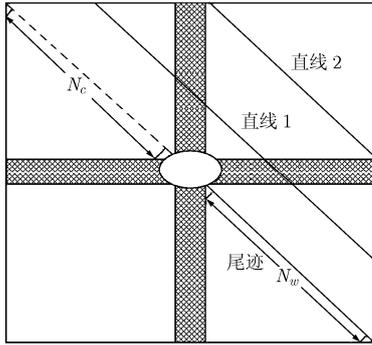


图 3 舰船尾迹特点分析图

会成为错误检测结果。

针对以上情况, 种劲松等人<sup>[12]</sup>提出了归一化 Hough 变换检测算法, 将变换域的值进行平均:

$$\begin{aligned}
 h(\theta, \rho) &= H\{F\} \\
 &= \iint_D F(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \\
 &\quad / N(\theta, \rho)
 \end{aligned} \tag{2}$$

式中  $N(\theta, \rho)$  为直线所对应几何直线的像素点数目。此算法很好地解决了直线长度不一所带来的错误检测问题。但是这种全局的检测方法容易受到舰船尾迹所在直线的杂波干扰, 并且检测结果中不能得到舰船的行驶方向。

### 3.2 分割图像提升尾迹的对比度

试验中分离出的待检测舰船图像如图 4 所示, 根据人眼视觉神经系统的特点, 可以得出: 尾迹之所以能够显现在我们的视野中, 是因为尾迹和周围海杂波环境的灰度特性的强对比性。这里假设尾迹周围的直线像素服从概率模型为  $f(x)$  的分布, 除舰船目标和尾迹部分外, 图像中的其余像素皆满足这一分布。本文中使用的检测方法为归一化的 Hough 变换检测法, 尾迹和其余直线的灰度对比度用参数 Con 来评价。常用的尾迹检测方法中一般使用全局图像进行检测。从图 4 中可以看出待检测尾迹主要分布于以舰船为中心的 4 个子图像(左上、右上、左

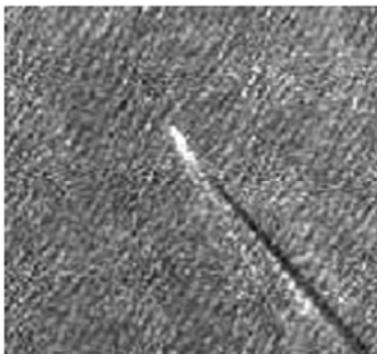


图 4 舰船尾迹分布图

下和右下)的一个中, 其简化如图 3 所示。中间的椭圆区域为检测出的舰船区域。

使用整幅图像进行归一化 Hough 检测时, 尾迹变换到  $\theta$ - $\rho$  平面的值为尾迹所在的整条直线(包括虚线)所有像素的平均值, 那么它很容易受到图中虚线的影响而降低尾迹与其余直线的灰度对比度。假设海洋杂波的均值为

$$E(x) = \int xf(x)dx \tag{3}$$

真实尾迹部分的灰度均值为  $\mu_w$ , 则使用整体图像进行检测时, 所计算的尾迹直线与其余直线的对比度系数为

亮尾迹时:

$$Con_{all} = \frac{N_w \cdot \mu_w + N_c \cdot E(x)}{(N_w + N_c) \cdot E(x)} = 1 + \frac{N_w \cdot (\mu_w - E(x))}{(N_w + N_c) \cdot E(x)} \tag{4}$$

暗尾迹时:

$$Con_{all} = \frac{(N_w + N_c) \cdot E(x)}{N_w \cdot \mu_w + N_c \cdot E(x)} = 1 + \frac{N_c \cdot (E(x) - \mu_w)}{N_w \cdot \mu_w + N_c \cdot E(x)} \tag{5}$$

式中  $N_w$  为真实尾迹部分的像素数,  $N_c$  为尾迹所在直线海杂波部分的像素数。易知:  $N_w \approx N_c$ , 如图 3 所示。本文为了提高尾迹和其余直线的灰度对比度, 考虑到尾迹分布特点, 将图像以舰船重心为中心分割成左下、左上、右下和右上 4 副子图像, 并且尾迹可能位于分割的边界区域, 为此设定了一个交叉重叠, 如图 3 的阴影方格所示。分别对每幅子图像进行归一化 Hough 变换检测。本文算法计算的尾迹和其余直线的对比度系数为

亮尾迹时:

$$Con_{split} = \frac{\mu_w}{E(x)} = 1 + \frac{(\mu_w - E(x))}{E(x)} \tag{6}$$

暗尾迹时:

$$Con_{split} = \frac{E(x)}{\mu_w} = 1 + \frac{(E(x) - \mu_w)}{\mu_w} \tag{7}$$

则本文算法相比整体图像检测算法的尾迹对比度提升因子为

亮尾迹时:

$$\begin{aligned}
 Con_{improve} &= \frac{Con_{split}}{Con_{all}} = 1 + \frac{(\mu_w - E(x)) \cdot N_c}{N_w \cdot \mu_w + N_c \cdot E(x)} \\
 &\approx 1 + \frac{(\mu_w - E(x))}{\mu_w + E(x)}
 \end{aligned} \tag{8}$$

暗尾迹时:

$$\begin{aligned}
 Con_{improve} &= \frac{E(x)}{\mu_w} = 1 + \frac{N_c \cdot (E(x) - \mu_w)}{\mu_w (N_w + N_c)} \\
 &\approx 1 + \frac{(E(x) - \mu_w)}{2\mu_w}
 \end{aligned} \tag{9}$$

当尾迹为亮尾迹时:  $(\mu_w - E(x)) > 0$ , 当为暗尾迹时:  $(E(x) - \mu_w) > 0$ , 由此可知:  $Con_{improve} > 1$ 。因此本文基于分割子图像的算法的尾迹对比度得到了提升。

### 3.3 基于归一化 Hough 变换的舰船尾迹 CFAR 检测算法

本文使用归一化 Hough 变换方法来检测舰船尾迹, 它将 Hough 变换域的值进行平均:

$$h(\theta, \rho) = H\{F\} = \frac{\iint_D F(x, y)\delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy}{N(\theta, \rho)} \quad (10)$$

当  $N(\theta, \rho)$  很大时, 由中心极限定理可以知道变换域  $h(\theta, \rho)$  的值符合高斯分布, 其概率密度函数可以表示为

$$f(h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_h} \exp\left[-\frac{(h(\theta, \rho) - \bar{h})^2}{2\sigma_h^2}\right] \quad (11)$$

式中  $\bar{h}$ ,  $\sigma_h^2$  分别为  $h(\theta, \rho)$  的均值和方差, 假设变换前图像的灰度均值和方差为  $\bar{F}$  和  $\sigma_F^2$ , 则

$$\bar{h} = \bar{F}, \quad \sigma_h^2 = \sigma_F^2 / N \quad (12)$$

由于各直线的长度不同, 因此  $N$  不好计算, 故实际计算中由变换域的估计值来代替。

$$\sigma_h^2 = \frac{1}{N_1 \cdot N_2} \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_2} (h(i, j) - \bar{h})^2 \quad (13)$$

式中  $N_1, N_2$  为原图像直线变换到  $\theta$ - $\rho$  平面的点数, 由于尾迹有一定的长度, 因此可以设定以长度门限并将小于该门限的直线对应的变换点排除掉。

进一步可以将变换域  $h(\theta, \rho)$  进行变换得到正态分布, 即

$$h_0(\theta, \rho) = \frac{h(\theta, \rho) - \bar{h}}{\sigma_h} \quad (14)$$

根据式(14)在变换域提取峰值和谷值点:

$$h_0(\theta, \rho) > \lambda_T \text{ 或 } h_0(\theta, \rho) < -\lambda_T, \text{ 判为目标尾迹} \quad (15)$$

式中  $\lambda_T$  为检测门限, 它与虚警概率  $P_{fa}$  对应的关系为

$$P_{fa} = \int_{-\infty}^{-\lambda_T} f(h_0(\theta, \rho)) dh_0 + \int_{\lambda_T}^{\infty} f(h_0(\theta, \rho)) dh_0 = 2 \cdot (1 - \Phi(\lambda_T)) \quad (16)$$

从式(16)可知, 可以根据给定的虚警率  $P_{fa}$  来求得检测门限  $\lambda_T$ , 提取出变换域的峰值和谷值点, 再反变换回图像域, 最后按照分割方法的反过程合成 4 个子图像的检测结果。实现恒虚警尾迹检测。

对检测后的结果还可以进行后续处理, 可以利用尾迹的特征: 如长宽比, 长度等来排除虚警。为

了说明本文算法的优点, 实验结果都没有经过后续处理。

## 4 算法仿真及分析

### 4.1 仿真试验

本文选用 RADARSAT 和 TerraSAR 图像进行检测。使用全局归一化 Hough 变换 CFAR 算法和分割归一化 Hough 变换 CFAR 算法进行检测, 并且使用不同的虚警率来比较检测效果。本文选取的实验图像为先将舰船检测完后, 以舰船重心为中心分割出一定长度的待检测方块图像。

对于 RADARSAT 图像 1(512×512), 可以看出图中有一条尾迹, 而且图像中有油污的影响, 应用两种检测方法使用不同的虚警率进行检测得到比较效果如图 5 所示。图 5(a)为 RADARSAT 原图像, 图 5(b)为使用基于分割的归一化 Hough 变换检测结果, 使用的虚警率为  $P_{fa} = 10^{-8}$ , 可以看出能够检测出尾迹, 没有虚警。而对原图像使用全局图像归一化 Hough 变换法在相同的虚警率下检测不出任何直线。图 5(c)为使用基于分割的归一化 Hough 变换检测结果, 使用的虚警率为  $P_{fa} = 10^{-5}$ , 可以看出能够检测出尾迹, 但是有虚警。而对原图像使用全局图像归一化 Hough 变换法在相同的虚警率下检测不出任何直线。图 5(d)为使用全局图像归一化 Hough 变换检测结果, 使用的虚警率为  $P_{fa} = 10^{-3}$ , 可以看出能够检测出尾迹, 但是有很多虚警。

对于 TerraSAR 图像 2(128×128), 可以看出图中有两条尾迹, 一条暗, 一条亮。应用两种检测方法使用不同的虚警率进行检测得到比较效果如图 6 所示。图 6(a)为 TerraSAR 原图像, 图 6(b)为使用基于分割的归一化 Hough 变换检测结果, 使用的虚警率为  $P_{fa} = 10^{-6}$ , 可以看出能够检测出尾迹, 没有虚警。而对原图像使用全局图像归一化 Hough 变换法在相同的虚警率下检测不出任何直线。图 6(c)为使用基于分割的归一化 Hough 变换检测结果, 使用的虚警率为  $P_{fa} = 10^{-4}$ , 可以看出能够检测出尾迹, 但是有虚警。图 6(d)为使用全局图像归一化 Hough 变换检测结果, 使用的虚警率为  $P_{fa} = 10^{-4}$ , 可以看出能够检测出尾迹, 没有虚警。

### 4.2 结果分析

从上面的两个实验可以看出, 本文的基于分割图像进行归一化灰度 Hough 变换检测方法的性能要好于基于全局图像的归一化灰度 Hough 变换检测方法。这是因为图像经过分割以后尾迹和其他直线的灰度对比度得到了提升, 而尾迹检测正是利用了尾迹的灰度对比度这个特点来进行的。下面从实验数

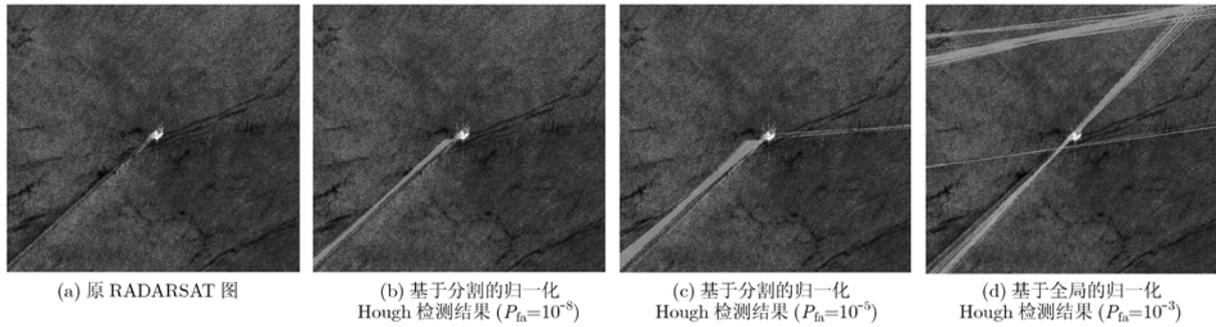


图 5 两种检测方法使用不同的虚警率进行检测比较

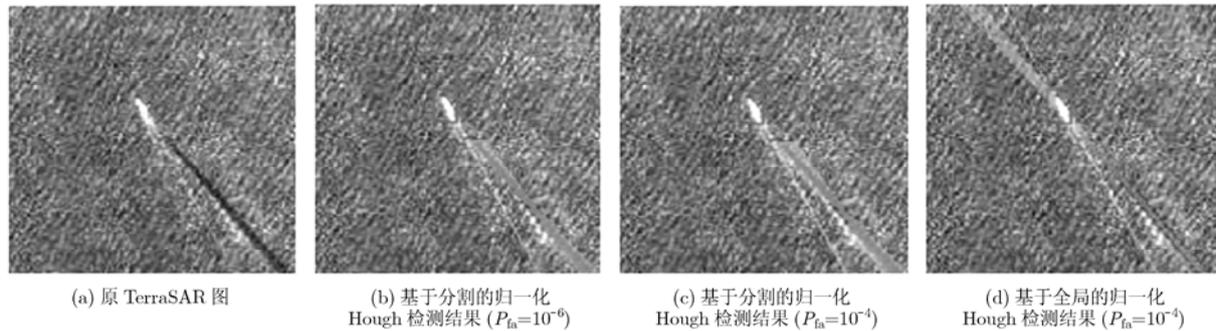


图 6 两种检测方法使用不同的虚警率进行检测比较

据来论证:

两个实验都反映了以下事实:

当使用比较低的虚警率进行检测时, 基于分割的检测算法可以检测出尾迹, 而全局图像的检测算法则检测不出。依据公式  $P_{fa} = 2 \cdot (1 - \Phi(\lambda_T))$  可知, 当使用两个相同较低的虚警率分别应用全局和分割的检测算法进行检测对比时, 此时计算出来的  $\lambda_{T1}$  和  $\lambda_{T2}$  的关系为:  $\lambda_{T1} = \lambda_{T2}$ 。也即两种方法求出的检测门限相同, 本文算法在较低的虚警率时能够检测出尾迹, 这是因为基于分割方法提升了尾迹的对比度, 而全局图像检测算法在较低虚警率时检测不出尾迹, 这是因为尾迹所在直线容易受到尾迹所在杂波部分的影响, 变换到  $\theta-\rho$  平面的点值和其余点的对比度小于分割子图像的对比度, 因而提取不出该点。而本文的基于分割图像进行归一化灰度 Hough 变换检测方法提升了尾迹和其余直线的灰度对比, 因此可以提取出来。

全局图像归一化 Hough 变换检测法检测出来的直线是整条尾迹所在直线, 不能提取出尾迹的端点, 因而不能确定舰船的行驶方向。而本文的算法可以提取出尾迹的端点, 可以确定舰船的行驶方向。这是因为舰船尾迹只在以舰船重心为中心的 4 个子图像中的一个里, 因此提取出来的尾迹图像有端点, 一边是舰船重心, 另一端是尾迹的终点。

虚警率越高, 那么得到的检测门限越高, 因此

虚警就越小, 但是目标有可能会发生漏检, 相反, 虚警率越低, 得到的检测门限越低, 虚警数就越大。

### 4.3 计算效率分析

一个好的算法不仅有好的性能, 而且需要具有较高的运算效率。下面将分析本文算法的预算效率, 并将其与传统的尾迹检测算法进行比较。

本文算法运算过程包括: 分割子图像并将子图像所有直线映射到 Hough 变换域(第 1 步), 根据虚警率提取出变换域的峰值和谷值点(第 2 步), 将提取出的点反映射回图像域得到检测直线(第 3 步)。

而传统的尾迹检测算法的运算过程包括: 将整幅图像映射到  $\theta-\rho$  变换域, 提取出变换域的峰值和谷值点, 将提取出的点反映射回图像域得到检测直线。

假设图像分辨率为:  $N \cdot N$ , 则分割子图像后的 4 个子图像的分辨率为:  $M \cdot M$ , 其中  $M \approx N/2$ , 分割子图像的计算量很小, 可以忽略。将子图像所有直线映射到  $\theta-\rho$  变换域, 变换域的分辨率为:  $180 \cdot \sqrt{2}M$ , 而变换域中的每个点的值是所在直线所有像素灰度值的平均, 这里直线的长度不一, 而同一个角度  $\theta$  的所有长度  $\rho$  参与计算均值的像数数目和为  $M \cdot M$ , 也即变换域中的同一个角度  $\theta$  对应  $M \cdot M$  次加法和  $\sqrt{2}M$  次除法运算, 因此第 1 步的计算量为:  $4 \cdot 180 \cdot M^2 = 720M^2$  次加法和  $4 \cdot 180 \cdot \sqrt{2}M = 720\sqrt{2}M$  次除法运算。第 2 步根据虚警率提取峰值

和谷值点的运算量很小,可以忽略。第3步中假设提取的峰值点和谷值点数目为 $n$ ,则将提取出的点反映射回图像域得到直线,直线判断准则为 $y = ax + b$ ,其中 $a, b$ 是常数,它是提取出的点得到的,则第三步提取直线需经过 $n \cdot M$ 次乘法和加法运算。因此本文算法的总体运算量为 $720M^2 + n \cdot M = 180N^2 + n \cdot N / 2$ 次加法, $720\sqrt{2}M + nM = 360\sqrt{2}N + nN / 2$ 次乘法运算。

同理,对传统的尾迹检测算法进行计算量分析,假设其提取的尾迹数目为 $k$ ,总共需要 $180 \cdot N \cdot N + kN = 180N^2 + kN$ 次加法, $180 \cdot \sqrt{2}N + kN = 180\sqrt{2}N + kN$ 次乘法运算。上述运算都是实数运算。可见,本文算法和传统的尾迹检测算法的计算量相差不大,计算量级均为 $O(N^2)$ 。

综上所述,本文算法具有很好的实用性,计算复杂度不高,可以用于实际工程中。

## 5 结论

本文提出了一种基于图像分割归一化灰度 Hough 变换图像舰船尾迹的恒虚警检测算法。该方法以舰船为中心先分割图像为4个子图像,提高了尾迹在图像中的灰度对比度,提高了检测性能。利用尾迹检测结果可以很好地判断舰船的行驶方向。结合 SAR 海洋图像的特点对归一化 Hough 变换后的变换域进行概率分布建模,实现了恒虚警检测。同时对算法的实用性和运算复杂度进行了分析,分析结果表明本文算法有很好的实用性,适用于工程应用。但是本文是在先检测出舰船的位置后再定位区域进行尾迹检测,因此不适用于隐藏目标的尾迹检测。

## 参考文献

- [1] 陈珊,王军锋. SAR 图像上舰船目标检测的一种新算法[J]. 信息技术, 2008, 4: 118-120.  
Chen Shan and Wang Jun-feng. A new algorithm for ship detection in SAR images[J]. *Information Technology*, 2008, 4: 118-120.
- [2] 种劲松,朱敏慧. SAR 图像窗口 K-分布目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1276-1280.  
Chong Jin-song and Zhu Min-hui. Target detection algorithm of SAR image based on local window K-distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(9): 1276-1280.
- [3] Liao Ming-sheng and Wang Chang-cheng. Using SAR images to detect ships from sea clutter [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 194-198.
- [4] Li Hai-yan and He Yi-jun. Detection of weak ship signals with the optimization of polarimetric contrast enhancement [J]. *High Technology Letters*, 2008, 14(1): 85-91.
- [5] 王大旗,朱敏慧. SAR 图像非线性分布目标检测方法研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(9): 1357-1360.  
Wang Da-qi and Zhu Min-hui. Target detection algorithm of SAR image based on local window K-distribution [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(9): 1357-1360.
- [6] Rey M T, et al. Application of radon transform techniques to wake detection in Seasat-A SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 553-560.
- [7] 汪海洋等. 基于方向极傅里叶频谱2DPCA的尾迹检测[J]. 自动化学报, 2008, 34(9): 1053-1059.  
Wang Hai-yang, et al. Wake detection using 2DPCA of directional polar Fourier spectrum[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(9): 1053-1059.
- [8] 王连亮,陈怀新. 基于递归修正 Hough 变换域的舰船多尾迹检测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(4): 834-837.  
Wang Lian-liang and Chen Huai-xin. Multi-ship wakes detection method based on recursive modified Hough transform field [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 834-837.
- [9] Courmontagne P. An improvement of ship wake detection based on the radon transform [J]. *Signal Processing*, 2005, 85(2): 1634-1654.
- [10] Copeland A C, Ravichandran G, and Trivedi M M. Localized radon transform-based detection of ship wakes in SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 1010-1019.
- [11] Hough P V C. A method and means for recognizing complex patterns [P]. US, Patent 3, 069, 654.
- [12] 种劲松,朱敏慧. 基于归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像舰船尾迹检测算法[J]. 中国图形图像学报, 2004, 9(2): 146-150.  
Chong Jin-song and Zhu Min-hui. Ship wake detection algorithm in SAR image based on normalized grey level Hough transform[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2004, 9(2): 146-150.

艾加秋: 男, 1985年生, 博士生, 从事信息和信号处理方面的研究。

齐向阳: 男, 1974年生, 研究员, 硕士生导师, 从事星载 SAR 系统仿真和高分辨率成像技术方面的研究。

禹卫东: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 从事合成孔径雷达信号处理技术的研究。

刘凡: 男, 1984年生, 博士生, 从事成像技术和信号处理方面的研究。