

基于归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像 舰船尾迹检测算法

种劲松 朱敏慧

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室, 北京 100080)

摘要 舰船尾迹检测作为近年来 SAR 图像海洋应用的一个重要方面而受到关注。目前大多数研究都是利用 Radon 变换作为数学工具, 结果得到增强的是尾迹特征, 而不是尾迹的端点。从提取尾迹的端点坐标出发, 在传统 Hough 变换算法基础上进行改进, 提出了基于归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像舰船尾迹检测算法, 并推导出尾迹端点反演算法, 同时自动提取舰船的航速, 取得了较好的实验结果。

关键词 Hough 变换 合成孔径雷达 尾迹检测

中图分类号: TP751 TN957 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)02-0146-05

Ship Wake Detection Algorithm in SAR Image Based on Normalized Grey Level Hough Transform

CHONG Jin-song, ZHU Min-hui

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract As one of the important applications in Synthetic Aperture Radar (SAR) images, ship wake detection has been received considerable attentions in the area of marine remote sensing. Recently, most researches on ship wake detection depend on the mathematical tool of Radon transform. However, the result of Radon transform is the image with which wake character being enhanced but not the end points of the wakes. In order to calculate the ship's velocity, the aim of the research is to detect the end points of ship wakes. Found on the improvement of the conventional Hough transform, a normalized Hough transform algorithm based on grey level is proposed. It can make the detection result independent of the noise and the different lengths of different lines using the normalization technology. The steps of algorithm are presented. The expression of the wake's end points is derived. On the other hand, the calculation algorithm of ship's moving velocity is presented. Both the time complexity and space complexity of the normalized Hough transform and the conventional Hough transform are analyzed respectively. This algorithm is applied to the ship wake detection in SAR image. The experiments obtained good results and can extract ship's velocity automatically.

Keywords Hough transform, synthetic aperture radar, wake detection

1 引言

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, 在海洋遥感领域受到高度重视, 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。1978 年, 在 SEASAT 卫星的 SAR 图像上, 人们第一次观测到海洋表面延伸 20km 长的舰船尾迹^[1], 自此, 科学家们开始对 SAR 图像舰船尾迹表

示关注并进行研究。舰船尾迹检测具有以下三方面的作用^[2,3]:(1)尾迹比舰船更大、更容易区分;(2)尾迹能更好地估计舰船的实际位置;(3)尾迹可以估计运动舰船的航速和航向。

近年来,在 SAR 图像尾迹检测方面的研究很多,主要是基于 Radon 变换^[2~4]。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,直到如今,大多数研究仍以 Radon 变换为主要数学工具。

但基于 Radon 变换的算法均存在一个问题,即算法的结果是图像,而非具有端点坐标的尾迹特征。本文算法的出发点与文献^{[2]~[4]}等不同,研究目的是提取尾迹端点坐标,从而实现自动计算舰船航速,即算法的结果是得到具有尾迹端点坐标的线性特征。因此,本文提出使用归一化灰度 Hough 变换,其检测过程是从图像空间映射到 Hough 变换空间,再提取线性特征。

2 归一化灰度 Hough 变换

自从 1962 年 Paul Hough 在其专利文献中引入直线检测方法以来,二值图像 Hough 变换在图像处理和计算机视觉中得到越来越多的应用,例如直线检测、圆或椭圆的检测、任意形状区域的边界提取、二维或三维运动参数的估计等。

2.1 标准 Hough 变换

传统 Hough 变换应用于二值图像,被称为标准 Hough 变换。

记 $N \times N$ 二值图像 (x_i, y_j) 像素的灰度值为 $f(x_i, y_j)$ 。图像空间中的直线用极坐标形式可以表示为

$$\rho = x_i \cos \theta + y_j \sin \theta$$

$$\rho \in \left[-\frac{\sqrt{2}}{2}N, \frac{\sqrt{2}}{2}N \right], \theta \in [0, \pi), i, j = 1, \dots, N$$

ρ - θ 参数空间中,设 θ 在 $[0, \pi)$ 间均匀地取 M 个离散值, ρ 的采样个数为 K ,则直线检测的标准 Hough 变换的算法描述为

(1) 初始化参数空间 $H(\rho_k, \theta_m)$

$$H(\rho_k, \theta_m) = 0, k = 0, 1, \dots, k-1; m = 0, \frac{\pi}{M}, \dots, \pi$$

(2) 计算参数空间中的值

for($k=0$ to $K-1$)

for($m=0$ to π step= $\frac{\pi}{M}$)

for($i=0$ to $N-1$)

for($j=0$ to $N-1$)

if($f(x_i, y_j) = 1$) then

$$\{\rho_k = x_i \cos \theta_m + y_j \sin \theta_m$$

$$H(\rho_k, \theta_m) = H(\rho_k, \theta_m) + 1\}$$

Hough 变换后,图像平面内的直线对应于变换平面内的一个峰值,从而图像平面中寻找直线特征的问题就转化为在变换平面中寻找峰值的问题。

2.2 灰度 Hough 变换

标准 Hough 变换是针对二值图像进行的,对于灰度图像必须首先选择阈值将图像二值化后再进行 Hough 变换。然而,对于舰船尾迹 SAR 图像来说,无法通过确定自适应的阈值来将图像二值化,因为 SAR 图像上舰船尾迹可能比海洋背景亮,也可能比海洋背景暗,也由于 SAR 图像相干斑噪声的严重影响。

因此,设想在进行 Hough 变换过程中,直接使用图像灰度信息。在标准 Hough 变换基础上进行修改,成为灰度 Hough 变换,算法描述为

(1) 初始化参数空间 $H(\rho_k, \theta_m)$

$$H(\rho_k, \theta_m) = 0, k = 0, 1, \dots, K-1; m = 0, \frac{\pi}{M}, \dots, \pi$$

(2) 计算参数空间中的值

for($k=0$ to $K-1$)

for($m=0$ to π step= $\frac{\pi}{M}$)

for($i=0$ to $N-1$)

for($j=0$ to $N-1$)

$$\{\rho_k = x_i \cos \theta_m + y_j \sin \theta_m$$

$$H(\rho_k, \theta_m) = H(\rho_k, \theta_m) + f(x_i, y_j)\}$$

2.3 归一化灰度 Hough 变换

由于图像上位于不同位置直线的像素点数各不相同(如图 1 所示,直线①与直线②长度不同),使得图像中的不同直线对于 Hough 变换空间的贡献不均匀(即累加数目不同),再加上相干斑噪声的严重影响,往往使得检测结果不正确。

为此,在灰度 Hough 变换算法基础上进行改进,引入直线长度统计空间,用于将参数空间归一化,从而成为归一化灰度 Hough 变换,算法描述为

(1) 初始化参数空间 $H(\rho_k, \theta_m)$ 和直线长度统计空间 $L(\rho_k, \theta_m)$

$$H(\rho_k, \theta_m) = 0, k = 0, 1, \dots, K-1; m = 0, \frac{\pi}{M}, \dots, \pi$$

$$L(\rho_k, \theta_m) = 0, k = 0, 1, \dots, K-1; m = 0, \frac{\pi}{M}, \dots, \pi$$

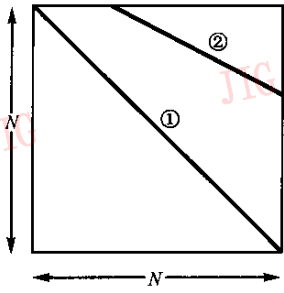


图1 图像空间中不同位置直线上像素点数不同

(2) 计算参数空间和直线长度统计空间中的值

for ($k=0$ to $K-1$)

for ($m=0$ to π step $=\frac{\pi}{M}$)

for ($i=0$ to $N-1$)

for ($j=0$ to $N-1$)

$\{\rho_k = x_i \cos \theta_m + y_j \sin \theta_m$

$H(\rho_k, \theta_m) = H(\rho_k, \theta_m) + f(x_i, y_j)$

$L(\rho_k, \theta_m) = L(\rho_k, \theta_m) + 1\}$

(3) 对参数空间中的值进行归一化

for ($k=0$ to $K-1$)

for ($m=0$ to π step $=\frac{\pi}{M}$)

$\{H(\rho_k, \theta_m) = H(\rho_k, \theta_m) / L(\rho_k, \theta_m)\}$

3 基于归一化灰度 Hough 变换的尾迹检测算法

基于归一化灰度 Hough 变换的舰船尾迹检测算法, 对于每个舰船目标, 执行:

(1) 以舰船目标为中心, 以二倍尾迹长度为边长, 确定含有舰船目标及其尾迹的图像方窗;

(2) 在图像方窗中, 将舰船目标上的像素值用背景均值来代替, 其目的是使舰船目标的像素值不能影响到尾迹检测;

(3) 对方窗进行归一化灰度 Hough 变换, 在变换空间中查找峰值或谷值;

(4) 根据峰值或谷值的 (ρ, θ) , 反演出尾迹端点坐标并计算舰船航速。

3.1 尾迹端点坐标反演

在 Hough 变换空间中找到峰值或谷值对应的 (ρ, θ) 后, 反演尾迹所在直线的端点坐标 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 的算法如下:

若 $\theta = \frac{\pi}{2}$ (即垂直直线), 则令 $(x_1, y_1) = (\rho, 0)$,

$(x_2, y_2) = (\rho, N-1)$, 否则

(1) 令 $x_1=0, x_2=N-1$, 则

$y_1 = (\rho - x_1 \cos \theta) / \sin \theta, y_2 = (\rho - x_2 \cos \theta) / \sin \theta;$

(2) 检查 y 坐标值是否出界

若 $y_1 < 0$, 则令 $y_1 = 0$; 若 $y_2 < 0$, 则令 $y_2 = 0$;

若 $y_1 > N-1$, 则令 $y_1 = N-1$; 若 $y_2 > N-1$, 则

令 $y_2 = N-1$;

(3) 如果 y 坐标改变, 则重新计算 x 坐标值

$x_1 = (\rho - y_1 \sin \theta) / \cos \theta$

$x_2 = (\rho - y_2 \sin \theta) / \cos \theta$

上面算法反演出尾迹的两个端点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$, 并非是尾迹的实际起点和结束点, 而是尾迹所在直线与图像方窗边缘的两个交点。为了计算舰船航速并且清楚地显示实际尾迹, 还需要求出舰船重心到尾迹所在直线的垂足。

如图 2 所示, 设舰船重心位置为 (x_0, y_0) , 求重心到尾迹的垂足位置 (α, β) 。

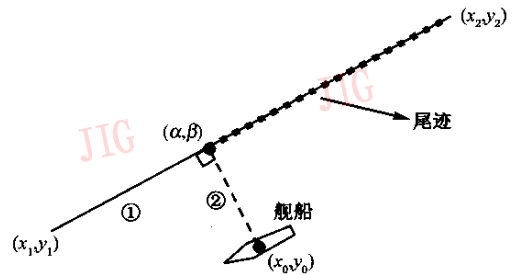


图2 舰船重心与尾迹之间的示意图

尾迹所在直线(即图 2 中直线①)的两点式方程为

$$\frac{y - y_1}{x - x_1} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (1)$$

舰船重心点与垂足点之间构成的直线(即图 2 中直线②)两点式方程为

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{\beta - y_0}{\alpha - x_0} \quad (2)$$

直线 $A_1x + B_1y + C_1 = 0$ 与直线 $A_2x + B_2y + C_2 = 0$ 垂直的条件为

$$A_1A_2 + B_1B_2 = 0 \quad (3)$$

因此, 式(1)和式(2)系数分别代入式(3), 可得到关系式

$$(y_2 - y_1)\beta + (x_2 - x_1)\alpha - (x_2 - x_1)x_0 - (y_2 - y_1)y_0 = 0 \quad (4)$$

由于 (α, β) 在直线①上, 因此将 (α, β) 代入式(1), 得到

$$(y_2 - y_1)\alpha + (x_2 - x_1)\beta + (x_2 - x_1)y_1 - (y_2 - y_1)x_0 = 0 \quad (5)$$

通过求解式(4)和式(5)的联立方程组, 可以解

出 (α, β) 的解析表达为

$$\alpha = \frac{(x_2 - x_1)^2 x_0 + (y_2 - y_1)^2 x_1 + (x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(y_0 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{(y_2 - y_1)^2 y_0 + (x_2 - x_1)^2 y_1 + (x_2 - x_1)(y_2 - y_1)(x_0 - x_1)}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

求出垂足 (α, β) 后,实际尾迹应该为 (x_1, y_1) 与 (α, β) 之间的线段,或为 (x_2, y_2) 与 (α, β) 之间的线段。可以通过分别统计这二个线段的均值来判断。设 (x_1, y_1) 与 (α, β) 线段的均值为 Avg_1 , (x_2, y_2) 与 (α, β) 线段的均值为 Avg_2 。若 Hough 空间中最找到最值为峰值(对应于比背景亮的舰船尾迹),则 Avg_1 与 Avg_2 中较大的线段为实际尾迹;若 Hough 空间中最找到最值为谷值(对应于比背景暗的舰船尾迹),则 Avg_1 与 Avg_2 中较小的线段为实际尾迹。

3.2 航速计算

根据运动目标 SAR 成像特点,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,即尾迹的尖端。运动舰船的航速 V_{ship} 可以通过舰船方位向的位移 d 来计算^[5]

$$V_{ship} = \frac{dV_{sat}}{H \tan \theta \cos \varphi} \quad (8)$$

其中, φ 为舰船运动矢量与距离向之间的夹角, H 为 SAR 平台的高度, θ 为入射角, V_{sat} 为卫星速度,舰船方位向位移 d 为舰船重心 (x_0, y_0) 与垂足 (α, β) 的距离,即

$$d = \sqrt{(x_0 - \alpha)^2 + (y_0 - \beta)^2} \quad (9)$$

4 实验结果与分析

图 3 是 1996 年 4 月 3 日获得的 ERS-2 图像,从图中可以看出舰船后面存在十分明显的湍流尾迹。使用目标检测算法检测出的舰船目标显示在图 4 方框之中,使用尾迹检测算法得到的尾迹显示为图 4 中的直线。

将 ERS-2 卫星的高度、速度、入射角和计算出的舰船位移 d 代入式(8),可以算出二只舰船航速分别为 3.75m/s 和 7.2m/s。

4.1 算法复杂性分析

很明显,对于 $N \times N$ 二值图像,标准 Hough 变换和灰度 Hough 变换的算法时间复杂度为,空间复杂度为 $O(N^2)$,其中, M 为极坐标参数 θ 量化的个数, K 为极坐标参数 ρ 的量化个数。

归一化灰度 Hough 变换的算法,时间复杂度为

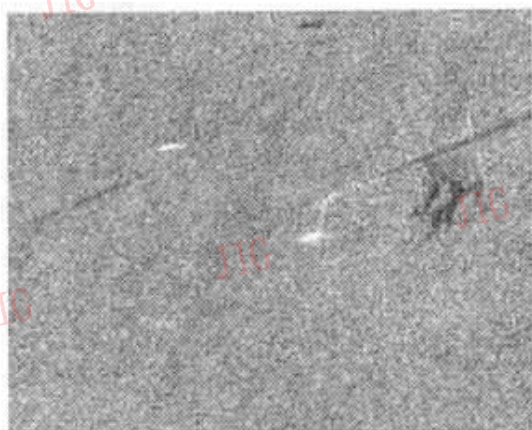


图 3 ERS-2 舰船及其尾迹图像

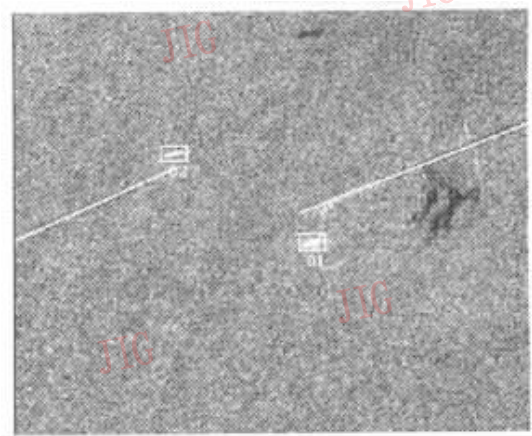


图 4 舰船目标及尾迹检测结果

$O(KMN^2 + MK)$, 空间复杂度为 $O(2N^2)$ 。尽管算法的时间和空间复杂度都增加了,但使用该算法取得了预期效果。另一方面,由于图像边长 N 事先确定,因此直线长度统计空间 L 中的值也可以事先确定。在对同等边长图像进行变换时,直线长度统计空间 L 不必再次进行计算,则可以节省计算时间。

4.2 基于归一化灰度 Hough 变换算法与基于 Radon 变换的算法比较

基于 Radon 变换算法得到的是尾迹特征增强的二维图像,有利于人眼方便地解译和识别,相当于图像处理中的图像增强过程;而本文方法提取的是具有尾迹端点坐标的线性特征,从而用于自动计算舰船航速,分析舰船航向,相当于图像处理中的特征提取,具有自动估算舰船运动参数的优点。

5 结论

本文提出基于归一化灰度 Hough 变换的 SAR

图像尾迹检测算法,将标准 Hough 变换改进为归一化灰度 Hough 变换。该算法可以反演尾迹端点,并自动提取舰船航速。该算法在对尾迹检测时,只有尾迹相对于海面背景比较明显,才能在 Hough 变换空间中比较容易地找到最值,因此在算法使用之前需要进行图像预处理。该算法在 SAR 图像尾迹自动检测应用中取得了较好的结果,具有实际应用价值。

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 Rey M T, Tunaley J K, Folinsbee J 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):553~360.
- 3 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.
- 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 Lyden J D. Analysis of synthetic aperture radar imagery of surface ship wakes[A]. In: Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium'86 [C], Switzerland, Zurich, 1986:801~805.



种劲松 1969 年生,1991 年获吉林大学计算机科学系学士学位,2000 年获北京航空航天大学模式识别与智能系统专业硕士学位,2003 年获中国科学院研究生院信号与信息处理专业博士学位。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 1943 年生,研究员,博士生导师,1965 年获中国科技大学无线电电子学系学士学位。主要从事 SAR 技术领域的研究工作。