

# 星载 SAR 图像船舶及航迹检测

杨文<sup>1</sup> 孙洪<sup>1</sup> 徐新<sup>1</sup> 徐戈<sup>1</sup>

(1 武汉大学电子信息学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

**摘要:** 研究了星载 SAR 图像中船舶目标及其航迹的检测提取方法。通过扩展分形特征检测船舶目标, 在目标周围运用局部 Radon 变换检测航迹。实验结果表明, 本文方法对于静止和运动船舶目标的检测都具有较强的鲁棒性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 目标检测; 扩展分形; Radon 变换  
**中图分类号:** TP751; P236

在一定的海面风速和海况条件下, 星载 SAR 能较容易地获取海面船舶位置、大致航行方向和速度等信息。这些信息正在用于海洋军事、航道监测和遇难船舶救助等方面。SAR 图像中包含有很多有关产生航迹的船舶本身的有用信息, 充分提取和利用这些信息尤为重要。首先, 由于船舶目标在 SAR 图像中是以亮斑的形式出现的, 因此, 可以从检测到的亮斑的大小和图像的分辨率来估计目标的大小; 其次, 可以通过航迹确定船舶航行的大致方向。另外, 还可以通过多种途径来对船舶的航行速度进行估计, 但以上这些工作的前提是要检测到船舶及其航迹<sup>[1]</sup>。

## 1 船舶目标检测

在 SAR 图像中, 海洋背景通常很暗, 而船舶目标和背景的对比很强, 一般很少有背景像素能达到船舶目标的亮度, 因此, SAR 图像中的船舶可看作点目标。能否从海洋杂波背景中检验出这些点目标, 不仅与点目标的性质有关, 还与海洋背景的特性和图像噪声有关。一般的目标检测算法如方差法、恒虚警法等, 都是基于灰度差异的。但是当背景噪声较强时, 待检测的目标几乎淹没于噪声和复杂的背景之中。这时, 若把目标检测的着眼点放在目标本身, 则会由于目标信息的相对贫乏而使检测难以进行。但目标的存在常常会使其所在局部区域的纹理较之包含该区域的更大区

域的纹理发生较大改变, 因此, 可运用纹理分析的方法从纹理差异中找到目标。基于这一思想, 本文采用一种利用扩展分形特征来实现目标自动检测的方法, 它具有定位精确、算法简单、抗噪能力强和运算速度快等特点。

扩展分形 (extended fractal, EF) 特征是一个用作目标检测的统计量, 它由多尺度 Hurst 参数派生而来。文献 [2] 认为, 分数布朗运动 (fractional Brownian motion, fBm) 模型能够模拟相当多的自然纹理图形, 而 Hurst 参数控制了 fBm 过程的实现, 它与 fBm 曲面的可视粗糙度相关, 使得用模型方法来量化纹理粗糙度的特性成为可能。类似于 Hurst 参数与粗糙度的联系, 多尺度 Hurst 参数提供了多尺度粗糙度的信息, 可以用来量化在不同尺度下图像表征出来的纹理粗糙程度<sup>[3]</sup>。EF 特征的基本计算过程为: 给定一幅图像  $I[m, n]$ , 其  $x$  方向和  $y$  方向的 EF 特征分别是对  $x$  方向和  $y$  方向的图像数值延迟  $2\Delta$  和  $4\Delta$  后求增量平方均值的对数比<sup>[4]</sup>。其表达式为:

$$\begin{aligned} F^x[m, n] &= \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \frac{f_{\Delta}^x[m, n]}{f_{2\Delta}^x[m, n]} \right\} \\ F^y[m, n] &= \frac{1}{2} \log_2 \left\{ \frac{f_{\Delta}^y[m, n]}{f_{2\Delta}^y[m, n]} \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $f^x, f^y$  分别为  $x, y$  方向的结构函数,

$$f_{\Delta}^x[m, n] = \sum_{i=-w}^w \sum_{j=-w}^w |I[m + \Delta + i, n + j] - I[m - \Delta + i, n + j]|^2$$

$$f^{\Delta}[m, n] = \sum_{i=-w}^w \sum_{j=-w}^w |I[m+i, n+\Delta+j] - I[m+i, n-\Delta+j]|^2 \quad (2)$$

EF 特征计算中隐含的滑动窗口为  $W \times W$ , 且有  $w = (W-1)/2$ 。最小延迟  $\Delta$  与窗口尺度的关系为:

$$\Delta_{\min} = \frac{W-1}{4} \quad (3)$$

式中, 参数  $\Delta$  必须是整数, 如果考虑 EF 特征具有的各向同性, 则图像中心点的 EF 特征可以用两个坐标轴方向特征的简单平均表示为:

$$F[m, n] = (F^x[m, n] + F^y[m, n])/2 \quad (4)$$

假设方形目标尺寸为  $S \times S$ , 为了保证在含有目标的图像点上求得的 EF 特征值最大, 目标尺寸与  $\Delta$  应大致满足以下关系:

$$S = 2\Delta - 1 \quad (5)$$

设所得的 EF 特征图像为  $E[m, n]$ , 由门限检测过程即可得到检测结果  $R[m, n]$  为:

$$R[m, n] = \begin{cases} 1, & E \in T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $T = [\text{mean}(E) - \sigma^2, \text{mean}(E) + \sigma^2]$  为阈值区间, 其中  $\text{mean}(E)$ 、 $\sigma$  分别为 EF 特征图像的均值和方差。

由上述计算过程可见, EF 特征与滑动窗口尺度、延迟长度、目标尺寸等参数有关。如果已知目标类型(即可估计目标的尺寸参数), 就可通过训练过程来得到合适的滑窗和延迟参数, 从而得到目标的最大 EF 特征数值以及最佳检测门限。EF 特征提取方法特别适合于对特定大小目标的检测。

图 1(a) 是一个运动的船舶目标, 在目标后面有很明显的“V”形航迹, 图 2(a) 是多个静止的船舶目标。从图 1(b) 和图 2(b) 的检测结果(窗口大小为  $W=25$ , 检测阈值为  $T=0.2$ ) 可看出, 感兴趣目标都被检测出来, 但目标存在重影, 这是由于式(2)中的取绝对值运算和延迟尺度  $\Delta$  共同作用的结果。其中的取绝对值运算则是分维方法对目标的一种关联测度, 它是分维方法对目标形态的一种本质反映; 延迟尺度  $\Delta$  则影响重影的距离。

一个好的检测算子应从目标的辨别力、速度和适应性 3 个方面来加以评估。本文选取了若干幅含船舶目标的 SAR 图像, 分别采用方差法、双参数恒虚警法(constant false alarm rate, CFAR)和扩展分形法进行检测。实验结果表明, EF 特征对纹理和灰度对比度都是敏感的, 而方差、恒虚警算子等只与对比度有关; 从速度上来说, EF 特征和双参数恒虚警法特征的检测速度相当; 从适应

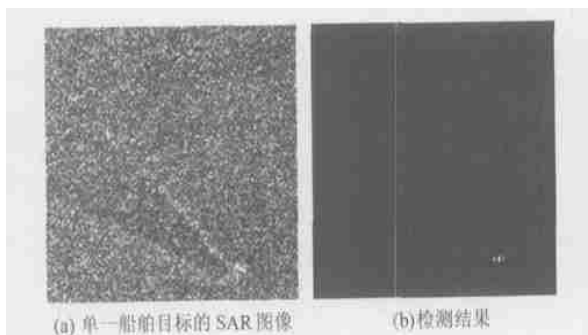


图 1 单一船舶目标检测

Fig. 1 Detection of the Single Ship

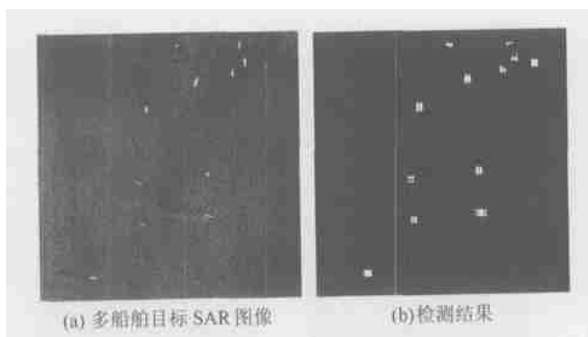


图 2 多船舶目标检测

Fig. 2 Detection of Several Ships

性来讲, EF 特征适用范围更广。

## 2 航迹检测

尽管船舶在水体中行进时通常产生“V”字形的航迹, 但其在 SAR 图像中的实际表现却是变化多样的<sup>[1]</sup>。

航迹模式可以分成几个部分, 有的部分在 SAR 图像中并不都是可见的。然而, 航迹在 SAR 图像中通常表现为线特征。这些线段不仅有有限的长度, 还有宽度, 它们通常比背景明亮或晦暗, 有时并不是一条直的线段。另一个很重要的考虑是 SAR 图像特有的 Speckle 噪声。因此, 本文方法通过识别这些线特征来定位船舶的航迹。

大多数航迹检测方法是先对 SAR 数据预先滤波, 使得航迹特征更加清楚, 再运用线特征检测算法, 但这样检测出的线特征中有相当多的曲线。笔者尝试不预先滤波, 而利用 Radon 变换直接在特征空间进行线检测。Radon 变换<sup>[5]</sup>是一种全局的变换, 它不能区分长直线和短直线, 也不能定位线段的端点。笔者通过使用局部 Radon 变换来解决这个问题, 它不是沿着穿过整幅图像的直线积分, 而是沿着设定长度的线段积分<sup>[6]</sup>, 如图 3 所示。

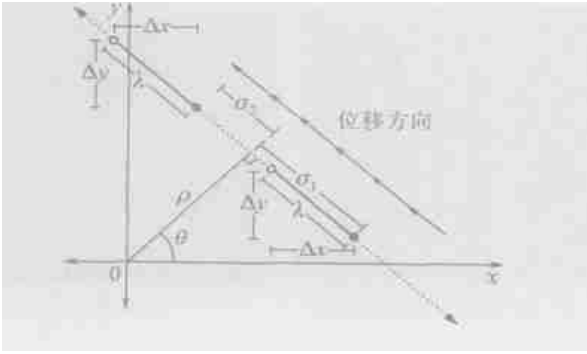


图3 局部 Radon 变换

Fig. 3 Localized Radon Transform

局部 Radon 变换表示为:

$$R_{Loc}\{f(\theta, \rho, \sigma)\} = \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} f(x, y) \cdot \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dy dx \quad (7)$$

式中,  $x_{min} = \min(\rho \cos \theta - \sigma \sin \theta, \rho \cos \theta - (\sigma + \lambda) \sin \theta)$ ;  $x_{max} = \max(\rho \cos \theta - \sigma \sin \theta, \rho \cos \theta - (\sigma + \lambda) \sin \theta)$

$\sin \theta$ );  $y_{min} = \rho \sin \theta + \sigma \cos \theta$ ;  $y_{max} = \rho \sin \theta + (\sigma + \lambda) \sin \theta$ ;  $\sigma$  是平移参数;  $\lambda$  是线段积分的长度, 表达了将被最优匹配的线段特征长度。附加的参数使得现在是三维的空间,  $\sigma$  代表了线段积分沿由  $\rho$  和  $\theta$  确定的直线的当前位置。当线段积分沿着这条直线平移时,  $\sigma$  从  $-d/2$  变到  $d/2 - \lambda$ 。当  $-\pi/2 < \theta < 0$ ,  $x_{min} = \rho \cos \theta - \sigma \sin \theta$  时,  $x_{max} = \rho \cos \theta - (\sigma + \lambda) \sin \theta$ ; 当  $0 < \theta < \pi/2$  时, 则相反。

对每一个角度  $\theta (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2)$  作如下计算: ① 对图像作局部 Radon 变换; ② 计算沿  $\rho$  方向条带的方差; ③ 在变换域取阈值; ④ 在变换域作细化操作; ⑤ 重建图像域的直线。

图4给出了模拟 SAR 图像中直线段的局部 Radon 变换的检测过程。

图5(a)中有两艘运动的船舶, 其中一艘的航迹只有一个明显的条带, 图5(b)是其局部 Radon 变换检测结果。

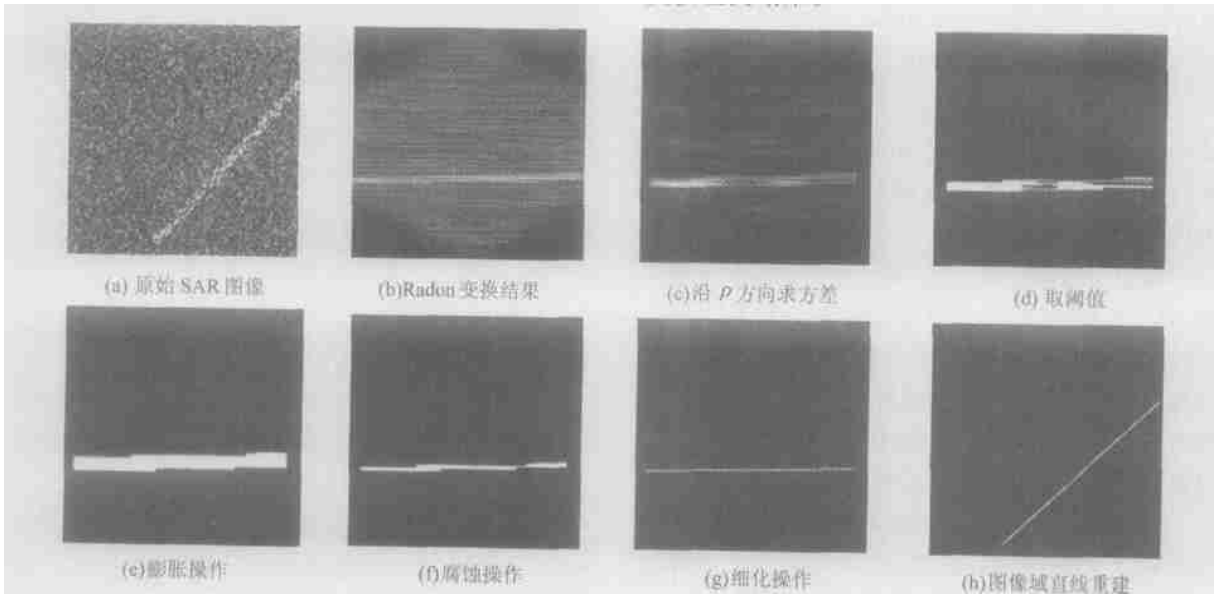


图4 模拟 SAR 图像沿 45° 方向 Radon 变换检测

Fig. 4 Radon Transform Along 45 Degree in Simulated SAR Image

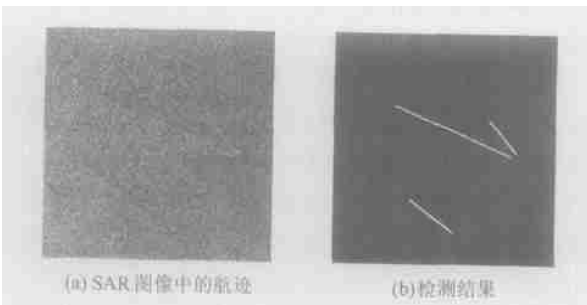


图5 SAR 图像中的航迹和检测结构

Fig. 5 Wakes in SAR Image and Its Detection Result

### 3 联合检测

很多学者分别研究过 SAR 图像的船舶和航迹, 但他们大多数集中在检测航迹, 因为航迹通常比船舶本身要大而且更清楚。由于很多船舶(如静止船舶)没有航迹, 而且对于更大的入射角, 如 RADARSAT, 航迹更加不明显, 且船舶目标本身也比 ERS1 中清楚得多。因此, 笔者决定先检测船舶, 然后再在船舶周围检测航迹。图6是检测方案, 首先进行场景分割, 在分割出的海域里检测

船舶目标, 然后在船舶目标四周开窗, 检测是否有航迹存在。如船舶目标和航迹均存在, 则判为运动船舶, 此时可进一步求出其大致航向及速度; 如只有船舶目标存在, 则初步判为静止船舶, 此时还需根据其他知识进行进一步判断。图 7 给出了图 5 中的船舶及航迹联合检测的结果。

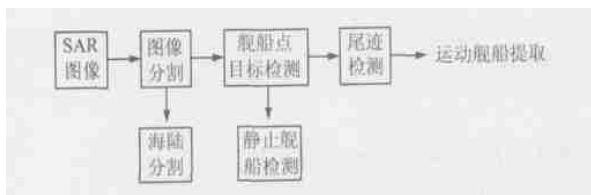


图 6 SAR 图像运动船舶联合检测框图

Fig. 6 Framework of Combined Detection of Moving Ships in SAR Image

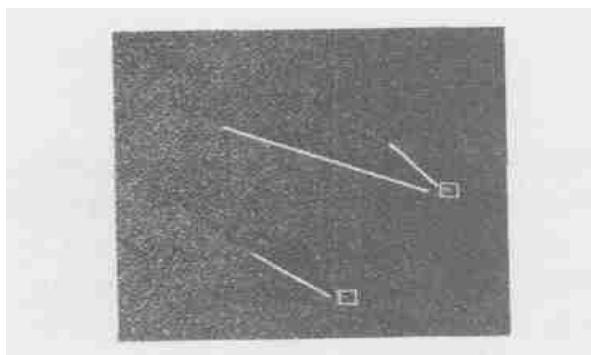


图 7 SAR 图像中船舶联合检测结构

Fig. 7 Combined Detection of Moving Ship in SAR Image

## 参 考 文 献

- 1 Eldhuset K. An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Spaceborne SAR Imagery in Coastal Regions. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 1 010~1 019
- 2 Mandelbrot B B. *Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: Freeman W H, 1982
- 3 Kaplan L M, Jayko C C. Texture Roughness Analysis and Synthesis via Extended Self-similar (ESS) Model. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17: 1 043~1 056
- 4 Kaplan L M. Improved SAR Target Detection via Extended Fractal. *IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 436~451
- 5 Rey M T, Tunaley J K, Folinsbee J T. Application of Radon Transform Techniques to Wake Detection in Seasat-A SAR Imagery. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(4): 553~560
- 6 Copeland A C, Ravichandran G, Trivedi M M. Localized Radon Transform-based Detection of Ship Wakes in SAR Imagery. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1): 35~44

第一作者简介: 杨文, 博士生。现主要从事 SAR 图像处理与分析及其应用研究。

E-mail: yangwenwu@263.net

## Detection of Ships and Ship Wakes in Spaceborne SAR Imagery

YANG Wen<sup>1</sup> SUN Hong<sup>1</sup> XU Xin<sup>1</sup> XU Ge<sup>1</sup>

(1 School of Electronics Information, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** This paper discusses the detection of ships and ship wakes, and proposes a scheme with a series of steps for combined detection. The extended fractal (EF) feature is a detection statistic, which can greatly enhance the detection probability. The experiments show that the EF features provide improved detections performance. The Radon transform is commonly used in algorithms for detecting linear features in imagery. The results demonstrate the ability of this approach to successfully detect the linear components of ship wakes visible in SAR imagery.

**Key words:** SAR; target detection; extended fractal; Radon transform

About the first author: YANG Wen, Ph. D candidate, majors in SAR image processing and analysis.

E-mail: yangwenwu@263.com

(责任编辑: 平子)