

一种基于斑点抑制的 SAR 图像舰船航迹检测算法¹

邹焕新 蒋咏梅 匡纲要 郁文贤

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要 该文分析了合成孔径雷达 (SAR) 图像中舰船航迹的特性和斑点噪声模型及其局部统计特性, 在此基础上, 提出了一种先基于小波变换进行斑点噪声抑制, 再基于 Radon 变换进行航迹检测的方法. 对数据处理的结果表明, 该方法较直接对 SAR 图像应用 Radon 变换能更有效、准确地检测到 SAR 图像中的舰船航迹.

关键词 SAR 图像, 舰船航迹, 斑点噪声, 小波变换, Radon 变换

中图分类号 TN951

1 引 言

自从 1978 年美国 SeaSAT SAR 卫星首次观测到舰船航迹图像后, 舰船航迹雷达特征信号作为舰船目标检测和分类的一种方式受到了广泛的关注^[1]. 海洋波之所以能在 SAR 图像中被观测到, 主要是由于它们的倾斜调制 (Tilt modulation) 和流体力学调制 (Hydrodynamic modulation) 两种调制机制对雷达后向散射截面作用的结果, 亦即所谓的真实孔径雷达 (RAR) 调制. 检测航迹模式比直接检测舰船本身具有更多的优点: 航迹模式具有更大更易于区分的特征信号, 并且可以获得舰船真实位置的估计, 此外, 通过检测航迹可以得到舰船的有关信息, 如船速、航向、舰船尺寸等^[2].

在海面上运动的舰船会产生具有“V”字形线性特征的波模式, 在一定条件下, 这些波模式在舰船后面可以延伸至几千米甚至几十千米. 由于 SAR 传感器观测方向的不同、舰船尺寸和速度的不同以及海况和风速与风向条件的变化, 不是所有这些波模式分量 (如图 1) 都可以在每一个星载 SAR 海洋图像中观测到, 并且在 SAR 图像中舰船航迹波模式的实际外观也可能差别很大. 然而, 在 SAR 图像中航迹分量通常表现为线性特征, 可能是亮线, 也可能是暗线. 由于 SAR 的相干成像机制导致了斑点噪声的存在, 影响了图像质量, 因此, 航迹检测是通过在带有噪声的 SAR 图像中检测这些线性特征来实现的.

现在有很多方法可用于检测舰船航迹线性特征, 但它们都不同程度地存在一些局限, 如直接基于 Radon 变换的航迹检测方法^[3], 在 SAR 图像信噪比 (SNR) 较低的情况下检测结果很差; 又如基于局部 Radon 变换的航迹检测方法^[4], 虽然可以给出航迹的端点位置, 但算法复杂, 计算量也较大; 再如基于曲线扫描的航迹检测方法^[5], 由于扫描中心难以确定, 且扫描半径和扫描步长也是可变的, 若这些扫描参数选取不当, 将导致计算量非常大. 本文针对低信噪比 (斑点噪声污染严重) 情况下的 SAR 图像, 提出了一种基于小波变换和 Radon 变换的航迹检测方法, 小波变换用于 SAR 图像中斑点噪声的抑制和航迹线性特征的增强, Radon 变换则用于在斑点抑制后的图像中实现线性航迹的检测, 这使得检测过程更有效, 检测结果更为准确.

2 舰船航迹模式特性

美国密歇根环境研究所的研究人员早在 80 年代就已对舰船航迹产生的机制进行了分析,

¹ 2001-11-03 收到, 2002-12-25 改回

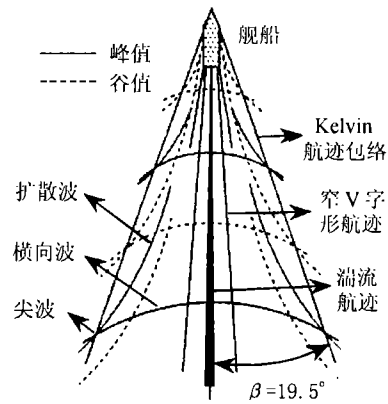


图 1 航迹波模式组成分量几何关系图

对不同的海况条件和不同的成像条件下能够得到的 SAR 海洋图像中的舰船航迹模式进行了分类, 并为海洋遥感界普遍接受。舰船产生的航迹一般可分为 3 类: (1) 由舰船直接产生的表面波航迹, 它又可以分为窄 V 字形航迹和典型的 Kelvin 航迹; (2) 湍流和漩涡航迹; (3) 舰船产生的内波。航迹波模式组成分量几何关系如图 1 所示 (未示出内波分量)。从图中可以看出, 窄 V 字形航迹、Kelvin 航迹和湍流航迹均具有明显的线性特性, 对航迹的检测也正是基于这一特性。

3 SAR 图像斑点噪声模型

SAR 是一种主动式的微波传感器, 由于采用相干波成像方式, 因此, SAR 图像不可避免地会受到斑点噪声的影响。SAR 图像中的斑点噪声是一种乘性噪声, 它表现为图像灰度的剧烈变化, 即在 SAR 图像中的同一片均匀区域, 有的分辨单元呈亮点, 有的则呈暗点, 斑点噪声的存在降低了 SAR 图像的空间分辨率, 隐藏了图像的精微结构, 使 SAR 图像的可解译性变差。含有乘性噪声的图像具有区域越亮、噪声越强的特性。噪声模型可以表示为

$$g_{ij} = f_{ij}v_{ij} \quad (1)$$

其中 f_{ij} 为图像信号, v_{ij} 为斑点噪声。根据文献 [6], 斑点噪声服从均值为 1, 方差为 σ_v^2 的负指数分布。Lee 在文献 [7] 中指出, (1) 式的最优线性近似可以表示为

$$g_{ij} = \bar{v}f_{ij} + \bar{f}(v_{ij} - \bar{v}) \quad (2)$$

其中 \bar{f} 是 f 的均值, \bar{v} 是 v 的均值。由于 v 的均值等于 1, (2) 式可以重写为

$$g_{ij} = f_{ij} + u_{ij} \quad (3)$$

其中 $u_{ij} = \bar{f}(v_{ij} - \bar{v})$ 。 u_{ij} 的均值为 0, 标准差 $\sigma_u = \bar{f}\sigma_v$ 。因此, 我们可以得到斑点噪声图像的近似加性噪声模型, 这使得利用合适的小波减缩方法从观测图像中抑制斑点噪声成为可能。

4 小波变换门限化及其门限选择

近年来, 小波变换已经成为图像 (如 SAR 图像) 压缩和噪声消除的一种新工具。图像消噪技术可分为两大类, 即成像之前的多视处理技术和成像之后的滤波技术。前者以多视平均的方法, 以空间分辨率降低 N 倍为代价获得 \sqrt{N} 倍的斑点抑制性能; 后者可分为空间滤波技术和频域滤波技术两个分支。对 SAR 图像进行斑点抑制有很多相应的滤波算法, 如局域平均法、SIGMA 滤波、Kuan 滤波、增强的 Lee 滤波等, 但这些滤波器依赖于具体的应用需求, 并且都有其相应的适用范围。

离散小波变换 (DWT) 是一个可逆的线性变换, 它可以把一幅图像分解为不同的频率部分。对于大多数图像来说, 图像的低频部分比高频部分包含更多的信息, 因此, DWT 用这样一种

方式来表示一幅图像: 大部分的图像信息在变换域中表现为少数高幅度的低频系数, 同时大部分高频系数的幅度值非常小。DWT 与离散余弦变换 (DCT) 有相似之处, 不同的是小波变换用特定的小波函数取代 DCT 中的余弦函数。在实际应用中, 我们使用紧支撑的 Daubechies 小波, 它是一个正交小波, 对于给定的支撑宽度具有极值相位和最高消失矩^[8]。

对于 SAR 图像来说, 经过线性和正交小波变换以后, 原始图像中的高斯噪声变换到小波域中也是高斯噪声。也就是说, SAR 图像经过小波变换后, 斑点噪声分布在所有的频率范围内, 并且在变换域中其对应的小波系数很小。因此, 在小波域中消除代表斑点噪声的小的系数后再进行逆变换, 则在重建的 SAR 图像中大部分斑点噪声得到了抑制。

在 (3) 式中, 假设 u_{ij} 服从均值为 0, 方差为 σ_u^2 的高斯独立同分布, 即 $u_{ij} \sim N(0, \sigma_u^2)$, 且与 f_{ij} 独立。令 $g = \{g_{ij}\}_{i,j}$, $f = \{f_{ij}\}_{i,j}$ 和 $u = \{u_{ij}\}_{i,j}$ 分别为观测信号 g_{ij} , 图像信号 f_{ij} 和噪声 u_{ij} 各自的矩阵表示。并令 $Y = Wg$ 表示 g 的小波变换系数矩阵, W 为二维正交小波变换算子。同理, $X = Wf$ 表示 f 的小波变换系数矩阵, $U = Wu$ 表示 u 的小波变换系数矩阵。由于采用的是正交小波变换, 因此, U_{ij} 与 u_{ij} 具有相同的分布。

在 SAR 图像中, 斑点噪声是以一种混乱无序的高频噪声的形式出现的。在图像的小波变换中, 代表噪声的小波系数将不会是系数的主要部分, 使用小波门限化方法可以消除这些系数。经常使用的门限化方法有两种^[9], 一种是软门限函数 (也称为减缩函数):

$$\eta_T(x) = \text{sgn}(x) \cdot \max(|x| - T, 0) \quad (4)$$

这个函数通过门限 T 使系数朝着零的方向减缩, 其中 $\text{sgn}(\cdot)$ 是符号函数。另一种是硬门限函数:

$$\Psi_T(x) = \begin{cases} x, & |x| > T \\ 0, & |x| \leq T \end{cases} \quad (5)$$

这个函数在输入系数的绝对值大于门限 T 时保持其值不变, 否则置为 0。

这样, 通过一个门限函数对每个小波系数 Y_{ij} 门限化以得到 \hat{X}_{ij} , 噪声消除以后得到的图像信号的估计为 $\hat{f} = W^{-1}\hat{X}$, 其中 W^{-1} 为二维逆小波变换算子。

同时, 通过对 (4), (5) 式的分析发现, 若门限函数为

$$\eta'_T(x) = \text{sgn}(x) \cdot \min(|x| - T, 0) \quad (6)$$

或

$$\Psi'_T(x) = \begin{cases} x, & |x| < T \\ 0, & |x| \geq T \end{cases} \quad (7)$$

则此时门限化得到的小波系数 \hat{X}'_{ij} 表示的是噪声分量。对 \hat{X}'_{ij} 进行逆小波变换, 则可以得到噪声图像。对这个噪声图像的统计特性的测试可以用来调整门限 t 以得到一个最优的门限值。构造一个性能函数如下:

$$H = \min\{|\hat{\sigma}_u - \sigma_u|\} \quad (8)$$

其中 $\hat{\sigma}_u$ 是估计的斑点噪声标准差, σ_u 是对 \hat{X}'_{ij} 进行逆小波变换得到的噪声图像的标准差。若能找到一个最优的门限值 t^* 使 (8) 式达到最小值, 则此时 SAR 图像中的斑点噪声得到最大程度的抑制。

对图像进行处理的目的是为了消除 g_{ij} 中的噪声, 得到 f_{ij} 的最小均方估计 \hat{f}_{ij} , 此外, 也可以把最小均方误差 (MSE) 作为斑点噪声抑制性能的评估函数。MSE 的表达式为

$$\text{MSE}(\hat{f}) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (\hat{f}_{ij} - f_{ij})^2 \quad (9)$$

其中 M 和 N 分别表示 SAR 图像的宽度和高度 (以像素为单位)。

5 Radon 变换

Radon 变换可以定义在任意维变量空间域。我们考虑二维欧氏空间的特殊情况, 并研究一条线段上的点集的特征函数变换, Radon 变换的坐标关系如图 2 所示。可以得到^[3]:

$$f(\theta, \rho) = R\{F\} = \int \int_D F(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (10)$$

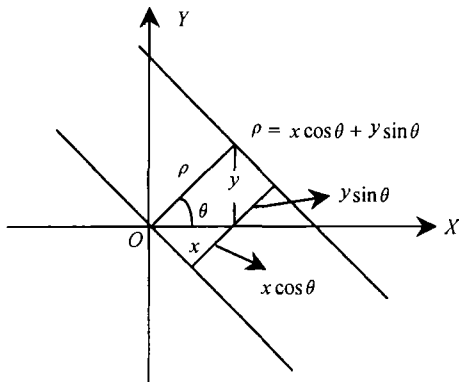


图 2 Radon 变换的坐标关系图

其中 D 为整个 $x-y$ 平面; $F(x, y)$ 是关于 x 和 y 的函数; δ 为 Dirac 函数; ρ 为原点到直线的距离; θ 为直线的法线与 x 轴的夹角。

如果 θ 和 (或) ρ 为定值, 则可以得到一变换的样本。要获得全变换可理解为 θ 和 ρ 变化, 对任意的 θ 和 ρ , f 是确定的。Dirac 函数的出现使得 $F(x, y)$ 的积分是在直线 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$ 上进行的。

上述积分式的离散形式如下:

$$f(\theta, \rho) = R\{F\} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m F(i, j) \delta(\rho - i \cos \theta - j \sin \theta) \quad (11)$$

式中 $F(i, j)$ 为图像在像素点 (i, j) 处的灰度值, m, n 分别为图像的宽度和高度, 其余变量含义与连续形式相同。

根据 Radon 变换的原理及其特性, 它适合于用来检测 SAR 图像中的航迹特征, 其中舰船航迹的亮线特征对应于 Radon 变换域的峰值点。因此, 对 SAR 图像应用 Radon 变换, 在变换域中寻找感兴趣的峰值点位置, 便可以得到亮线航迹特征在 SAR 图像中的基本位置参数。

6 数据处理流程

在实际数据处理时, 标准卫星遥感图像首先被分割成子场景作为输入的 SAR 图像, 在分割时为了避免图像中的航迹被切断, 各个子场景之间有一定数量的像素重叠。对 SAR 图像作正交小波变换并在小波域中门限化小波系数抑制斑点噪声, 对斑点抑制后的图像进行 Radon 变换则可以得到舰船航迹的位置参数。具体算法 (流程图如图 3 所示) 如下:

- (1) 估计斑点噪声 u_{ij} 的标准差 $\hat{\sigma}_u$, 表达式为 $\hat{\sigma}_u = \sqrt{\frac{1}{N}(x_{ij} - \bar{x})^2}$, \bar{x} 在一个局部 7×7 窗口中计算得到;
- (2) 对图像进行小波变换获得小波系数 X ;
- (3) 设置初始门限值 $t = t_0$;
- (4) 通过 (6) 或 (7) 式门限化小波系数 X 获得 \hat{X}' ;

- (5) 对 \hat{X}' 进行逆小波变换得到噪声图像;
- (6) 计算噪声图像的标准差 $\sigma_{\hat{u}}$;
- (7) 计算 $\Delta = |\hat{\sigma}_u - \sigma_{\hat{u}}|$ 。如果 $\Delta \leq K$, 跳至 9;
- (8) 更新门限值 $t = t + k\Delta$ 。跳至 (4);
- (9) 从原始图像中减去噪声图像得到消除斑点噪声后的图像;
- (10) Radon 变换检测线性航迹特征;
- (11) 结束。

其中 K 是 (8) 式的容差, k 是门限值 t 的步进量。

上述算法的关键是如何找到一个合适的容差 K 值, 使得算法既能保证一定的实现速度要求, 同时又能满足一定的精度要求。下面简单讨论一下 K 值对算法稳定性(收敛性)和航迹检测有效性的影响以及最佳(准最佳) K 值的选取。

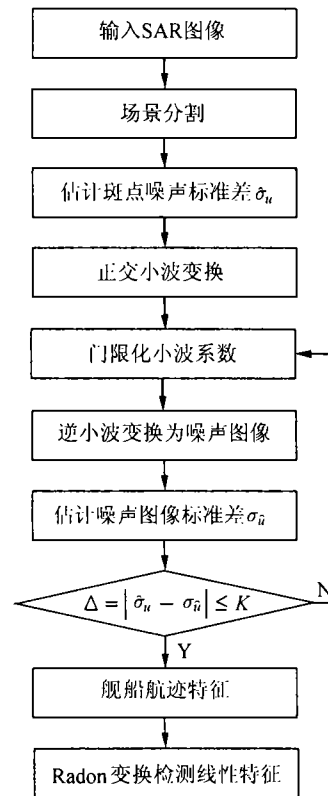


图3 航迹检测流程图

(1) K 值对算法稳定性(收敛性)的影响。对于一个给定的输入 SAR 图像来说, 从该图像估计得到的噪声标准差 $\hat{\sigma}_u$ 应该保持在某一个相对固定的水平上(该固定水平可能会因估计窗口大小的不同而有小的差别)。因此, 对于这个相对固定的标准差 $\hat{\sigma}_u$ 和某一个给定的 K 值, 总能找到一个门限值 t , 使得通过此 t 值门限化小波域系数而得到的噪声图像的标准差 $\sigma_{\hat{u}}$ 满足目标函数的要求, 即使得 $\Delta = \min\{|\hat{\sigma}_u - \sigma_{\hat{u}}|\} < K$, 从而使算法收敛于最优解。由于在算法的迭代过程中要求 $\Delta = |\hat{\sigma}_u - \sigma_{\hat{u}}| < K$, 当容差 K 取值较大时, 通过较少的迭代次数就能满足容差要求, 此时算法的收敛速度较快; 当容差 K 取值较小时, 则需要较多的迭代次数才能满足容差要求, 此时算法的收敛速度相对较慢。

(2) K 值对航迹检测有效性的影响。基于 Radon 变换进行图像中线性特征的检测, 其目的是为了将图像域中难于检测的线性特征映射到 Radon 变换域中易于检测的点特征(峰值点或谷值点)。对 SAR 图像进行噪声消除, 目的也是为了增强图像中的线性信号特征, 抑制噪声分量, 使线性特征的检测易于实施。显然, K 值越小, 则通过门限值 t 门限化小波域系数后重建的噪声图像与原始 SAR 图像中包含的噪声分量越接近, 此时斑点噪声抑制的效果也越好, 经过斑点抑制后的 SAR 图像的信噪比(SNR)也越高, 检测到图像中航迹的可能性也会相应提高。当然, K 值太小, 将导致迭代次数和计算量的增加, 使得检测的速度变慢。并且在实验中发现, 当 K 值小于一定值以后, 对图像中的噪声已无明显的消除作用, SAR 图像的信噪比也无明显的提高。因此, 最佳(准最佳) K 值的选取对算法的性能起着关键的作用。

(3) 最佳(准最佳) K 值的选取。对于一般的 SAR 海洋图像来说, 海洋背景表现在图像上是其灰度值相对较低, 且从该图像估计得到的噪声标准差 $\hat{\sigma}_u$ 基本保持在某一个相对固定的水平

上。因此,若能找出最佳(准最佳) K 值与噪声标准差 $\hat{\sigma}_u$ 之间的关系,则对于不同的 SAR 图像来说可以通过这两者之间的关系来确定 K 值。通过多次实验我们发现,若 K 处于 $\hat{\sigma}_u/7 \sim \hat{\sigma}_u/5$ 之间时,所得的实验效果相当好。而当 $K < \hat{\sigma}_u/7$ 时,迭代次数和计算量增大,噪声消除效果并无明显改善,信噪比也无明显提高;当 $K > \hat{\sigma}_u/5$ 时,虽然迭代次数和计算量很小,但图像中包含的噪声分量未能充分消除,信噪比很低。因此,我们认为最佳(准最佳) K 值应该处于 $\hat{\sigma}_u/7 \sim \hat{\sigma}_u/5$ 之间。在本文的实验中, K 值取为 $\hat{\sigma}_u/6$ 。

7 数据处理结果

图 4 所示的是 ERS-1 SAR 海洋图像切片,分辨率为 $25 \times 25\text{m}$,斑点噪声强,信噪比低,并且其中的两条舰船航迹(图中用白色矩形框包围的区域)以略弯的线性形式出现,形成了一个“V”字形的航迹特征。为了便于比较,在图像未经过任何预处理的情况下,首先用直接基于 Radon 变换的算法进行航迹的检测,其结果如图 5 所示,检测到的航迹叠加到原始 SAR 图像场景切片上的结果如图 6 所示。从图中可以看出,只检测到了一条航迹。图 7 是利用本文提出的方法对图 4 所示的 ERS-1 SAR 海洋图像进行斑点噪声抑制得到的结果。可以看出噪声抑制的效果较好,对 SAR 图像中的航迹特征增强也较为明显,为下一步利用边界提取算子提取边界和利用 Radon 变换检测线性特征作好了准备。图 8 是利用常规的“Sobel”边界提取算子提取的边界,其中有很多细小的边界,但这不影响图像中线性特征的检测。图 9 为图 8 应用 Radon 变换结果的三维图。从图中可以看出两个明显的峰值点,其对应的角度分别为 108° 和 126° 。应用 Radon 变换检测到的航迹叠加到原始 SAR 图像场景切片上的结果在图 10 中给出,从图中我们可以确定航迹的方向和航迹之间的夹角。根据检测到的舰船航迹,可以精确估计舰船的位置,且计算得到两个航迹之间的夹角约为 18° ,这与理论上 Kelvin 航迹半张角为 19.5° 非常接近。

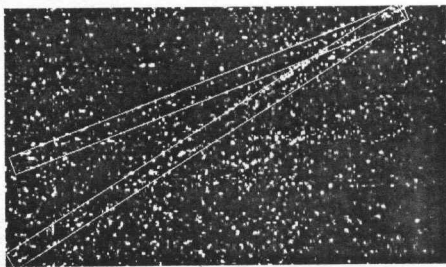


图 4 ERS-1 SAR 子场景

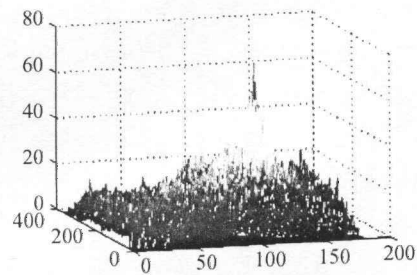


图 5 SAR 子场景 Radon 变换结果

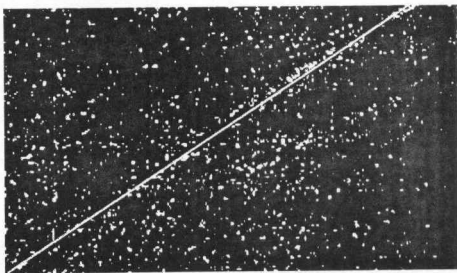


图 6 子场景叠加 Radon 变换检测的航迹结果

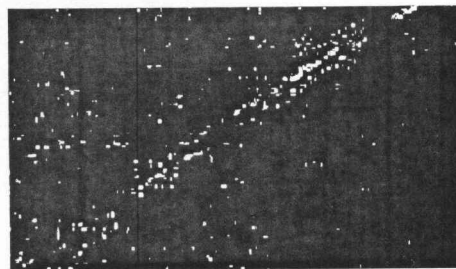


图 7 小波变换门限化抑制斑点噪声结果

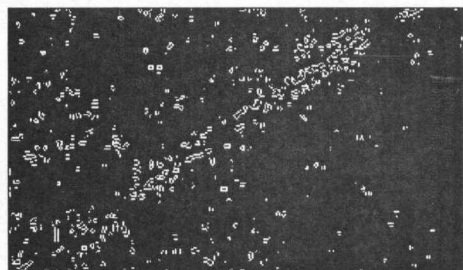


图 8 “Sobel” 边界检测结果

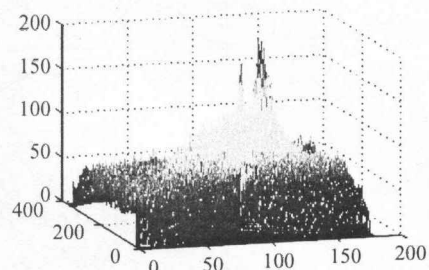


图 9 图 8 应用 Radon 变换结果

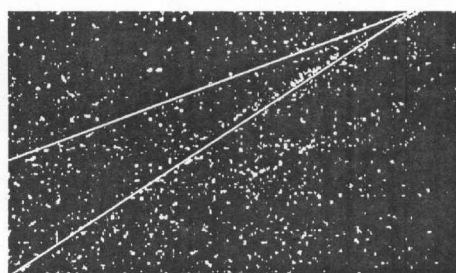


图 10 子场景叠加 Radon 变换检测的航迹

8 结 论

基于小波变换和 Radon 变换进行航迹线性特征的检测, 先通过小波变换门限化方法抑制 SAR 图像中的斑点噪声, 增强 SAR 图像中的航迹特征, 在此基础上, 利用 Radon 变换方法实现对 SAR 图像中舰船航迹的检测。对实际 SAR 图像的处理结果表明, 该方法能有效地抑制 SAR 图像中的斑点噪声, 准确检测到 SAR 图像中的线性舰船航迹。

参 考 文 献

- [1] R. Gasparovic, Observation of ship wakes from space, AIAA Space Programs and Technologies Conference, Huntsville. AL, March 1992, 24-27.
- [2] K. Oumansour, Y. Wang, J. Saillard, Multifrequency SAR observation of a ship wake, IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation, 1996, 3(4), 275-280.
- [3] M. T. Rey, *et al.*, Application of Radon transform techniques to wake detection in SeaSAT SAR images, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4), 553-560.
- [4] A. C. Copeland, G. Ravichandran, M. M. Trivedi, Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1), 35-45.
- [5] K. Eldhuset, An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions, IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4), 1010-1018.
- [6] J. W. Goodman, Statistical Properties of Laser Speckle Patterns, in Laser Speckle and Related Phenomena, J.C.Dainty, Ed., SpringerVerlag, Berlin, 1975, 9-75.
- [7] J. S. Lee, Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics, IEEE Trans. on PAMI, 1980, PAMI-2(2), 165-168.
- [8] 陈桂明, 张明照, 戚红雨编著, 应用 MATLAB 语言处理数字信号与数字图像, 北京, 科学出版社, 2000, 290-292.

- [9] H. Guo, J. E. Odegard, M. Lang, R. A. Gopinath, I. W. Selesnick, C. S. Burrus, Wavelet based speckle reduction with application to SAR based ATD/R, IEEE Int. Conf. on Image Processing, Austin, TX, 1994, 1, 75-79.

DETECTION ALGORITHM OF SHIP WAKES OF SAR IMAGE BASED ON THE SPECKLE NOISE SUPPRESSION

Zou Huanxin Jiang Yongmei Kuang Gangyao Yu Wenxian

(*School of Electronic Science and Engineering, NUDT, Changsha 410073, China*)

Abstract The characteristics of ship wakes in SAR image is analyzed, the model of speckle noise and its local statistic characteristics are also analyzed. A ship wake detection algorithm is proposed in this paper, which based on wavelet transform to suppress the speckle noise firstly and Radon transform to detect the ship wakes secondly. The results of data procession show that the proposed method is more efficient and more accurate to detect the ship wakes in SAR images than that of applying Radon transform to SAR images directly.

Key words SAR image, Ship wakes, Speckle noise, Wavelet transform, Radon transform

邹焕新: 男, 1973 年生, 博士生, 主要从事 SAR 图像处理、雷达目标检测和识别等方面的研究工作。

蒋咏梅: 女, 1970 年生, 博士, 讲师, 主要从事 SAR 图像处理、雷达目标检测和识别、信息融合等方面的研究工作。

匡纲要: 男, 1966 年生, 博士, 副教授, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等领域的研究工作。在国内外学术刊物上发表 30 余篇学术论文。

郁文贤: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达目标识别、信息融合、神经网络等方面的研究工作。在国内外学术刊物上发表 50 余篇学术论文。