

基于局域 Radon 变换的尾迹提取算法

牛 蕾 阮祥伟 张长耀

(中国电子科技集团公司第38研究所,合肥 230031)

摘 要 提出一种基于局域 Radon 变化的 SAR 图像尾迹提取算法,该算法首先利用滑窗对图像进行标准差归一化处理,以突出图像中灰度与海面背景有明显差别的区域;选出突出的像素点,并根据策略将其灰度值用某些常数代替;接着在局域 Radon 变换中,积分值对应于这些区域线性特征的长度,通过设定阈值去除线性区域较短的非尾迹区域产生的虚警,用形态学的膨胀算法将结果中靠的很近的两条亮线合成一条,再用合理的腐蚀处理,剔除噪声信号。实测数据处理结果表明,该算法能准确提取舰船尾迹,降低虚警,能确定尾迹的起点和终点,准确计算出尾迹的边之间的夹角,而且运算简单,满足人们对系统实时性的要求。

关键词 SAR 局域 Radon 变换 形态学图像处理 尾迹

中图法分类号:TP391.41 文献标识码:A 文章编号:1006-8961(2008)06-1143-05

Detection Algorithm of the Ship Wakes from SAR Imagery Based on Localized Radon Transform

Niu Lei, Ruan Xiang-Wei, Zhang Chang-Yao

(No. 38 Research Institute of China Electronic Technology Corporation, Hefei 230031)

Abstract This paper presents a method for detecting ship wakes in SAR images based on the localization of Radon transform. Firstly, the image is normalized, and the noticeable pixel would be regarded as a constant. In localized radon space a big number will correspond to a long line segment. An appropriate threshold can decrease false alarm. By choosing appropriate structuring elements, i. e. dilation and erosion lengths, the two responses which are close enough in the vertical direction will be joined into one. The effect of erosion is that responses which are too narrow in the vertical direction will disappear entirely while responses which are wide enough will be contracted vertically. The simulation and real data processing results show that the algorithm is successful in wake features detection, wake location and computational efficiency.

Keywords SAR(synthetic aperture radar), localized radon transform, morphological image processing, wake

1 引 言

自从1978年在美国 seasat(海洋星)的 SAR (synthetic aperture radar) 图像上,人们首次发现海洋表面延伸 20km 长的舰船尾迹以来,利用 SAR 实现舰船目标的检测和分类成为一种受到世界各国广泛关注的方式。SAR 图像反映的水面舰船的尾迹主要有 Kelvin 波尾迹、窄 V 型波尾迹、一般湍尾迹和内波尾迹^[1,2]。尾迹的基本特点是直线特

征,但是由于海面风场、洋流、相干斑等因素影响, SAR 图像中含有线性特征信息的目标除了舰船运动形成的尾迹外,还有很多虚假线性信息。如何区别舰船尾迹和其他线性信息,降低虚警率成为尾迹识别技术的关键。基于 Radon 变换的尾迹识别算法^[3]是最常用的一种方法,该算法通过对图像沿任意可能存在直线方向的积分,使一条直线在变换后成为一个亮的或暗的峰值,因此,在变换域中的一个亮点或暗点就对应了图像中的一条亮或暗的直线,Radon 变换的积分过程也消除了噪声

对图像的影响,但是, Radon 变换也有以下局限:首先,由于 Radon 变换是对整个图像的积分,一些短的直线可能被噪声掩盖;其次,根据变换后的亮点或暗点能得到尾迹角度的大致情况,而不能得到尾迹的起始点和终点信息,反演出的线段布满整个图像平面;而且舰船的尾迹也不一定笔直,若有稍许弯曲则可能得不到正确结果,于是, Copeland 等人使用局域 Radon 变换^[4]来克服全局 Radon 变换所固有的局限。但是,由于局域 Radon 变换的值反映的是积分线段上的灰度信息,局部的暗或亮线(点)会对文献[4]中算法的结果产生较大影响,从而影响了尾迹信息的正确性。针对以上缺点,本文基于局域 Radon 变换提出了一种改进的舰船尾迹检测算法,记为 LRWD (localized radon transform techniques to wake detection)。先利用滑窗对图像进行标准差归一化处理,分离出图像中灰度与海面背景有明显差别的区域,对突出的像素点,根据策略将其灰度值用某些常数代替,接着在局域 Radon 变换中,用形态学的膨胀算法将变换域靠的很近的两条亮线合成一条,再用合理的腐蚀处理,剔除噪声信号。实验结果表明,本文算法能去除海洋内波、风场等在海面形成的线性波纹对舰船尾迹信息产生的虚警,而且能对尾迹准确定位。

2 基本概念

2.1 Radon 变换和局域 Radon 变换

Radon 变换是把 2 维图像 XY 坐标平面上的的一条线映射成 Radon 空间的一个点,连续图像的 Radon 变换定义为

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

D 为整个图像平面, $f(x, y)$ 为图像上 (x, y) 处像素点的灰度值, δ 是冲激函数, $\delta(k) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases}$, ρ 是从原点到所探测直线的法线长度(有正有负), θ 为所探测直线的法线与 x 轴的夹角,该定义是将函数 δ 沿直线 $\rho - x \cos \theta - y \sin \theta = 0$ 进行积分,以便获取在任意 (ρ, θ) 处, $f(x, y)$ 沿该直线的求和值(即投影值)。

局域 Radon 变换也是在整个 SAR 图像上计算 Radon 变换,只是对积分的上下限作了适当限制,使得图像强度的积分沿着直线段的一部分而不是这个

直线段的全部进行,局域 Radon 变换可以表示为

$$R(\theta, \rho, \sigma) = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dy dx \quad (2)$$

式中,

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

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

$$y_{\max} = \rho \sin \theta + (\sigma + \lambda) \cos \theta$$

$$y_{\min} = \rho \sin \theta + \sigma \cos \theta$$

σ 是移位参数,和 ρ 相似也是一个有正有负的量,取值范围为 $\left[-\frac{d}{2}, +\frac{d}{2} - \lambda\right]$, d 为图像对角线方向上的像素数, λ 是积分线段长度, σ, λ 的定义及局域 Radon 变换示意图如图 1 所示,其中 ε 是个小于 λ 的常数。

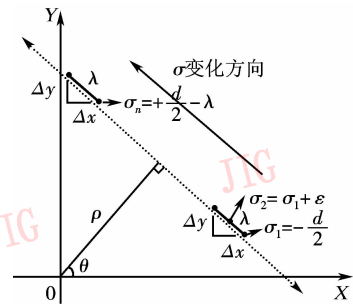


图 1 局部 Radon 变化示意图

Fig. 1 Localized Radon Transform

2.2 形态学图像处理^[5]

形态学主要是用于获取物体拓扑和结构信息,它通过物体和结构元素相互作用的某些运算,得到物体更本质的形态,形态学的基本操作是膨胀和腐蚀,定义如下:

膨胀:

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

腐蚀:

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

式中, B 是输入图像矩阵, S 是给定的结构单元, D 、 E 分别为结构单元在图像窗口上滑动,在 (x, y) 处相互作用,得到的二值图像。

3 LRWD 算法

LRWD 算法流程图如图 2 所示。

具体算法步骤如下:

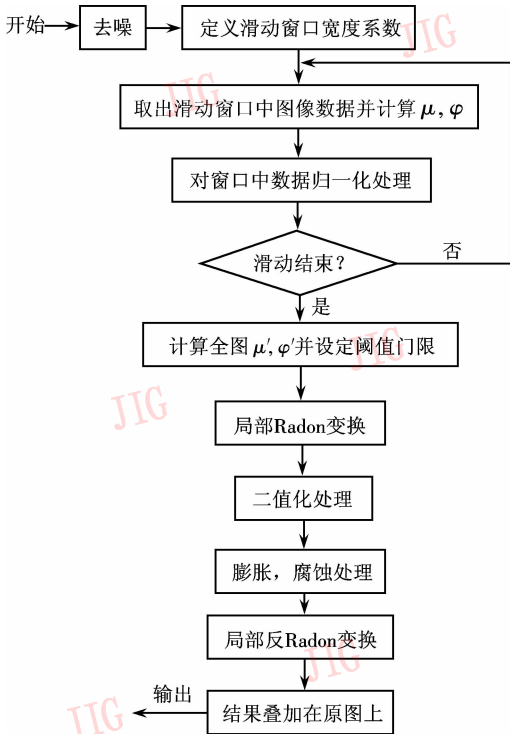


图 2 LRWD 算法流程图

Fig. 2 Flow of LRWD

(1) 通过中值滤波等去斑算法去除斑点噪声对图像的影响;

(2) 定义滑动窗口的大小(根据经验值,对于小于 500×500 的图像窗口大小设定为 70×70 ,大于 500×500 的图像窗口大小为 100×100),计算每次滑动后窗口中数据的均值 μ 和标准差 φ ,并根据 μ, φ 按下式归一化窗口中数据:

$$f'(x, y) = \frac{f(x, y) - \mu}{\varphi} \quad (5)$$

$f'(x, y)$ 为归一化处理后,图像矩阵在 (x, y) 点处的值,该步骤目的是去除海面洋流、油污等大面积非尾迹的深色区域对船只尾迹的影响,同时突出尾迹、内波等突变区域在图像上的特征;

(3) 使窗口有重叠的遍历整幅图像,结束滑动后得到一个新的图像矩阵 f' ,重新计算整个矩阵的均值和标准差 μ', φ' ,根据 μ', φ' 设置阈值上下限:

$$w_{\max} = \mu' + k_1 \cdot \varphi' \quad (6)$$

$$w_{\min} = -\mu' - k_2 \cdot \varphi' \quad (7)$$

式中, $k_1, k_2 \in (1.0, 3.0)$,当尾迹明显时取较大值以降低虚警,尾迹不明显则设定为比 1 稍大或相当的值,增大检测概率,阈值大小的设定视实际需要而定。将 $f'(x, y) > w_{\max}$ 的像素点设为 1, $f'(x, y) <$

w_{\min} 的像素点设为 -1,其余点置 0,这样,经过局部 Radon 变换后的积分值反映的是线段的长度信息,可以通过阈值去掉不够长的线性区域。

(4) 对图像 f' 在某个角度 θ 进行积分,为了提高算法速度,在实验中取 $\Delta\theta = 5^\circ$,即 $\theta = 0, 5, \dots, 175$,在积分起点 σ_i 做长度为 λ 的积分, $\sigma_i = \sigma_{i-1} + \varepsilon$,得到变换矩阵 $R(\theta, \rho, \sigma)$ 。记录在每个角度 θ 得到的变换矩阵 $R(\theta, \rho, \sigma)$ 的最大值 $x_{l,\theta}$ (对应亮线) 和最小值 $x_{s,\theta}$ (对应暗线),数组记为 $X_{\max} = [x_{l,\theta_1}, x_{l,\theta_2}, \dots, x_{l,\theta_n}]$, $X_{\min} = [x_{s,\theta_1}, x_{s,\theta_2}, \dots, x_{s,\theta_n}]$ 。

(5) 对数组 X_{\max} 从大到小排序,新序列定义为 $\hat{X}_{\max} = [x_{l,1}, x_{l,2}, \dots, x_{l,n}]$,对数组 X_{\min} 从小到大排序,新序列定义为 $\hat{X}_{\min} = [x_{s,1}, x_{s,2}, \dots, x_{s,n}]$,选出两个序列的前 m 个值,因为尾迹可能有断开、弯曲等情况,我们选略大于尾迹条数的前 3 个值,即 $m = 3$,记为 $x_{l,1}, x_{l,2}, x_{l,3}, x_{s,1}, x_{s,2}, x_{s,3}$,分别对它们对应 θ 变换矩阵 $R(\theta, \rho, \sigma)$ 做以下处理:

(1) 分别对 $x_{l,1}, x_{l,2}, x_{l,3}$ 对应 θ 的变换矩阵 $R(\theta, \rho, \sigma)$ 做二值化处理:

$$R'(\theta, \rho, \sigma) = \begin{cases} 1 & R(\theta, \rho, \sigma) < T_1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

分别对 $x_{s,1}, x_{s,2}, x_{s,3}$ 对应 θ 的变换矩阵二值化处理:

$$R'(\theta, \rho, \sigma) = \begin{cases} 1 & R(\theta, \rho, \sigma) < T_2 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

式中, $T_1 = \max(\xi, x_{l,i} \times a)$, $T_2 = \min(-\xi, x_{s,i} \times a)$, $i = 1, 2, 3$,以滤除背景中线性特征较短的区域。 ξ 是常数,是尾迹线段长度的下限,目的是剔除 $x_{l,1}, x_{l,2}, x_{l,3}, x_{s,1}, x_{s,2}, x_{s,3}$ 中不满足条件的值, a 是略小于 1 的常数,实验中取 0.9。

(2) 膨胀、腐蚀处理:对经过二值处理的变换矩阵 $R'(\theta, \rho, \sigma)$ 中的每个值为 1 的像素点,在 σ 方向上保持不变,在 ρ 方向上以该像素点为中心,向两边扩充膨胀系数所决定的距离,结果是 σ 方向上单位宽度线段变成一定宽度, ρ 方向上靠的很近的亮线合成一条,选择比膨胀系数较大的腐蚀参数进行腐蚀处理,剔除剩余的噪声信号。因为船的尾迹通常有一定的宽度,在前 4 步的处理后,可能存在相邻的两条亮线,如果不进行膨胀处理,很难将两者区分开,膨胀之后尾迹对应的两条亮线合二为一,其宽度会大于单一噪声信号膨胀的结果,在这种情况下进行合理的腐蚀处理,噪声信号就能被剔除掉,而尾迹

信号则会以一条窄的亮线保留下来。膨胀、腐蚀系数的选择跟 SAR 图像分辨率、尾迹宽度等信息有关,对于本文中的实验用图,膨胀系数为 7,腐蚀系数为 16。

(3)重建图像平面,根据 θ 和二值矩阵 $R'(\theta, \rho, \sigma)$ 进行局部 Radon 反变换,即将 $R'(\theta, \rho, \sigma)$ 平面内每个值为 1 的点对应到图像平面内的一个长为 λ 的线段,该线段起始点由 σ 决定,线段法线方向与图像横轴夹角为 θ ,只要参数 λ, ε 选取合理,经过局域 Radon 反变换后的线段的长度和端点位置将会和原图像中想要探测的线段的长度和端点位置相当接近。

4 实验结果和分析

实验用图为中电 38 所 2005 年 7 月对某海域获取的 L 波段 VV 极化的 SAR 图像,从 1 幅原始图像中剪切出的含有尾迹的部分,由图 3(a),可以看到,有一段明显的海洋内波在图像中呈现直线特征,这将对舰船尾迹提取产生影响。实现了文献[4]、[6]中的尾迹检索算法。图 3(f)是用文献[5]中 SWDRM (ship wake detection algorithm based on radon transformation and morphologic image processing technology)算法进行尾迹特征提取的结果,可以看到,海洋内波连同尾迹的 3 条边一起显现在图像的重建结果中,由于 SWDRM 算法使用的是 Radon 变换提取直线特征,所以尾迹的夹角、位置等信息不能得到精确值。因为图像中内波相比于船的尾迹更加明显,内波对积分的影响远大于尾迹对积分的影响,所以仅利用局域 Radon 变化^[4]提取的尾迹特征也不能得到理想的结果,即使增加积分线段的长度,图 3(c),图 3(d),图 3(e)为 λ 取 70、140、200 时,用局域 Radon 变换进行尾迹提取的结果;图 3(b)是 LRWD 算法得到的结果,由于算法中局域 Radon 变换的积分反映的是图像中直线特征的长度,灰度信息对积分没有影响,所以,检索结果能排除灰度比尾迹明显而长度比尾迹短虚假信息(本例为海洋内波),尾迹的 3 条边均被检出,且没有产生虚警。实验中 $\varepsilon = 5, \lambda = 140$, ε, λ 的取值在很大范围内变化都能得到较理想的尾迹提取结果,取值前提是 λ 应大于海洋内波呈直线的部分,但也不能太大,这样会影响结果中尾迹的起点和终点位置的精确度,也会增加运算时间。阈值 $k_1 = 2, k_2 = 1$ 。根据 $x_{1,1}, x_{1,2}, x_{s,1}, x_{s,2}$ 对应

的 θ ,很容易得到尾迹 3 条边与横坐标的夹角分别为 $95^\circ, 80^\circ, 60^\circ$,因此,3 条边之间的夹角分别为 $15^\circ, 20^\circ$,如果将原图左上角的像素坐标标记为 $(0, 0)$,则尾迹顶点在图像中的坐标为 $(652, 143)$ (原图大小 688×536),根据 SAR 图像的成像参数可以确定尾迹起始点在海面坐标上的位置。

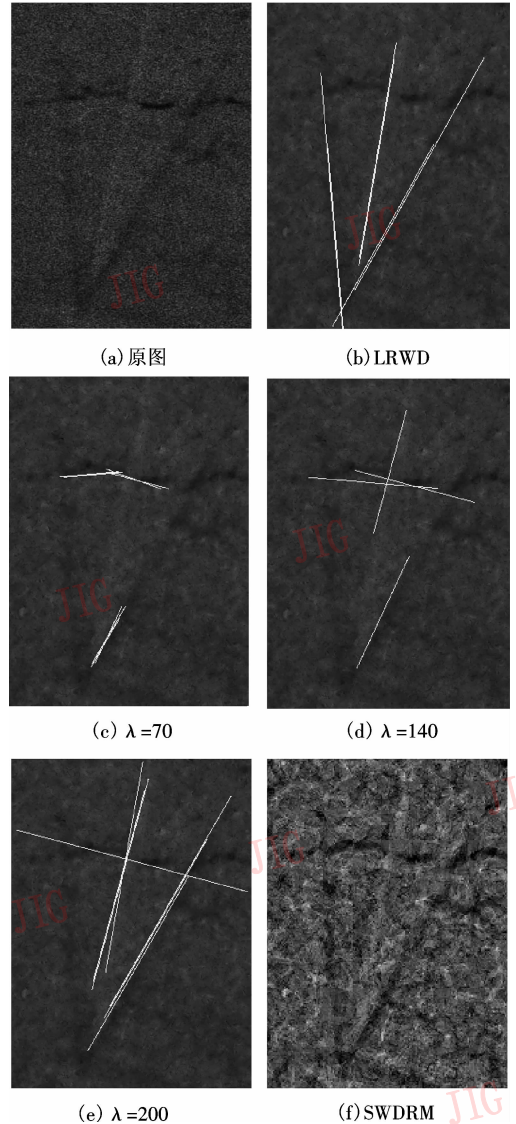


图 3 含尾迹图像及各种方法提取尾迹的结果

Fig. 3 Original image and its detection results based on the three methods

此外,LRWD 算法的运算简单。SWDRM 算法要在每个滑窗内进行 Radon 变换和反变换处理,众所周知,Radon 变化和反变换是一个非常复杂的运算过程,因此该算法运算量大。本文提出的 LRWD 算法虽然比文献[4]中算法多了图像的标准差归一化处理等步骤,但这些步骤算法简单,处理后的局域

Radon 变换结果可以直接映射到原图像,这个所谓反变换过程也非常简单。实验电脑配置为 windows XP 系统, CPU:3.00G HZ, RAM:1.00GB;LRWD 和局域 radon 变化两种算法的积分间隔和长度均为 $\varepsilon = 5, \lambda = 140$, 对图 3(a) 大小为 688×536 的图像, SWDRM、局域 Radon 变化、LRWD 3 种算法的运算时间分别为 174s, 122s 和 124s。

图 4 是对另一幅大小为 $1\,432 \times 976$ 的图像进行尾迹提取的结果,对于比较大的图像为了节省运算时间,可适当降低对精度的要求,对 LRWD 和局域 Radon 变换两种算法取 $\varepsilon = 10, \lambda = 200$ 。图 4(b) 是 LRWD 算法提取尾迹的结果,尾迹的两条边被准

确提取,夹角为 15° ,较长的一边由于风场、洋流等原因造成的弯曲部分也被检出,由于海面不平静,海面的纹理对结果产生一定影响,表现为右边有一较长的波纹被当成尾迹提取;图 4(c),图 4(d),图 4(e)是用 SWDRM 算法,变换不同阈值实现尾迹提取的结果,可以看出,降低虚警会导致尾迹左侧较弱的边也被剔除;图 4(f)是文献[4]中算法提取的结果,原图左下侧的亮点对结果造成很大影响,产生虚警。LRWD、局域 Radon 和 SWDRM 3 种算法的运算时间分别为 265s, 243s 和 635s。

5 结 论

本文给出一种基于局域 Radon 变化的尾迹提取算法,该算法克服了具有线性特征的非尾迹目标对尾迹提取的影响,改进了传统的基于局域 Radon 变换提取尾迹的方法,通过与基于 Radon 变换的 SWDRM 算法及文献[4]中算法的比较,实验结果证明,本文提出的算法能准确提取舰船尾迹,降低虚警,确定尾迹的起点和终点,准确计算出尾迹各边之间夹角,而且运算简单,能够满足人们对系统实时性的要求。

参考文献 (References)

- 1 Oumansour K, Wang Y, Saillard J. Multifrequency SAR observation of a ship wake[J]. IEE Proceeding Radar, Sonar Navigation, 1996, **143**(4):275~280.
- 2 Tunaley J K, Buller E H, Wu K H. The simulation of the SAR images of a ship wake [J]. IEEE Transactions on GRS, 1991, **29**(1):149~155.
- 3 Rey M T, Tunaley J K, Folsinbee J T. Application of Radon transform techniques to wake detection in Seasat-A SAR images [J], IEEE Transactions on Geosci and Remote Sensing, 1990, **28**(4):553~560.
- 4 Copeland A C, Ravichandran G, Trivedi M M. Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images [J]. IEEE Transactions on Geosci and Remote Sensing, 1995, **33**(1):35~45.
- 5 Chui Yi. Image processing and analysis—Mathematical morphology and its application[M], Beijing: Science Press, 2000 [崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M], 北京: 科学出版社, 2000.]
- 6 Wang Shi-qing, Jin Ya-qiu. Ship wake detection in SAR image based on radon transformation and morphologic image processing[J], Journal of remote sensing, 2001, **5**(4):289~294 [王世庆, 金亚秋. SAR 图像船行尾迹检测的 radon 变换和形态学图像处理技术[J], 遥感学报, 2001, **5**(4):289~294.]

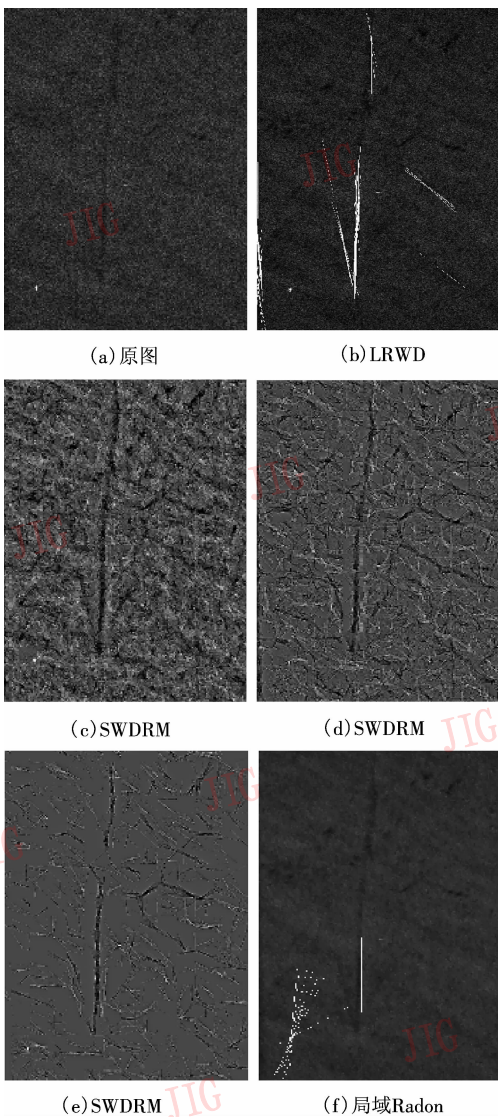


图 4 含尾迹图像及各种方法提取尾迹的结果
Fig. 4 Original image and its detection results
based on the three methods