

文章编号: 2095-4980(2017)04-0558-07

基于分块相位梯度算法的多舰船尾迹自动识别

孙玉鑫, 丁娟娟, 刘 鹏*

(复旦大学 电磁波信息科学教育部重点实验室, 上海 200433)

摘 要: 提出一种基于分块相位梯度算法(PGA)的多舰船尾迹合成孔径雷达(SAR)图像自动识别方法。首先在多结构形态学滤波和自适应阈值(OTSU)分割的基础上, 利用分块PGA算法消除运动舰船的位置偏移和像元模糊, 还原舰船实际信息; 利用改进的局部Hough变换对分块图像进行检测和识别, 根据识别出的尾迹坐标和角度反演运动舰船位置和航向信息。检测结果表明, 该算法可准确检测SAR图像中舰船的实际位置和航向, 识别准确度高, 抗干扰性强。

关键词: 合成孔径雷达; 多舰船尾迹自动识别; 分块相位梯度算法; 改进局部Hough变换; 多结构形态学滤波; 聚类; OTSU自适应阈值分割

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0558

Automatic recognition of multiple ship wakes in SAR image based on PGA

SUN Yuxin, DING Juanjuan, LIU Peng*

(Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: A Phase Gradient Algorithm(PGA) based algorithm for the automatic recognition of multiple ship wakes in Synthetic Aperture Radar(SAR) image is presented. Firstly, the center point of each ship image is extracted by using a combination algorithm of multiple-structure morphology filtering, the OTSU automatic segmentation and the clustering method. Then, the whole image is divided into sub-images which are chosen to be a square of appropriate size and the centers of sub-images are the detected points. As moving ships in SAR image always result in residual chirps in the azimuthally processed signals, the block-wise PGA is utilized to compensate the position offset and defocusing effect in each sub-image. Finally, an improved local Hough transform is proposed to detect the ship wake based on an inverse analysis of the detected wake's coordinate and angle, and the locations and the trajectories of each moving ship are obtained. The examples demonstrate that this algorithm can accurately recognize and restore the ships' actual trajectories and locations with high detectability and low false detection rate.

Keywords: Synthetic Aperture Radar; multiple ship wakes detection; block-wise Phase Gradient Algorithm; improved local Hough transform; multiple structure morphology filtering; clustering; OTSU automatic segmentation

随着我国海洋事业的发展, 大范围海域的舰船监测受到越来越多的重视。相比光学图像, 合成孔径雷达(SAR)图像监测具有全天候、全天时的优势。但舰船SAR图像存在由不同运动模式引起的各类位置偏移和模糊, 分辨力相对于静止地物急剧下降。另一方面, SAR图像数据量大, 人工识别耗时, 且不稳定。因此, 实现舰船SAR图像信息的自动检测非常重要。

SAR图像中舰船检测的研究大致可分为2类, 即针对强散射船体的检测和针对各类尾迹的检测。常用的尾迹SAR图像检测方法有Radon变换、Hough变换。Rey等首先将Radon变换用于SEASAT图像的尾迹检测。但是单一的Radon变换一般只能检测长尾迹, 准确度较差。Fitch等对NASA-JPL机载AirSAR图像, 使用人工神经网络的方法辅助判读Radon变换后的机载SAR尾迹。为克服上述Radon变换的局限, Copeland等^[1]提出局部Radon变换, 克服

收稿日期: 2016-04-27; 修回日期: 2016-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61179022)

*通信作者: 刘 鹏 email: pliu@fudan.edu.cn

Radon变换中固有的局限,可以检测出小尺寸的尾迹,但缺点是运算复杂,计算量大。2000年王世庆和金亚秋^[2]提出结合形态学图像处理的Radon变换,具有较好的鲁棒性,能够适应不同的水域环境。2004年种劲松等^[3]提出基于归一化灰度的Hough变换,通过引入直线长度统计空间,解决了不同长度线段对Hough变换空间贡献不均匀的问题,提高了检测精确度。2009年王连亮等^[4]提出了基于递归修正Hough变换域的检测算法,对于不同对比度、不同宽度的尾迹特征有较强的检测能力。

常用的舰船SAR图像检测方法有恒虚警检测、小波变换检测和多极化检测等。Wackerman等^[5]提出了双参数恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)法用于RADARSAT图像中的舰船检测,避免了复杂的公式迭代。罗强等^[6]提出了基于小波变换的SAR图像舰船检测方法,该方法对复杂图像具有较强的自适应性,但难以对检测指标进行约束。牛朝阳等^[7]利用极化白化滤波算法并融合Envisat/ASAR双极化数据进行检测。2009年张东晓等^[8]提出一种基于分形特征的舰船目标检测算法,该方法稳定性好,但对图像的预处理技术要求较高。2010年AI Jiaqiu等^[9]利用CFAR对灰度归一化的Hough变换加以改进,提高了抗干扰性和实用性。2012年张宏稷等^[10]提出了一种基于非邻域结构似然函数的舰船检测方法,利用非邻域滤波的思想构造窗函数对舰船进行检测,剔除了干扰目标,提高了检测的准确性。

由于SAR图像中船体和尾迹的特征明显不同,针对二者的检测方法差异很大。目前船体和尾迹共存条件下的检测开展较少,并且多数方法未考虑船舶运动产生的位置偏移和模糊,因此检测结果与实际船舶参数往往存在一定偏差。本文提出一种基于分块相位梯度算法(PGA)的多舰船尾迹合成孔径雷达(SAR)图像自动识别方法,该算法考虑到舰船运动产生的模糊和位移现象,在检测过程中添加了分块PGA聚焦处理,实现了船体尾迹共存下的自动识别。

1 分块 PGA 算法

PGA算法由Eichel等在1989年提出,基本步骤是:从SAR复数据图像中找到一些孤立的强散射点,对每个强散射点进行加窗,并估算它的相位误差,然后对这些估算结果取平均。同样的操作进行若干次迭代,便可得到方位向的相位误差曲线。PGA算法是非参数化的,可应用于大多数成像场景,是一种公认的稳健的相位矫正方法^[11]。

在海面SAR图像中,舰船运动产生SAR图像位置偏移和模糊,对检测产生干扰。由于舰船的亮度通常比背景高,基于这一特点,本文基于舰船位置对SAR图像进行分块PGA处理。

1.1 多结构形态学滤波

海洋表面作为一个复杂的时变系统,风速、海浪、漂浮物等都会对海洋SAR图像中舰船的检测产生干扰,因此在进行尾迹检测前,必须对背景噪声行抑制。舰船在中低分辨率SAR图像中通常只占十几或几十个像素点,可近似为多个亮点。形态学滤波可以消除与结构元素相比尺寸较小的亮细节,保持图像整体灰度值和大的亮度区域基本不受影响。本文引入基于膨胀腐蚀处理的多结构形态学滤波^[12],选取4种不同大小不同形状的结构元素($0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$)依次对SAR图像进行膨胀和腐蚀组合处理,如图1所示。一方面可同时抑制正、负脉冲噪声;另一方面,可以克服单一结构中只能保留某一特定方向图形信息而导致的图像信息泄露等问题,充分保留了原图像各个方向的信息。

分别用4种不同结构对原图像进行交替的膨胀腐蚀处理,然后将得到的4幅图像进行加权,叠加后得到合成图像,最后将合成图像与原图像做差,便可得到图像背景抑制后的图像,如图2所示。实验表明,通过多结构形态

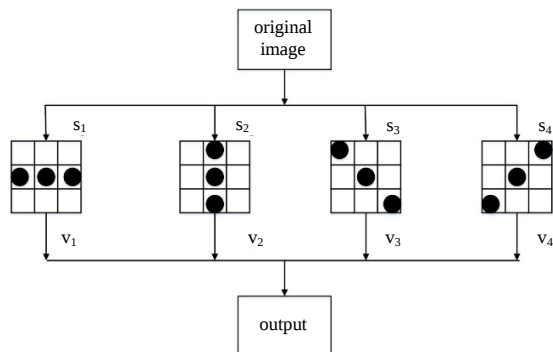
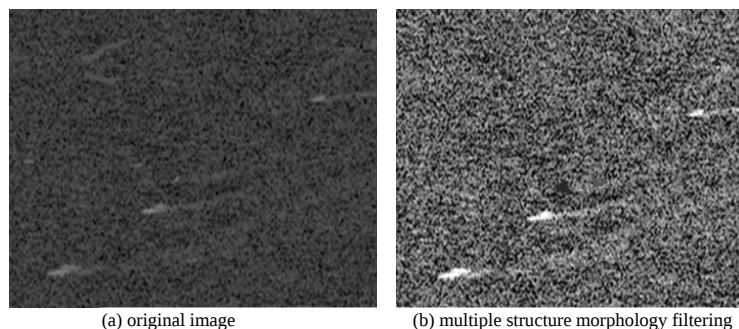


Fig.1 Chart of morphological filtering with multiple structuring
图1 多结构形态学滤波结构图



(a) original image

(b) multiple structure morphology filtering

Fig.2 Examples of filtering
图2 滤波结果图

学滤波处理,可有效进行背景抑制,减少海浪和水面漂浮物对舰船中心位置检测的干扰。

1.2 自适应阈值分割

多结构形态学滤波处理得到背景抑制的图像。由图2(b)可见,图像中大部分背景被较好地抑制,但还存在少量的干扰。采用OTSU^[13]进一步准确定位舰船位置,该方法计算速度快,背景和目标区分度好,是一种较好的全局阈值自动选择处理方法。

大津法按图像的灰度特性,将图像分成背景和目标 2 部分。背景和目标之间的类间方差越大,说明背景和目标的区分度越好。当类间方差最大时,背景和目标的区分度最好。

对于海洋SAR图像 $f(x,y)$,图像的大小记为 $M \times N$,目标和背景的分割阈值记为 T 。按照 T ,将图像分为2类:灰度大于或等于阈值 T 的像素视作目标像素,统计个数记为 Num_1 ,其占整幅图像的比例记为 ω_1 ,平均灰度 μ_1 ;灰度小于阈值 T 的像素视作背景像素,统计其个数记作 Num_0 ,占整幅图像的比例为 ω_0 ,平均灰度为 μ_0 。图像的总平均灰度记为 μ ,类间方差记为 σ ,则有:

$$\omega_0 = Num_0 / (M \times N) \quad (1)$$

$$\omega_1 = Num_1 / (M \times N) \quad (2)$$

$$\mu = \omega_0 \times \mu_0 + \omega_1 \times \mu_1 \quad (3)$$

$$\sigma = \omega_0 \times (\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1 \times (\mu_1 - \mu)^2 \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)中可得:

$$\sigma = \omega_0 \times \omega_1 \times (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (5)$$

采用遍历法,分别计算 T 从0~255变化时灰度值的类间方差。类间方差最大时的 T 值即所需阈值。由于在尾迹检测中通常不考虑精细结构,可以利用阈值 T 对图像进行二值化处理,节约计算时间。

1.3 最近邻法聚类

经过上述自适应阈值分割,得到的二值化图像如图3所示。由于舰船多为金属目标,甲板以上及船体附近存在镜面反射、二面角、三面角等强反射区,在不同运动状态下,舰船SAR图像呈现密集亮点或亮区^[14]。本文采用最近邻规则的聚类方法进行聚类处理,在SAR图像中,类心的位置就是所求的舰船中心位置。经过最近邻原则进行聚类后,可以得到舰船的中心位置,如图4所示。

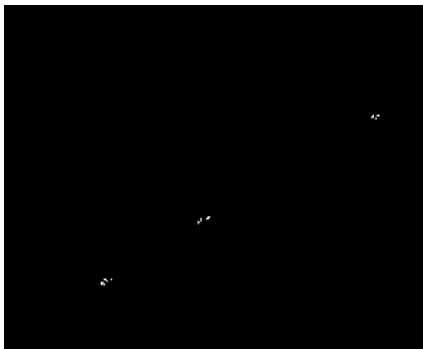


Fig.3 Image before clustering
图3 聚类前的二值图像

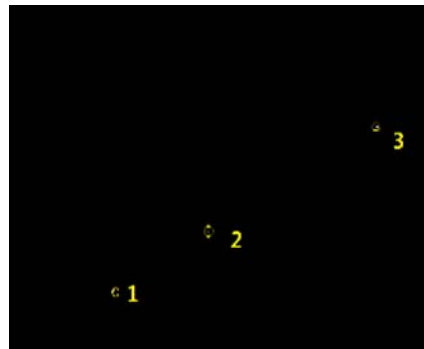


Fig.4 Image after clustering
图4 聚类后的二值图像

1.4 改进的 PGA 算法

利用船体检测的结果可以确定舰船位置,为解决运动舰船产生的位置偏移和模糊问题,在SAR图像复数据中以舰船位置为中心,选取 40×40 的矩形区域作为子图像,对复数数据进行改进PGA处理。算法步骤如下:

1) 选点。孤立点的选择是该算法的一个重点,孤立点具有较高的信噪比,直接关系到聚焦效果的好坏以及收敛速度的快慢^[15]。首先对每一条方位向直线选取最大能量的 N 个点(本文选取所有点数目的1/10),这样可将一些能量小但对比度大的点去除。分别计算 N 个点对比度,选取对比度最大的点作为孤立点。对比度越大,表示强弱越分明,存在孤立散射点的可能性越大;而对比度小,则说明像素强度在其均值上下的起伏较小,存在孤立强散射点的可能性也较小,因此用最大对比度法选取孤立点的方法是可行的。

$$C(m_{\max}, n_{\max}) = \max \left(\frac{E \{ (I^2(m, n) - E[I^2(m, n)])^2 \}}{E[I^2(m, n)]^2} \right) \quad (6)$$

式中: $C(m_{\max}, n_{\max})$ 为该方位向最大对比度; $I^2(m, n)$ 为像素的强度; $E[I^2(m, n)]$ 为该方位向的平均强度。

2) 循环移位。将选取的孤立点循环移位至孔径中心位置, 循环移位一方面保留了相位误差对被选散射点的影响, 另一方面去除了与目标有关的线性相位分量, 有利于确定窗宽。

3) 加窗。传统方法一般选取固定的窗宽, 窗宽选取过小, 会导致相位信息不完整, 估计出的相位存在偏差; 窗宽选取过大, 则会引入杂波干扰, 信噪比降低。本文采用一种新的窗宽选取方法, 孤立点的能量为 $E_{\max}$, 方位向的平均能量为 $\bar{E}$, 把它作为支撑域外的平均能量 E_a , 然后选取 $E_{\max}$ 下降到 E_a 处的距离作为所加的窗宽, 每次迭代都采用此方法估计窗宽, 若当前窗宽不小于前次窗宽, 则将前次窗宽的 80% 作为当前窗宽^[16], 自适应加窗法在迭代过程中可以随着数据的变化改变窗宽, 有效减少了迭代次数。

4) 相位误差梯度估计。对加窗后的数据沿方位向进行快速傅里叶变换, 采用线性无偏最小方差估计的相位误差为:

$$\Phi(m) = \sum_{l=2}^m \angle \left[\sum_{n=1}^N f_n^*(m) \times f_n(m+1) \right], \Phi(1) = 0 \quad (7)$$

由于线性无偏最小方差估计出的误差不包括线性相位误差, 线性相位误差会产生位移现象。为消除线性相位的影响, 将所估计的相位误差梯度减去其所对应的相位误差梯度均值, 这样可消除位移。

$$\bar{\Phi}(m) = \Phi(m) - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^U \Delta \Phi(n) \quad (8)$$

式中: U 为合成孔径长度对应坐标值; $\bar{\Phi}$ 为去除一阶相位误差后的相位梯度值。相位误差求和即可得到整个方位向的相位误差。

5) 迭代相位校正。距离压缩相位历史数据与相位误差估计的共轭相乘, 经快速傅里叶变换到图像域, 便可得到聚焦后的图像。一般经过 4 或 5 次迭代便可达到收敛, 经改进 PGA 处理后的子图像如图 5 所示。

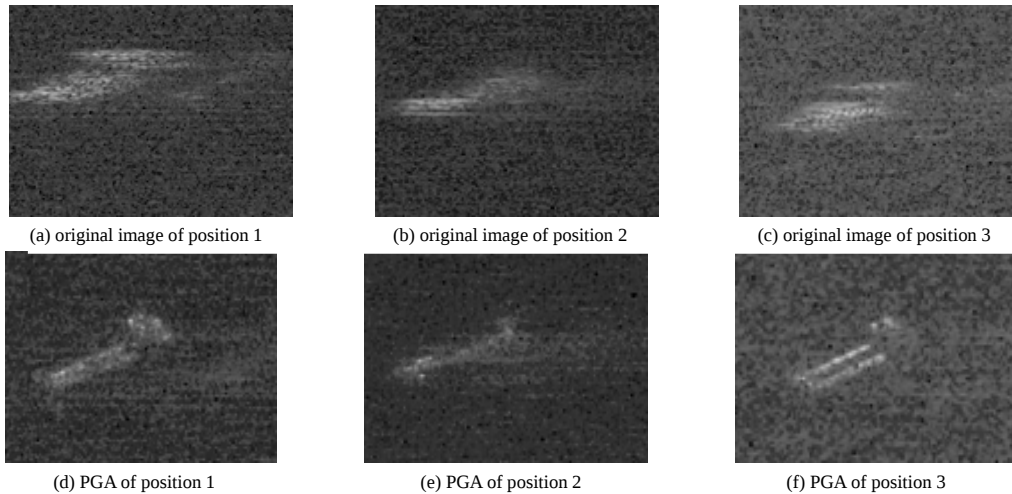


Fig.5 Results of refocus
图5 聚焦结果

与传统 PGA 算法相比, 分块 PGA 算法具有如下优点:

1) 传统的 PGA 算法对全局 SAR 图像进行处理, 分块 PGA 算法只对产生散焦的运动目标部分进行处理, 大大减少了计算量, 提高了聚焦速度。

2) 在 PGA 处理过程中, 采用最大对比度选点法和能量自适应加窗法, 使 PGA 算法在不同场景的应用中均能较准确地估计相位误差, 从而获得稳定的聚焦性能。

3) 在相位补偿过程中, 添加了一阶相位误差补偿, 消除了目标的位置偏移。

2 尾迹检测

通过分块 PGA 处理, 得到位置和相位矫正后的子图像, 用改进的 Hough 变换对子图像分别进行尾迹检测。

Hough 变换在图像处理中直线、圆或椭圆的检测、边界提取、二维或三维运动参数的估计等已有很多应用。在二维连续空间中，可定义为：

$$f(\theta, \rho) = H\{F\} = \iint_D F(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (9)$$

式中： D 为整幅图像； $F(x, y)$ 为图像的灰度值； ρ 为原点到直线的法向距离； θ 为法线与 x 轴的夹角。本文利用结合形态学处理和归一化处理的 Hough 变换进行尾迹检测，具体分为如下 5 个步骤：

1) 对原图像进行膨胀腐蚀处理，去除孤立噪声，初步提高图像的信噪比。

2) 在参数空间中灰度累加器 $H(\rho_k, \theta_m)$ 和计数累加器 $L(\rho_k, \theta_m)$ 并进行初始化， k 和 m 分别为参数空间中横轴和纵轴的个数，其中： $H(\rho_k, \theta_m) = 0$, $L(\rho_k, \theta_m) = 0$, $k = 0, 1, \dots, k-1$; $m = 2\pi/m, \dots, k\pi/m, \dots, \pi$ 。

3) 计算灰度累加器和计数累加器的值。对参数空间 (ρ_k, θ_m) 进行遍历，累加每一个像素的灰度值到灰度累加器，计数累加器同时加 1。

4) 对灰度累加器的值进行归一化处理。

$$H(\rho_k, \theta_m) = H(\rho_k, \theta_m) / L(\rho_k, \theta_m) \quad (10)$$

5) 设定阈值，阈值一般根据经验设定。这里设定为最大峰值点的 0.5 倍，当灰度累加器的值小于最大峰值点灰度累加器值的 0.5 倍时，认为该直线为干扰线而舍去，将每条直线进行一一判别后，便可以得到检测结果。

用上述改进的 Hough 变换对子图像分别进行尾迹检测，得到舰船尾迹的始末位置 $\text{point1}(x_1, y_1)$, $\text{point2}(x_2, y_2)$ ，将 2 点进行连线，便可得到所需要的尾迹。利用 2 点间的公式

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (11)$$

便可反演出舰船的航向。

对 TerraSAR-X 2007 年 11 月 16 日获取的局部 SAR 复数图像(图像大小为 539×421)检测，多艘舰船的坐标、航向和尾迹走向的检测结果如图 6 所示。

第 1 艘舰船位置坐标(154,322)，航行角度 -28.48° ；第 2 艘舰船位置坐标(265,268)，航行角度 -30.72° ；第 3 艘舰船位置坐标(459,174)，航行角度 -53.51° 。检测所需时间约 4 s。

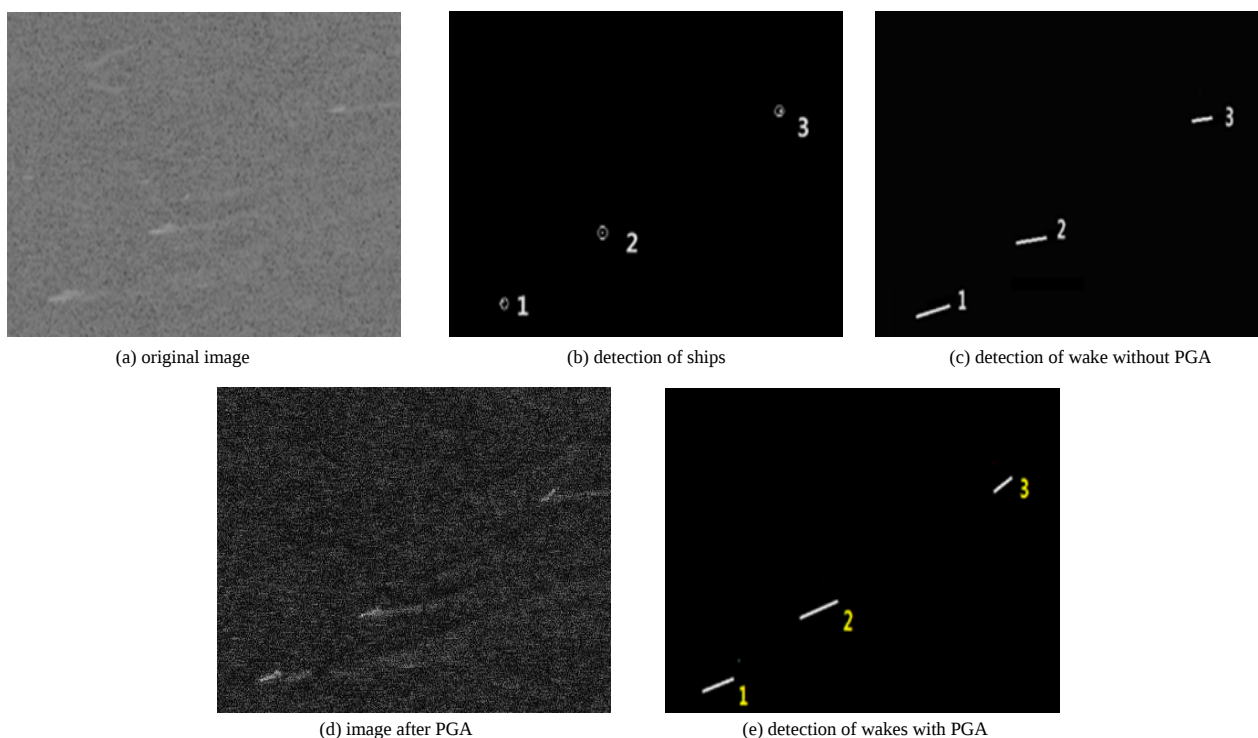


Fig.6 Detection of multi-ship wakes

图 6 多舰船尾迹检测结果

图 6(a)中由于目标运动，舰船存在较为明显的位移和模糊，图 6(c)为未经过分块 PGA 处理得到的尾迹检测结果，图 6(e)为经过分块 PGA 处理后得到的尾迹检测结果。对比可以发现，图 6(c)中检测结果与图 6(e)存在偏

差,这是由于运动舰船在雷达方位向上存在速度分量,导致 SAR 图像上产生位置偏移和散焦,因此未经分块 PGA 处理的图 6(c)所检测出的尾迹航向和实际航向存在较大偏差,其中舰船 3 由于运动速度较快,偏差尤为明显。图 6(d)消除了偏差,所检测出结果的图 6(e)为舰船实际航向,与传统检测方法最大不同便是添加了分块 PGA 过程,对比说明本文提出的基于分块 PGA 的检测算法可以更准确地检测出舰船的位置和航向信息。

为证明方法可靠性,选取 TerraSAR-X 2013 年 3 月 8 日的吴淞口地区局部 SAR 图像(图像大小为 644×547)进行处理,适当调整子图像的大小,结果如图 7 所示。

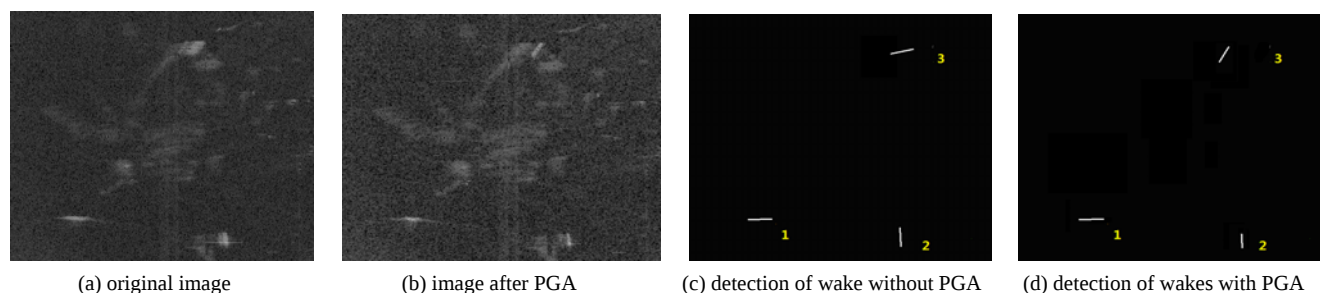


Fig.7 Detection of multi-ship wakes

图 7 多舰船尾迹检测结果

第 1 艘舰船位置坐标(152,457),航行角度 -5.23° ;第 2 艘舰船位置坐标(464,507),航行角度 88.34° ;第 3 艘舰船位置坐标(392,85),航行角度 -63.26° 。检测所需时间 4 s。

图 7(c)为未经过分块 PGA 处理的尾迹检测结果,图 7(d)为经过分块 PGA 处理后的尾迹检测结果,图 7(c)中检测结果与图 7(d)存在偏差,这是由于舰船运动导致 SAR 图像上产生位置偏移和散焦,其中舰船 3 由于运动速度最快,偏差尤为明显,进一步证明了本文所提出算法可以更准确地检测出舰船位置和航向信息。

由仿真结果可知,本文提出的 SAR 图像多舰船尾迹自动识别算法可以消除 SAR 图像中舰船的位移和模糊,准确检测出多个运动舰船目标,同时可得到舰船的准确位置、航向和尾迹走向等信息。方法的主要优点是抗干扰性好,准确性高,简单高效。

3 结论

本文采用分块 PGA 算法,消除 SAR 图像中散焦现象,利用局部 Hough 变换进行检测,提出了一种 SAR 图像多舰船尾迹自动识别算法。相比传统检测算法,本文所提出的基于 PGA 多舰船尾迹自动识别算法在检测过程中利用分块 PGA 算法,解决了由于舰船运动产生的目标偏移和模糊问题,并且在检测过程中引入错误判断机制,提高了检测的准确性。但由于在检测过程中加入聚焦过程,增加了计算量。根据实验仿真结果可知,该算法可以准确还原舰船的实际位置和航向,并准确得到舰船位置、航向和尾迹走向特征等信息,对海面舰船的监控、管理和信息提取提供了一种有效的技术方法。

参考文献:

- [1] COPELANG A C, RAVICHANDRAN G, TRIVEDI M M. Localized Radon transform-based detection of ship wakes in SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 35-45.
- [2] 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, 4(4): 289-294. (WANG Shiqing, JIN Yaqiu. Ship wake detection in SAR images based on Radon transformation and morphologic image processing [J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 4(4): 289-294.)
- [3] 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 Jingsong, ZHU Minhui. 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.)
- [4] 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 Lianliang, CHEN Huaixin. Multi-ship detection method based on recursive modified Hough transform field[J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(4): 834-837.)
- [5] WACKERMAN C C, FRIEDMAN K S, PICHEL W G. Automatic detection of ships in RADARSAT-1 SAR imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27(23): 568-577.

- [6] 罗强,罗莉,任庆利. 一种基于小波变换的卫星 SAR 海洋图像舰船目标检测方法[J]. 兵工学报, 2002,23(23):500-503. (LUO Qiang,LUO Li,REN Qingli. Method of ship detection in oceanic SAR image based on wavelet transform[J]. Acta Armamentarii, 2002,23(23):500-503.)
- [7] 牛朝阳,马德宝,李武皋. 基于联合 PWF-2pCFAR 算法的 Envisat/ASAR 双极化数据舰船检测方法研究[J]. 信息工程大学学报, 2008,9(3):319-322. (NIU Chaoyang,MA Debao,LI Wugao. Ship detection based on the combined PWF-2pCFAR algorithm using envisat/ASAR dual polarization data[J]. Journal of Information Engineering University, 2008,9(3):319-322.)
- [8] 张东晓,何四华,杨绍清. 一种多尺度分形的舰船目标检测方法[J]. 激光与红外, 2009,39(3):315-318. (ZHANG Dongxiao, HE Sihua,YANG Shaoqing. Ship target detection method based on multi-scale fractal feature[J]. Laser and Infrared, 2009, 39(3):315-318.)
- [9] AI Jiaqiu,QI Xiangyang,YU Weidong,et al. A novel ship wake CFAR detection algorithm based on SCR enhancement and normalized Hough transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011,8(4):681-685.
- [10] 张宏稷,杨健. 基于非邻域结构似然函数的舰船检测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(6):875-879. (ZHANG Hongji,YANG Jian. Non-local structure and likelihood function based ship detection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(6):875-879.)
- [11] DENG Yuan,ZHANG Yunhua. Improved PGA algorithm based on adaptive range bins selection[J]. Journal of Language Teaching and Research, 2010,1(2):151-156.
- [12] FARAJZADEH M,MAHMOODI A,ARVAN M R. Detection of small target based on morphological filters[C]// 20th Iranian Conference on Electrical Engineering. Tehran,Irana:IEEE, 2012:1097-1101.
- [13] OTSU N. A threshold selection method from gray level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics IEEE Transactions, 1979,9(1):62-69.
- [14] ZILMAN G,ZAPOLSKI A,MAROM M. On detectability of a ship's Kelvin wake in simulated SAR images of rough sea surface[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015,53(2):609-619.
- [15] 倪崇,王岩飞,徐向辉. 一种改进的 SAR 图像聚焦算法[J]. 测绘学报, 2012,41(3):449-453. (NI Chong,WANG Yanfei, XU Xianghui. An improved autofocus algorithm for SAR images[J]. Acta Geodaetica Sinica, 2012,41(3):449-453.)
- [16] QING Jiming,XU Haoyu,LIANG Xingdong,et al. An improved phase gradient autofocus algorithm used in real-time processing[J]. Journal of Radars, 2015,4(5):600-607.

作者简介:



孙玉鑫(1993-), 男, 山东省德州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像目标识别研究. email:15210720108@fudan.edu.cn.

丁娟娟(1991-), 女, 安徽省安庆市人, 在读硕士研究生, 主要从事波散射与空间遥感的研究.

刘 鹏(1971-), 男, 陕西省泾阳县人, 副教授, 主要从事环境与目标的电磁波散射与传播, 计算电磁学, 有限元方法和海洋微波遥感领域的研究.