

DOI: 10.7652/xjtuxb201306005

采用自适应背景窗的舰船目标检测算法

李亚超, 周瑞雨, 全英汇, 邢孟道

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 710071, 西安)

摘要: 针对合成孔径雷达(SAR)图像应用中,传统滑动窗口检测算法无法对近距、近岸或不同大小目标实现精确检测的问题,提出了一种自适应窗口的舰船目标检测算法。该算法首先利用阈值滤波实现海面的分离,然后通过对分离后待检目标的像素体积统计,剔除大体积陆地目标,得到待检目标,并根据其像素分布设置自适应窗口,通过对自适应窗口内目标像素和背景像素的分离统计,最终拟合得到待检目标附近背景的 K -分布概率模型进行恒虚警检测。相对于传统滑动窗口检测算法,自适应窗口检测算法可实现对目标背景像素的精确统计及 K -分布拟合,以及对舰船类目标的精确检测。实验结果证明,在相同的虚警概率条件下,对复杂海面情况的 SAR 图像进行舰船检测,自适应窗口检测算法比传统局部窗 K -分布的恒虚警检测结果的品质因子高 0.34。

关键词: 合成孔径雷达;舰船目标检测;恒虚警; K -分布

中图分类号: TN957.51 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)06-0025-06

An Algorithm of Ship Target Detection Based on the Adaptive Background Window Function

LI Yachao, ZHOU Ruiyu, QUAN Yinghui, XING Mengdao

(National Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: An adaptive detection algorithm is proposed to solve on the problem in the application of the SAR images that the traditional target detection algorithms, which are on the basis of sliding window, cannot give an accurate detection to targets that are in short distances, near to the coast, or very different in size. The method separates the sea surface using threshold filtering, and then the targets to be detected are obtained by counting the pixel volume of targets and eliminating the most acreage of the land. Adaptive windows are set according to the pixel distribution. The K -distribution possibility model of the scenes near the targets is obtained by separating the counting of the target pixel from the counting of the background pixel on adaptive windows. The adaptive window detection algorithm has the advantages of achieving accurate statistics of background pixel of targets and K -distribution fitting over the traditional target detection algorithm. Experimental results show that the quality factor of the proposed adaptive window detection algorithm is 0.34 higher than that of the traditional target detection algorithm when the detecting is performed on the SAR images with the circumstances of the complicated sea surface and the same CFAR condition.

Keywords: synthetic aperture radar; ship target detection; constant false alarm; K -distribution

收稿日期: 2012-11-07。 作者简介: 李亚超(1981—),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61001211); 航空基金资助项目(20110181004);中央高校基本科研业务费资助项目(72105317)。

网络出版时间: 2013-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130318.1139.005.html>

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨微波成像雷达,具有远距离、全天候、全天时等优点。近年来,利用 SAR 图像对舰船目标进行检测与监视的研究以及相应的技术开发在海洋遥感领域得到了高度重视,成为 SAR 技术的非常重要的应用方向之一^[1-4]。

双参数 CFAR 算法^[5-8]和 K -分布 CFAR 类算法^[9-10]在 SAR 图像舰船目标检测中得到了广泛的研究和应用。双参数 CFAR 算法背景假设为高斯分布,利用滑动窗口完成对局部区域背景杂波的统计建模,但是双参数 CFAR 算法的高斯型分布模型不能很好地描述 SAR 图像中海杂波分布。 K -分布 CFAR 类算法的背景假设为 K -分布, K -分布的长拖尾形状的分布特征使其能够更好地描述海杂波。

全局 K -分布 CFAR 算法只适用于研究海杂波分布均匀的中低分辨 SAR 图像,通过对图像的参数计算,得到全图背景杂波的 K -分布模型,设置全局阈值进行目标检测。在海杂波分布不均匀,局部变化较强的高分辨 SAR 图像中,种劲松等人提出一种基于局部窗的 K -分布 CFAR 算法^[10],然而这种算法对窗口的设置以及滑动步长的选取仍为人工手动设置,因而在对不同大小目标和近距目标的检测中会造成一定的虚警、漏检概率。

针对传统 K -分布 CFAR 算法和局部窗 K -分布算法的局限性,本文提出了一种基于自适应背景窗的舰船目标检测算法,通过对图像的预处理,结合各个待检测目标像素分布,设置自适应待检测目标大小的自适应窗口,在窗口中通过对目标和背景的分离,完成背景像素的自适应统计,避免了近距目标像素对背景统计的影响,从而拟合得到精确的背景 K -分布模型。本文算法由于无需窗口的滑动检测,因而避免了窗口滑动步长带来的检测误差。

1 SAR 图像舰船检测算法

基于自适应背景窗的检测算法主要分为图像预处理和舰船检测 2 部分,如图 1 所示。先通过图像预处理部分实现对 SAR 图像中可能目标的粗检测;

再通过舰船检测部分,对可能目标背景杂波进行统计,利用所得到的 K -分布统计模型进行目标细检测,剔除非舰船类目标。

1.1 海面分离

本文首先通过阈值处理实现对海面和非海面目标的分离。Otsu 法也称大津阈值法,是目前一种十分流行的阈值选取算法^[11-13]。其核心思想是:确定一个最佳阈值,在对图像完成阈值处理后,使背景和目標物 2 类像素类的类间方差最大,从而达到区别背景和目標的目的。

输入 SAR 图像矩阵 I 的灰度级为 $0 \sim 255$,设阈值 $T_j (j=0,1,\dots,255)$ 将像素灰度级分为 2 类, $C_0=0,1,\dots,T_j, C_1=T_j+1, T_j+2,\dots,255$ 分别代表背景和目標,则经过阈值处理后图像的类间方差为

$$\sigma^2(T_j) = \omega_0(\mu_0 - \mu)^2 + \omega_1(\mu_1 - \mu)^2 \quad (1)$$

式中: ω_0, μ_0 分别代表 C_0 类像素的产生概率和均值; ω_1, μ_1 分别代表 C_1 类像素的产生概率和均值; μ 为图像总灰度的平均值^[11-13]。

为了得到最大的类间方差,需求解最优化问题

$$T_{\text{opt}} = \arg \max_{j=0,1,\dots,255} \{\sigma^2(T_j)\} \quad (2)$$

在得到最佳阈值 T_{opt} 后, SAR 图像所对应的矩阵 I 为 $m \times n$ 维,对 I 进行阈值处理,即

$$I_{\text{bin}}(i,j) = \begin{cases} 1, & I(i,j) \geq T_{\text{opt}} \\ 0, & I(i,j) < T_{\text{opt}} \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_{bin} 为阈值处理后的二值图像矩阵; (i,j) 为对应像素点坐标。

Otsu 法阈值处理采用最大类间原理,从而可以将海面与非海面目标分离开来,但同时也会造成一些陆地被分离,引入陆地产生的虚假目标。这些虚假目标和强海杂波产生的虚假目标,可通过后续检测算法进行剔除。

1.2 陆地剔除

在海面被分离之后,得到了含有陆地、舰船类目标以及由强海杂波产生的伪目标的二值图像。由于在含有陆地的图像中,陆地像素在较大程度上会影响背景的统计模型,从而造成检测门限上升,增加了漏检和虚警概率。为了更好地实现对背景模型的统计,需要对陆地目标进行剔除,同时也可以消除陆地对近岸目标检测的影响。

陆地与舰船等目标的最大区别在于陆地的体积远远大于舰船等目标。利用这一特点结合雷达分辨率与舰船目标实际体积分布区间,可以估算出 SAR 图像中舰船类目标的分辨单元个数,即图像中舰船

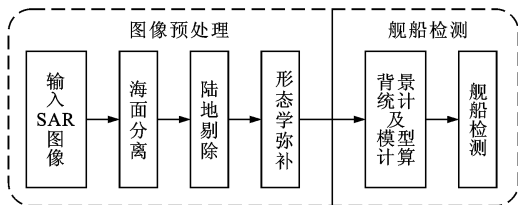


图 1 算法流程图

体积,再利用前面得到的二值图,对其中各个目标的连通像素集合进行像素点的统计遍历,根据各个目标分辨单元统计个数,进行陆地剔除。

假设二值图中各个目标体积单元数为 V_k ($k=1,2,\dots,n$, n 为图像 I_{bin} 中目标个数), (i,j) 为属于目标 V_k 的像素坐标,结合实际舰船体积与雷达分辨单元大小,得到舰船体积单元数分布区间为 $V_{\text{min}} \sim V_{\text{max}}$,判断准则为

$$I_{\text{land}}(i,j) = \begin{cases} 1, & V_k < V_{\text{min}} \text{ 或 } V_k > V_{\text{max}} \\ 0, & V_{\text{min}} \leq V_k \leq V_{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: I_{land} 为二值图像中体积不符合舰船体积区间的陆地等非目标区域。为了实现对此类区域的剔除,采用矩阵操作 $I_{\text{tar1}} = I_{\text{bin}} - I_{\text{land}}$ 实现二值图中对陆地的剔除。

1.3 形态学图像弥补

对二值图像中大面积陆地进行剔除后,保留下了舰船类目标、小型陆地和强海杂波产生的伪目标。一些舰船类目标经过处理后变成了2个独立的目标,这会给后续的目标细检测带来不便,这种情况是由于在高清 SAR 图像中,舰船中央部分的反射系数小于船首船尾的,从而造成舰船目标出现首尾分离的现象。本文采用数学形态学操作消除此影响。

闭操作^[14]是数学形态学操作的一种重要的运算方法,它利用结构元素对图像进行先膨胀后腐蚀,以达到光滑图像轮廓,消弥狭窄的间断和长细的鸿沟,消除小的空洞,并填补轮廓线中的间断的作用。

定义结构元素 B 对集合 A 进行闭操作,表示为

$$A \circ B = (A \oplus B) \otimes B \quad (5)$$

式中: $\oplus$ 为膨胀操作; $\otimes$ 为腐蚀操作; $\circ$ 表示闭操作。

为了消除二值图像中舰船首尾分离现象,避免虚警的发生,结合雷达分辨率,利用操作单元 U ,对 I_{tar1} 进行闭操作 $I_{\text{tar2}} = I_{\text{tar1}} \circ U$,得到弥补后的二值图像矩阵 I_{tar2} 。

1.4 自适应窗口的背景分离检测算法

在经过 Otsu 法阈值处理、陆地剔除、数学形态学操作后的二值图像矩阵 I_{tar2} 中,陆地等不符合检测要求的目标已经被剔除,剩下的只有舰船目标、小岛等小型陆地以及强海杂波引入的伪目标。

为了达到对目标及伪目标背景杂波的精确统计,本文采用自适应背景窗口设置的方法完成对海杂波的统计建模,为后期舰船目标检测提供背景概率分布模型,其实现步骤如下。

(1)对经过处理后的二值图像矩阵 I_{tar2} 中的目标 V_k ($k=1,2,\dots,n_{\text{total}}$, n_{total} 为 I_{tar2} 中目标个数)进行

体积遍历,得到目标边界信息

$$\left. \begin{aligned} i_{k\min} &= \min_i; & i_{k\max} &= \max_i \\ j_{k\min} &= \min_j; & j_{k\max} &= \max_j \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $i_{k\min}$ 为属于目标 V_k 的最小行坐标; $i_{k\max}$ 为属于目标 V_k 的最大行坐标; $j_{k\min}$ 为属于目标 V_k 的最小列坐标; $j_{k\max}$ 为属于目标 V_k 的最大列坐标。

(2)利用目标的边界信息,对目标自适应窗口边界进行合理设置,这里取自适应窗口为目标大小的3倍,设置分割矩阵

$$I_b(i,j) = 1, i = (i_{k\min} - L_k), \dots, (i_{k\max} + L_k) \\ j = (j_{k\min} - W_k), \dots, (j_{k\max} + W_k) \quad (7)$$

式中: $L_k = i_{k\max} - i_{k\min}$ 为目标的行分布长度; $W_k = j_{k\max} - j_{k\min}$ 为目标的列分布宽度。用 SAR 图像矩阵 I 与分割矩阵 I_b 进行矩阵点乘操作得到目标的自适应背景窗矩阵 $I_{\text{bt}} = II_b$,实现各个待检测目标的自适应背景窗口设置。

(3)结合目标二值图像 I_{tar2} ,用 SAR 图像矩阵 I 与二值图像矩阵 I_{tar2} 进行矩阵点乘操作得到目标矩阵 $I_t = II_{\text{tar2}}$,实现目标像素的提取。

(4)利用 I_{bt} 和 I_t ,做矩阵减法得到背景矩阵 $I_b = I_{\text{bt}} - I_t$,实现自适应窗口中目标与背景的分离。

(5)对目标背景分离后的背景矩阵 I_b 进行像素灰度级统计,对其均值和方差进行计算,得到背景的均值和方差

$$\mu = E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (8)$$

$$\sigma(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \quad (9)$$

式中: x_i 为背景杂波的像素强度; N 为背景窗口内像素个数。

(6)计算 K -分布概率密度函数的均值和形状参数, K -分布的形状参数与均值、方差之间的关系为^[9-10]

$$\sigma(x) = \left[\left(1 + \frac{1}{v} \right) \left(1 + \frac{1}{M} \right) - 1 \right] \mu^2 \quad (10)$$

式中: μ 、 $\sigma(x)$ 分别为均值和方差,由式(8)、(9)求得; M 为 SAR 图像视数; v 为形状参数。利用式(10)可求得

$$p(x) = \frac{2}{x\Gamma(v)\Gamma(M)} \left(\frac{Mux}{\mu} \right)^{(L+v)/2} K_{v-M} \left(2 \left(\frac{Mux}{\mu} \right)^{1/2} \right) \quad (11)$$

式中: x 为观测强度; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $K_{v-M}(\cdot)$ 为 $v-M$ 阶修正的柱贝塞尔函数,从而得到背景分布拟合的 K -分布概率模型。

利用上述背景分布作为恒虚警检测中的背景分布 $p(x)$, 可由以下虚警概率公式解得目标检测门限 t

$$1 - P_{fa} = \int_0^t p(x) dx \quad (12)$$

式中: P_{fa} 为虚警概率。

得到门限 t 后, 对目标背景分离后的待检目标分布求均值, 并对其均值进行门限检测。由上述原理可知, 设置合理的虚警概率, 对待检目标均值进行门限检测, 便可以实现对舰船类目标的精确检测。

2 实验结果对比分析

为了更好地验证本文算法的有效性, 分别利用传统滑动窗口检测算法和本文算法对图像中目标进行检测。

图 2 为用传统滑动窗口检测算法在检测近距离目标时的窗口设置。图 3 为用本文算法在检测近距离目标时的窗口设置。图 4 为用传统滑动窗口检测算法时对背景窗口内的背景像素统计及 K -分布拟合结果。图 5 为使用本文算法对目标背景分离后的背景像素统计及 K -分布拟合结果。

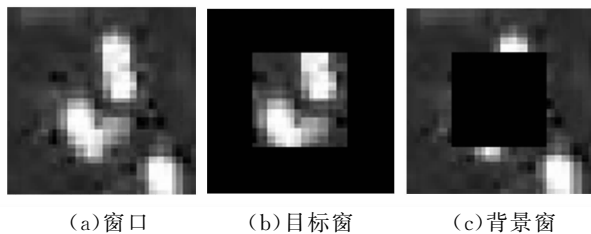


图 2 传统滑动窗口设置

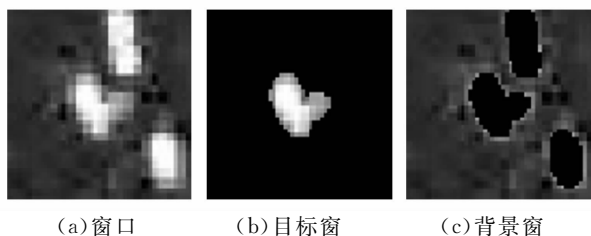


图 3 本文自适应窗口设置

由图 2 和图 3 可以看出, 传统滑动窗口检测算法由于固定步长的滑动检测, 无法使得待检测目标完全位于目标窗口内, 造成目标像素扩散至背景窗口, 同时近距离其他目标也会存在于背景窗口内, 影响背景像素统计质量, 而本文的自适应窗口设置, 通过待检测目标像素分布, 自适应设置窗口, 并在窗口内部通过目标像素和背景像素分离完成对背景像素的统计。分别对图 2、图 3 中背景像素进行统计, 并结合 K -分布概率模型, 拟合结果如图 4、图 5 所示。从

结果可以看出, 本文算法拟合结果更加精确。

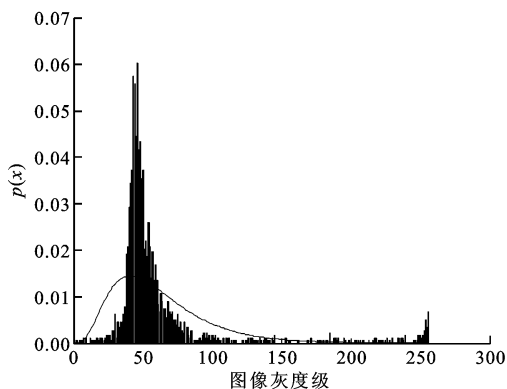


图 4 传统滑动窗口检测算法中背景像素统计及 K -分布拟合

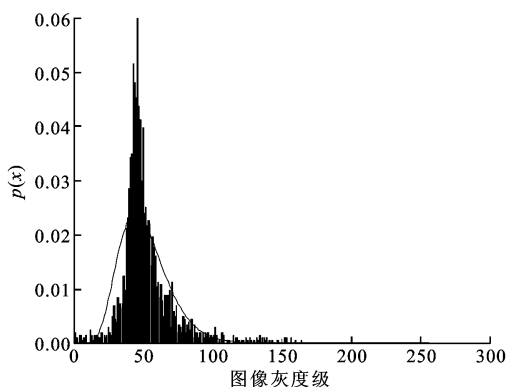
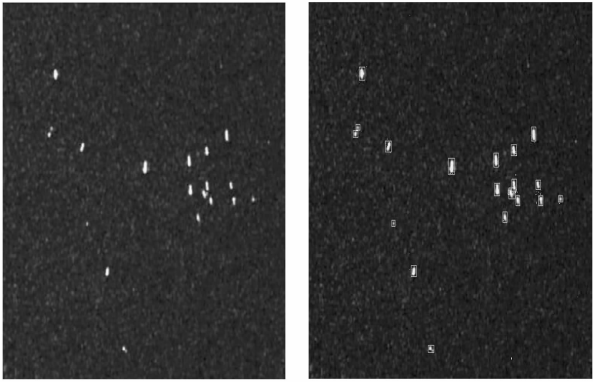


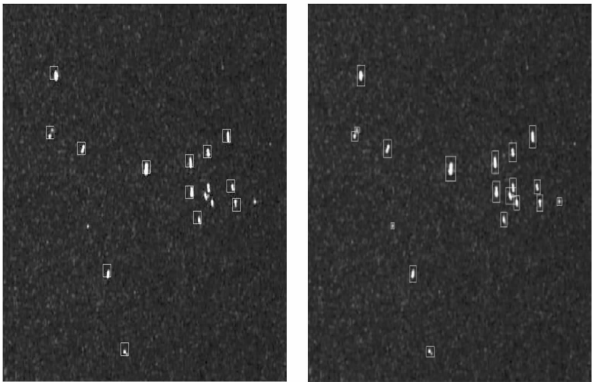
图 5 本文算法中背景像素统计及 K -分布拟合

利用传统 K -分布 CFAR 算法、局部窗 K -分布 CFAR 算法以及本文算法对 SIR-C 雷达图像 (含 19 个舰船目标) 和 5 m 分辨率舟山岛海面 SAR 图像 (含 11 个舰船目标) 进行舰船目标检测对比分析, 检测结果如图 6、图 7 所示。图中方框为被检测出真实舰船目标以及虚警目标, 圆圈为漏检目标, 三角框为虚警目标。

从图 6 结果可以看出: 全局 K -分布在低分辨且海杂波分布均匀的情况下能达到较为理想的检测结果; 局部 K -分布由于窗口设置的固定性以及滑动步长的设置, 难以实现对近距离目标以及小目标的精确检测; 本文算法可实现简单海面情况下舰船类目标的精确检测。从图 7 结果可以看出: 全局 K -分布 CFAR 已不适用于这种局部性变化强的目标检测; 局部窗 K -分布 CFAR 算法由于窗口检测的引入, 在很大程度上避免了由于陆地剔除不完整遗留下的伪目标造成的影响, 即背景局部变化性强对目标检测造成的影响, 但其传统窗口设置, 难以实现对近距

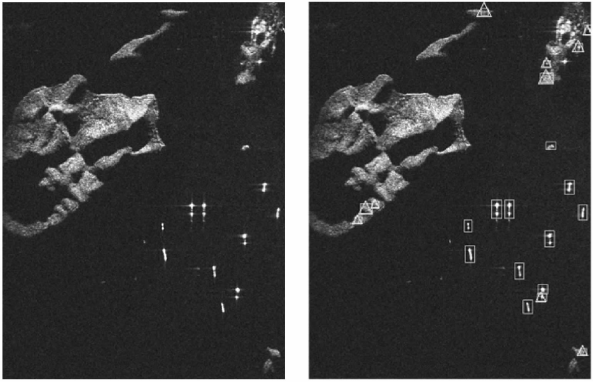


(a)SIR-C 雷达原始图像 (b)全局 K -分布 CFAR

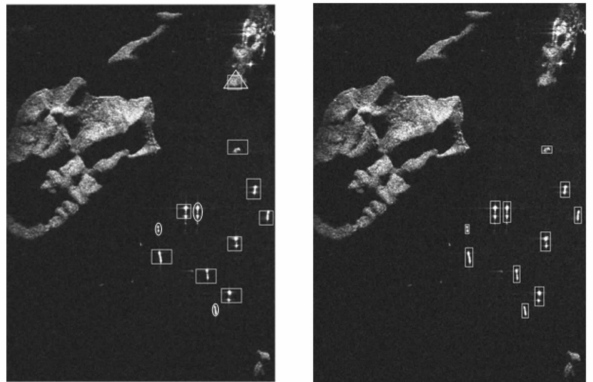


(c)局部窗 K -分布 CFAR (d)本文算法

图 6 应用 3 种算法对 SIR-C 雷达图像的检测结果



(a)5 m 分辨率舟山岛图像 (b)全局 K -分布 CFAR



(c)局部窗 K -分布 CFAR (d)本文算法

图 7 应用 3 种算法对舟山岛图像的检测结果

目标及小目标的检测,会产生一定的虚警和漏检概率;本文算法的自适应背景窗设置,不仅可以避免由于陆地剔除不完整遗留下的伪目标造成的影响,同时也可克服传统窗口设置的不足,实现对舰船类目标的精确检测。

为了衡量检测质量,定义检测的品质因子为^[9]

$$F = \frac{N_{tt}}{(N_{fa} + N_{gt})} \tag{13}$$

式中: N_{tt} 为检测中正确检测目标个数; N_{fa} 为虚警目标个数; N_{gt} 为实际目标个数。

表 1 列出了对平稳海面 SIR-C 图像 3 种检测算法的性能指标对比。从表 1 可以看出,本文算法具有更好的检测性能。

表 1 3 种算法对平静海面 SIR-C 图像的检测性能指标对比

检测算法	漏检数	正检数	虚警数	品质因子
局部窗 K -分布 CFAR	6	13	0	0.684 2
全局 K -分布 CFAR	0	19	1	0.950 0
本文方法	0	19	0	1.000 0

表 2 列出了对复杂海面背景下舟山岛 SAR 图像 3 种检测算法的性能指标对比。从表 2 可以看出,本文所提出的算法具有更好的检测性能。

表 2 3 种算法对复杂海面背景下舟山岛 SAR 图像的检测性能指标对比

检测算法	漏检数	正检数	虚警数	品质因子
局部窗 K -分布 CFAR	3	8	1	0.666 7
全局 K -分布 CFAR	0	11	9	0.550 0
本文方法	0	11	0	1.000 0

由以上实验可知,本文算法的检测效果明显优于全局检测算法和局部窗 K -分布 CFAR 算法,特别是对含有陆地、近距离目标、近岸目标等复杂海面状况的 SAR 图像中舰船目标检测具有很好的实用性。

3 结 论

本文在分析了双参 CFAR 检测、全局 K -分布 CFAR 检测和局部窗 K -分布 CFAR 检测局限性的基础上,提出了一种基于自适应背景窗的 SAR 图像

舰船分离检测算法。该算法通过对图像进行预滤波实现海面、陆地和目标的分离,并结合雷达分辨率,完成对陆地的剔除;然后,结合目标边界设置合适背景窗口,对背景窗口内目标与背景进行分离,实现对目标背景的自适应统计并拟合得到其 K -分布模型,完成对海面舰船目标的检测。在实测数据处理中,取得了很好的检测效果,证明了本文算法的有效性。

参考文献:

- [1] DELPHINE C M. Ship detection with spaceborne multi-channel SAR/GMTI radars [C]// Proceedings of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 400-403.
- [2] WANG Juan, SUN Lijie. Study on ship target detection and recognition in SAR imagery [C]// Proceeding of the 1st International Conference on Information Science and Engineering. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1456-1459.
- [3] 田巴睿,王超,张红. 星载 SAR 舰船检测技术及其在海洋渔业监测中的应用 [J]. 遥感技术与应用, 2007, 22(4): 503-512.
TIAN Sirui, WANG Chao, ZHANG Hong. Ship detection with spaceborne SAR and its application in oceanic fishery monitoring [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2007, 22(4): 503-512.
- [4] 周树道,王敏,叶松,等. 基于 SAR 图像的海洋舰船目标检测技术 [J]. 微计算机应用, 2010, 31(2): 61-65.
ZHOU Shudao, WANG Min, YE Song, et al. Ocean ship target detection technology based on SAR image [J]. Microcomputer Applications, 2010, 31(2): 61-65.
- [5] BREKKE C, ANFINSEN S N. Ship detection in ice-infested waters based on dual-polarization SAR imagery [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(3): 391-395.
- [6] XING Xiangwei, JI Kefeng, ZOU Huanxin, et al. A fast ship detection algorithm in SAR imagery for wide area ocean surveillance [C]// Proceeding of Radar Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2012: 0570-0574.
- [7] LIAO Mingsheng, WANG Changcheng. Using SAR images to detect ships from sea clutter [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 194-198.
- [8] 艾加秋,齐向阳,禹卫东. 改进的 SAR 图像双参数 CFAR 舰船检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2881-2885.
AI Jiaqiu, QI Xiangyang, YU Weidong. Improved two parameter CFAR ship detection algorithm in SAR images [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(12): 2881-2885.
- [9] 艾加秋,齐向阳. 一种基于局部 K 分布的新的 SAR 图像舰船检测算法 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(1): 36-42.
AI Jiaqiu, QI Xiangyang. A new ship detection algorithm based on local K -distribution in SAR images [J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2010, 27(1): 36-42.
- [10] 种劲松,朱敏慧. SAR 图像局部窗口 K -分布目标检测算法 [J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1276-1280.
ZHONG Jinsong, ZHU Minhui. Target detection algorithm of SAR image based on local window K -distribution [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25(9): 1276-1280.
- [11] 张辉,张道勇,何最红. 灰度等级处理中的 OSTU 动态阈值法研究 [J]. 传感器世界, 2008, 24(7): 24-27.
ZHANG Hui, ZHANG Yongdao, HE Zuihong. Study of OSTU dynamic threshold based on gray-scale processing [J]. Sensor World, 2008, 24(7): 24-27.
- [12] OTSU N. A threshold selection method form gray-level histograms [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybenetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [13] 程培英. 一种新颖的 Ostu 图像阈值分割方法 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26(5): 228-231.
CHENG Peiying. A novel OSTU segmentation algorithm for image threshold [J]. Computer Applications and Software, 2009, 26(5): 228-231.
- [14] 方斌,李伟仁. 基于数学形态学的空空导弹导引头红外图像处理 [J]. 红外技术, 2003, 25(2): 9-12.
FANG Bin, LI Weiren. Segmentation method for imaging IR air-to-air missile based on morphology [J]. Infrared Technology, 2003, 25(2): 9-12.

(编辑 刘杨)