

改进的 SAR 图像双参数 CFAR 舰船检测算法

艾加秋^{①②} 齐向阳^① 禹卫东^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 双参数 CFAR 检测中设置了目标窗口、保护窗口和背景窗口 3 个窗口, 并且窗口的大小, 滑动步长都要进行经验训练得到, 效率低, 对距离很近的舰船 SAR 图像会产生漏检。针对这些不足, 该文提出了一种改进的双参数 CFAR 检测算法, 该算法只取目标窗口和背景窗口, 通过把泄露到背景窗口中的舰船部分去除并对背景窗口中的剩余部分进行均值和方差估计来检测舰船, 并且将窗口滑动步长取为目标窗口尺寸。相对双参数 CFAR 算法, 结构得到了简化, 检测结果的虚警率减小, 对距离很近的舰船不会产生漏检, 计算效率得到了改善。仿真结果表明了方法的有效性。

关键词: 舰船检测; 双参数; 恒虚警; 背景杂波提取

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2881-05

Improved Two Parameter CFAR Ship Detection Algorithm in SAR Images

Ai Jia-qiu^{①②} Qi Xiang-yang^① Yu Wei-dong^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In all the algorithms of the ship detection of SAR images, two parameter CFAR detector uses three moving windows: target window, protect window and background window, the sizes of the three windows and the moving step need to be trained, So it is quite inefficient and will cause targets undetected when they are too close. The improved two parameter CFAR detector delivered in this paper only uses a target window and a background window, By using special methods to remove the leaked ship pixels in the background window and estimate the remaining pixels in the background window which are sea clutter to get the local window's clutter gray mean and variance. The moving step is the same as the length of the target window, Compared with two parameter CFAR detector, the structure is simplified and the detection result's false alarms is less, targets too close can also be detected, furthermore, the computing efficiency is improved. The simulation results prove the algorithm's effectiveness.

Key words: Ship detection; Two parameter detector; Constant False Alarm Rate (CFAR); Clutter extraction in the background window

1 引言

合成孔径雷达是一种高分辨率成像传感器, 具有全天时和全天候观测的能力。在海洋监测 SAR 图像中, 由于舰船金属的后向散射系数很大, 而海洋的后向散射系数很小, 因此海洋在 SAR 图像中灰度很小, 而舰船目标灰度很大^[1-6], 因此利用 SAR 图像进行舰船检测与监视得到高度重视, 并且取得了很大的成就。

由于随着不同的天气、风速, 海况相差很大, 因此呈现在 SAR 图像中的海洋杂波效果也有很大的差别^[7], 针对这些复杂情况, 在检测过程中需要有一个自适应的恒虚警检测方法。现阶段应用普遍

的是双参数 CFAR 检测和基于 K-分布的 CFAR 检测^[8]。

K-分布 CFAR 检测算法只适用于局部变化小的情况, 不适用于复杂海况的检测^[9]。双参数 CFAR 检测适用于局部背景变化复杂的 SAR 图像检测中, 它设定目标窗口、保护窗口和背景窗口, 并且这些窗口以一定的步长在图像中滑动。保护窗口是为了防止目标窗口中的舰船部分泄露到背景窗口中^[1], 它通过计算背景窗口中的所有像素的均值和方差得到该局部窗口的门限从而将目标窗口中高于该门限的部分判为舰船。但是双参数 CFAR 检测算法的目标窗口、保护窗口和背景窗口尺寸需通过经验学习取得, 滑动步长也是经验取得^[10], 效率低, 实现起来繁琐。对于距离很近的舰船会出现漏检。

针对双参数 CFAR 检测和 K-分布 CFAR 检测算法的局限性，本文提出了一种改进的双参数 CFAR 检测算法。

2 改进的双参数 CFAR 检测算法

传统的双参数 CFAR 检测算法基于背景杂波是高斯分布的假设^[1]，它可以适应背景杂波变化。双参数 CFAR 算法通过计算背景窗口中的所有像素的均值 μ_b 和方差 σ_b^2 进行检测，假定目标窗口中某一像素的灰度值为 I_T ，则目标检测准则为^[1]

$$I_T - \mu_b > t \cdot \sigma_b \quad (1)$$

当 $I_T - \mu_b > t \cdot \sigma_b$ 时，判为目标，否则判为背景。其中 t 为标称化因子，通常为常数，它控制虚警率。

由于 3 窗口以一定的步长在图像上滑动，因此保护窗口并不能保证舰船部分不会泄露到目标窗口中，参见图 1，因此通过计算背景窗口得到的灰度均值和方差并不代表杂波实际的值。在检测过程中会出现虚警和漏检。

本文提出的算法设置了两个滑动窗口：目标窗口 T 和背景窗口 B ，参见图 2，其中目标窗口的大小设为最大船只长度的 2 倍，背景窗口大小设为目标窗口大小的 2 倍^[2]。将两窗口以一定的步长(目标窗口大小)在图像中滑动，保证除四周边缘的像素外所有像素全部检测到。由于在滑动的过程中背景窗口中可能会有舰船像素。因此本文考虑将背景窗口中的舰船部分去除而对剩余部分像素来统计得到估计的杂波均值和方差。

该算法具体步骤为

- (1)输入目标窗口和背景窗口的尺寸。
- (2)计算整个背景窗口的均值 μ_b 和方差 σ_b^2 。

(3)对背景窗口中的每一个像素灰度值 I_B 减去均值 μ_b ，如果 $I_B - \mu_b \geq t_1 \cdot \sigma_b$ ，(其中 t_1 可取为 2.5 - 3.5，经验值取为 3。)则该像素点可认为是舰船部分，当然也可能是斑点噪声，但是去除了斑点

噪声对检测结果来说将会更好。标记这种方法为第 1 种杂波提取方法。应用这种方法去除背景中的舰船部分前后的对比参见图 3。

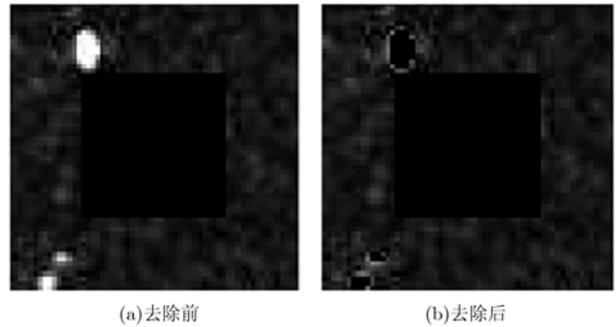


图 3 去除背景中的舰船部分前后的对比图

从图 3 中可以看出有部分舰船像素没有完全去除，但是效果已经得到了大大地改观。还可以用种子点区域增长的方法^[3]通过选取背景窗口中非舰船像素和非噪声斑点的种子点(种子点的灰度可设为 $\mu_b < T_{seed} < 1.5 \cdot \mu_b$)，设定背景均值 μ_b 为增长门限从而将背景窗口中的舰船部分提取出来，标记这种方法为第 2 种杂波提取方法。去除背景窗口中舰船部分前后的对比参见图 4。

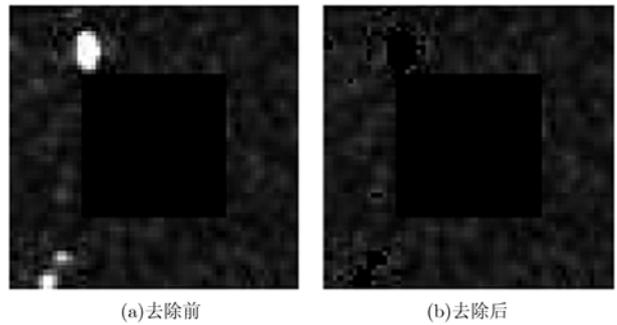


图 4 种子区域增长法去除舰船部分前后对比图

显而易见，基于种子区域增长去除舰船部分的第 2 种杂波提取方法的效果更好。两种算法各有优缺点，第 1 种方法速度快，实现起来容易。第 2 种方法提取出来的效果更好，但是速度慢。

(4)对去掉舰船部分的背景窗口中的杂波重新进行均值和方差计算，得到新的均值 μ_b 和方差 σ_b^2 。并且对目标窗口中的每一个像素点进行判断来判断是否是舰船。其判决规则是：设 I_T 是目标窗口中的像素灰度值，如果 $I_T - \mu_b \geq t \cdot \sigma_b$ ，其中 t 的取值根据实验训练得到，其经验取值为 $4.5 < t < 7.0$ 。一般取 $t = 5.0$ 。

(5)根据以上方法将背景窗口和目标窗口以一

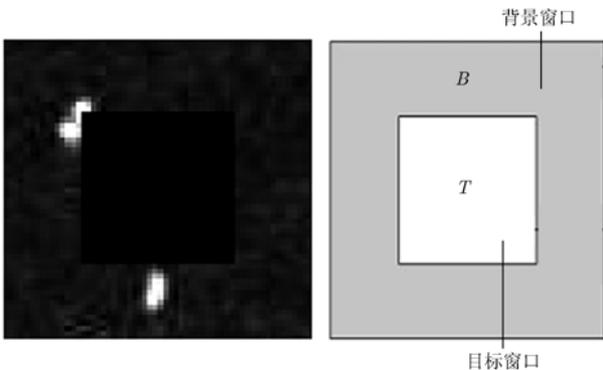


图 2 改进的双参数 CFAR 检测算法窗口设置

图 1 背景窗口中的舰船泄露现象

定的步长在图像上滑动,只要取滑动的步长保证能对每个点进行检测。为了提高计算效率,滑动步长取为目标窗口的大小。

3 恒虚警性分析

传统的双参数CFAR和本文提出的算法都是基于背景杂波是高斯分布的假设,传统的双参数CFAR算法的虚警率与标称化因子 t 之间满足以下关系^[10]:

$$P_{fa} = 1/2 - 1/2 \times \Phi(t) \quad (2)$$

其中 $\Phi(\bullet)$ 为标准正态分布函数。下面论证本文算法的恒虚警性。

下面验证背景窗口中去除舰船部分后的剩余像素统计的均值和方差为真实的海杂波的均值和方差:假定未去除舰船部分的均值和方差为 μ_b 和 σ_b^2 。则杂波灰度值 x 的概率分布 $f(x)$ 服从高斯分布:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_b} \exp\left(-\frac{(x - \mu_b)^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (3)$$

则原来的背景窗口中的灰度 x 的概率分布 $f(x)$ 如图5所示。

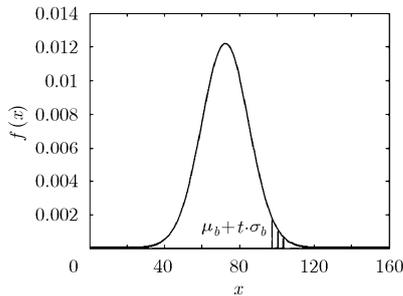


图5 背景窗口灰度概率分布图

本算法中的第(3)步第2种基于种子点区域增长杂波提取方法选取一定的面积门限能很准确地提取出舰船部分而不会取出海杂波中的斑点噪声部分,对杂波成分没有影响。

本算法中的第(3)步选取第1种杂波提取方法去除背景窗口中的舰船部分,除了会去除掉背景窗口中的舰船部分外,还会去除掉小部分斑点噪声,如图5中的阴影部分所示。由于去除掉的小部分斑点噪声部分占背景杂波中的比例为: $1 - \Phi(t_1) \leq 0.0013 (2.5 \leq t_1 \leq 3.5)$,比例很小,因此统计的杂波均值和方差和真实的杂波的均值和方差相比略微减小,因此虚警率比第2种基于种子点区域增长方法的虚警率略大,但是相差很小。

假定背景窗口中无舰船泄露,全是杂波,令背景窗口中杂波的均值为 μ_b ,方差为 σ_b^2 ,而杂波服从

高斯分布:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_b} \exp\left(-\frac{(x - \mu_b)^2}{2\sigma_b^2}\right) \quad (4)$$

则这种情况下的虚警率为

$$\begin{aligned} P_{fa1} &= \int_T^\infty f(x)dx = \int_{\mu_b + t \times \sigma_b}^\infty f(x)dx \\ &= \int_t^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - \Phi(t) \end{aligned} \quad (5)$$

当背景窗口中有舰船泄露时,由于本文算法将背景中的舰船部分提取出来并且不计入杂波中,因此最后得到的去除舰船部分的统计均值和方差为实际中真正的杂波,其均值和方差为 μ_b 和 σ_b^2 。此时的杂波概率模型为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma_b} \exp\left(-\frac{(x - \mu_b)^2}{2 \times \sigma_b^2}\right) \quad (6)$$

因此这种情况下的虚警率为

$$\begin{aligned} P_{fa2} &= \int_T^\infty f(x)dx = \int_{\mu_b + t \times \sigma_b}^\infty f(x)dx \\ &= \int_t^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - \Phi(t) \end{aligned} \quad (7)$$

综上所述,本文算法的虚警率为

$$\begin{aligned} P_{fa} &= P(1) \times P_{fa1} + P(2) \times P_{fa2} \\ &= (P(1) + P(2)) \times (1 - \Phi(t)) = 1 - \Phi(t) \end{aligned} \quad (8)$$

因此本文算法第(3)步第2种种子区域增长杂波提取方法具有恒虚警性。第1种杂波提取舰船部分得到的检测结果的虚警率比第2种方法略大,但是相差很小。

4 实验结果对比分析

本文选用SIR-C图像和RADARSAT图像进行检测。它们的杂波服从高斯分布。对它们分别使用双参数CFAR检测和本文提出的改进的双参数CFAR检测方法进行检测,检测中设定的虚警率相同。本算法中的第(3)步分别选取两种方法去除背景窗口中的舰船部分进行比较。图6,图7中方框为正确目标,圆圈为虚警目标。

为了衡量检测效果,定义了检测的品质因子FoM^[9], $FoM = N_{tt} / (N_{fa} + N_{gt})$,其中 N_{tt} 为检测中正确的检测目标数, N_{fa} 为虚警目标数, N_{gt} 为实际目标数。

对于平稳海况的SIR-C图像(380×327),应用两种检测方法进行检测得到比较效果如图6所示。图6(a)为平静海面SIR-C原图像,图6(b)为使用双参数CFAR检测结果,图6(c)为使用本文算法第1种提取方法检测结果,图6(d)为使用本文算法第2种提取方法检测结果。3种方法的虚警率相同,为

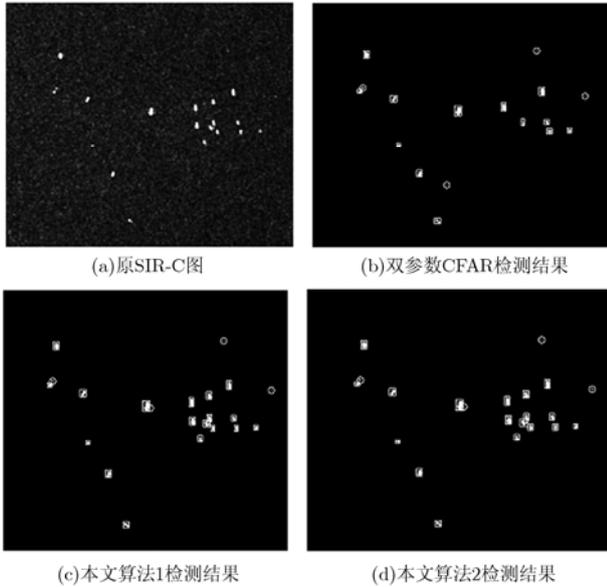


图 6 应用 3 种方法对平静海面 SIR-C 图像进行检测的效果图

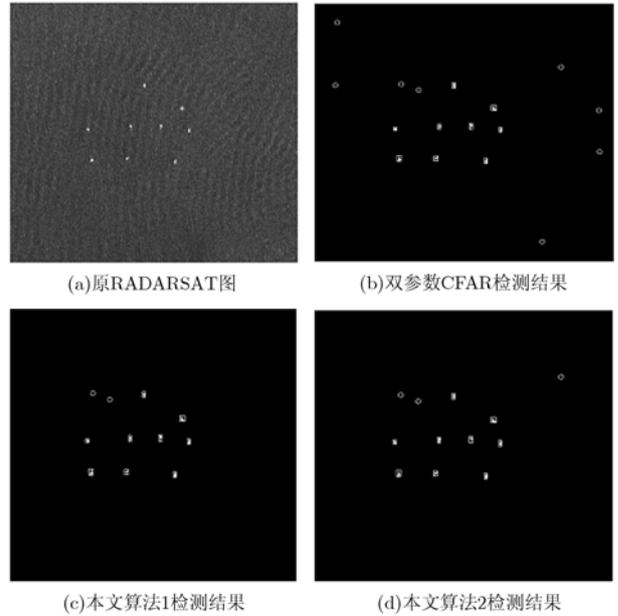


图 7 应用 3 种方法对复杂海面 RADARSAT 图像进行检测的效果图

$$P_{fa} = 10^{-8}$$

表 1 列出了平静海面 SIR-C 图像使用 3 种检测方法的指标对比。图像中舰船实际目标数为 18。

表 1 平静海面 SIR-C 图像 3 种检测方法检测指标

检测算法	漏检数	正确检测数 N_{tt}	虚警数 N_{fa}	品质因子 FoM	时间(s)
双参数 CFAR	5	13	4	0.76	0.375
本文算法 1	0	18	4	0.82	0.255
本文算法 2	0	18	4	0.82	23.36

对于复杂海况 RADARSATSAT SAR 图像(497 × 476)，应用两种检测方法进行检测得到比较效果图 7。图 7(a)为原图像，图 7(b)为使用双参数 CFAR 检测结果，图 7(c)为使用本文算法第 1 种提取方法检测结果，图 7(d)为使用本文算法第 2 种提取方法检测结果。3 种方法的虚警率相同，为 $P_{fa} = 10^{-8}$ 。

表 2 分别列出了复杂海面 RADARSAT 图像使用 3 种检测方法的指标对比。图像中舰船实际目标数为 9。

表 2 复杂海面 RADARSAT 图像 3 种检测方法检测指标

检测算法	漏检数	正确检测数 N_{tt}	虚警数 N_{fa}	品质因子 FoM	时间(s)
双参数 CFAR	0	9	8	0.53	0.752
本文算法 1	0	9	2	0.82	0.328
本文算法 2	0	9	3	0.75	36.20

从表 1，表 2 可以看出，本文算法与双参数 CFAR 算法相比：本文算法对相距很近的船不会发生漏检，这是由于提取出了背景窗口中的舰船部分。而且虚警率小于双参数 CFAR 算法。本文算法仿真中设定双参数 CFAR 算法和本文算法的滑动步长为最大能够滑动的步长，也即目标窗口大小，由于本文算法的目标窗口大小为最大舰船长度的两倍，而双参数 CFAR 目标窗口大小为最小舰船长度的两倍，因此利用第 1 种方法提取舰船部分的计算时间减少了，而利用第 2 种方法是基于种子点区域增长方法提取，需要遍历每个点并判断该点是否为舰船部分，因此提取舰船部分的花费时间长，计算效率要差。但是本文算法的结构得到了简化。

通过以上实验可知，本文的算法的检测效果和检测效率明显优于传统的双参数 CFAR 检测算法，对于复杂海况的舰船检测有很好的实用性。

5 结论

本文研究了双参数 CFAR 检测的特点及其局限性，在其基础上提出了一种改进的双参数 CFAR 检测算法。它通过设置一个滑动的背景窗口和目标窗口，并将背景窗口中的舰船部分去除而对剩余部分进行统计得到杂波均值和方差，结构得到了简化，在实际应用中取得了很好的检测效果，其检测效率高于双参数 CFAR 检测算法，有很好的实用价值。

参考文献

[1] 种劲松, 朱敏慧. SAR 图像舰船目标检测算法的对比研究[J]. 信号处理, 2003, 19(6): 580-582.
Chong Jin-song and Zhu Min-hui. Comparison on ship target

- detection algorithms of SAR imagery [J]. *Signal Processing*, 2003, 19(6): 580-582.
- [2] 种劲松, 朱敏慧. SAR 图像窗口 K-分布目标检测算法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1276-1280.
- Chong Jin-song and Zhu Min-hui. Target detection algorithm of SAR image based on local window K-distribution[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(9): 1276-1280.
- [3] 谢明鸿, 张亚飞, 付琨. 基于种子点增长的 SAR 图像海岸线自动提取算法[J]. 中国科学院研究生院学报, 2007, 24(1): 93-98.
- Xie Ming-hong, Zhang Ya-fei, and Fu Kun. Algorithm of detection coastline from SAR images based on seeds growing[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences Technology*, 2007, 24(1): 93-98.
- [4] 陈德元, 涂国防. 一种基于小波变换的 SAR 图像舰船检测的新算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 855-858.
- Chen De-yuan and Tu Guo-fang. A new algorithm of ship targets detection in SAR images using wavelet transform[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 855-858.
- [5] 郝程鹏, 侯朝焕. 一种 K-分布杂波背景下的双参数恒虚警检测器[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 756-759.
- Hao Cheng-peng and Hou Chao-huan. A two parameter CFAR detector in K-distribution clutter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 756-759.
- [6] Eldhuset K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(4): 1010-1019.
- [7] Blake A P, Blacknell D, and Oliver C J. Sea clutter analysis and its resolution dependence[C]. Radar conference 97, Edinburgh, UK, Oct.14-16, 1997: 124-128.
- [8] Li Hai-yan and He Yi-jun. Detection of weak ship signals with the optimization of polarimetric contrast enhancement [J]. *High Technology Letters*, 2008, 14(1): 85-91.
- [9] Robertson N, et al. Ship surveillance using RADARSAT ScanSAR images[J]. Ship Detection in Coastal Waters Workshop 2000, NS, Canada, 31 May, 1&2 June, 2000: 41-45.
- [10] Crisp D J. The State-of-art in ship detection in synthetic aperture radar image[R]. Defence Science and Technology Organization (DSTO)Information Science Laboratory, Edinburgh, Australia, 2004: 16-54.
- [11] 何友等. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 81-90.
- He You, et al. Radar Automatic Detection and CFAR Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999: 81-90.
- 艾加秋: 男, 1985年生, 硕士生, 从事信息和信号处理方面的研究
- 齐向阳: 男, 1974年生, 副研究员, 硕士生导师, 长期从事星载 SAR 系统仿真和高分辨率成像技术方面的研究.
- 禹卫东: 男, 1969年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事合成孔径雷达信号处理技术的研究.