

一种改进的 *CFAR* 船只探测方法

陈 鹏,黄韦良,傅 斌,史爱琴

(国家海洋局 海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室,国家海洋局 第二海洋研究所,浙江 杭州 310012)

摘 要: 提出了一种改进的 *CFAR* 船只探测算法。该方法采用 PNN 模型来估计海面雷达后向散射的概率分布模型,利用 *CFAR* 技术来确定整体阈值,采用基于交叉验证技术的黄金分割搜索法估算高斯分布的形状参数,使用区域生长法去除虚警。使用 Radarsat 图像对该方法进行了检验,并与改进前的算法进行了比较,结果显示该文的探测算法在探测精度和探测速度上均明显优于改进前的算法。

关键词: 船只探测;PNN;*CFAR*;合成孔径雷达

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引 言

由于合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候和大范围监视海面船只的能力,星载 SAR 船只探测技术的研究长期以来受到有关方面的高度关注。早在 20 世纪 80 年代初,美国科学家就从 Seasat-1 卫星 SAR 图像上注意到了船只的信息^[1]。1988 年挪威的 Eldhuset 提出了窗口滤波船只探测法^[2],并将该方法应用于 Seasat-1 和 ERS-1 卫星 SAR 的船只探测^[3,4]。但该方法的计算时间较长,海况的适应性较差。1997 年加拿大 Vachon 等人开发了基于 K 分布的恒虚警概率(*CFAR*)船只探测法^[5],该方法的船只探测精度达到了 85%,已被应用于加拿大的海洋监测工作站(OMW)^[6]。基于 K 分布的 *CFAR* 船只探测法虽然能较好地适应各种背景噪声,但估计的形状参数有时会出现负值,此外计算也比较耗时。在众多的探测算法中,概率神经网络(PNN)开始受到人们重视。PNN 是一种以 Parzen 窗概率密度估计为基础的神经网络,理论上可以用于估计任意分布的概率密度,其估计精度只与样本数量和窗函数(高斯函数)形状参数有关,且适用于不同的海面粗糙度。Jiang 等人提出了一种基于概率神经网络的

CFAR 船只探测法^[7],该方法避免了复杂的计算,取得了较快的计算速度。但是该方法也存在一些不足之处,例如形状参数的估算精度与速度互相制约,要获得较高的精度就必须牺牲速度,相反要提高速度就得牺牲精度;形态学滤波算子的性能不可靠,可能腐蚀船只目标的形状信息,也可能将虚警误认为是船只,或者将船只误认为是虚警。本文提出了一种改进的基于 PNN 的 *CFAR* 船只探测算法。该方法利用基于 PNN 概率分布函数的 *CFAR* 来确定探测的整体阈值,采用黄金分割搜索法估算形状参数,使用区域生长法去除虚警。通过对 RADARSAT SAR 图像的船只探测,验证该方法的探测精度和速度。

2 探测模型

本文的星载 SAR 水面船只探测模型由 *CFAR* 探测器、基于 PNN 的概率分布函数和区域生长法组成。

2.1 *CFAR* 探测器

CFAR 探测器基于对 SAR 图像中的船只及其背景噪声的统计信息,使用一个特定的阈值来区分船只和背景噪声。*CFAR* 船只探测器的数学表达式

收稿日期:2003-10-08;修订日期:2004-03-29

基金项目:国家 863 项目 2002AA633120。

作者简介:陈鹏(1977—),男,湖南安仁人,2000 年获武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业工学学士,2004 年获得国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室理学硕士学位。研究方向:遥感与 3S 集成技术、海洋微波遥感。

为:

$$CFAR=1-F(I_c) \tag{1}$$

其中 I_c 为船只探测的整体阈值, $F(I_c)$ 为 SAR 图像灰度分布的概率分布函数在 I_c 处的函数值。

2.2 基于 PNN 的概率分布函数

基于 PNN 的 SAR 图像灰度概率分布函数 $F(x)$ 由下式给出:

$$F(x)=\sum_{i=0}^mP[i]\int_0^xG_{i,\sigma}(t)dt \tag{2}$$

其中 m 为 SAR 图像灰度的最大值, $P[i]$ 为归一化直方图, t 为中间变量, $G_{i,\sigma}(x)$ 为高斯权函数, 其表达式为:

$$G_{i,\sigma}(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp[-(x-i)^2/2\sigma^2] \tag{3}$$

其中 σ 为形状参数。

2.3 区域生长法

区域生长法一般用来分割图像, 这里我们用来去除虚警。区域生长法以图像的某个像元为生长点, 比较相邻像元的特征, 将具有相似特征的相邻像元合并为同一区域。以合并的像元为生长点, 继续重复以上的过程, 最终形成具有相似特征的像元最大连通集合。

3 探测流程

基于 PNN 的 CFAR 船只探测方法, 其探测流程如图 1。探测流程分为形状参数估算、概率分布函数确定、探测阈值计算、船只探测和虚警去除 5 个步骤。

3.1 形状参数估算

形状参数 σ 的值与整体阈值结果直接相关, 因此它的选取非常重要^[7]。至今国内外还没有很好的方法来解决这一问题。本文使用基于交叉验证的黄金分割搜索法。该方法对一系列形状参数使用训练数据来估计其概率密度函数, 然后使用验证数据对所估计出来的概率密度函数进行验证, 取概率密度函数与验证数据的归一化直方图的均方差最小时对应的 σ 值为权函数的形状参数, 其中寻找最小误差的过程采用黄金分割搜索法。形状参数估算过程如下: 首先进行数据采样, 一幅 $m\times n$ 大小的图像, 使用 3×3 的窗口将图像均匀划分, 在每一个窗口中随

机地选取一个值组成训练数据, 然后再从窗口中剩下的数据里取出中值组成验证数据。

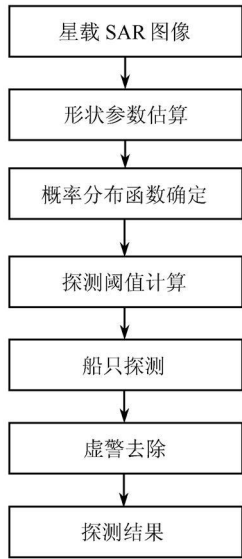


图 1 船只探测流程图
Fig.1 Flow chart of ship detection

其次使用训练数据得到含 σ 变量的概率密度函数 $D(x)$:

$$D(x)=\sum_{i=0}^mH_L[i]G_{i,\sigma}(x) \tag{4}$$

其中 H_L 为训练数据的归一化直方图。

然后使用验证数据得到误差函数 $E(\sigma)$, 表达式如下:

$$E(\sigma)=\sqrt{\frac{1}{2}\sum_{i=0}^m(D(l)-H_v(l))^2+\eta\Delta H} \tag{5}$$

其中 $\Delta H=\sum_{i=0}^m\|H_L(n)-H_L(n-1)\|$, η 为补偿系数, 一般为 1。

最后使用黄金分割搜索算法来求解 $E(\sigma)$ 的局部极值, 其极小值所对应的 σ 即为我们所要求的形状参数。其中 σ 的取值范围一般为 0—10 之间。

3.2 概率分布函数的确定

得到 σ 值以后, 可由式 (3) 确定权函数。将权函数代入式 (2), 可得到概率分布函数。概率分布函数的求解过程如下:

首先求解 $\int_0^xG_{i,\sigma}(t)dt$ 。因为误差函数 $erf(x)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^xe^{-t^2}dt$, 故有

$$\int_0^x G_{i, \sigma}(t) dt = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{x-i}{\sigma\sqrt{2}} \right) + \operatorname{erf} \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(y) &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[y - \frac{y^3}{3 \times 1!} + \frac{y^5}{5 \times 2!} - \frac{y^7}{7 \times 3!} + \dots \right] \\ &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \frac{y^{2n+1}}{(2n+1) \times n!} \end{aligned}$$

然后将式(6)代入式(2),由 SAR 图像归一化直方图即可确定概率分布函数的表达式。

3.3 探测阈值计算

探测阈值的计算实际上是对式(1)的求解。 $CFAR$ 是一个恒定的值,而且 $F(x)$ 为一个单调递增的函数,本文使用二分法进行求解,由于图像灰度值为整数,求解的精度为整数 1 即可。求解步骤如下(本方法适用 8 位的图像):

(1) 寻找一个数 $I(0-255$ 之间),使得 $F(I) \leq 1 - CFAR$ 且 $F(I+1) \geq 1 - CFAR$,那么 I_c 就介于 I 与 $I+1$ 之间。从 0 开始找,取 $I=0$,步长 S 取 128。如果 $F(I)$ 满足 $F(I) \leq 1 - CFAR$ 且 $F(I_1) \geq 1 - CFAR$ (结束条件),则 $I = I_c$,求解结束。否则执行下一步。

(2) 取 $I = I + \frac{S}{2^n}$,计算 $F(I)$ 的值,如果满足结束条件则 $I = I_c$,求解结束。否则执行下一步。

(3) 如果 $F(I) < 1 - CFAR$,那么执行第二步,否则 $I = I - \frac{S}{2^{n+1}}$,计算 $F(I)$ 的值,如果 $F(I)$ 满足结束条件,那么 $I = I_c$,求解结束。否则如果 $F(I) > 1 - CFAR$,就执行第二步,如果 $F(I) < 1 - CFAR$ 则执行第三步。如此反复,直到找到 I_c 为止。

3.4 船只探测

船只探测过程是一个用探测阈值 I_c 区分船只目标和海面背景的过程。将图像的每个像元的灰度值与 I_c 进行比较,如果大于或等于 I_c ,则该像元为可能的船目标像元,否则为海面背景像元。

3.5 虚警去除

利用区域生长法去除虚警的步骤如下:

(1) 根据 SAR 图像的分辨率设置船目标像元个数最小值。

(2) 对每一个候选的可能船目标,使用区域生长法,统计其像元个数。

(3) 如果像元个数的值大于或等于船目标像元个数最小值,则认为该候选船目标为真实目标,否则将该候选船目标作为虚警处理。

4 船只探测实例

图 2(a) 为 Radarsat SAR F1 模式图像,大小为 512×512 像元,成像时间为 1998 年 3 月 5 日 5 时 49 分。雷达波束入射角为 39° ,图像空间分辨率为 9m。由于锚地风平浪静,海面雷达后向散射较弱,泊在锚地的船只与海面背景形成很大的反差,在 SAR 图像上清晰可辨。

通过图 1 船只探测流程的运行,得到图 2(a)的形状参数为 1.6,整体阈值为 187。恒虚警概率 $CFAR$ 的值越小,表示虚警的概率越小,本文取 $CFAR = 10^{-3}$ 。图 2(b)和图 2(c)分别为船只探测和去除虚警后的结果。比较图 2(a), (b)和 (c),可发现图 2(a)中的 5 艘船只都被探测出来,没有虚警。

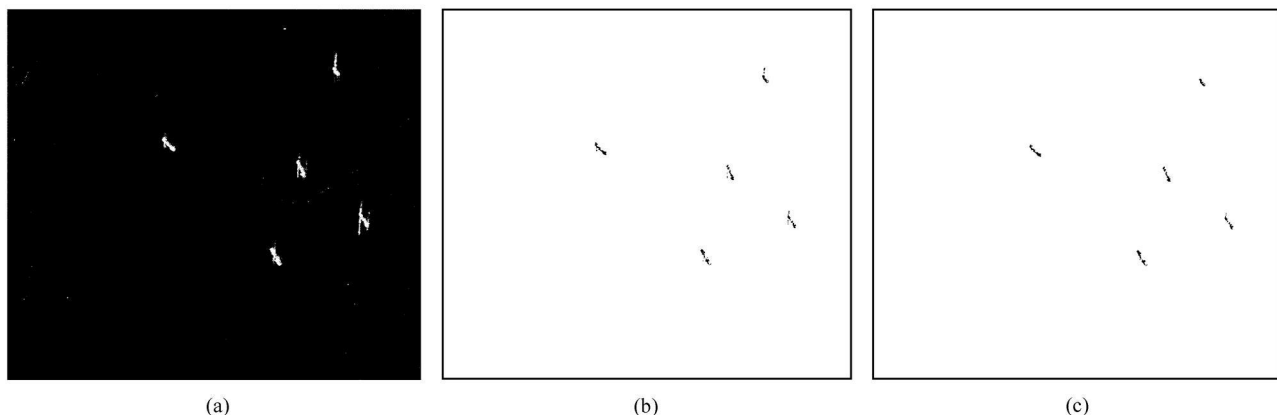


图 2 Radarsat SAR 船只图像及其探测结果

Fig.2 Radarsat SAR image and detection result

图 3(a)是台湾海峡 Radarsat SAR S7 模式图像,大小为 531×468 像元,成像时间为 2001 年 10 月 5 日 18 时 12 分,图像空间分辨率为 25m。由于雷达

波束入射角为 47° 和较好的海况条件,航行中的船只与海面背景存在较大的反差,在 SAR 图像上依然清晰可辨。

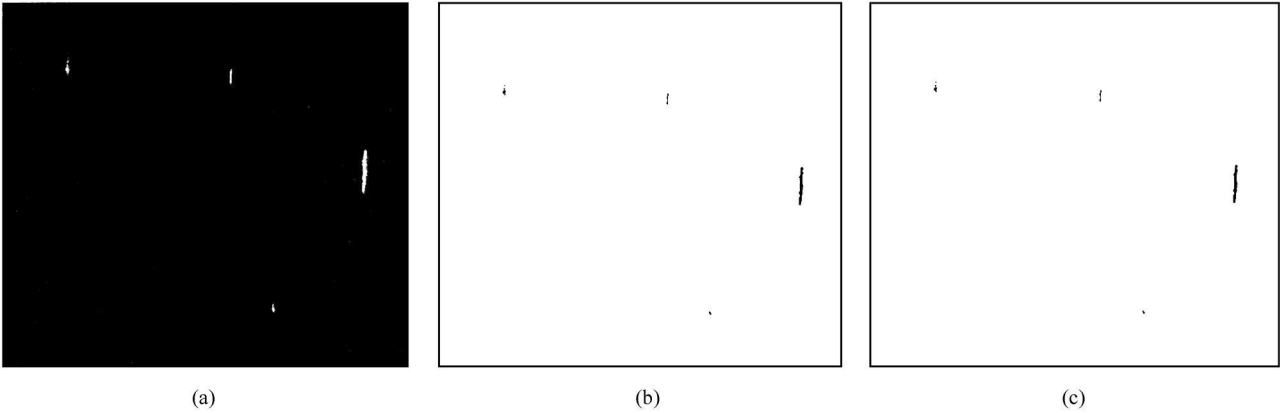


图 3 Radarsat SAR 船只图像及其探测结果
Fig.3 Radarsat SAR image and detection result

由流程图 1 计算得到图 3(a)的形状参数为 1.5,整体阈值为 153。图 3(b)和(c)分别为船只探测和去除虚警后的结果。探测结果显示图 3(a)中所有 4 艘船只都被探测出来,且无虚警。

像,大小为 723×628 像元,成像时间为 2002 年 3 月 2 日 9 时 59 分,空间分辨率为 25m。与图 3(a)图像不同的是图 4(a)的图像背景噪声比较大,但仔细观察,仍能看到航行中的 4 艘船只。

图 4(a)是台湾北部海区 Radarsat SAR S7 模式图

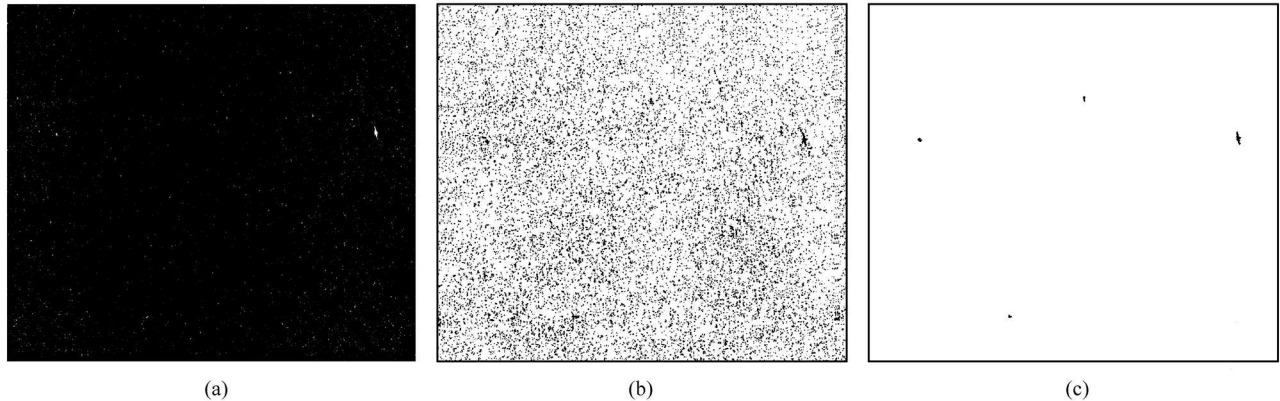


图 4 Radarsat SAR 船只图像及其探测结果
Fig.4 Radarsat SAR image and detection result

由流程图 1 计算得到图 4(a)的形状参数和整体阈值分别为 2.6 和 101。图 4(b)为船只探测的结果,显示大量的背景噪声被认为是可能的船目标。图 4(c)为去除虚警后的船只探测结果,可以看出只有 4 个船只目标信息被保留了下来,所有的虚警都被去除了。

实际上具代表性的基于人工神经网络的 CFAR 探测方法^[7],也是本方法的原型,本文的探测方法与该方法进行了比较。表 1 给出了 3 个探测实例的比较结果。由表 1 可知,在水面船只与海面背景存在较大的灰度反差时(实例 1 和 2),两种方法都能 100% 的探测出所有的船只,而且均无虚警。但是当海面背景噪声较大时(实例 3),本文的方法明显优于 Jiang 等人方法。经过虚警去除以后,本文方法的探测精度为 100%,Jiang 等人的方法的精度为 75%,有 25%

5 与同类探测方法的比较

Jiang 等人 2001 年提出的船只探测法是目前国

的虚警。由表 1 还可看出两种方法在探测速度上也
有较大差异。就 3 幅图像的平均探测速度而言,本
文的方法为 1.3s,比 Jiang 等人的 4.3s 要快 3 倍以上。

表 1 本文的方法与 Jiang 等人方法的探测结果比较
Table 1 Performance comparison between our method and Jiang's

	方法	CFAR 值	σ 值	整体阈值	探测时间/s	实际船只数量	探测船只数量	虚警概率/%	探测精度/%
实例 1	1	0.001	1.6	187	1.141	5	5	0	100
	2	0.001	1.8	191	3.846	5	5	0	100
实例 2	1	0.001	1.5	153	1.352	4	4	0	100
	2	0.001	1.4	149	4.226	4	4	0	100
实例 3	1	0.001	2.6	101	1.441	4	4	0	100
	2	0.001	2.7	108	4.886	4	3+1	25	75

注:方法 1 为本文的方法,方法 2 为 Jiang 等人的方法。3+1 表示有一个虚警。

6 结 论

本文改进了基于 PNN 模型的 CFAR 船只探测方法。使用 Rardarsat SAR 图像对改进后的探测方法进行了检验,探测精度为 100%,虚警概率为零。比较结果表明,改进后的船只探测方法探测精度更高,速度更快。

参 考 文 献(References)

[1] Fu L L, Holt B M. Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic Aperture Radar[M]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, USA, 1982.

[2] Eldhuset K. Automated Ship and Ship Wake Detection in Spaceborne SAR Images from Coastal Region[A]. in Proc. IGARSS '98[C]. 1988, 1529—1533.

[3] Knut Eldhuset. An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Spaceborne SAR Images in Coastal Regions[J]. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1996, 34(4): 1010—1019.

[4] Wahl Terje, Eldhuset Knut. Ship Traffic Monitoring Using the ERS-1 SAR[A]. Norwegian Defence Research Establishment (NDRE). Proceeding First ERS-1 Symposium[C]. 1992, 823—828.

[5] Vachon P W, Campbell J, Bjerklund C, Dobson F, et al. Ship Detection by the RADARSAT SAR: Validation of Detection Model Predictions[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1997, 23(1): 48—59.

[6] Vachon P W, Thomas S J. Validation of Ship Detection by the Radarsat Synthetic Aperture Radar and the Ocean Monitoring Workstation[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1999, 25(1): 112—123.

[7] Jiang Q S, Aitnouri Elmechdi, Wang S R. Automatic Detection for Ship Target in SAR Imagery Using PNN-model[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(4): 297—305.

[8] Duin R P W. On the Choice of Smoothing Parameters for Parzen Estimators of Probability Density Function[J]. IEEE Trans. Comput., 1976, 25(4): 1175—1179.

AN IMPROVED CFAR ALGORITHM FOR SHIP DETECTION IN SAR IMAGERY

CHEN Peng, HUANG Wei-gen, FU Bin, SHI Ai-qin

(Laboratory of Ocean Dynamic Processes and Satellite Oceanography, Second Institute of Oceanography, Hangzhou 310012, China)

Abstract: In this paper, we present an improved constant false alarm rate (CFAR) algorithm for ship detection in synthetic aperture radar (SAR) imagery. The algorithm includes the probabilistic neural networks (PNN), CFAR technique, golden section method and area growth method. The PNN is used to estimate the probabilistic density function of radar backscatter from sea surface. The CFAR technique is applied to determine a threshold that differs ships from sea surface. The golden section method is used to estimate the shape parameter of the Gauss function while the area growth method is employed to remove the false alarm. The algorithm is applied to detect ships in Radarsat imagery. The comparison of the performance between the improved algorithm and the original algorithm is made. The results show that the improved CFAR algorithm performed better than the original one.

Key words: ship detection; PNN; CFAR; SAR