

文章编号: 1007-4619 (2005)01-0050-07

一种新的 SAR 图像船只检测方法

侯四国^{1,2}, 张红³, 王超¹, 刘智²

(1. 中国科学院 遥感应用研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 解放军信息工程大学 测绘学院研究生培训中心, 河南 郑州 450052;

3. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

摘要: 提出一种新的基于恒虚警率 (CFAR-Constant False Alarm Rate) 技术, 确定 SAR 图像中检测船只整体阈值的方法。该方法采用高斯分布 (正态分布) 作为 SAR 图像灰度的概率密度函数, 由 CFAR 技术直接导出用于检测船只整体阈值的计算公式, 用记数滤波器滤波去除虚警。该算法避免了复杂公式迭代和求解形状参数计算过程, 也避免了用二分法寻找阈值的循环解算过程, 提高了检测速度。使用 X-SAR 和 ERS SAR 图像对该算法进行检验, 并与其它算法进行比较, 结果显示所提出的算法在检测精度和检测速度上都有明显的改进。

关键词: SAR; CFAR; 船只检测; 高斯分布

中图分类号: TP722.6/TP751.1 **文献标识码:** A

1 引言

由于合成孔径雷达 (SAR) 具有全天候、全天时和大范围监视海面船只的能力, SAR 船只检测技术的研究长期以来受到有关方面的高度关注。早在 1978 年, 美国宇航局发射的 Seasat-1 卫星获取了船只、船尾迹和多普勒位移等信息, 从图像中检测船目标, 进一步可以获取大量的有用信息。从 20 世纪 80 年代开始各国陆续开展了 SAR 图像船只检测方法的研究, 主要研究方法归纳起来有以下几种:

(1) 挪威人 Knut Eldhuset 提出了窗口滤波方法^[1]。其基本原理是在整幅图像中建立一个 20×20 大小的框架, 10×10 大小的窗口包含在框架中, 计算框架均值 μ_B , 由公式

$$T(i, j) = X(i, j) + X(i, j+1) + X(i+1, j) + X(i+1, j+1) - 4\mu_B \quad (i, j) \in A \quad (1)$$

计算出窗口中一个临时图像, $X(i, j)$ 是像素点 (i, j) 的灰度值。窗口和框架移动步长等于窗口宽度。将方程 (1) 中 $T(i, j)$ 与根据图像标准方差 σ_B 定义的局部阈值 $q\sigma_B$ 进行比较 (其中 q 一般取 5.0), 大于阈

值的像素为一组, 每一组构成一个候选的船只目标。

(2) 自适应阈值法^[2]。周等提出了自适应阈值的检测方法, 利用下式自适应地确定区分背景和目标的整体阈值:

$$\Delta = \mu + (M - \mu) \cdot \sqrt{\frac{\mu}{M}} \quad (2)$$

其中 Δ 为所需的阈值, μ 为图像的均值, M 为图像像素灰度的最大值。此方法是在整幅图像中进行检测, 大于阈值的像素取为一组, 而每一组构成一个候选的船只目标。

(3) Rey 等人提出了概率密度函数法^[3,4]。该方法是用多视灰度 K 分布或多视亮度 Gamma 分布来描述 SAR 图像灰度的概率密度函数, K 分布的概率密度函数表达式为:

$$p(x) = \frac{2}{x\Gamma(v)\Gamma(L)} \left(\frac{L_{xx}}{\mu}\right)^{\frac{L+v}{2}} K_{L-v} \left(\sqrt{\frac{L_{xx}}{\mu}}\right) \quad (3)$$

其中 μ 为图像均值, v 为形状参数, L 为统计独立视数 (Number of Looks), Γ 为伽玛函数, K_{L-v} 为修正的 Bessel 函数。

根据实验结果, 当 $\mu > 100$ 或者 $|\hat{v} - L| > 200$ 时, 将 Gamma 分布作为图像的概率密度函数效果更

收稿日期: 2003-11-10; 修订日期: 2004-01-05

基金项目: 国家“973”项目 2001CB309406; 自然科学基金项目 40071062; 预研项目 413220204。SAR 数据由 ESA 和 G-DFD 提供。

作者简介: 侯四国 (1972-), 男, 工程师, 1995 年毕业于解放军信息工程大学测绘学院, 获摄影测量与遥感专业学士学位, 现为解放军信息工程大学测绘学院摄影测量与遥感专业硕士研究生。研究方向: 微波遥感。

好一些,多视亮度 Gamma 分布的概率密度函数表达式如下:

$$p(x) = \frac{\beta^L}{\Gamma(L)} x^{L-1} \exp(-\beta x) \quad x > 0 \quad (4)$$

此处 L 是统计独立视数, Γ 为伽玛函数, β 是与分布函数的数学期望及方差有关的参数。

定义 SAR 图像灰度的概率密度函数后,可根据其分布函数确定在一定置信水平 η_c 下的灰度阈值:

$$\eta_c = \int_0^{I_c} p(x) dx \quad (5)$$

式中 I_c 为灰度阈值, $1 - \eta_c$ 为虚警率(通常取 0.05)。确定整体阈值后,同方法二来检测船只。

(4) Jiang 等人提出了基于概率神经网络(PNN, Probabilistic Neural Network)的 CFAR 船只检测法^[5]。基于 PNN 的 SAR 图像灰度概率密度函数 $F(x)$ 的表达式为:

$$F(x) = \sum_{i=0}^m P[i] \int_0^x G(i, \sigma) dt \quad (6)$$

其中, $G(i, \sigma)$ 是权函数, 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。其 CFAR 船只探测器的数学表达式:

$$CFAR = 1 - F(I_c) \quad (7)$$

利用二分法确定用于船只检测的整体阈值 I_c 。在确定整体阈值后,同方法二来检测船只。

以上方法都要寻找评判船目标的阈值,方法一是根据统计值计算局部阈值,方法二、三、四是计算全局阈值。本文提出一种基于 CFAR 技术的船只检测新算法,该方法利用高斯分布(正态分布)函数作为 SAR 海洋图像灰度的概率密度函数,利用正态分布函数的特性及 CFAR 技术确定检测的整体阈值,采用记数滤波器去除虚警。通过对 X-SAR 和 ERS SAR 图像的船只检测,验证本方法的检测精度和速度。

2 CFAR 检测

2.1 基于高斯分布(正态分布)的 CFAR 算子

CFAR 检测经常应用于雷达和通信领域^[6],近年来,CFAR 算法也开始应用于 SAR 图像目标检测,特别是应用 CFAR 技术在高分辨率 SAR 图像中快速检测目标,如林肯实验室提出了基于 Gauss 分布的双参数 CFAR 算法^[7],Jiang 等人利用 CFAR 算法在 SAR 图像中检测船只^[5]。研究表明,CFAR 对数

据分布模型适应性比较强,也有较好的检测能力。

基于如下假设条件和中心极限定理,定义观测随机变量为复的 Gaussian 分布随机变量。Madsen^[9]及 Bamler 和 Hartl^[8]的假设条件为:

(1) 在一个分辨单元内的任何散射单元不会很大程度影响其它散射单元,这种假设一般是成立的,如农田、森林、沙漠、海洋以及许多其它自然散射单元都服从这个假设。

(2) 每个散射单元相位服从 $[-\pi, \pi)$ 上的均匀分布。这个假设基于当斜距分辨率比波长长得多时,会出现较大范围的相位偏移,在区间 $[-\pi, \pi)$ 上服从均匀分布。

(3) 每个散射单元相位随机变量互不相关,而相关的一些散射单元自然形成一个散射中心。

(4) 每个散射单元的幅度随机变量与相位随机变量之间互不相关。这个假设是基于信号传输的相位延迟,与散射单元的幅度无关。

对海面来说,同质区的判断应该和目标与背景的尺度有关,平静海面对小目标可以看作同质区,海浪比较大时,海面对大型目标也可以看作同质区。在任何情况下,海面 SAR 图像基本满足上面的 4 条假设,所以本文假设 SAR 海洋图像服从 Gaussian(高斯)分布:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

其中 μ 和 σ 是分布函数的均值和标准方差, μ 描述了数据分布集中特性, σ 是形状参数,描述数据的分散程度,是确定高斯分布(正态分布)的形状特征和概率密度函数 $F(x)$ 的关键参数。在海浪比较大时应用本公式,形状参数值 σ 会比较大,表明分布函数取值的分散程度大,这样会降低检测精度,尤其是对小型目标。要进行检测误差的量化研究,需要进行大量的实验,对各种情况下的检测结果进行分析。

CFAR 算子的基本思想是:对每个像素点 x_c ,取其周围一定区域作为参考窗口(本文取整幅图像作为参考窗口),根据参考窗口的统计特性确定一个阈值 x_0 ,使得以下的检测具有恒虚警 P_{FA}

$$\begin{cases} x_c \text{ 为目标像素点,} & \text{if } x_c > x_0 \\ x_c \text{ 为杂波像素点,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

阈值为 x_0 时的虚警率为:

$$P_{FA} = \int_{x_0}^{\infty} f_c(x) dx \quad (10)$$

将式(8)代入(10)式,可得:

$$P_{FA} = \exp\left[-\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (11)$$

虚警率计算公式(11)确定了 P_{FA} 与 x_0 , μ 和 σ 的关系。在 CFAR 技术中,我们用规则统计量——均值和方差,来计算阈值。由(11)式可得:

$$x_0 = \mu + \sqrt{-2\sigma^2 \ln(P_{FA})} \quad (12)$$

由此可知,在给定 CFAR 情况下,可以通过计算图像均值和方差来决定一个全局检测阈值。

2.2 船只检测

对于高、低分辨率的海洋 SAR 图像,背景为广阔的海洋面,船只在海面上航行,可以把船作为点目标来看。当海面比较平静(风速小于 2m/s)时,海面对雷达波束是镜面反射,回波信号比较弱,此时背景很暗;而海况比较强烈的情况下,海面 Bragg 共振散射,回波信号强,背景偏亮。在这两种情况下,船只均有强的角反射回波信号。船只本身的 SAR 成像机理主要基于角反射器原理,船只与海面构成角反射器,并且船只表面的突出物也容易构成角反射器,因此船只目标以亮点的形式出现^[2,10]。正是由于船只在 SAR 图像中有这样的成像特点,所以可以采用一定的阈值检测方法,来将船只目标从背景中检测出来。由(12)式计算出检测船只的整体阈值后,根据(9)式,船只检测过程是一个用检测阈值区分目标和海面背景的过程。将图像每个像元的灰度值与计算出的阈值进行比较,如果大于阈值,则该像元作为可能的船只目标像元,否则为海面背景像元。

2.3 计数滤波器滤波去除虚警

CFAR 检测结果中含有多个由噪声引起的暗点,它们的分布较稀疏,而目标区域的暗点分布则很稠密。本算法采用一个 5×5 的计数滤波器,对每个点来说,若其 5×5 邻域内暗点的个数大于某个值,则该点为目标;否则为背景。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) 对每一个候选的船目标,使用计数滤波器滤波,统计像元的个数;
- (3) 如果像元个数的值大于我们所设定的值,则认为该目标为真实目标,否则认为该目标为虚警。

2.4 本算法的检测流程图

基于高斯分布的 CFAR 船只检测方法,其流程

图如图 1。检测流程分为概率密度函数确定、高斯分布参数估算、全局检测阈值计算、船只检测、虚警去除、输出检测结果等 6 个步骤。

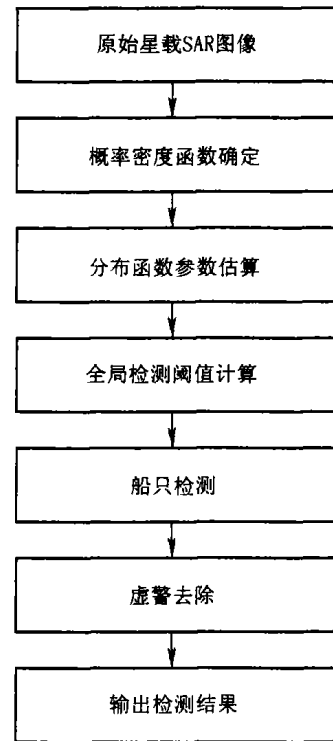


图 1 船只检测流程图

Fig. 1 Framework of ships detection

3 船只检测实验

图 2(a)是 1994-04-18 航天飞机(SIR-C/X-SAR)获取的中国渤海地区实验数据,大小为 1480×1508 像元。由于当时的海面气候条件较好,海面雷达后向散射系数不是很强,停泊在此的船只与海面背景形成较大的反差。但同时也可看到,图像中还存在大量的海面后向散射引起的亮点,对船只的检测产生一定的影响。

利用图 1 的检测流程对该图像进行处理,解算出图 2(a)的灰度均值, $\mu = 49.5675568$, 方差 $\sigma^2 = 785.8180156$ 。经过多次实验,取恒虚警率 CFAR 为 0.04,解算出检测阈值 $x_0 = 120$ (表 1)。图 2(b)和图 2(c)分别是船只检测和去除虚警后的结果。比较图 2(a)、(b)、(c),可发现图 2(a)中的三艘船只都被检测出来,无虚警。

图 3(a)是与图 2(a)同一幅图像中的不同区域的局部图像,大小为 1480×1764 像元,通过人工判读,发现图像中有 4 艘船只,其中一艘为运动船只,

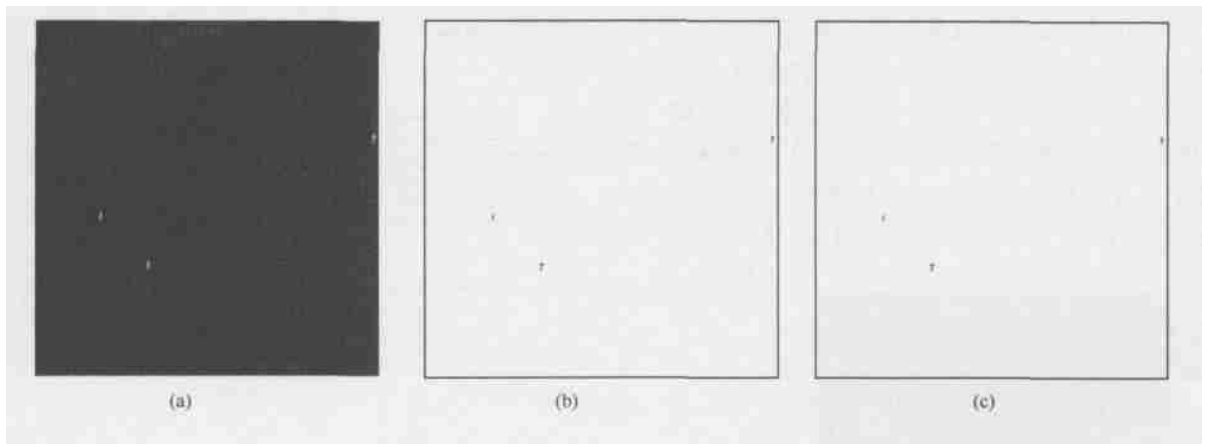


图 2 X-SAR 图像及其检测结果

(a) 原始图像; (b) 阈值检测结果; (c) 去虚警结果

Fig. 2 X-SAR image and detection result

(a) Original image; (b) result by single thresholding; (c) final result by eliminating the false ship pixels

表 1 图 2 的统计结果

Table 1 Statistical result of Fig. 2

图像均值	图像方差	CFAR	阈值	运行时间	检测船只数
49.5675568	785.8180156	0.04	120	1s	3

带有明显的尾迹。此外,在航行的船只上方形成两个由海面强反射引起的亮斑,在图像的右上角有一片亮区,可能会给检测带来困难。

用本方法进行检测,解算出图 3(a)的灰度均值 $\mu=126.7405$, 方差 $\sigma^2=1836.3137$, 恒虚警率 CFAR 取为 0.04, 解算出检测阈值 $x_0=235$ (表 2)。图 3(b) 为检测结果,4 艘船只均被检测出来,但同时产生了几十个虚警目标,尤其是右上角出现了许多孤立亮点,为假目标。图 3(c)是去除虚警后的结果,右上角孤立亮点被成功去除,但由船尾迹引起的虚警没有完全去除,仍有两个假目标,而且有一艘小船被误判为虚警。

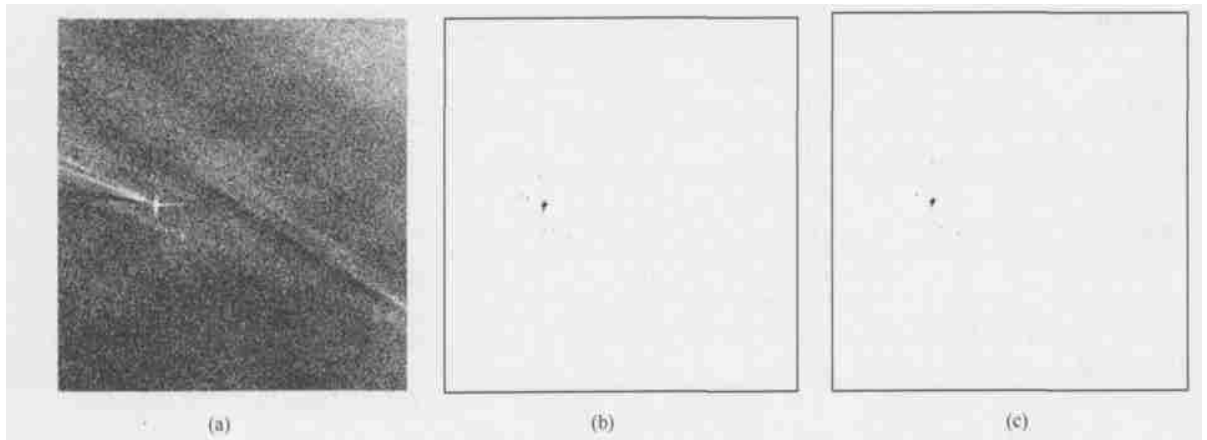


图 3 X-SAR 图像及其检测结果

(a) 原始图像; (b) 阈值检测结果; (c) 去虚警结果

Fig. 3 X-SAR image and detection result

(a) Original image; (b) result by single thresholding; (c) final result by eliminating the false ship pixels

表 2 图 3 统计结果

Table 2 Statistical result of Fig. 3

图像均值	图像方差	CFAR	阈值	运行时间	检测船只数
126.7405	1836.3137	0.04	235	1s	3

图 4(a)的实验数据是 2000-01-22 中国东海地区 EBS SAR 数据,图像大小为 1102×985 像元。由于当时的海面气候条件较好,海面雷达后向散射不是很强,停泊在此的船只与海面背景形成一定的反差。

利用图 1 的检测流程对该图像进行处理,解算出图 4(a) 的灰度均值 $\mu = 51.7796$, 方差 $\sigma^2 = 209.6533$, 经过多次实验, 取恒虚警率 $CFAR$ 为 0.001, 解算出检测阈值 $x_0 = 105$ (表 3)。图 4(b) 和图 4(c) 分别是船只检测和去除虚警后的结果。比较图 4(a)、(b)、(c), 可发现图 4(a) 中的 6 艘船只

都被检测出来, 无虚警。

表 3 图 4 统计结果

Table 3 Statistical result of Fig. 4

图像均值	图像方差	$CFAR$	阈值	运行时间	检测船只数
51.7796	209.6533	0.001	105	1s	6

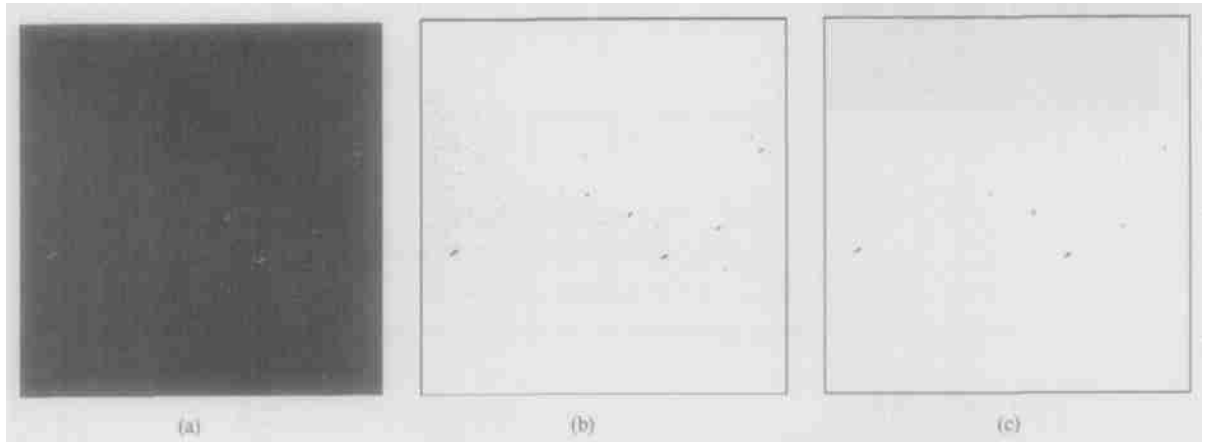


图 4 ERS-SAR 图像及其检测结果

(a) 原始图像; (b) 阈值检测结果; (c) 去虚警结果

Fig. 4 ERS-SAR image and detection result

(a) Original image; (b) result by single thresholding; (c) final result by eliminating the false ship pixels

表 4 本文的方法与其它方法的比较

Table 4 Comparison of different ship detection algorithms

统计参数	实例	本算法	自适应阈值	概率密度函数 pdf	随机神经网络 PNN
检测时间/s	1	>1	>1	>2	>5
	2	>1	>1	>2	>5
	3	>1	>2	>2	>5
整体阈值	1	120	140	102	121
	2	235	217	204	206
	3	105	143	77	106
实际船只数量	1	3	3	3	3
	2	4	4	4	4
	3	6	6	6	6
检测船只数量	1	3	3	3	3
	2	5	6	7	8
	3	6	6	6	6
检测像素数量	1	555	447	743	555
	2	857	1447	2004	2004
	3	2406	405	53383	2155
去除虚警后的像素数量	1	376	220	440	376
	2	582	567	749	805
	3	334	300	371	327

4 算法评价

本文所提出的检测整体阈值方法中,恒虚警率是根据图像的特征来决定的,其大小要根据实验结果来确定,以达到在虚警率不是很高的情况下保证目标的检测率。由于无当时成像时间的海面资料,主要是根据人工判别,来确定图像中船只的数目。

在确定恒虚警率的情况下,与 PNN 算法相比,两种算法所计算的整体阈值大致相等(实例 1 中的 120 和 121 及实例 3 中的 105 和 106),检测的像素数目相等,但本算法避免了 PNN 算法中求解形状参数的过程和用二分法解算阈值的过程,节省了时间;与概率密度函数(pdf)算法相比,避免了函数中众多参数的解算,尤其是没有计算 Bessel 复杂函数的过程,降低了计算复杂度;与自适应阈值法^[2]相比,从检测结果看,本算法要优于自适应阈值法。

表 1 给出了用 4 种检测方法对 3 个实例的比较结果。由 3 个实例可以看出,对于船只目标与海面背景反差比较大的图像中,4 种方法都能检测出目标,而且没有虚警。而对于存在大量亮斑的图像,检测效果不是很好,存在较多虚警。在实例 2 图 3 中,由于航行船只产生的尾迹有很强的反射,形成大片的亮斑,对检测结果造成很大的影响。由表 4 可以看出,采用本文提出的算法检测速度比其它算法要快,而且检测精度也是最好的。

5 结论

本文提出了一种新的确定 SAR 海洋图像中检测船只整体阈值的算法。采用 X-SAR 和 ERS SAR 图像对该算法进行检验,结果表明,利用 CFAR 技术和高斯分布建立海洋中等分辨率 SAR 图像模型,可

直接解算用于检测船只的整体阈值,从而避免了复杂的公式迭代计算,用该算法检测精度和检测速度有较大提高。

参考文献(References)

- [1] Knut Eldhuset. An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Spaceborne SAR Images in Coastal Regions [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 1010-1019.
- [2] Zhou H J, Li X Y, Peng X H, et al. Detect Ship Targets from Satellite SAR Imagery [J]. *Journal of National University of Defense Technology*. 1999, **21**(1): 67-70. [周红建,李相迎,彭雄宏等.从卫星 SAR 海洋图像中检测船目标[J].国防科技大学学报,1999, **21**(1): 67-70.]
- [3] Rey M T, Drosopoulos T, Petrovic D. A Search Procedure for Ships in RADARSAT Imagery [C]. DREO Report No. 1305, 1996.
- [4] Jiang Q S, Wang S R, Djemel Ziou, et al. Automatic Detection for Ship Targets in RADARSAT SAR Images from Coastal Regions [A]. *Vision Interface '99*, Trois-Rivieres [C]. Canada, 19-21 May, 131-137.
- [5] Jiang Q S, Aitnouri Elmehdi, Wang S R. Automatic Detection for Ship Target in SAR Imagery Using PNN-mode [J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2000, **26**(4): 297-305.
- [6] He Y. Automatic Radar Detection and Constant False Alarm Rate Processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 1999. [何友.雷达自动检测与恒虚警处理.北京:清华大学出版社,1999.]
- [7] Novak L M, Halversen S D. Effects of Polarization and Resolution on SAR ATR [J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, **33**(1): 102-115.
- [8] Bamler R, Hartl P. Synthetic Aperture Radar Interferometry, Inverse Problems [J], 1998, **14**: 1-54.
- [9] Madsen S. N. Texts: Speckle Theory: Modeling, Analysis, and Applications Related to Synthetic Aperture Radar Data, [D]. Technical University of Denmark. 1986
- [10] Zhang Y, Huang W G, Zhang Y G, et al. On the Space Remote Sensing of Vessels at Sea with Synthetic Aperture Radar [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2003, **23**(1): 53-57. [张宇,黄伟良,张永刚等.星载合成孔径雷达探测水面舰船技术研究[J].海洋测绘,2003, **23**(1): 53-57.]

A Novel Method for Ship Detection in SAR Images

HOU Si-guo^{1,2}, ZHANG Hong³, WANG Chao¹, LIU Zhi²

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing Applications,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China;

3. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: A novel method is presented for ship detection in synthetic aperture radar (SAR) images, which is based on the constant false alarm rate (CFAR) technique and considers the probability density function of sea clutter as Gaussian distribution. All possible ship targets are detected using an overall threshold, which is calculated using the analytic formula. Then a statistic filter is used to eliminate the false ship pixels. This method avoids complicated iteration, calculation of shape parameters and dichotomy threshold, and therefore its accuracy and computation speed are improved, which are demonstrated by the results.

In the paper, the main ATR techniques for ship detection in SAR images are reviewed, which include the window filter method, self-adapting threshold method, *pdf* (probability density function) method and *PNN* (Probability Neural Network) model. A novel method is then presented, which is based on *CFAR* technique and Gaussian distribution of sea surface clutter. In this method, *CFAR* operator is given based on Gaussian distribution (normal distribution), and the statistic filter is introduced to eliminate the false ship pixels, finally the framework of the method is described. The X-SAR and ERS SAR images are used for the algorithm test. Parameters such as detection threshold, computation time, number of detected targets and target pixel numbers are chosen as parameters for comparison with other methods. Results and comparison show that the new method proposed in this paper has advantages of high accuracy and computation speed.

Key words: SAR; *CFAR*; ship detection; gaussian-distribution