

文章编号: 1007 4619 (2007) 02 0185 08

SAR 图像多尺度积增强的目标检测算法

陈德元^{1, 2}, 涂国防¹

(1. 中国科学院 研究生院 信息科学与工程学院, 北京 100049; 2. 中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

摘 要: 合成孔径雷达 (SAR) 成像系统的热噪声和海杂波严重影响 SAR 图像自动目标检测的性能, 去噪和均匀背景杂波是提高 SAR 图像目标检测性能的重要课题。根据 SAR 图像噪声功率一般存在于信号小尺度, 没有跨尺度特征, 而目标信号的边缘具有跨尺度的特点, 本文提出了一种多尺度积信号增强和去噪的 SAR 图像舰船目标检测算法。本算法对 SAR 图像进行小波变换, 应用多尺度积在小波域增强 SAR 图像舰船信号和均匀背景杂波, 再对 SAR 图像进行目标检测。ERS SAR 图像用于验证本文算法。仿真实验结果表明, 新算法同传统的双参数 CFAR 检测算法、基于 K 分布背景杂波的检测算法以及基于小波软阈值增强的检测算法相比, 在虚警数和品质因数性能指标上均优于后几种检测算法。

关键词: 合成孔径雷达; 小波变换; 舰船检测; 多尺度积

中图分类号: TP722.6/TP751.1 文献标识码: A

SAR Image Enhancement Using Multiscale Products for Targets Detection

CHEN De yuan^{1, 2}, TU Guo fang¹

(1. School of Information Science and Engineering, the Graduate University of Chinese Academy of Sciences Beijing 100049, China;

2. Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

Abstract: Since the heat noise of Synthetic Aperture Radar (SAR) imaging system and sea clutter severely affect the performance of automatic targets detection in SAR images, removing noise and homogenizing sea clutter in SAR images to improve performance of targets detection is a challenge for researchers. Considering the noise power exists small scale and the boundaries of target signal exist cross scale in SAR images, we propose a novel scheme which enhances signal and removes noise based on multiscale products method to detect ship targets. The algorithm applies wavelet transform to SAR image and enhances ship signal and homogenizes background clutter of SAR images in wavelet domain using multiscale products. And then detects ship targets in enhanced SAR images. ERS SAR images are used to test our detection algorithm. The simulating results show that the new detector improves detection performance when it is to compare the two parameter constant false alarm detector and the detection algorithm based on K distribution.

To estimate the efficacy of our enhancement algorithm, we compute computation complexity of the algorithm and a popular enhancement algorithm which is based on wavelet soft threshold. It shows that our algorithm is easier to implement using hardware. The two enhancement algorithms are applied to SAR image ship targets detection. The detected results show that the detection performance of our algorithm is better than the later.

Key words: synthetic aperture radar; wavelet transform; ship targets detection; multiscale products; remove noise; parameter estimation

收稿日期: 2005 12 20; 修订日期: 2006 04 26

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 90304003, 60573112); 国家基金项目 (编号: A1320061262, K2004060420)

作者简介: 陈德元 (1968—), 男, 中国科学院研究生院博士研究生。主要从事信息处理、遥感 SAR 图像目标识别的工作。研究方向: 信号处理。

1 引 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 成像具有全天候、全天时特点, 在热点地区监测和海事救援等领域得到广泛应用, 各种应用产生了大量 SAR 数据, 自动处理海量 SAR 数据在各应用领域具有实际价值和理论意义。在基于 SAR 图像的自动目标识别 (Automatic Target Recognition, ATR) 系统中, 自动目标检测是 ATR 系统的第一步。因此 SAR 图像的自动目标检测是一重要课题, 数十年来一直是研究热点。

在背景杂波包络为瑞利分布时, SAR 图像的恒虚警概率 (Constant False Alarm Rate, CFAR) 检测主要分为两类^[1]: 单元平均 (Cell Averaging, CA) 检测和有序统计量 (Order Statistic, OS) 检测。

在 CA 类检测算法中, 门限由给定虚警概率和背景杂波功率求得, 而背景杂波功率由参考单元的均值估计得到。为了将 CA 类检测算法应用于非均匀背景杂波, 学者们相继提出了最大选择 (Greatest of GO) CFAR 算法和最小选择 (Smallest of SO) CFAR 算法。在 CA 类检测算法中, Burl 等学者提出的双参数 CFAR 检测算法^[2]具有复杂度低和简单实用的特点, 得到广泛应用。由于算法假定 SAR 图像背景杂波为高斯分布, 算法虚警率高^[3], 导致 ATR 系统计算复杂度高。因此应用双参数 CFAR 算法检测船舰目标时, 应对 SAR 图像作适当的预处理。

为改进 CA 类算法, 学者们^[4]将 K 分布模型应用于船舰目标检测。在基于 K 分布背景杂波模型的目标检测中, 计算 K 分布的累计概率分布时需要复杂的数值计算。尽管 Jiang^[4]给出了近似公式, 仍具有很高的复杂度。在某些情形下, SAR 图像的 K 分布形状参数为负, 导致该算法无效。因此使用 K 分布背景杂波模型进行船舰目标检测时, 要研究新的 SAR 图像船舰检测算法来弥补 K 分布模型的不足。在文献 [4] 中, 当 SAR 图像的 K 分布参数估计值异常时, 背景杂波模型用伽马分布替代 K 分布。

SAR 图像目标检测的第一步是提取图像特征, 正确估计杂波模型, 然后采用合适的算法作目标检测。影响 SAR 图像目标检测性能的主要因素有雷达入射角、扫描模式、极化方式、目标形状、海 (地) 面状况和 SAR 成像系统的热噪声等, 去噪和正确估计海杂波的概率分布模型可提高 SAR 图像目标检测性能。本文根据 SAR 目标信号和背景杂波的特点, 应用小波变

换对 SAR 图像进行预处理, 再作双参数 CFAR 检测, 从而避免了 K 分布检测的复杂计算及算法无效的情形, 并提高了 SAR 图像船舰目标检测性能。

应用信号边缘具有跨尺度的特点, Rosenfeld^[5]提出了图像边缘的多尺度积 (Multiscale Products, MP) 检测理论。随着小波分析实际应用和理论研究的不断深入, 学者们揭示了信号的小波变换 (Wavelet Transform, WT) 与多尺度表示之间的内在联系^[6,7]。将 MP 与 WT 相结合, 学者们提出了很多信号检测的新算法, 如 Sadler 提出的阶跃 (Step Change)^[8]检测、Kim 提出的细胞动作电位 (Action Potential)^[9]检测等。根据 WT 可检测信号局部极值^[7]的特性和 SAR 图像噪声功率被限制在信号小尺度的特点, 本文提出了一种基于小波多尺度积 (Wavelet Multiscale Products, WMP) 的 SAR 图像船舰目标检测算法。本算法对 SAR 图像进行三级小波变换, 计算对数化后小波系数的积。根据小波域多尺度积对船舰信号的增强和背景杂波的去噪特性, 处理后的 SAR 图像能够较好地削弱背景杂波模型中的随机噪声, 最后使用双参数 CFAR 算法检测 SAR 图像船舰目标。仿真实验结果表明, 新算法同传统的双参数 CFAR 检测算法、K 分布杂波模型的检测算法及基于小波软阈值增强的检测算法相比, 在虚警数和品质因数性能指标上均优于后几种检测算法。

2 信号的多尺度积增强

本节先介绍信号的小波多尺度表示, 再给出小波变换下的多尺度积, 最后根据信号边缘跨尺度和噪声功率限制在信号小尺度范围的特点, 提出基于 WMP 的信号增强算法。

2.1 信号的多尺度表示

在 Rosenfeld^[5]的开创性工作中, 信号的多尺度表示是通过相邻抽样点的平滑和差分实现的, 即信号 $x(n)$ 的 k 尺度表示 $d_k(\delta)$ 为

$$d_k(\delta) = \frac{\sum_{j=1}^k f(i+j)}{k} - \frac{\sum_{j=0}^{k-1} f(i+j)}{k} \quad (1)$$

学者们通过对小波分析深入的研究, 揭示了信号小波变换与多尺度表示之间的联系^[6,7]。假设函数 $\psi(\delta) \in L^1 \cap L^2$, 且满足允许条件

$$C_\psi = \int \frac{|\psi(\omega)|}{|\omega|} d\omega < \infty$$

式中, $\Phi(\omega)$ 为 $\psi(\omega)$ 的傅立叶变换, 则信号 $x(t) \in L^2$ 的连续小波变换定义为

$$W_a x(t) = x(t) \psi_a(t)$$

式中, \cdot 表示卷积; $\psi(t)$ 称为母小波, 或称小波函数; a 称为尺度因子, $\psi_a(t) = (1/a) \psi(t/a)$ 。通过 a 的伸缩变化, 可得信号 $x(t)$ 在不同尺度上的表示, 小波分析称为数学显微镜由此而得。

在实际应用中, 信号 $x(t)$ 抽样表示为 $x(n)$ 。为方便计算, 通常将尺度因子 a 二尺度离散化, 即 $a=2^j$, j 为正整数。此时 $x(n)$ 的离散小波变换 (Discrete WT, DW T) 表示为

$$W_{2^j} x(n) = x(n) \psi_{2^j}(n) \quad (2)$$

信号 $x(n)$ 经过小波变换后, 得信号的小波系数 (高频分量) $W_{2^j} x(n)$ 和粗糙 (低频) 分量 $S_{2^j} x(n)$ 。比较式 (1) 和 (2) 可知, Rosenfeld 的多尺度表达式实际上是二尺度离散化后 Haar 基的小波变换, 因此其多尺度表示是小波变换的特殊形式。Mallat^[6] 将多尺度思想引入小波分析, 提出多分辨分析的概念, 使信号的小波变换与多尺度表示有机结合, 拓展了小波变换的应用。根据多分辨分析的思想, 小波变换相当于一对由高通和低通滤波器组成的滤波器组, 这便于实现信号的快速小波分解和重构。

实现信号的离散小波变换有抽样离散小波变换 (Decimated DW T, DDW T) 和非抽样离散小波变换 (Undecimated DW T, UDW T) 两种。由于 UDW T 具有平移不变性, 能更精确地估计信号波形^[9], 故本文采用 UDW T 计算信号的小波系数。对二维图像作小波变换时, 为计算方便, 选择的小波函数一般可分离为两个一维小波函数的乘积, 从而图像的小波变换等同于对图像的行、列分别作一维小波变换。在图像重建时, 采用相对应的顺序进行逆小波变换, 即对变换图像的列、行进行一维逆小波变换。

2.2 多尺度积增强

在文献 [5] 中, Rosenfeld 首次将多尺度积用于图像边缘检测。根据信号的小波变换和多尺度表示的内在关系, 学者们提出了新的信号检测算法^[8,9]。由离散小波变换表达式 (2), 信号 $x(n)$ 基于小波的多尺度积表示为

$$p(n) = \prod_{j \in K} W_{2^j} x(n) \quad (3)$$

式中, K 是根据需要选定的指标集, $W_{2^j} x(n)$ 为信号的第 j 级小波变换系数。从多尺度积 $p(n)$ 的表达式 (3) 知, $p(n)$ 对信号多尺度表示的大系数的作用

相当于几个串联的“逻辑与”器件。在选定的指标集 K 中, 只有信号每个尺度的系数均为大数值时, 最后的多尺度积 $p(n)$ 才为大数值。本文应用 $p(n)$ 的这一性质, 在小波域对信号进行增强和去噪处理。

一般地, 信号的噪声功率被限制在信号小尺度上, 不具有跨尺度特征, 信号的边缘和突变却存在于不同的信号尺度表示。根据表达式 (3) 知, 适当选择指标集 K , 信号的多尺度积能在小波域内增强信号边缘和削弱噪声。用信号的低频分量和小波域内的增强分量重建信号, 得小波多尺度积增强信号。将多尺度积增强用于 SAR 图像处理时, 其去噪特性可均匀背景杂波, 使背景分布模型近似于高斯分布, 便于利用简单的双参数 CFAR 检测算法。

通过图 1 的仿真实验进一步表明, 多尺度积具有良好的信号增强特性。信号有两个突变点, 如图 1 (a) 所示; 图 1 (b) 为一次多尺度积, 即一级小波变换的高频分量; 图 1 (c) 为三次多尺度积, 即三级小波变换的高频系数之乘积; 用信号的低频分量和增强后的高频分量重建信号, 得小波多尺度积增强信号, 如图 1 (d) 所示。图 1 (a) 和图 1 (d) 的仿真结果表明: 小波多尺度积在增强信号和抑制噪声方面具有优越性。

3 舰船目标检测算法

舰船目标检测算法的流程图如图 2 所示。算法主要由小波变换、对数变换、多尺度积增强、逆小波变换和双参数 CFAR 检测组成。试验结果显示, 多尺度积指标集选择为初始的三个小波变换级, 即用三级小波变换可达到算法中多尺度积增强信号和去噪的目的。

首先对 SAR 图像作三级 UDW T, 得低频分量和相应的高频分量。由于对数变换具有抑制大功率背景杂波和随机噪声的功能, 本文对 SAR 图像的高频分量作对数变换, 然后对高频系数作多尺度积, 达到增强舰船信号和抑制噪声的目的。将低频分量和经过多尺度积增强后的高频分量作逆小波变换, 得增强 SAR 图像 I_e 。根据前面的理论分析和仿真结果可知, 增强 SAR 图像比原图像背景更均匀, 并且舰船信号的边缘得到增强, 有利于舰船目标检测。最后对增强 SAR 图像作双参数 CFAR 检测。

双参数 CFAR 检测由 Burl^[2] 提出, 并应用于林肯实验室的 ATR 系统。实际上, 它是单元平均检测算法的改进。进行目标检测时, 在检测窗口周围增加保护窗口 (Guard Area), 作用是防止目标像素泄

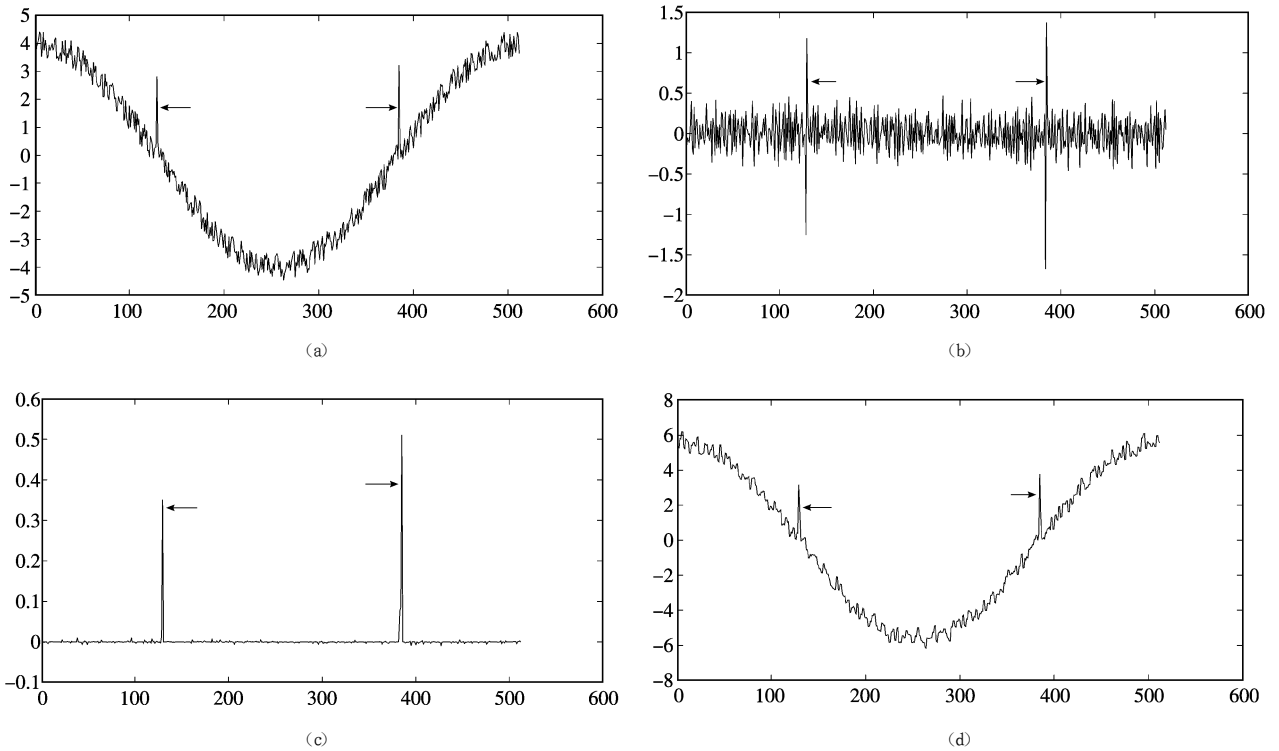


图 1 信号及其多尺度积增强结果

(a) 原信号; (b) 一次小波变换积; (c) 三次小波变换积; (d) 多尺度积增强结果

Fig 1 Signal and the MP enhanced results

(a) The original signal; (b) One time wavelet transform product; (c) Three times wavelet transform product; (d) The MP enhanced results

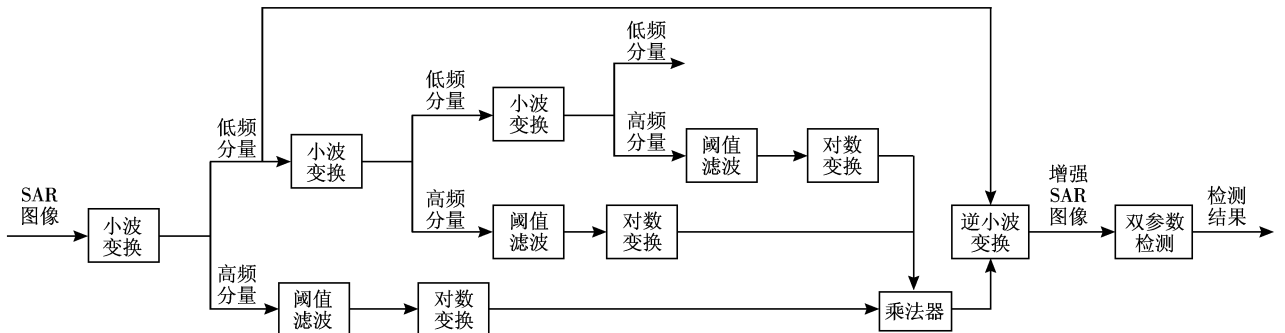


图 2 船舰目标检测算法流程图

Fig 2 The flow chart of ship detection algorithm

漏到背景窗口中,导致不准确的背景参数统计结果。在保护窗口的外围是计算背景参数的背景窗口,如图 3 所示。

假设 \hat{m}_T 和 \hat{m}_B 分别为检测窗口和背景窗口的估计均值, $\hat{\sigma}_B$ 为背景窗口的估计标准差,双参数 CFAR 检测的判决准则为:

$$\frac{\hat{m}_T - \hat{m}_B}{\hat{\sigma}_B} > T_{CFAR} \quad (4)$$

T_{CFAR} 是与虚警概率相关的阈值。当判决式 (4) 成立时,检测窗口判决为目标,否则判决为背景。将双参

数 CFAR 检测算法应用于增强的 SAR 图像,得最后检测结果。

4 计算机仿真实验结果和分析

为验证本文算法的有效性,下面从算法计算复杂度 and 检测性能两个方面进行比较。

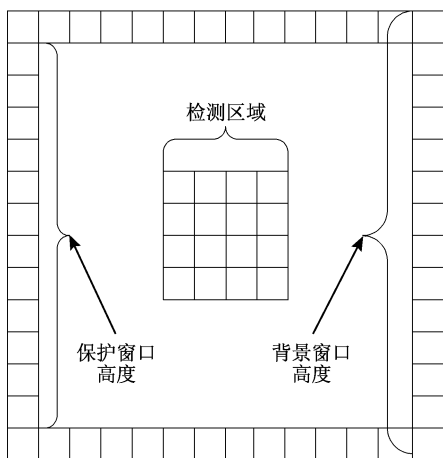


图 3 双参数 CFAR 检测算法

Fig 3 The two parameter CFAR detection algorithm

的改进算法常用于图像增强,该算法核心为:对图像进行适当级数的小波变换,对高频系数用阈值将其分为强部和弱部系数,对弱部系数乘以一个小于 1 的正数,对强部系数,用一个 3×3 的模块,在三个方向搜索强部系数,用以判断该强部系数属于孤立噪声还是信号边缘,若是孤立噪声,乘以一个小于 1 的正数,若是信号边缘则保持系数不变,详细算法参见文献 [10]。将本文的增强算法与文献 [10] 的增强算法的复杂度进行比较。

设图像尺寸为 $N \times N$,由于小波变换的算法复杂度为 $O(N \times N)$,从而本文算法复杂为 $O(N \times N)$,本文增强算法主要采用小波变换、阈值滤波器及乘法器,易于软件及硬件实现。文献 [10] 的值增强算法复杂度也为 $O(N \times N)$,但该算法中对每一个强部系数,需要在三个方向的高频分量的相同位置取一个 3×3 的方块,用于判断该强部系数是孤立噪声,还是信号边缘,从而该增强算法主要由小波变换、阈值滤波器、乘法器以及图像取块模块构成,从而硬件实现复杂度比本文提出的复杂度高。

若小波变换采用 Haar 小波基,容易算出本文的增强算法的计算量大约为 $57 \times N \times N$,文献 [10] 的增强算法的计算量约为 $21 \times N \times N$ 。本文的增强算法的时间复杂度比文献 [10] 的增强算法的复杂度高。

4.2 检测性能比较

为比较本文检测算法与常用检测算法的检测性能,本文用 ERS SAR 图像作为实验对象。图 4 (a) 为 ERS 1 于 1996 年 4 月在新加坡附近海域的成像,

大小为 600×480 ,可视船舰数为 8;图 4 (b) 为双参数检测结果;图 4 (c) 为 K 分布检测结果,本文使用的 K 分布检测算法由文献 [4] 提供,该算法采用形态滤波过滤虚警,过滤虚警时本文采用 7×7 模板,如果模板中有 5 个像素点判决为目标,则中心点为目标像素;图 4 (d) 为新算法的检测结果。在输出图像中,方框内是该检测算法检测到的潜在目标。测试图像中部有一条高亮度的船舰尾迹,使传统检测算法产生虚警,新算法使用多尺度积进行信号增强和处理后,消除了虚警。图 5 (a) 为 ERS 2 于 1996 年 7 月拍摄的油污监测 SAR 图像,图像大小为 1024×692 ,可视船舰数为 10,图像中的三块黑色区域为海面油污。从图中可知,成像时海面杂波回波信号强,使船舰检测难度增大,特别是在图像的右下角,传统的 K 分布检测和双参数 CFAR 检测均产生了大量虚警目标。如图 5 (b) 为经过文献 [10] 增强算法的检测结果,本文的检测算法则极大地降低了虚警目标数,如图 5 (c) 所示,具体的检测性能参见表 1。对图 5 (a) 进行 K 分布检测时,过滤虚警同样使用 7×7 模板,若模板中有 6 个像素点判决为目标,则中心点为目标像素。与图 4 (a) 的 K 分布检测算法相比,提高了目标像素点的判决数目,在图 5 (a) 的 K 分布检测中能过滤更多的虚警目标。图 4 (d)、图 5 (b) 和图 5 (c) 中的检测算法所使用的小波为 Haar 小波,本文还测试了其他常用小波基在新算法中的检测性能,检测结果见表 1。实验结果显示,新算法在虚警数指标上优于传统的双参数检测、K 分布检测和基于小波软阈值增强的检测算法。

为度量各种算法的检测性能,本文采用文献 [11] 提供的品质因数 (Figures of Merit F_{oM}) 为度量标准, F_{oM} 定义为:

$$F_{oM} = \frac{N_{tt}}{N_{ft} + N_{gt}}$$

式中, N_{tt} , N_{ft} 和 N_{gt} 分别为检测的正确船舰数、虚警目标数和 SAR 图像的实际船舰数。

用图 4 (a) 和图 5 (a) 作测试对象,图像的实际船舰数 N_{gt} 分别为 8 和 10,分别对应表 1 中的图像 1 和图像 2。表 1 中的图像 3 为 ERS 2 于 1997 年 4 月在南中国海关丹 (Kuantan) 附近的成像,图像大小为 1028×1054 ,可视船舰数为 7。计算各种算法在测试图像中的漏检数 N_{lt} 、正确检测目标数 N_{tt} 、虚警数 N_{ft} 和品质因数 F_{oM},实验结果如表 1 所示。表 1 的结果显示,新检测算法的品质因数优于双参数 CFAR 检测和 K 分布检测算法。在小波基的选择方面,由

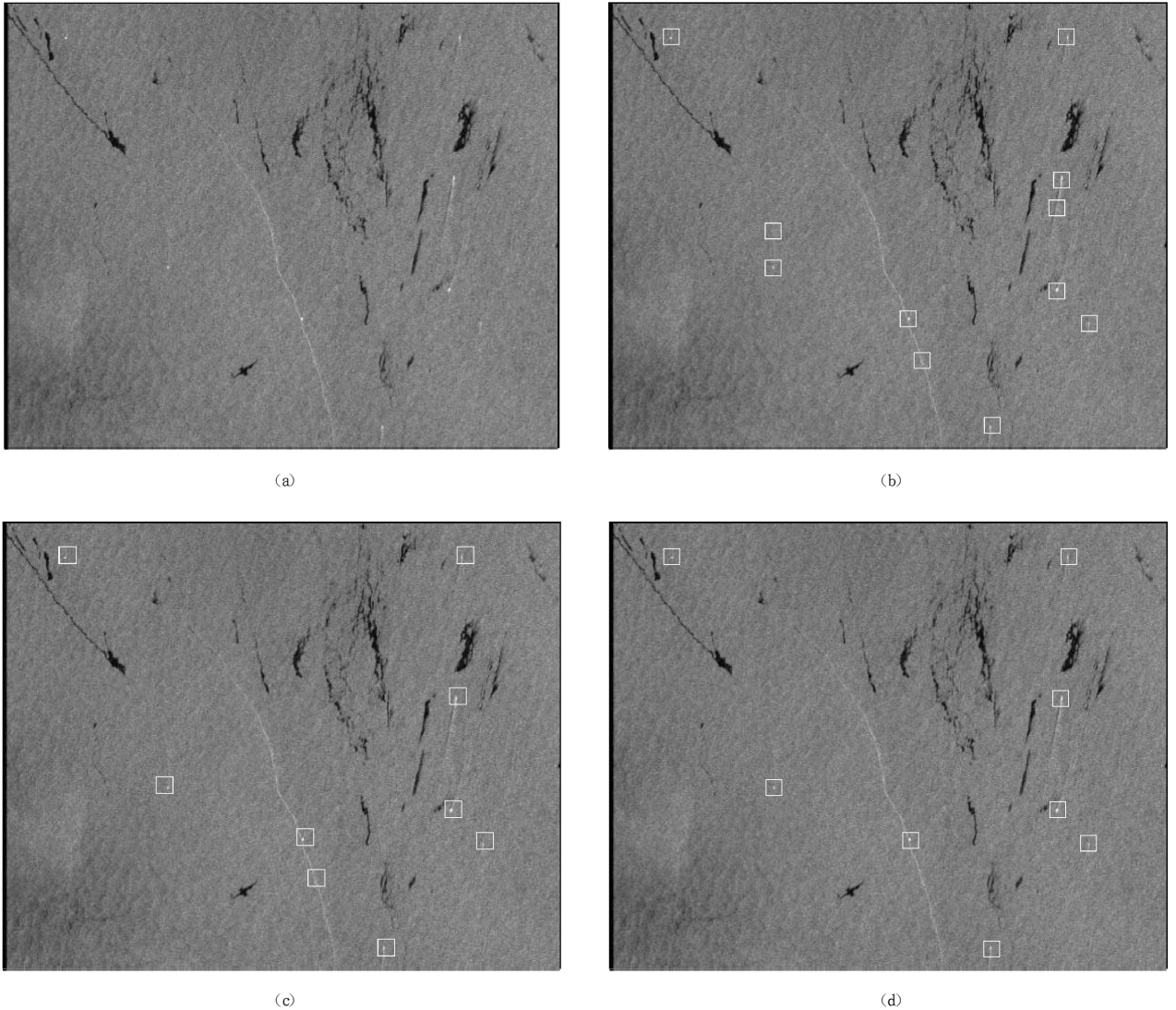


图 4 SAR 图像及处理结果

(a) ERS 2 SAR 图像, 可视船舰数为 8; (b) 双参数 CFAR 算法检测结果, 检测的正确船舰数为 8, 虚警数为 3;

(c) K 分布单元平均算法检测结果, 检测的正确船舰数为 8, 虚警数为 1; (d) 新算法的检测结果, 检测的正确船舰数为 8, 虚警数为 0。

Fig 4 SAR image and detected results

(a) ERS 2 SAR image. The number of visual ships is 8;

(b) The detected results of two parameter CFAR algorithm. The numbers of detected real ship and false alarm are 8 and 3, respectively;

(c) The detected results of K distribution algorithm. The numbers of detected real ship and false alarm are 8 and 1, respectively;

(d) The detected results of new algorithm. The numbers of detected real ship and false alarm are 8 and 0, respectively

表 1 不同检测算法的实验结果

Table 1 The experiment results of different detection algorithm s

检测算法	小波基	图像 1				图像 2				图像 3			
		N_{it}	N_{tt}	N_{ft}	F α M	N_{it}	N_{tt}	N_{ft}	F α M	N_{it}	N_{tt}	N_{ft}	F α M
双参数 CFAR	N/A	0	8	3	0.73	0	10	58	0.15	0	7	3	0.7
K 分布	N/A	0	8	1	0.89	0	10	505	0.02	0	7	3	0.7
	Haar	0	8	0	1.00	0	10	21	0.32	0	7	0	1.00
	Daub4	0	8	0	1.00	0	10	22	0.31	0	7	1	0.88
新算法	Daub6	0	8	0	1.00	0	10	20	0.33	0	7	0	1.00
	Duab8	0	8	0	1.00	0	10	22	0.31	0	7	1	0.88
	Duab7/9	0	8	0	1.00	0	10	38	0.21	0	7	0	1.00

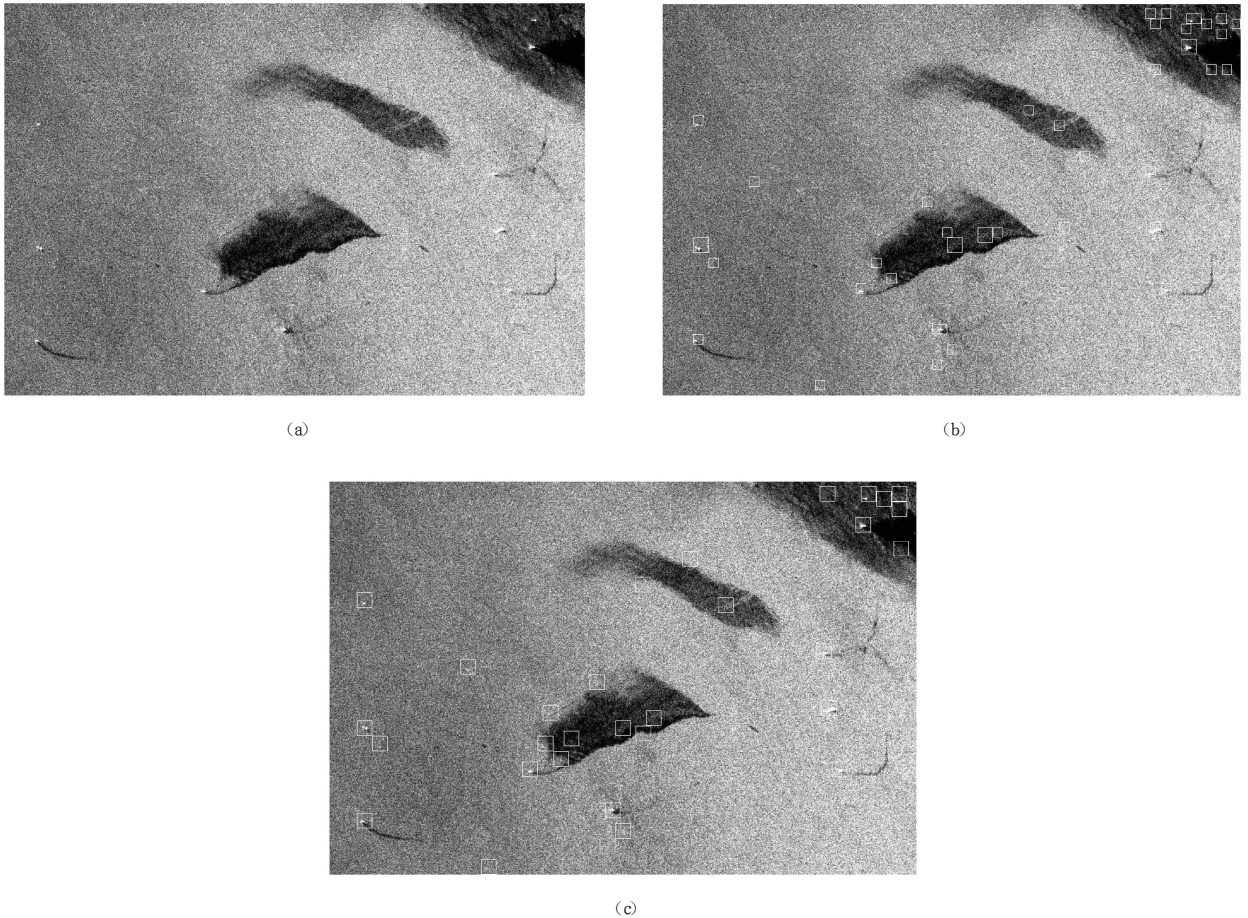


图 5 SAR 图像及处理结果

- (a) ERS 2 SAR 图像, 可视船舰数为 10; (b) 文献 [10] 增强算法的检测结果, 检测的正确船舰数为 10, 虚警数为 27;
 (c) 新算法的检测结果, 检测的正确船舰数为 10, 虚警数为 21

Fig 5 SAR image and detected results

- (a) ERS 2 SAR image. The number of visual ships is 8;
 (b) The detected results of reference [10]. The numbers of detected real ship and false alarm are 10 and 27, respectively;
 (c) The detected results of new algorithm. The numbers of detected real ship and false alarm are 10 and 21, respectively

于小波基在新算法中主要用于捕捉船舰信号的边缘, 故选择长度较短的小波基为宜, 小波滤波器长度的增加, 并不能提高检测性能。从表 1 还可以看出, 不同小波基的检测性能相近, 说明新算法具有稳定性。表 1 中新算法的小波基从上至下分别为 Haar, Daubechies4, Daubechies6, Daubechies8 和 Antanin7/9。计算机仿真实验中, 其他 SAR 图像的仿真试验结果也表明, 新算法的检测性能优于传统的双参数 CFAR 检测和基于 K 分布的检测。

5 结 论

根据多尺度积具有增强跨尺度信号和过滤小尺度噪声的特性, 本文提出了一种基于多尺度积增强

的 SAR 图像船舰目标检测新算法。理论分析和仿真实验结果表明: 本文算法与传统的双参数 CFAR 检测和 K 分布检测算法相比, 在虚警数和品质因数性能指标上, 均优于传统检测算法和常用的基于小波变换增强的检测算法。

参 考 文 献 (References)

- [1] He Y. Automatic Radar Detection and Constant False Alarm Processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. [何友. 雷达自动检测与恒虚警处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.]
- [2] Burl M, Owirka G, Novak L. Texture Discrimination in Synthetic Aperture Radar Imagery [A]. Proc. 23rd Asilomar Conf. Signals Systems Computers[C]. Pacific Grove, CA, 1989.
- [3] Novak L, Halvorsen S, Owirka G, et al. Effects of Polarization

- and Resolution on SAR ATR [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33 (1): 102—116.
- [4] Jiang Q, Wang S, Ziou D, et al. Automatic Detection for Ship Targets in RADARSAT SAR Images from Coastal Regions [A]. Proc. Vision Interface [C]. Quebec, Canada, 1999.
- [5] Rosenfeld A. A Nonlinear Edge Detection Technique [J]. Proc of the IEEE, 1970, 58 (5): 814—816.
- [6] Mallat S. A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation [J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, 37 (12): 2091—2110.
- [7] Daubechies I. The Wavelet Transform, Time frequency Localization and Signal Analysis [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1990, 36 (5): 961—1005.
- [8] Sadler B, Swami A. Analysis of Multiscale Products for Step Detection and Estimation [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1999, 45 (3): 1043—1051.
- [9] Kim K, Kim S. A Wavelet based Method for Action Potential Detection from Extracellular Neural Signal Recording with Low Signal to noise Ratio [J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2003, 50 (8): 999—1011.
- [10] Zhang W J, Xu X D, Li J, et al. SAR Image De noise Based Wavelet Threshold optimization and Edge detection Using Wavelet [J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7 (1): 41—46. [张文江, 许晓东, 李京等. 基于小波阈值优化和边缘检测的 SAR 影像斑点噪声滤除 [J]. 遥感学报, 2003, 7 (1): 41—46.]
- [11] Chong J S, Zhu M H. Target Detection Algorithm of SAR Image Based on Local Window K Distribution [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2003, 25 (9): 1276—1280. (in Chinese) [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.]