

一种基于小波变换的SAR图像舰船检测的新算法

陈德元^{①②} 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 100039)

^②(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

摘要: 根据小波变换和Teager能量算子(TEO)的局部特性, 该文提出一种基于SAR图像的舰船检测算法。该算法对SAR图像进行小波变换, 计算小波系数的小波能量。根据小波域的小波能量对舰船信号的增强特性, 使用双参数CFAR检测SAR图像舰船。仿真结果表明, 新算法与传统的双参数CFAR检测算法和基于K-分布的单元平均检测算法相比, 在舰船检测数和虚警率性能指标上均优于传统检测算法。

关键词: 合成孔径雷达; 小波变换; 舰船检测; Teager能量算子

中图分类号: TN959.72

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)04-0855-04

A New Algorithm of Ship Targets Detection in SAR Images Using Wavelet Transform

Chen De-yuan^{①②} Tu Guo-fang^①

^①(School of Info. Sci. and Eng., Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

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

Abstract: Using the local nature of wavelet transform and Teager energy operator (TEO), a novel scheme is proposed to detect ship targets in SAR images based on TEO wavelet enhancement. The algorithm applies wavelet transform to SAR image and computes the Teager energy of every wavelet coefficient of the high frequency components. According to the property of the Teager energy which enhances the ship signals of SAR image, two-parameter Constant False Alarm Rate(CFAR) detection algorithm is applied to the enhanced SAR image to detect ship targets. The simulating results show that the new detector improves detection performance comparing with the two-parameter CFAR detector and the cell average detection based on K-distribution.

Key words: Synthetic Aperture Radar(SAR); Wavelet transform; Ship targets detection; Teager energy operator

1 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像具有全天候、全天时等特点, 广泛应用于监测和识别等领域。SAR图像可视目标的人工检测和识别是繁重、枯燥且需要经过长期训练的工作, 从而可视目标或感兴趣区域(Region of Interest, ROI)检测的自动化是SAR图像应用的关键, 也是自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)的基础。因此基于SAR图像的自动目标检测是一个重要课题, SAR图像检测数十年来一直是研究热点。

SAR成像系统使用发射微波, 记录返回信号强度和时延获取扫描区域的信息。由于角反射的缘故, 轮船及人造物比海面或地面具有更强的回波信号, 有利于目标信号检测。另一方面, 雷达成像系统的热噪声和海面杂波的干扰严重影响SAR图像舰船目标的检测性能。

Burl等学者假定背景杂波的概率密度函数(Probability Density Function, PDF)符合高斯分布, 提出具有低算法复

杂度的双参数恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测算法^[1]。由于背景回波信号受风速和风向以及其它因素的影响, 基于高斯分布的双参数检测算法虚警率高^[2], 导致ATR系统的计算复杂度高。为了更好地吻合背景杂波模型, 降低虚警率, Armstrong^[3]将K-分布用于目标检测。尽管Jiang^[4]给出近似公式计算K-分布的累计概率分布, 该算法仍具有很高的复杂度。在极端情形下, SAR图像的K-分布形状参数为负, 导致该算法无效。因此在使用K-分布背景杂波模型进行舰船目标检测时, 要研究新的SAR图像舰船检测算法弥补K-分布的不足。

应用小波变换(Wavelet Transform, WT)和Teager能量算子(Teager Energy Operator, TEO)的局部特性, 学者们已提出很多信号检测算法, 主要用于检测一维信号的突变、音调等^[5-8]。小波变换也可应用于图像插值, 提高图像的空间分辨率^[9]。根据双参数CFAR检测算法的特点, 本文提出一种将WT和TEO相结合的SAR图像舰船检测新算法。本算法对SAR图像进行小波变换, 根据小波域的小波能量, 使用双参数CFAR检测SAR图像的舰船。计算机仿真结果表明本算法与传统的双参数CFAR检测和基于K-分布的单元平

2005-08-31 收到, 2006-02-24 改回

国家“十五”攻关项目(k2004060420)和国家自然科学基金(90304003)资助课题

均检测算法相比, 检测船舰数、虚警数和品质因数性能指标均优于传统检测算法。

2 Teager能量算子

Kaiser在文献[10]中给出了一维信号 $x(n)$ 的Teager能量计算公式:

$$E(x(n)) = x^2(n) - x(n+1)x(n-1) \tag{1}$$

其中能量函数 $E(\cdot)$ 称为Teager能量算子(TEO)。TEO具有很多特性, 这些特性在检测信号^[7]的同时, 可以去除噪声^[8]。从式(1)可知, Teager 能量仅与相邻的3个抽样点相关, TEO具有良好的局部性质。

Mitra^[11]将TEO扩展到二维信号的Teager能量计算。在Mitra的扩展方案中, 提出3种扩展方案计算二维信号 $x(m, n)$ 的Teager能量。第1种沿着水平方向和垂直方向扩展, 计算公式为

$$E(x(m, n)) = 2x^2(m, n) - x(m-1, n)x(m+1, n) - x(m, n-1)x(m, n+1) \tag{2}$$

第2种沿着两个对角线方向扩展:

$$E(x(m, n)) = 2x^2(m, n) - x(m-1, n+1)x(m+1, n-1) - x(m-1, n-1)x(m+1, n+1)$$

第3种扩展方案应用当前抽样点周围的8个抽样值计算信号的Teager能量:

$$E(x(m, n)) = 3x^2(m, n) - \frac{1}{2}x(m-1, n-1)x(m+1, n+1) - \frac{1}{2}x(m+1, n-1)x(m-1, n+1) - x(m+1, n)x(m-1, n) - x(m, n+1) \cdot x(m, n-1)$$

在本文的检测算法中, 采用第1种扩展计算方法。

3 信号的TEO小波增强

假设函数 $\psi(t) \in L^1 \cap L^2$, 且满足允许条件:

$$C_\psi = \int_{\mathbb{R}} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{3}$$

式中 $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换, 则信号 $x(t)$ 可以通过函数 $\psi(t)$ 作小波变换, 并对变换信号进行相关处理, 然后用 $\psi(t)$ 作逆变换重构信号。

信号 $x(t)$ 的小波变换定义为

$$W_x(a, b) = |a|^{-1/2} \int_{\mathbb{R}} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{4}$$

其中 $\psi(t)$ 为母小波, 或称小波函数, a 和 b 分别表示尺度因子和平移因子。经过相关处理后, 信号 $x(t)$ 可由下面的逆小波变换公式重构:

$$x(t) = C_\psi^{-1} \iint_{\mathbb{R}^2} W_x(a, b) \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \tag{5}$$

式中 $\psi_{a,b}(t)$ 定义为

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

根据小波函数的允许条件式(3), 得 $\int_{\mathbb{R}} \psi(t) dt = 0$, 说明函数 $\psi(t)$ 是局部非零的紧支函数, 小波变换实际是一种高频滤波器。从式(4)可知, 信号 $x(t)$ 发生突变时小波系数将产生局部极值。根据小波系数的局部特性, 检测SAR图像信号的突变, 跟踪船舰目标信号。

另一方面, 由TEO表达式(1)可知, 信号的Teager能量对高频部分进行非线性增强, 同时对低频进行抑制。根据上面对小波变换和TEO的分析, 将TEO应用于信号的高频分量, 能进一步增强高频系数。为抑制噪声, 本文采用Otsu分割算法^[12]设计自适应阈值滤波器, 对小波高频系数进行滤波处理, 过滤系数值较小的小波系数, 再用低频分量和处理后的高频分量作逆小波变换, 达到增强信号和削弱噪声的目的。

通过图1的仿真实验进一步表明, TEO小波增强(TEO Wavelet Enhancement, TWE)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), 对信号作小波变换后, 小波系数产生了两个局部极值(如图1(b)所示)。用TEO增强小波系数, 获得小波系数的局部极值(如图1(c)所示)。为了抑制噪声, 对图1(b)的高频分量作自适应阈值滤波, 并与图1(c)的Teager能量合并, 再作逆小波变换, 得TWE增强信号(如图1(d)所示)。从图1(a)和图1(d)的仿真结果表明: TWE在增强信号和抑制噪声方面具有优越性。

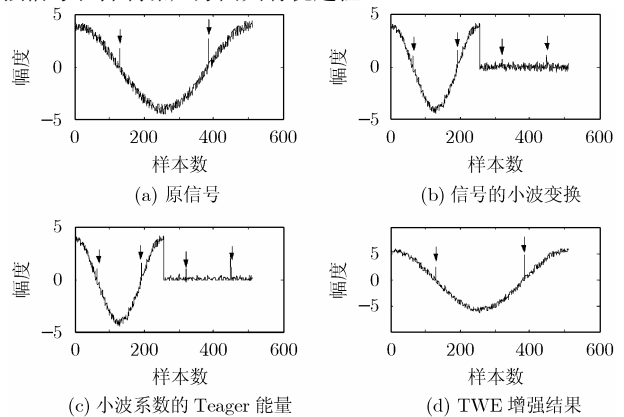


图1 信号及其 TEO 小波增强结果

4 船舰目标检测算法

船舰目标检测算法分为增强和检测两部分, 检测算法的流程如图2所示。

对SAR图像进行TWE增强时, 首先对SAR图像作小波变换得低频分量LL和3个高频分量HL, LH, HH。为了计算方便, 小波函数采用可分离函数, 即对图像的行、列分别作小波变换。在图像恢复时, 采用相对应的顺序进行逆小



图2 船舰目标检测算法流程图

波变换, 即对变换图像的列、行进行逆小波变换。将自适应阈值滤波器和TEO应用于3个高频分量, 分别得含有重要系数的高频分量 HL' , LH' , HH' 和Teager能量 $E(HL)$, $E(LH)$, $E(HH)$, 合并结果得增强的高频分量 HL'' , LH'' , HH'' , 它们由下式确定:

$$X''(m, n) = \text{sgn}(X'(m, n)) \times E(X(m, n))$$

其中 X 表示3个高频分量之一, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数, 返回 $X'(m, n)$ 的符号。最后, 对低频分量 LL 和3个处理后的高频分量 HL'' , LH'' 和 HH'' 作逆小波变换, 得到增强SAR图像 I_E 。

在检测部分, 对SAR图像 I_E 作双参数CFAR检测。

双参数CFAR检测由Burl^[1]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, 作用是防止目标像素泄漏到背景窗口中, 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

$$\frac{\hat{m}_T - \hat{m}_B}{\hat{\sigma}_B} > T_{\text{CFAR}} \quad (6)$$

其中 T_{CFAR} 是由虚警概率决定的阈值。当判决式(6)成立, 判决为目标; 否则判决为背景。将双参数CFAR检测器应用于增强的SAR图像, 得最后检测结果。

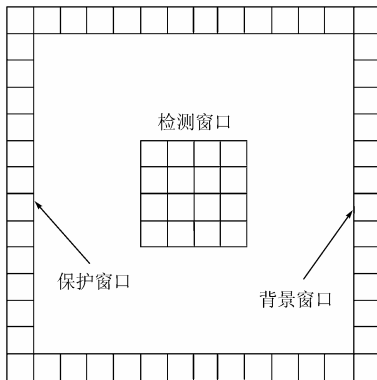
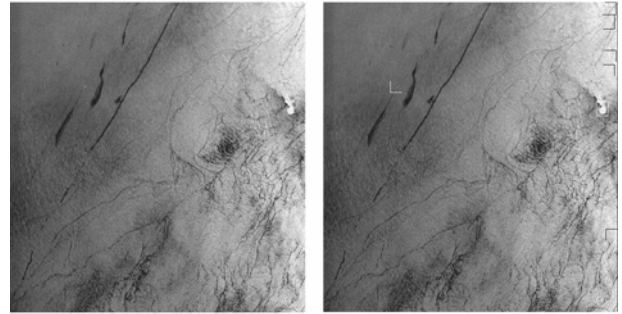


图3 双参数CFAR检测算法示意图

5 计算机仿真实验结果和分析

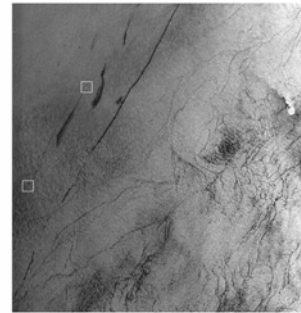
为验证本文的算法, 我们用ERS-2 SAR图像作为实验对象, 图4(a)大小为800×844, 可视船舰数为2, 新算法小波基为Haar 2/2。图4(b)为K-分布检测结果, 本文使用的K-分布检测算法由文献[4]提供, 该算法使用形态滤波过滤虚警。图4(c)为新算法的检测结果。在输出图像中, 方框内是该检测算法检测到的潜在目标。图4的检测结果显示, 新算法比传统检测算法具有更高的检测性能。

为比较小波基对新算法性能的影响, 本文计算几种常用



(a) ERS-2SAR 图像, 可视船舰数为 2

(b) K-分布单元平均算法检测结果, 检测船舰数为 1, 虚警数为 6



(c) 新算法的检测结果, 检测船舰为 2, 虚警数为 0

图4 SAR图像及处理结果

小波基在新算法中的检测性能, 并与双参数CFAR 检测以及K-分布检测作比较, 检测效果用文献[13]提供的品质因数FoM度量, FoM定义为

$$\text{FoM} = \frac{N_{\text{tt}}}{N_{\text{ft}} + N_{\text{gt}}}$$

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

用图4(a)(表1中的图像1)和另一SAR图像(表1中的图像2)作为测试对象, 图像的实际船舰数 N_{gt} 分别为2和8。计算各种算法在测试图像中所用时间 $T(\text{s})$ 、漏检数 N_{ft} 、正确检测目标数 N_{tt} 、虚警数 N_{ft} 和品质因数 FoM, 实验结果如表1所示。表中“小波基”栏数字 m/n 分别表示综合滤波器和分析滤波器的长度。表1显示新算法所用时间略高于K-分布检测算法。然而, 本文的算法在提高检测船舰数的同时降低虚警数, 获得较高的品质因数。比较滤波器的长度和检测性能, 我们还得出统计结论: 由于SAR图像的每一分辨单元是多个海杂波反射信号的叠加, 因而短的滤波器比长的滤波器具有更好的增强和去噪效果, 为设计自适应小波基在SAR图像船舰检测中的应用提供了依据。

6 结束语

根据TEO和WT的局部特性, 本文提出一种基于TWE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: 本文的算法与传统的检测算法相比, 在提高船舰检测数的同时降低虚警数, 获得高品质因数, 但计算复杂度略高于K-分布检测。

表1 不同检测算法的实验结果

检测算法	小波基	图像1(大小: 800×844)					图像2(大小: 560×456)				
		T (s)	N_{tt}	N_{tt}	N_{tt}	FoM	T (s)	N_{tt}	N_{tt}	N_{tt}	FoM
双参数	N/A	0.42	0	2	3	0.40	0.14	0	8	5	0.62
K-分布	N/A	0.99	1	1	6	0.13	0.35	1	7	5	0.54
新 算 法	Haar2/2	0.89	0	2	0	1.00	0.56	0	8	1	0.89
	Daub4/4	0.97	0	2	0	1.00	0.53	0	8	0	1.00
	Daub6/6	1.05	0	2	0	1.00	0.53	0	8	0	1.00
	Antonini7/9	1.12	0	2	0	1.00	0.56	0	8	2	0.80
	Villasenor7/9	0.97	0	2	0	1.00	0.56	0	8	2	0.80
	Villasenor6/2	0.96	0	2	0	1.00	0.50	0	8	0	1.00

参 考 文 献

- [1] Burl M C, Owirka G J, and Novak L M. Texture discrimination in synthetic aperture radar imagery. in Proc. 23rd Asilomar Conf. Signals, Systems, Computers, Pacific Grove, CA, 1989: 399–404.
- [2] Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, and Hielt M. Effects of polarization and resolution on SAR ATR. *IEEE Trans. on Aerosp. and Electron. Syst.*, 1997, 33(1): 102–116.
- [3] Armstrong B C and Griffiths H D. CFAR detection of fluctuating targets in spatially correlated K-distributed clutter. *IEE Proc. -F, Radar and Signal Processing*, 1991, 138(2): 139–152.
- [4] Jiang Q, Wang S, Ziou D, and Zaart A L. Automatic detection for ship targets in RADARSAT SAR images from coastal regions. in Proc. Vision Interface, Qubbec, Canada, 1999: 131–137.
- [5] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1990, 36(5): 961–1005.
- [6] Mallat S and Hwang W. Singularity detection and processing with wavelets. *IEEE Trans. on Inform. Theory*, 1992, 38(2): 617–643.
- [7] Kim K H and Kim S J. Neural spike sorting under nearly 0-dB signal-to-noise ratio using nonlinear energy operator and artificial neural-network classifier. *IEEE Trans. on Biomed. Eng.*, 2000, 47(10): 1406–1411.
- [8] Sankur B, Güler E C, and Kahya Y P. Multiresolution biological transient extraction applied to respiratory crackles. *Computers in Biology and Medicine*, 1996, 26(1): 25–39.
- [9] 陈德元, 涂国防. 小波分形插值医学图像处理. 电讯技术, 2001, 41(6): 67–70.
Chen De-yuan and Tu Guo-fang. Process medical image with wavelet and fractal interpolation. *Telecommunication Engineering*, 2001, 41(6): 67–70.
- [10] Kaiser J F. On a simple algorithm to calculate the energy of a signal. in Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing, Albuquerque, NM, 1990: 381–384.
- [11] Mitra S K, Thurnhofer S, Lightstone M, and Strobel N. Two-dimensional Teager operators and their image processing applications. in Proc. IEEE Workshop on Nonlinear Signal & Image Processing, Halkidiki, Greece, 1995: 959–962.
- [12] Otsu N. A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 1979, 9(1): 63–66.
- [13] 种劲松, 朱敏慧. SAR图像局部窗口K-分布目标检测算法. 电子与信息学报, 2003, 25(9): 1276–1280.
Zhong Jin-song and Zhu Min-hui. Target detection algorithm of sar image based on local window k-distribution. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(9): 1276–1280.
- 陈德元: 男, 1968年生, 博士生, 从事SAR图像目标检测、编码的研究。
- 涂国防: 男, 1954年生, 教授, 博士生导师, IEEE 高级会员, 主要从事数字通信、图像编码与信号处理的研究。