

# 一种基于正则化方法的 SAR 图像边缘检测算法

张 静<sup>1</sup> 王国宏<sup>1</sup> 林雪原<sup>1</sup>

(1 海军航空工程学院信息融合研究所,烟台市二马路 188 号 264001)

**摘 要:**提出了一种基于正则化方法的 SAR 图像边缘检测算法,并用 MSTAR(moving and stationary target acquisitions and recognition)数据进行大量的仿真实验。实验表明,与经典的边缘检测方法相比,该方法能保持图像的细节特征,较好地解决了边缘断裂和抗噪问题,具有较好的边缘检测能力。

**关键词:**SAR 图像;正则化;边缘检测

**中图法分类号:**P237.3

SAR 图像边缘检测和提取是 SAR 图像数据处理中的一个重要工作<sup>[1-3]</sup>,它可以应用于 SAR 目标识别,有助于 SAR 图像内容的分析和解译。由于 SAR 图像边缘检测的重要性,当前有许多种针对 SAR 图像的边缘检测算子,如 Sobel 算子、Prewitt 算子、Robert 算子、Log 算子、Canny 算子等。然而,导数的计算对噪声很敏感,利用这些算子对 SAR 图像进行检测往往会将有用的目标信息误判为“伪”,而虚假信息误判为“真实”信息,而造成边缘的改变,信息可信度降低。

正则化技术是求解逆问题“病态”性质的有效方法,它通过合理开发利用符合工程背景实际的先验知识,构造约束条件,改变求解策略,使问题的解变得确定和稳定<sup>[4-5]</sup>。SAR 成像本质上是一个典型的“病态”逆问题<sup>[6]</sup>,近年来许多学者将正则化方法运用到 SAR 图像处理中,有效地抑制了 SAR 图像的相干斑噪声<sup>[7-11]</sup>。而正则化技术仅能实现图像的降噪,并不能获得目标的边缘特征。

## 1 正则化模型

概括地讲,逆问题的病态主要是由于正算子的“过滤”作用造成的。正则化方法可以将先验知识耦合到逆过程中,使一些因正算子的过滤作用、离散化的观测和噪声污染而丢失的信息得到恢复<sup>[4]</sup>。正则化的数学模型为<sup>[7-8]</sup>:

$$g = Tf + n \quad (1)$$

正则化方法把含噪声情况下求解  $f$  的过程转化为带约束下多目标的最优化问题:

$$\min_f \|g - Tf\|_2^2, \text{ and } \arg \min_f \|f\|_0. \quad (2)$$

进一步表示为单目标优化问题:

$$f = \arg \min_f J(f) \quad (3)$$

其中, $J(f)$ 称为目标函数,表示为:

$$J(f) = \|g - Tf\|_2^2 + \lambda \|f\|_0. \quad (4)$$

由于噪声对  $l^0$  范数不具稳定性,因此,很多学者<sup>[9,12]</sup>利用  $l^k$  范数代替  $l^0$  范数。 $l^k$  对稀疏性要求增强,实验表明, $k$  值越小,解向量的稀疏性越强,越有利于保护更小数目的强梯度值点。根据这些特点,可以将式(4)改写为:

$$J(f) = \|g - Tf\|_2^2 + \lambda \|\varphi(f)\|_k^k \quad (5)$$

## 2 基于正则化的 SAR 图像边缘检测算法

### 2.1 SAR 图像的正则化处理

在 SAR 图像检测的过程中,最常使用的是 SAR 图像的幅度信息,而不考虑相位信息。因此,本文在进行正则化处理时也采用 SAR 回波数据的幅度信息,这时对图像进行正则化处理实际上是一个图像的后处理过程,故系数矩阵  $T$  选取单位对角阵,则目标函数为:

$$J(f) = \|g - f\|_2^2 + \lambda \|\varphi_i(f)\|_k^k \quad (6)$$

为了充分反映目标的边缘细节信息,本文在

选取势函数时,在文献[7]的基础上增加了对数变换以减少动态范围,如表 1 所示,其中  $\beta$  和  $\epsilon$  均为非负常数,可以有效避免对数变换不存在以及范数在零点处不可导等问题。本质上讲,附加  $\beta$  和  $\epsilon$  实际上是对对数和范数的一种平滑近似。表 1 给出的势函数虽然在形式上比文献[7]复杂,但当输入数据为幅度数据时,这些势函数有利于降噪和边缘特征的提取。

表 1 几种势函数

Tab. 1 Some Potential Functions

$\ \varphi_1(f)\ _k$	$((\ln(f+\beta))^2 + \epsilon)^{k/2}$
$\ \varphi_2(f)\ _k$	$\frac{((\ln(f+\beta))^2 + \epsilon)^{k/2}}{1 + ((\ln(f-\beta))^2 + \epsilon)^{k/2}}$
$\ \varphi_3(f)\ _k$	$\ln(1 + ((\ln(f+\beta))^2 + \epsilon)^{k/2})$
$\ \varphi_4(f)\ _k$	$e^{(1 + ((\ln(f+\beta))^2 + \epsilon)^{k/2})}$

为了获取最优解,对式(7)求取梯度,得:

$$\nabla J(f) = H(f)f - 2g \tag{7}$$

式中,  $H(f) = 2E + k\lambda Z_i(f)$ ,  $Z_i(f) = \text{diag}\{z_i(f)\}$ ,  $z_i(f) = \frac{\varphi_i(f)}{f}$ , 其中  $\text{diag}$  表示对角阵。

由式(7)可以看出,  $H(f)$  相当于  $f$  的一个系数,可以近似为 Hessian 矩阵。利用类牛顿迭代算法,得到  $f$  的最优解值  $\hat{f}^{(n+1)}$ :

$$\hat{f}^{(n+1)} = \hat{f}^{(n)} - \gamma[H(\hat{f}^n)]^{-1} \nabla J(\hat{f}^{(n)}) \tag{8}$$

式中,  $\gamma$  为步长系数,通常设置为 1。

对 SAR 图像而言,  $f$  的维数通常很大,因此,在解最优解的过程中  $[H(\hat{f}^n)]^{-1}$  往往无法得到。对式(8)进行变形:

$$H(\hat{f}^{(n)})\hat{f}^{(n+1)} = (1 - \gamma)H(\hat{f}^{(n)})\hat{f}^{(n)} + \gamma 2g \tag{9}$$

在求解  $\hat{f}^{(n+1)}$  时,  $\hat{f}^{(n)}$  是已知量,式(9)等式右边相当于一个常量,等式等价于一个线性方程,利用共轭梯度法(CG)可以得到  $\hat{f}^{(n+1)}$  的最优解值。在迭代过程中设迭代初值为  $\hat{f}^{(0)} = g$ 。由于本文设定的模型是一种针对 SAR 图像后处理的模型,其结果是对原始 SAR 图像的幅度进行逼近,故迭代中共轭梯度获得结果已经是图像的最优解,即类牛顿迭代法  $n=1$ 。共轭梯度终止迭代误差为  $\delta_{CG}$  (通常设为  $10^{-6}$ )。

### 2.2 SAR 图像目标区域阈值处理

经正则化技术处理过的 SAR 图像是降噪后的图像,此时图像的目标信噪比明显提高。对此时的 SAR 图像进行统计分析,明显发现降噪处理后的 SAR 图像像素幅度值绝大部分接近于零,只有少数像素的幅度值较大,而这些幅度较大的值

恰恰对应降噪后的目标区域。因此,根据这种统计特性作阈值化处理,通过设定一个阈值  $\eta$ ,可以将目标区域提取出来:当  $X_i \geq \eta$  时为目标;反之,当  $X_i < \eta$  时非目标。其中,  $X_i$  表示降噪后的图像像素幅度值。

一般来说,阈值  $\eta$  的选取应根据具体的 SAR 图像统计分析得到,但只要 SAR 系统确定,可以通过局部的图像统计得到一类或多类目标的阈值。

### 2.3 SAR 图像边缘特征的提取

一幅 SAR 图像可以看作一个二元函数,在每个点上的任何方向都有方向导数和梯度,方向导数和梯度反映图像灰度在该方向的变化<sup>[13]</sup>。对于目标区域的边缘处,梯度方向的变化剧烈,也就是相邻两个像素差异较大。利用正则化方法降噪,正则技术可以保持较好的细节特征,而  $l^k$  范数的选取可以增加稀疏性,即较小的  $k$  值使观测图像  $g$  向零靠近,从而使大量  $g$  为零值。这样,在边缘处边缘点的像素被放大,而非边缘点的像素被平滑,从而保证了边缘点处较大的梯度。

根据这种特点,本文用邻域中选取最大值的方法获取目标的边缘特征。也就是用一个  $N \times N$  邻域的窗检测分割后的 SAR 图像,如果该像素值为窗内的最大值就保留该像素,否则就会被剔除。将所有的像素依次检测完得到的图像即为完整、优质的边缘特征信息。

## 3 仿真实验与分析

本文利用 Sandia 实验室提供的 MSTAR 数据<sup>[13]</sup>进行仿真实验。MSTAR 数据是迄今公开的最完备、评价 SAR ATR 算法性能最标准的数据。

本文选取了两种军用目标进行仿真实验,分别为 BTR70 和 BMP2。图 1 为这两种目标在某一姿态角下的原始 SAR 幅度图像,此时的图像含有大量的相干斑噪声。表 2 为利用不同势函数进

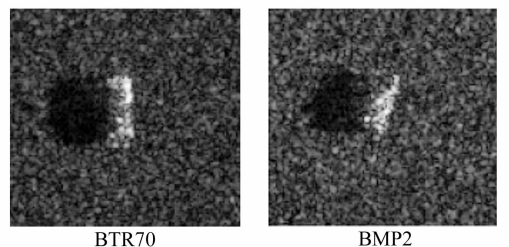


图 1 原始 SAR 图像

Fig. 1 Raw SAR Images

表2 利用不同势函数处理图像后的目标信噪比

Tab. 2 Target-Clutter Ratio with Different Potential Functions( $k=0.2, \lambda=8$ )

	信噪比(dB)								
	T72		BTR70			BMP2			
$\ \varphi_1(f)\  \hat{k} = (x^2 + \epsilon)^{k/2}$	49.96	44.24	43.47	36.13	49.37	37.53	41.81	44.05	44.91
$\ \varphi_2(f)\  \hat{k} = \frac{(x^2 + \epsilon)^{k/2}}{1 + (x^2 + \epsilon)^{k/2}}$	43.59	38.80	38.05	32.28	42.67	33.67	36.96	38.45	39.28
$\ \varphi_3(f)\  \hat{k} = \lg(1 + (x^2 + \epsilon)^{k/2})$	46.72	41.59	40.83	34.38	45.93	35.76	39.49	41.31	42.14
$\ \varphi_4(f)\  \hat{k} = ((\ln(f + \beta))^2 + \epsilon)^{k/2}$	52.71	65.26	68.69	48.18	69.27	55.82	50.13	48.00	92.95
$\ \varphi_5(f)\  \hat{k} = \frac{((\ln(f + \beta))^2 + \epsilon)^{k/2}}{1 + ((\ln(f + \beta))^2 + \epsilon)^{k/2}}$	66.98	52.20	72.03	58.39	63.50	44.25	101.04	96.89	106
$\ \varphi_6(f)\  \hat{k} = \lg(1 + ((\ln(f + \beta))^2 + \epsilon)^{k/2})$	72.40	59.36	109.55	60.71	70.51	49.78	53.64	87.13	44.14
$\ \varphi_7(f)\  \hat{k} = e^{(1 + ((\ln(f + \beta))^2 + \epsilon)^{k/2})}$	67.44	87.45	58.94	59.61	49.53	47.79	53.94	73.14	69.36

行正则化降噪处理后的图像的目标信噪比,其中前3种势函数为文献[7]提供的方法,后4种方法为本文给出的方法。对比这7种方法可以看出:①在相同的参数下,本文方法获得的目标信噪比明显优于文献[7]的方法,这充分说明了本文的方法更有利于相干斑噪声的抑制,进而有利于目标特征的提取。②在本文提供的4种方法中,目标信噪比的高低与目标的类型和姿态角有关,因此可以通过选取合适的参数 $k$ 和 $\lambda$ 获取最优的目标信噪比。

以第6种势函数为例,进行正则化降噪处理后的SAR图像,如图2所示。与图1原始图像对照可以看出,本文提供的4种方法更能对噪声进行有效抑制,而且经过降噪处理后的SAR图像能够完整保留原始图像中的目标区域,这对图像分割和目标识别是极其有利的。

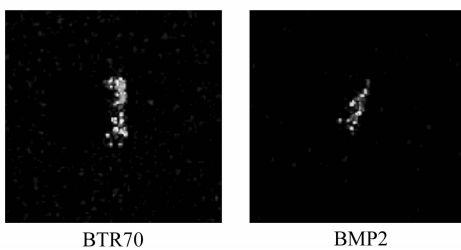


图2 利用第6种势函数进行降噪处理后的SAR图像  
Fig. 2 Denoising SAR Images Based on the Sixth Potential Function

以第6种势函数为例(其他势函数相同),给出两种目标不同姿态下降噪后的幅度排序分布图,如图3所示。虽然6幅图像分别表示不同种类不同姿态角下的待测目标,但经降噪后,6幅图像中的绝大部分像素值均接近于零,只有少部分的幅度对应非零值,而这些非零值正对应于降噪后的目标区域。根据这种特性,本文选取 $\eta=0.1$

作为分割目标与背景区域的界限。图4为利用第6种势函数进行降噪处理后分割出的目标区域,与原始SAR图像对照可以发现,原始图像上的目标区域被很好地分割出来,且分割出的目标轮廓没有出现太大的变形,较好地保留了目标原来的形状。

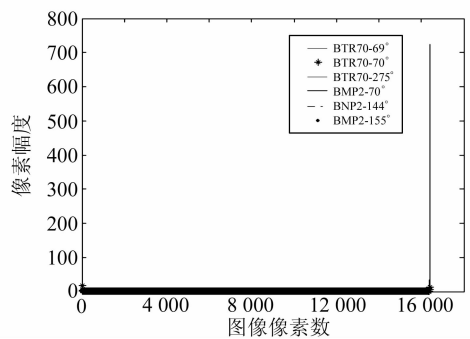


图3 不同SAR目标降噪后幅度排序分布图  
Fig. 3 Sorted Images for Different SAR Targets Based on the Sixth Potential Function

图5为利用不同势函数提取出的目标边缘特征,图6分别为未经降噪处理直接利用经典的Robert算子提取出的目标边缘特征。将本文提供的方法与传统的方法进行对比,可以得出以下结论:①传统的边缘检测方法能够获取目标的一些边缘特征,但因为噪声的影响,提取出的目标边缘特征存在断裂的情况。此外,原始方法提取的边缘特征在不同程度上出现变形,对一些有利于目标识别的拐角边缘、细化边缘不能实现有效检测。②利用本文方法提取出的边缘特征清晰、连续,完整地刻画出原始SAR图像中目标的轮廓特征,且不产生多余的虚假信息。③只要选取合适的参数,本文提供的几种势函数均可以获得目标的边缘特征,且提取出的边缘特征与原始SAR图像中的目标区域符合度高。

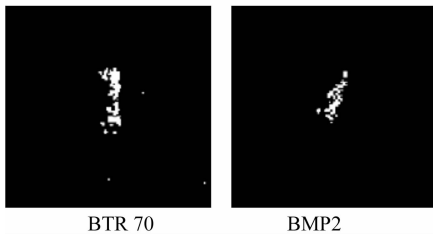


图 4 利用第 6 种势函数进行降噪处理后分割出的 SAR 图像

Fig. 4 Segmented SAR Images Denoised by the Sixth Potential Function

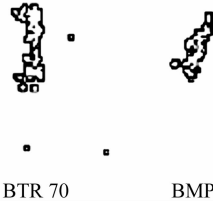


图 5 利用第 6 种势函数提取出的目标边缘特征

Fig. 5 Edge Detection Based on the Sixth Potential Function

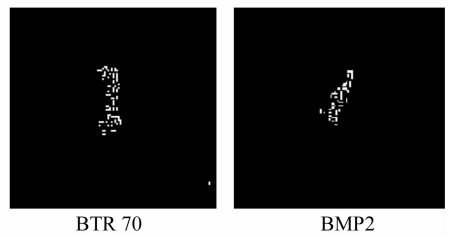


图 6 未经降噪处理直接利用 Robert 算子提取的目标边缘特征

Fig. 6 Edge Detection with Robert Operator Without Denoising

## 参 考 文 献

- [1] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Norwood, MA: Artech House, 1998
- [2] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005
- [3] 黄勇,王建国,黄顺吉. 一种 SAR 图像的自动匹配算法及实现[J]. 电子与信息学报,2005, 27(1):6-9
- [4] 黄卡玛,赵翔. 电磁场中的逆问题及应用[M]. 北京:科学出版社,2005
- [5] 汪良雄,王正明. 基于  $l^k$  范数正则化方法和 SAR 图像分辨率[J]. 宇航学报,2005, 26:77-82
- [6] 王岩,梁甸农,郭汉伟. 基于改进正则化方法的 SAR 图像增强技术[J]. 电子学报,2003, 31 (9):1 307-1 309
- [7] Cetin M. Superresolution and Edge-Preserving Reconstruction of Complex-Valued Synthetic Perture Radar Images[C]. The 2000 IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, Canada, 2000
- [8] Gough P T, Hunt B R. Synthetic Aperture Radar Image Reconstruction Algorithms Designed for Sub-

surface Image[J]. IEEE,1997;1 588-1 590

- [9] Yang X K, Yao S S, An Adaptive Edge-Preserving Artifacts Removal[J]. IEEE,2005(5): 4 939-4 942
- [10] 谢正美,王正明. 基于正则化变分模型的 SAR 图像增强方法[J]. 红外与毫米波学报,2005, 24(6): 467-471
- [11] Air Force Research Laboratory, Model Based Vision Laboratory. Sensor Data Management System [OL]. <http://www.mbvlab.wpafb.af.mil/public/sdms/datasets/mstar>,2006
- [12] 赵侠,王正明. SAR 复图像域上的噪声抑制和目标特征提取[J]. 电子学报,2005,33(12): 2 135-2 138
- [13] Ciuciu P, Idier J, Giovannelli J F. Markovian High Resolution Spectral Analysis[J]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1999(3):1 601-1 604

**第一作者简介:**张静,博士生。主要研究方向为图像处理、目标识别和数据融合。

E-mail:zy913@163.com

## Edge Detection in SAR Segmentation Based on Regularization Method

ZHANG Jing<sup>1</sup> WANG Guohong<sup>1</sup> LIN Xueyuan<sup>1</sup>

(1 Research Institute of Information Fusion, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai Erma Road 188, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Clear and continuous edge feature is important to analyze and interpret SAR images. A new edge detection of SAR images is presented by analyzing regularization method. There are three steps. Firstly, using a modified regularization method reduce the speckle noise. Then, a statistical method is proposed to segment the target of interest. At last, edge detection is realized by a window method. Compared with traditional methods, experimental results with MSTAR dataset show that this method can maintain detail feature, resolve the broken edge and decrease noise efficiently. This algorithm has wonderful edge-detection performance.

**Key words:** SAR images; regularization method; edge detection