



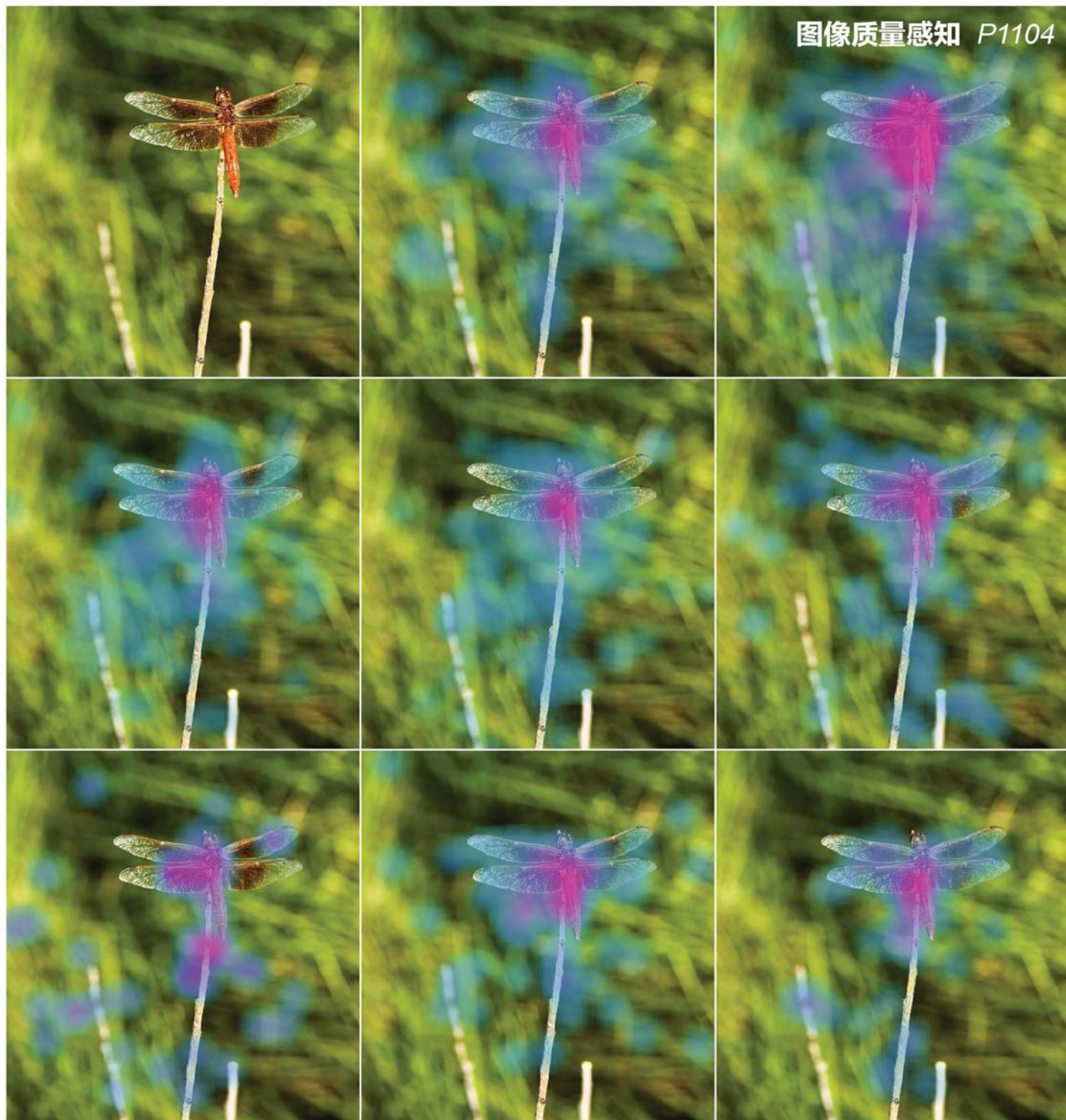
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所  
中国图象图形学学会  
北京应用物理与计算数学研究所

# 中国图象图形学报

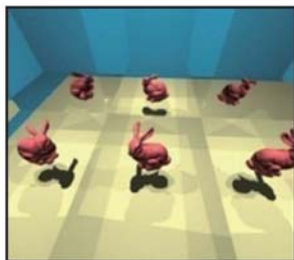
2014  
07  
VOL.19

ISSN1006-8961  
CN11-3758/TB



多特征融合的图像自动变形  
(第1012页)

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪(第1038页)

快速虚顶点光子映射的焦散  
绘制(第1062页)**综述**

打印机光谱特性化方法研究综述

万晓霞, 刘强 ..... 0985

**图像处理和编码**

图像场方向导数的局部区域重建

叶学义, 齐珍珍, 何志伟, 李汪兵 ..... 0998

Lytro相机的光场图像校正与重对焦方法

周文晖, 林丽莉 ..... 1006

多特征融合的图像自动变形

肖红光, 肖树根, 刘京, 李淳芃, 陈立福 ..... 1012

结合频谱扩散的指纹图像滤波增强

卞维新, 封举富, 罗永龙, 徐德琴 ..... 1021

**图像分析和识别**

中心投影变换的抗噪性分析

黄永东, 李三三, 杨建伟 ..... 1031

多通道Haar-like特征多示例学习目标跟踪

宁纪锋, 赵耀博, 石武祯 ..... 1038

自主移动机器人自适应室外道路检测

杜明芳, 王军政, 李静, 崔广涛, 方建军, 曹海青 ..... 1046

分层树结构字典编码的行为识别

周同驰, 程旭, 吴镇扬 ..... 1054

**计算机图形学**

快速虚顶点光子映射的焦散绘制

李瑞瑞, 秦开怀 ..... 1062

双重视图下的3维网格模型可见水印

陆尘, 朱长青, 王玉海 ..... 1068

**虚拟现实与增强现实**

个性化编辑的轻量化3维树木模型构建

董天阳, 纪磊, 刘思远, 范菁, 熊丽荣 ..... 1074

**遥感图像处理**

带距离徙动校正的压缩感知PFA成像方法

段化军, 朱岱寅 ..... 1085

结合边缘和区域的活动轮廓模型SAR图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣鲲, 符鹏 ..... 1095

**第2届全国图像图形联合学术会议专栏**

视线跟踪技术的图像质量主观数据库构建及其可视化

张昀, 牟轩沁 ..... 1104

丰富图像标签的正则化非负矩阵分解方法

夏召强, 冯晓毅, 彭进业 ..... 1112

# CONTENTS

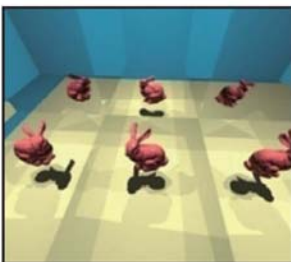
## JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Multi-feature fusion-based image morphing(P1012)



Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature(P1038)



Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations(P1062)

### Review

Review of spectral printer characterization

Wan Xiaoxia, Liu Qiang ..... 0985

### Image Processing and Coding

Reconstructing image local regions based on directional derivative of a field

Ye Xueyi, Qi Zhenzhen, He Zhiwei, Li Wangbing ..... 0998

Light field image rectification and refocus method for Lytro camera

Zhou Wenhui, Lin Lili ..... 1006

Multi-feature fusion-based image morphing

Xiao Hongguang, Xiao Shugen, Liu Jing, Li Chunpeng, Chen Lifu ..... 1012

The fingerprint enhancement using filtering combined with spectrum diffusion

Bian Weixin, Feng Jufu, Luo Yonglong, Xu Deqin ..... 1021

### Image Analysis and Recognition

Robustness to noise of central projection transformation

Huang Yongdong, Li Sansan, Yang Jianwei ..... 1031

Multiple instance learning based object tracking with multi-channel Haar-like feature

Ning Jifeng, Zhao Yaobo, Shi Wuzhen ..... 1038

Adaptive outdoor road detection for autonomous mobile robot

Du Mingfang, Wang Junzheng, Li Jing, Cui Guangtao, Fang Jianjun, Cao Haiqing ..... 1046

Action recognition using hierarchically tree-structured dictionary encoding

Zhou Tongchi, Cheng Xu, Wu Zhenyang ..... 1054

### Computer Graphics

Fast caustics rendering by photon beam tracing based on virtual vertex transformations

Li Ruirui, Qin Kaihuai ..... 1062

Visible watermarking for three-dimensional mesh model in two views

Lu Chen, Zhu Changqing, Wang Yuhai ..... 1068

### Virtual Reality and Augmented Reality

Construction of lightweight three-dimensional tree models supporting personalization editing

Dong Tianyang, Ji Lei, Liu Siyuan, Fan Jing, Xiong Lirong ..... 1074

### Remote Sensing Image Processing

PFA imaging with range migration correction by compressive sensing

Duan Huajun, Zhu Daiyin ..... 1085

Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image

Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng ..... 1095

### Column of UCIG'2013

Eye tracking based image quality assessment database and visualization method

Zhang Yun, Mou Xuanqin ..... 1104

Regularized non-negative matrix factorization method for image tag enrichment

Xia Zhaoqiang, Feng Xiaoyi, Peng Jinye ..... 1112

中图法分类号: TP751.1 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2014)07-1095-09

论文引用格式: Wang P, Zhou X, Peng R K, Fu P. Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image [J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(7): 1095-1103. [王沛, 周鑫, 彭荣鲲, 符鹏. 结合边缘和区域的活动轮廓模型 SAR 图像目标轮廓提取[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(7): 1095-1103. ][DOI:10.11834/jig.20140714]

## 结合边缘和区域的活动轮廓模型 SAR 图像目标轮廓提取

王沛, 周鑫, 彭荣鲲, 符鹏

南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016

**摘要:** **目的** 目标轮廓表征了目标形状, 可用于目标方位角估计、自动目标识别等, 因此提取合成孔径雷达 (SAR) 图像中的目标轮廓受到了人们的广泛关注。受 SAR 图像乘性噪声的影响, 传统的目标轮廓提取方法应用在 SAR 图像时失效。针对这一问题, 提出一种将基于边缘的活动轮廓模型和基于区域的活动轮廓模型相结合的活动轮廓模型。**方法** 以真实 SAR 图像为基础, 分析了向量场卷积 (VFC) 活动轮廓模型以及区域竞争 (RC) 活动轮廓模型各自的特点和优势, 发现这两个模型存在一定的互补性, 因此将这两个模型进行了结合, 得到了一种新的 SAR 图像目标轮廓提取方法。**结果** 基于真实 SAR 图像的实验结果表明, 本文方法能较好地应对 SAR 图像信噪比较低、目标边缘模糊等特点, 能准确地获得 SAR 图像目标轮廓。**结论** 本文方法可用于执行实际的 SAR 图像轮廓提取任务, 为后续的 SAR 图像自动识别和特征级图像融合等任务提供了较为优良的输入信息。

**关键词:** 合成孔径雷达; 轮廓提取; 活动轮廓模型; 似然比; 向量场卷积; G0 分布

## Active contour model based on edge and region attributes for target contour extraction in SAR image

Wang Pei, Zhou Xin, Peng Rongkun, Fu Peng

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

**Abstract:** **Objective** Target contours provide valuable shape information that can be used in pose estimation and target recognition. Therefore, target contour extraction in synthetic aperture radar (SAR) image has drawn much attention around the world. Given the multiplicative noise inherent in SAR image, traditional target contour extraction methods fail to process SAR images. To solve this problem, this paper proposes a new active contour model that combines the attributes of both edges and regions. **Method** Based on real SAR images, this paper analyzes the vector field convolution active contour model and the region competition active contour model. The two active contour models have their own advantages and complement each other. Therefore, we combine the two active contour models to obtain a new active contour model that can be used for target contour extraction in SAR image. **Result** The experiments are conducted based on real SAR images, and results show that the proposed method can deal with the characteristics of SAR image, such as low signal-to-noise ratio and blurred target edges. It can accurately locate the contours of the targets in SAR image. **Conclusion** The proposed method can be applied to SAR image interpretation to extract target contours to pro-

收稿日期: 2013-08-14; 修回日期: 2014-02-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61102138)

第一作者简介: 王沛 (1989—), 男, 南京航空航天大学检测技术与自动化专业硕士研究生, 主要研究方向为 SAR 图像处理。E-mail:

1847698730@qq.com

vide excellent input information for subsequent tasks in SAR image interpretation, such as automatic identification and feature-level image fusion.

**Key words:** synthetic aperture radar; target contour extraction; active contour model; likelihood ratio; vector field convolution; G0 distribution

## 0 引言

合成孔径雷达(SAR)作为微波遥感的代表,相比于传统光学、红外等遥感技术,在具有大面积的数据获取能力以及高分辨率的同时,还具有全天时、全天候以及对云层、雾层、地表植物等有一定穿透性的特点,使其在军事、民用的很多领域有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。然而,由于成像机理的原因,使得 SAR 图像信噪比较低,因此原本适用于光学图像中目标轮廓提取的方法不能直接应用于 SAR 图像中目标的轮廓提取,故需要开发新的适应于 SAR 图像的目标轮廓提取方法。

自 1953 年获得第 1 幅 SAR 图像以来,经过几十年孜孜不倦的努力,很多学者在 SAR 图像目标轮廓提取方法的研究中取得了重大的突破。时至今日,众多的轮廓提取方法已孕育而生。其中,常用的算法有:基于恒虚警率(CFAR)检测的轮廓提取方法<sup>[2]</sup>、基于边缘检测的轮廓提取方法<sup>[3]</sup>和基于马尔可夫随机场(MRF)的轮廓提取方法<sup>[4]</sup>。然而,随着计算机技术的飞速发展和现代战争的日趋信息化,这些算法在图像处理精度或速度上都愈发不能满足对目标轮廓提取的精确性或实时性的要求,寻求更为高效的 SAR 图像处理技术已成为当今该领域的热点问题。

近年来,活动轮廓模型被证明是一种高效的轮廓提取法。该类方法首先在近目标处设定一个初始轮廓,并将轮廓曲线的运动看做力合成的结果,从而设计曲线的能量函数,最后通过能量函数的最小化使得初始轮廓逼近真实目标边界。根据所使用输入信息的不同,活动轮廓模型可分为基于边缘的活动轮廓模型<sup>[5-12]</sup>以及基于区域的活动轮廓模型<sup>[13-15]</sup>。基于边缘的活动轮廓模型多采用图像的梯度作为输入信息,而基于区域的活动轮廓模型多采用统计模型作为图像的输入信息。这两类模型均能较好地提取光学图像中的目标信息。然而,由于 SAR 图像中相干斑噪声的影响,使得在光学图像中取得很大成功的活动轮廓模型不能直接应用于 SAR 图像目标

的轮廓提取。

由于活动轮廓模型的高效性符合 SAR 图像目标轮廓提取的研究趋势,故若能引入其他模型或方法使得活动轮廓模型能够对 SAR 图像目标进行轮廓提取,则有望改善 SAR 图像目标轮廓提取的精度和效率。基于这点,提出一种将基于边缘的活动轮廓模型与基于区域的活动轮廓模型相结合的 SAR 图像目标轮廓提取方法,利用图像的梯度信息吸引活动轮廓线运动至近目标处后再利用图像的区域信息对轮廓线进行边界保真,从而成功地将活动轮廓模型应用于 SAR 图像的目标轮廓提取。

## 1 活动轮廓模型回顾

### 1.1 Snake 模型

经典活动轮廓模型,即 Snake 模型<sup>[5]</sup>是由一系列控制点  $\mathbf{v}(s) = (x(s), y(s))$  组成的一条封闭的样条曲线。其中,  $\mathbf{v}(s)$  表示由封闭曲线包围的区域  $\Omega$  边界,即  $\mathbf{v}(s) = \partial\Omega$ 。则 Snake 模型的能量函数可表示为<sup>[5]</sup>

$$E_{\text{snake}} = \int_0^1 \left\{ \frac{1}{2} [\alpha |\mathbf{v}_s(s)|^2 + \beta |\mathbf{v}_{ss}(s)|^2] + E_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s)) \right\} ds \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{v}_s$  和  $\mathbf{v}_{ss}$  分别是  $\mathbf{v}(s)$  对  $s$  的一阶和二阶导数;  $\alpha$  和  $\beta$  分别是  $\mathbf{v}_s$  和  $\mathbf{v}_{ss}$  的权重;  $E_{\text{ext}}$  表示 Snake 模型的外部能量函数。通过最小化该能量函数来获取轮廓。从式(1)可以看出,最小化能量函数的过程即是控制点保持一定的间距且轮廓曲线保持一定的曲率向图像目标区域运动并且最终停止在目标边界的过程。假设  $I$  表示一幅灰度图像,  $G_\sigma$  表示方差为  $\sigma$  的高斯方程,则当目标边缘为阶跃式边缘,整幅图像为一幅灰度图时,经典的外部能量函数为<sup>[5]</sup>

$$E_{\text{ext}}^{(1)} = -|\nabla I|^2 \quad (2)$$

$$E_{\text{ext}}^{(2)} = -|\nabla[G_\sigma * I]|^2 \quad (3)$$

而当目标边缘的为屋脊式边缘,整幅图像为一幅边界图时,经典的外部能量函数为<sup>[6]</sup>

$$E_{\text{ext}}^{(3)} = I \quad (4)$$

$$E_{\text{ext}}^{(4)} = G_{\sigma} * I \quad (5)$$

对式(1)进行最小化,则轮廓满足欧拉方程<sup>[5]</sup>

$$\alpha \mathbf{v}_{ss}(s) - \beta \mathbf{v}_{ssss}(s) - \nabla E_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s)) = 0 \quad (6)$$

式(6)可看做一个力的方程,即

$$F_{\text{int}}(\mathbf{v}(s)) + F_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s)) = 0 \quad (7)$$

式中,  $F_{\text{int}}(\mathbf{v}(s)) = \alpha \mathbf{v}_{ss}(s) - \beta \mathbf{v}_{ssss}(s)$  表示内力,在活动轮廓模型运动过程中保持约束曲线使之平滑,而  $F_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s)) = -\nabla E_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s))$  表示外力,吸引活动轮廓线至目标区域。假设  $\mathbf{v}_t(s, t)$  表示轮廓曲线对时间  $t$  的一阶导数,使用最速下降法对式(7)进行寻优得到:

$$\mathbf{v}_t(s, t) = \alpha \mathbf{v}_{ss}(s, t) - \beta \mathbf{v}_{ssss}(s, t) + F_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s, t)) \quad (8)$$

综上所述,传统 Snake 模型是利用欧拉—拉格朗日方程对某种能量函数的进行最小化驱使初始轮廓逼近目标边缘的一种轮廓提取手段。该模型由于外部能量函数所形成的势场较小,故而模型具有较小的搜索范围,且不能够提取带有凹面的目标轮廓,因此需要对其进行改进。

## 1.2 向量场卷积模型

自 Kass 提出 Snake 模型以来,基于 Snake 外部能量函数或者外力的改进一直以来是众多图像工作者研究的重点和热点。时至今日,众多的改进模型被提出。然而,这些改进的模型往往会引入各种约束,在解决一个问题的同时引入其他问题<sup>[7]</sup>。

1998 年, Xu 等人<sup>[7]</sup>提出了一种梯度向量流模型(GVF)。该模型将扩散方程引入活动轮廓模型中,并采用迭代扩散的方式将图像梯度从目标的边缘扩散至全局。该方法能够同时解决 Snake 模型中的两个关键问题,即模型搜索范围较小以及不能提取目标凹面信息。该方法一经提出就受到了众多学者的重视,且有部分学者针对该模型存在的一些缺陷作出了许多改进<sup>[8-10, 12]</sup>。

2007 年, Li 等人<sup>[11]</sup>提出了一种向量卷积场(VFC)的活动轮廓模型。文献[11]指出, GVF 模型正是该模型的一种特例。相较于 GVF 模型, VFC 模型具有更强的抗噪性能且所构建的 VFC 场更加平滑。该模型引入了核函数<sup>[11]</sup>

$$k = mn \quad (9)$$

式中,  $m$  为向量  $n$  的权重,假设图像大小为  $M \times N$ , 向量  $n$  的原点为图像的中心点  $(\frac{M}{2}, \frac{N}{2})$ 。式(9)中,  $n_{x,y}$  表示指向核函数原点的单位向量<sup>[11]</sup>, 其表达式为

$$n(x, y) = \left[ -\left(x - \frac{M}{2}\right) / r(x, y), -\left(y - \frac{N}{2}\right) / r(x, y) \right] \quad (10)$$

式中,  $r(x, y) = \sqrt{\left(x - \frac{M}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{N}{2}\right)^2}$  表示点  $(x, y)$  至原点的距离。

文献[11]提出了两种  $m$  的加权形式作为参考,一种是根据距离倒数的加权形式,即

$$m_1(x, y) = (r(x, y) + \varepsilon)^{-\gamma} \quad (11)$$

式中,  $\varepsilon$  表示一较小的正数,  $\gamma$  表示该加权形式的可调参数。另一种是高斯形式的加权方式,即

$$m_2(x, y) = \exp(-r^2(x, y) / \zeta^2) \quad (12)$$

式中,  $\zeta$  表示该加权形式中的可调参数。本文默认采用  $m_1(x, y)$  这种加权形式计算核函数,并利用该核函数卷积原图像的的边缘图像即可得到 VFC 的外力<sup>[11]</sup>

$$f_{\text{vfc}} = f * k \quad (13)$$

式中,  $f$  表示原图像的的边缘图像,可通过原图像求导可得,即令  $f = -E_{\text{ext}}^{(i)}$ , 其中  $i = 1, 2, 3, 4$  分别对应式(2)~(5)。利用式(13)中的外力  $f_{\text{vfc}}$  代替原 Snake 模型中的外力(即式(7)中的  $F_{\text{ext}}(\mathbf{v}(s))$ ) 可得到 VFC 模型。相较于众多改进的 Snake 模型,该模型具有较强的抗噪性能,因此更加适合对信噪比较低的图像进行轮廓提取。然而由于 SAR 图像的成像机理的原因,图像中目标区域的像素值并不均匀,故而采用传统的基于边缘的活动轮廓模型计算边缘的方法,所得到的目标边缘断裂,从而使得该类模型最终轮廓提取的结果易发生边界泄露的现象。故需要引入边界保真项。

## 1.3 基于区域的活动轮廓模型

与基于边缘的活动轮廓模型不同的是,基于区域的活动轮廓模型多采用逐点检测的方法,即通过引入合适的统计模型判断轮廓曲线上各点属于目标或者背景。故而,在图像中存在强噪声的情况下,基于区域的活动轮廓模型能够较基于边缘的活动轮廓模型更加准确地对目标边缘点进行定位。

1996 年, Zhu 等人<sup>[14]</sup>基于 Snake 模型、区域生长算法和最小描述距离(MDL)准则,推导了区域竞争算法(RC)。该算法首先假定所有的背景区域服从统一的概率分布,然后在图像中任意选取  $L$  个种子区域,记为  $\Omega_i (i = 1, 2, 3, \dots, L)$ , 则这些区域的边界记为  $\partial \Omega_i (i = 1, 2, 3, \dots, L)$ , 再根据 MDL 准则设计能量函数

$$E(v(s), \{\eta_i\}) = \sum_{i=1}^L \left\{ \frac{\mu}{2} \oint_{\partial \Omega_i} ds - \right.$$

$$\log P(\{I(x, y) : (x, y) \in \Omega_i\} | \eta_i) + v \} \quad (14)$$

式中,第1项表示种子区域边界 $\partial\Omega_i$ 的长度;第2项为表示区域 $\Omega_i$ 的概率分布的对数; $\eta_i$ 表示区域 $\Omega_i$ 概率分布的参数; $\mu$ 和 $v$ 均为常值。通过最小化式(14)中的能量函数,可得

$$f_{RC} = -\mu\kappa(s)n(s) + \log\left(\frac{P(I_{v(s)}|\theta_1)}{P(I_{v(s)}|\theta_2)}\right)n(s) \quad (15)$$

式中, $\kappa(s)$ 表示当前轮廓曲线上各像素点的曲率, $n(s)$ 表示曲线 $v(s)$ 的法向量。 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别表示目标和背景的统计分布参数。式(15)中,第1项为曲线的内力,该项与式(7)中的内力项 $F_{int}(v(s))$ 起类似的作用<sup>[14]</sup>,能在曲线运动过程中保持曲线平滑;第2项为约束轮廓曲线最终静止于目标边缘的边缘保真项,代替式(7)中的外力项 $F_{ext}(v(s))$ ,令

$$f_{LR} = \log\left(\frac{P(I_{v(s)}|\theta_1)}{P(I_{v(s)}|\theta_2)}\right)n(s) \quad (16)$$

$f_{LR}$ 是一种似然比力(LR)。当轮廓线运动至近目标处,该力能够约束曲线静止于目标边界。将RC模型的外力引入VFC力中,试图通过引入区域信息对SAR图像的目标边界进行保真。然而,式(16)中真实图像中目标和背景统计分布的参数 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 很难获取。故而需要采用一定的方法对其进行估算(详见2.2节)。

#### 1.4 SAR 图像统计建模

目前常用的统计模型包括:对数 Gauss 分布、Gamma 分布、Weibull 分布、K 分布和 G0 分布等<sup>[16]</sup>。传统的对数 Gauss 分布、Gamma 分布、Weibull 和 K 分布均不能对极不均匀区域进行很好的拟合;而由 Frery 等提出的 G0 分布对于 SAR 图像中的均匀区域、一般不均匀区域和极不均匀区域均具有较强的建模能力<sup>[17]</sup>,是一种非常适合于 SAR 图像建模的理想分布,故本文采用该分布拟合图像数据。G0 分布的概率密度函数(PDF)为

$$p(z|\omega, \tau) = \frac{2n^n \Gamma(n-\omega) \tau^{-\omega} z^{2n-1}}{\Gamma(n) \Gamma(-\omega) (\tau + nz^2)^{n-\omega}} \quad (17)$$

$$-\omega, \tau, n, z > 0$$

式中, $n$ 为等效视数,可通过先验知识获得。 $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数。 $\omega$ 为形状参数, $\tau$ 为尺度参数,它们为待估计参数。 $z$ 表示 SAR 图像的幅度数据。采用二阶和四阶矩可得参数估计式为

$$\hat{\omega} = -1 - \frac{nE(z^4)}{nE(z^4) - (n+1)E^2(z^2)} \quad (18)$$

$$\hat{\tau} = (-\hat{\omega} - 1)E(z^2) \quad (19)$$

## 2 新活动轮廓模型

VFC 模型具有较强的抗噪性能,然而正如文献[11]中所描述的,当图像中同时存在噪声和带有弱边缘的目标时,使用 VFC 模型驱使曲线运动,轮廓线在越过噪声的同时可能会发生边缘泄露现象。而 SAR 图像中同时存在较强的乘性噪声和带有弱边缘的目标,故而 VFC 模型不能直接应用于 SAR 图像。而 RC 模型外力 $f_{LR}$ 具有较强的边缘保真特性,然而该模型需要引入其他外力吸引轮廓线运动至近目标处,才能使得该项的保真特性起作用。针对 SAR 图像的特点,结合这两种模型的优势,提出一种结合边缘活动轮廓模型(VFC 模型)与区域活动轮廓模型(RC 模型)的新活动轮廓模型,能够快速、精确地提取 SAR 图像目标的轮廓。

### 2.1 VFC 对 SAR 图像目标轮廓提取效果

前已述及,VFC 模型较众多的改进后的 Snake 模型具有较强的抗噪性能,因此本文试图采用该模型对 SAR 图像中的目标进行轮廓提取。然而,由于 SAR 图像中的噪声属于乘性噪声<sup>[1]</sup>,故而相较于加性噪声,该类噪声对活动轮廓模型的影响更大。根据 SAR 图像这一特性,需要为式(3)或式(5)中的 Gauss 滤波器参数选取较大的值,也即对原图像的模糊化的程度更大,才能使得轮廓曲线越过噪声区域。然而,过大的图像模糊化会使得 VFC 模型进行轮廓提取的最终结果不够精确。且 SAR 图像中的目标区域的像素值的灰度不均匀,通过 Gauss 滤波后求取的原图像的边缘图像中目标的部分边缘断裂,致使轮廓提取结果发生边界泄露。

如图1所示,图1(a)为MSTAR项目中,HH极化,工作在X波段的雷达获取的,方位向分辨率0.3 m、距离向分辨率0.2 m的1幅T-72型坦克的真实 SAR 图像。图像的大小为139×138像素,图像的横向为方位向,纵向为距离向。其中,虚线表示活动轮廓模型的初始轮廓线。从图1中可以看出,图像受乘性噪声的干扰较为严重,且目标区域的灰度不均匀。使用上文所述的方法求取原图像的边缘图像可得到如图1(b)所示的该坦克的边缘图像。从图1可以看出,目标的部分边缘断裂。图1(c)表示的是使用VFC模型计算而得的1幅VFC力场图。图1(d)为使用VFC模型对图1(a)中的坦克进行

轮廓提取的过程,其中虚线表示选取的初始轮廓,实线表示的是轮廓曲线运动的过程。从中可以看出轮廓曲线较好地越过了噪声区域。图 1(e)中,虚线表示初始轮廓,实线为使用 VFC 模型得到的最终轮廓提取结果,可以看出,虽然该模型能够使得轮廓线越过噪声点,然而部分轮廓曲线发生边缘泄露现象,故而没能提取完整的 SAR 图像目标轮廓。

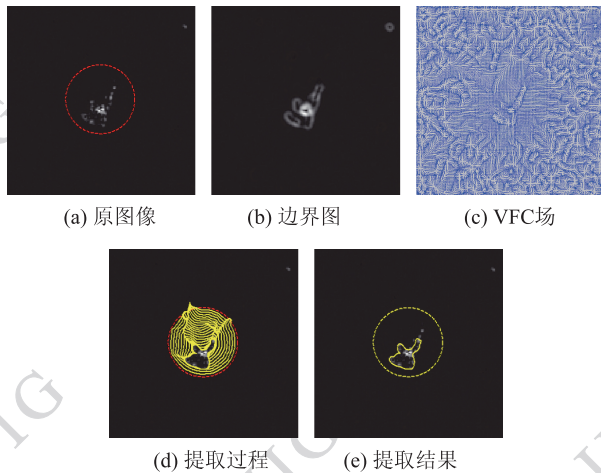


图 1 使用 VFC 模型对 SAR 图像目标进行轮廓提取结果

Fig. 1 Target contour extraction results of a SAR image using a VFC model

## 2.2 LR 对 SAR 图像目标轮廓提取效果

前已述及,RC 模型是一种优秀的区域活动轮廓模型,其主要贡献在于根据 Leclerc 连续极限的定义将统计分布模型引入了活动轮廓模型中,从而将区域信息引入活动轮廓模型中,并据此判断曲线的运动方向。然而,文献[14]中指出若要得到目标和背景的统计模型参数有两种方法:1)根据 Bayes 准则计算最大后验概率,从而得到统计分布的参数;2)采用邻域法,即在轮廓曲线上各点处取一适当大小的窗口,根据窗口内的信息判断轮廓线运动的方向。然而,在 SAR 图像中,前者需要的计算量过大,后者由于 SAR 图像受乘性噪声影响严重使得该方法对窗口选取存在一定局限性,即若窗口选取过大可能同时框中目标和背景信息致使所估算的统计模型参数不精确,若选取过小则窗口内信息受 SAR 图像乘性噪声影响较大,从而也会导致估计的参数不精确。

采用一种迭代逼近的方法:即在轮廓曲线向目标运动的过程中,在曲线当前位置将图像分成的两个区域(即曲线内部区域和曲线外部区域)分别作为目标和背景统计模型参数估计的样本,不断地修

正统计模型参数  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。轮廓曲线越靠近目标,所估计的参数  $\theta_1$  和  $\theta_2$  越逼近真实的图像目标和背景的统计模型参数,使得  $f_{LR}$  对真实目标边界的定位越精确,从而能够实现对轮廓边界的保真。然而,当初始轮廓距真实目标较远时,根据轮廓内外部的像素值估算的目标和背景统计模型的参数不精确,故而该方法不能够单独使用,需要引入其他外力(例如 VFC 力)驱使轮廓曲线向目标靠近。使用迭代逼近法对 SAR 图像目标进行轮廓提取的结果如图 2 所示。

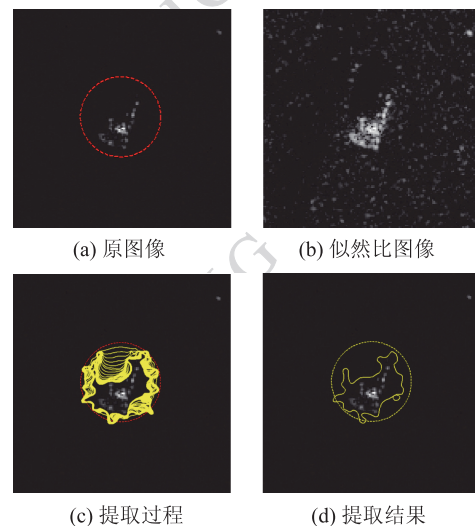


图 2 使用迭代逼近的方法对 SAR 图像目标进行轮廓提取

Fig. 2 Target contour extraction result of a SAR image using an iterative approximation method

图 2(a)为 1 幅与图 1(a)相同的真实 SAR 图像,其中,虚线表示活动轮廓模型的初始轮廓线。图 2(b)为根据当前轮廓位置利用式(16)计算而得的 1 幅似然比图像,其中像素越高表示似然比值越大,也即像素属于目标区域的可能性越大,反之亦然。图 2(c)中,虚线表示所选取的初始轮廓,实线为单独使用该似然比力进行轮廓提取的过程,由于初始轮廓距目标较远,故而使用矩估计法得到的目标和背景统计模型较其真实的分布相差较远,故而轮廓线最终不能够提取目标的轮廓。图 2(d)中,虚线表示所选取的初始轮廓,实线为单独使用似然比力进行轮廓提取的最终结果。

## 2.3 本文模型原理

根据上述两种模型的特点,结合 VFC 模型与 RC 模型,提出模型

$$f_{\text{new}} = g(x, y)f_{\text{vfc}} + h(x, y)f_{\text{LR}} \quad (20)$$

式中,第1项表示所求得 VFC 力,该项能够吸引活动轮廓运动至近目标处;第2项表示 LR 力,该项能够对边缘细节进行保真。 $g(x, y)$  和  $h(x, y)$  分别表示 VFC 力和 LR 力的权重,即

$$g(x, y) = e^{-f(x, y)/K} \quad (21)$$

$$h(x, y) = 1 - g(x, y) \quad (22)$$

式(21)中, $f(x, y)$ 表示原图像的边界图像, $K$ 为一可调参数,控制 VFC 力和似然比力的权重。通过式(20)–(22)可以推断:当轮廓曲线远离目标时,即轮廓曲线处 $f(x, y)$ 较小,故而 $g(x, y)$ 较大,从而使得 VFC 力 $f_{\text{vfc}}$ 起主要作用,能够吸引轮廓线向目标运动;而当轮廓线运动至近目标处时,轮廓曲线处 $f(x, y)$ 较大,故而 $g(x, y)$ 较小, $h(x, y)$ 较大,故而似然比力 $f_{\text{LR}}$ 起主要作用,对轮廓提取结果进行边界保真。因此,使用该模型能够快速地对 SAR 图像进行轮廓提取,且能够得到目标的精确轮廓。使用本文模型对图1中的原图像目标进行轮廓提取,其结果如图3所示。

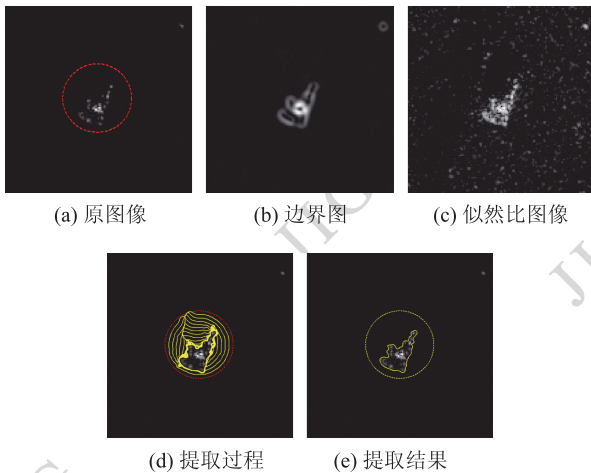


图3 使用本文模型对 SAR 图像进行轮廓提取结果

Fig. 3 Target contour extraction result of a SAR image using the new model

图3(a)为与图1和图2中的原图像相同的1幅T-72型坦克的真实SAR图像,其中,虚线表示活动轮廓模型的初始轮廓线。图3(b)为使用VFC模型计算而得的1幅目标边界图像。图3(c)为根据当前初始轮廓利用式(16)计算而得的1幅似然比图像,其中像素越高表示似然比值越大,也即像素属于目标区域的可能性越大,反之亦然。图3(d)中,虚线表示选取的初始轮廓,实线为使用本文模型进

行轮廓提取的过程,可以看出,轮廓线较好地越过了噪声区域,与图1中所示轮廓提取结果不同的是,轮廓线没有越过目标区域,也即没有发生边界泄露的现象,此时模型的保真项起主要作用。图3(e)中,虚线表示初始轮廓位置,实线为本文模型最终的轮廓提取结果,可以看出,轮廓线较好地提取了目标的轮廓,且所提取的轮廓边界保留了较多的真实图像目标边缘细节。

## 2.4 本文模型与传统轮廓提取方法的比较

通过选取1幅基于ERS-2卫星的实测数据(VV极化,图像横向为方位向,分辨率为12.5 m;图像纵向为距离向,分辨率为12.5 m,图像的大小为218×218像素,雷达工作在C波段)以及1幅ADTS实测数据的M48型坦克SAR图像(HH极化,图像纵向为方位向,分辨率为0.3 m;图像横向为距离向,分辨率为0.3 m,图像的大小为128×128像素,雷达工作在Ka波段),分别使用经典的SAR图像轮廓提取方法:Markov随机场<sup>[4]</sup>、指数加权均值比率(ROEWA)算子<sup>[18]</sup>和改进的CFAR检测器<sup>[19]</sup>对这两幅图像中的目标进行轮廓提取,并与使用本文模型提取的目标轮廓进行对比论证,其结果如图4、图5所示。

图4(a)为1幅基于ERS-2卫星拍摄的某港附近的船只,图像中乘性噪声较为严重。图4(b)为使用Markov随机场进行处理的结果,可以看出该方法受乘性噪声干扰严重,虽然能够较准确地提取目标的边缘信息,然而也将噪声处的边缘提取出来,故而

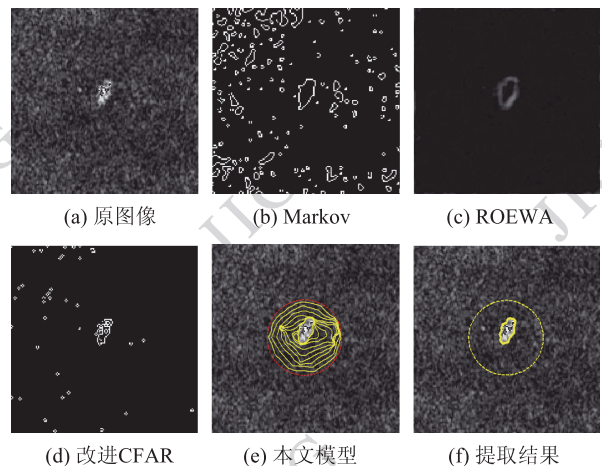


图4 不同模型对 ERS-2 数据轮廓提取结果

Fig. 4 Contour extraction results for ERS-2 data by using different models

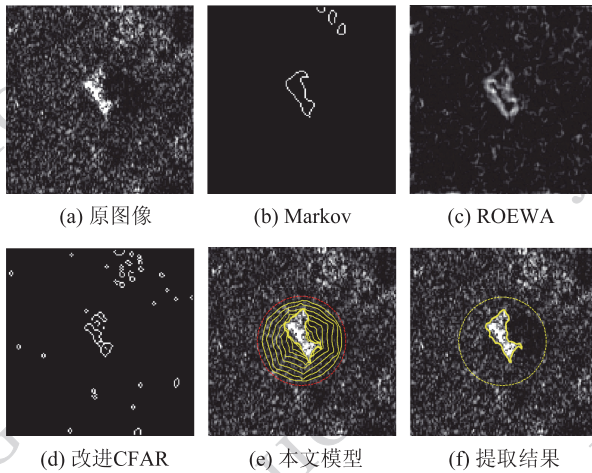


图 5 不同模型对 ADTS 数据轮廓提取结果

Fig. 5 Contour extraction results for ADTS data by using different models

轮廓提取失败;图 4(c)为使用 SAR 图像中常用的边缘检测算子 ROEWA 算子,对原图像进行边缘检测的结果。可以看出该算子对目标的边缘细节信息保留效果较差,提取的目标边缘较为模糊,且该算子不能直接得到目标的细化的轮廓信息,需要一定的后续处理;图 4(d)为使用改进的 CFAR 检测器对原图像进行轮廓的提取结果,可以看出该算子对目标边缘信息的保留能力一般,受噪声干扰严重。图 4(e)为使用本文模型对原图像进行轮廓提取的过程。图 4(f)为使用本文模型对原图像继续轮廓提取的结果。其中,虚线表示所选取的初始轮廓,实线表示最终的轮廓提取结果。可以看出,该模型能够较完整地保留目标信息,且能够直接得到目标细化的边缘。

图 5(a)为 1 幅基于 ADTS 实测数据的 M48 型坦克 SAR 图像。图 5(b)为使用 Markov 随机场进行处理的结果,可以看出 Markov 模型能够准确地将目标边界信息完整地提取出来,但同时会将斑点噪声信息亦提取出来;图 5(c)为使用 ROEWA 算子,对原图像进行边缘检测的结果,可以看出该算子不能够准确得到坦克的轮廓;图 5(d)为使用改进的 CFAR 检测器对原图像进行轮廓提取的结果,可以看出,该算子对目标边缘信息的保留能力一般,且受噪声干扰严重;图 5(e)为使用本文模型对原图像进行轮廓提取的过程;图 5(f)为使用本文模型提取的结果,虚线表示所选取的初始轮廓,实线表示最终的轮廓提取结果。可以看出,该模型能够较完整的保留目标信息,且能够直接得到目标细

化的边缘。

## 2.5 本文模型时间复杂度分析

本节所述模型主要是将 VFC 模型与似然比模型相结合从而得到一种新活动轮廓模型。故而该模型的算法时间应为 VFC 模型与似然比模型算法时间之和。假设待处理的图像尺寸为  $m \times n$ , 定义一个函数  $T(mn) = O(f(mn))$ , 其中  $O(f(mn))$  是一种时间复杂度中常用的大  $O$  阶法,  $f(mn)$  表示关于问题规模  $m \times n$  的某个函数。函数  $T(mn)$  用于表示算法所需的耗时, 则算法总的耗时可以表示为

$$T_{\text{VFC-RC}}(mn) = T_{\text{VFC}}(mn) + T_{\text{LR}}(mn) \quad (23)$$

其中,  $T_{\text{VFC-RC}}(mn)$  表示 VFC-RC 模型的算法耗时函数;  $T_{\text{VFC}}(mn)$  和  $T_{\text{LR}}(mn)$  分别表示 VFC 模型以及似然比模型算法耗时。则根据文献[11]的描述可知, VFC 模型的算法耗时函数为

$$f_{\text{VFC}}(mn) = mn \log(mn) \quad (24)$$

式中,  $f_{\text{VFC}}(mn)$  表示 VFC 模型的  $f(mn)$  函数。而通过式(18)(19)可以看出, 单次迭代的似然比模型的算法时间复杂度为  $O(mn)$ , 故而若假设 VFC-RC 模型总迭代次数为  $k$ , 则似然比模型的算法耗时函数为

$$f_{\text{LR}}(mn) = kmn \quad (25)$$

式中,  $f_{\text{LR}}(mn)$  表示 LR 力的  $f(mn)$  函数,  $k$  为算法迭代次数。因此 VFC-RC 模型的最终算法时间耗时函数为

$$f_{\text{VFC-RC}}(mn) = mn(\log mn + k) \quad (26)$$

式中,  $f_{\text{VFC-RC}}(mn)$  表示 VFC-RC 模型的  $f(mn)$  函数, 对于绝大多数图像一般经过 100 多次迭代算法就会收敛, 也即  $k \ll mn$ 。故而 VFC-RC 模型算法的最终时间复杂度近似为  $O(mn \log(mn))$ , 是一种高效的轮廓提取算法。

## 2.6 基于本文模型的 SAR 图像算法流程

基于本文模型的 SAR 图像目标轮廓提取算法流程如图 6 所示, 算法主要步骤如下:

1) 图像预处理。该步骤主要设置 Snake 模型内部能量函数的权重系数  $\alpha, \beta$ ; 式(3)中 Gauss 滤波器参数  $\sigma$ ; VFC 模型的可调参数  $\gamma$ ; 本文模型的权重参数  $K$ , 并且设置初始轮廓。

2) 由于 SAR 图像目标多是阶跃式的, 故而可根据式(3)计算 SAR 图像的边界, 从而得到一幅目标边界图。

3) 根据步骤 1) 中设置的初始轮廓对描述目标和背景统计特性的 GO 分布的参数  $\theta_1$  和  $\theta_2$  进行初

始化。

4) 使用式(20)计算本文模型。

5) 依据步骤4)所得新的轮廓曲线更新目标和背景的 PDF 参数  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。

6) 利用步骤5)中所得目标和背景的 PDF 参数

计算统计分布信息项。

7) 通过式(20)计算轮廓控制点  $\mathbf{v}(s)$ 。判断轮廓提取结果是否收敛,若收敛,则轮廓提取完成。反之,则根据当前轮廓,通过步骤5)重新计算目标和背景的 PDF,进而循环至结果收敛。

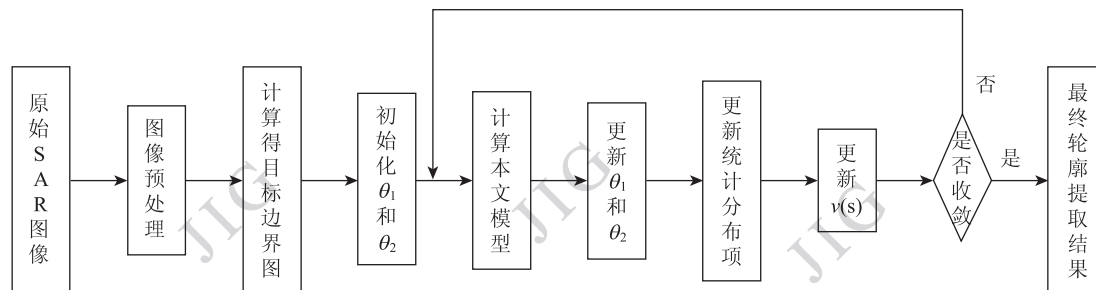


图6 本文算法流程图

Fig. 6 Flowchart of the new algorithm

### 3 实验分析

采用 MSTAR 提供的实测数据作为实验数据(均使用 HH 极化,方位向分辨率为 0.3 m,距离向分辨率为 0.2 m,T-72 型坦克的图像的大小为  $139 \times 138$  像素,BRT-60 型运输车的图像大小为  $128 \times 128$  像素,雷达工作在 X 波段,图像的横向为方位向,纵向为距离向),来验证本文模型算法的性能。该算法是采用 Matlab 2009a 在 PC 机上实现的。其结果如图 7、图 8 所示。

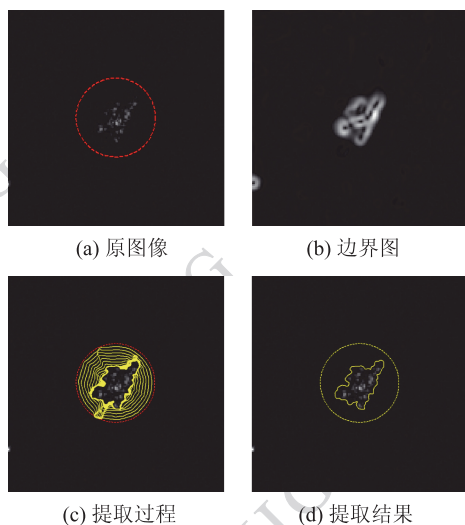


图7 T-72 型坦克 SAR 图像的目标轮廓提取结果

Fig. 7 Target contour extraction result for a SAR image with a T-72 tank

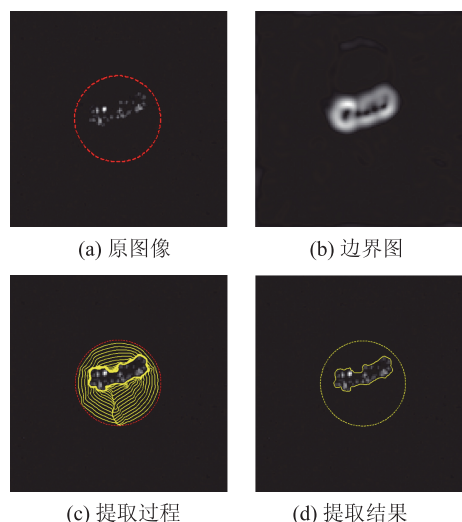


图8 BRT-60 型运输车 SAR 图像的目标轮廓提取结果

Fig. 8 Target contour extraction result for a SAR image with a BTR-60 transporter

图 7(a)为另一幅带有 1 辆 T-72 型坦克的真实 SAR 图像,其中,虚线表示活动轮廓模型的初始轮廓线;图 7(b)为使用式(3)计算所得的 1 幅目标边界图像,可以看出,所得的目标边界中部分边界断裂,且噪声影响严重;图 7(c)为使用本文模型提取目标轮廓的过程。其中虚线表示初始轮廓,实线表示最终轮廓提取结果,可以看出轮廓曲线越过了噪声区域很好地拟合 SAR 目标边界;图 7(d)中,虚线表示所选取的初始轮廓,实线表示使用本文模型提取 SAR 图像目标轮廓的结果,可以看出,该模型很好地贴合了真实目标边界。图 8(a)为 1 幅具有 1

辆 BTR-60 型运输车的真实 SAR 图像, 其中, 虚线表示活动轮廓模型的初始轮廓线; 图 8(b) 为使用式(3)计算所得的一幅目标边界图像, 从此图中可以看出, 所得的目标边界均较为模糊, 且噪声影响严重; 图 8(c) 为使用本文模型提取目标轮廓的过程。其中虚线表示初始轮廓, 实线表示最终轮廓提取结果。可以看出轮廓曲线越过了噪声区域很好地提取了运输车的边界; 图 8(d) 中, 虚线表示所选取的初始轮廓, 实线表示使用本文模型提取 SAR 图像目标轮廓的结果, 可以看出, 该模型很好地贴合了真实目标边界。综上所述, 使用本文模型对 SAR 图像进行轮廓提取, 所提取的结果具有轮廓连续、准确、无需后续处理等特点。

## 4 结 论

针对 SAR 图像目标轮廓提取这一难题, 结合 VFC 模型与似然比模型, 利用 VFC 模型具有较强的抗噪性能吸引轮廓线运动至近目标处, 利用似然比模型对近目标处的轮廓线进行边界保真, 从而提出一种新的 SAR 图像目标轮廓提取方法。结果表明, 本文提出的 SAR 图像目标轮廓提取算法具有轮廓边界定位准确、提取轮廓边界连续、无需后续处理等优点, 可用于执行实际的 SAR 图像目标轮廓提取任务。

## 参考文献 (References)

- [1] Kuang G Y, Gao G, Jiang Y M, et al. Synthetic Aperture Radar Target Detection Theory Algorithms and Applications[M]. Changsha: National University of Defense Press, 2007: 3-9. [匡纲要, 高贵, 蒋咏梅, 等. 合成孔径雷达: 目标检测理论、算法及应用[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2007: 3-9.]
- [2] Novak L M, Halversen S D. Effects of polarization and resolution on SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 1997, 33(1): 102-115.
- [3] Gernrain O, Refregier P. Edge location in SAR images: performance of the likelihood ratio filter and accuracy improvement with an active contour approach[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 1(10): 72-78.
- [4] Fjortoft R, Delignon Y, Pieczynski W, et al. Unsupervised classification of radar images using hidden Markov chains and hidden Markov random fields[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 3(41): 675-686.
- [5] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes-active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1987, 1: 321-331.
- [6] Cohen L D. On active contour models and balloons[J]. CVGIP: Image Understanding, 1991, 53(2): 211-218.
- [7] Xu C, Prince J L. Snakes, shapes, and gradient vector flow[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(3): 359-369.
- [8] Deng X P, He C, Sun H. An improved GVF snake model and its application to linear feature extraction from SAR images[C]// Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Signal Processing. Beijing, China: IEEE, 2010: 2063-2066.
- [9] Liu C C, Tsai C Y, Tsui T S, et al. An improved GVF snake based breast region extrapolation scheme for digital mammograms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 39(4): 4505-4510.
- [10] Ray N, Acton S T. Motion gradient vector flow: an external force for tracking rolling leukocytes with shape and size constrained active contours[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2004, 23(12): 1466-1478.
- [11] Li B, Acton S T. Active contour external force using vector field convolution for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(8): 2096-2106.
- [12] Zhou Y N, Cheng X, Luo J C, et al. Automatic snakes based on modified GVF[J]. Journal of Image and Graphics, 2012, 17(2): 256-262. [周亚男, 程熙, 骆剑承, 等. 改进 GVF 的自动 Snakes 模型[J]. 中国图象图形学报. 2012, 17(2): 256-262. ] [DOI: 10.11834/jig.20120215]
- [13] Ronfard R. Region-based strategies for active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 13(2): 229-251.
- [14] Zhu S C, Yuille A. Region competition: unifying snakes, region growing, and Bayes/MDL for multiband image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(9): 884-900.
- [15] Chan T, Vese L. Active contours without edges[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2001, 10(2): 266-277.
- [16] Gao G. Review on the statistical modeling of SAR images[J]. Signal Processing, 2009, 25(8): 1270-1278. [高贵. SAR 图像统计建模研究综述[J]. 信号处理, 2009, 25(8): 1270-1278. ]
- [17] Frery A C, Muller H, Freitas C C, et al. A model for extremely heterogeneous Clutter[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(3): 648-659.
- [18] Fjortoft R, Lopes A, Marthon P, et al. An optimal multiedge detector for SAR image segment[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 36(3): 793-802.
- [19] Xie K. Research on target detection in synthetic aperture radar image[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. [谢堃. 合成孔径雷达目标检测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011. ]