

# 融合目标轮廓和阴影轮廓的 SAR 图像目标识别

尹奎英<sup>1</sup>, 金林<sup>2</sup>, 李成<sup>3</sup>, 刘宏伟<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西 西安 710071; 2. 南京电子技术研究所, 江苏南京 210039; 3. 空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘要** 针对合成孔径雷达图像目标识别问题, 在基于图像成像模型分析基础上, 提出了一种融合 SAR 目标轮廓和阴影轮廓的目标识别算法。首先提出了一种基于去控制标记符的 SAR 图像分割算法, 得到 SAR 图像目标轮廓和阴影轮廓, 然后用这 2 种轮廓融合, 用傅立叶描述子将二维数据转为一维数据, 最后用基于串接准则的融合算法得到识别结果, 进行 SAR 目标识别。基于 MSTAR 的实验结果验证了本算法的有效性。实验结果证明: 目标轮廓和阴影轮廓的结合, 除反映本身包含的局部空间结构信息外, 还能反映 SAR 目标的高度信息, 较单一轮廓特征, 是一种更为稳健的特征。

**关键词** SAR 目标识别; SAR 图像分割; SAR 图像轮廓; 特征融合

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.01.006

**中图分类号** TN958 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)01-0024-04

基于合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的自动目标识别(Automatic Target Recognition, ATR)技术在战场感知方面非常重要, 已成为国内外研究的热门课题<sup>[1-3]</sup>。SAR 图像的特殊成像机理使得 SAR 图像噪声非常严重, 很难有清晰的轮廓。因此在进行 SAR ATR 时, 一般都使用目标内部结构特征, 如灰度值, 峰值, 中心距等特征, 基本没有使用 SAR 图像轮廓信息, 更没有使用 SAR 图像阴影信息。事实上, SAR 图像轮廓反映了 SAR 目标的局部空间结构信息, 如果分割得当, 能够分割出准确, 精细的轮廓信息, 轮廓信息可以作为一种非常稳健的识别特征。

目前在 SAR 目标轮廓特征方面作 SAR ATR 的文献很少, 文献[3]中分析了利用局部空间作识别的可行性, 并用仿真的 ISAR 数据基于局部空间进行 ATR, 不过用的数据是仿真的 ISAR 数据, 没有用到实测数据; 文献[1]用分割后的目标轮廓进行识别, 由于数据预处理不同, 分割的复杂度要高出很多; 本文同时融合了阴影轮廓和目标轮廓 2 个特征, 除了反映目标本身的轮廓信息外还能反映目标的高度信息, 因此识别率有了很大的提高。

## 1 SAR 阴影成像模型

合成孔径雷达成像一般用斜距近似表示地面距离。若场景宽度较宽, 球面波效应不能忽略, 则用斜距表示的地面距离是有失真的, 等距球面与地面的交点是远密近疏。当然, 只要知道场景和载机高度的几何关系, 这种几何失真可以通过计算加以校正, 但是如果地面有起伏, 且起伏的状况不预知, 就会带来一系列问题, 见图 1,  $\psi$  为雷达的下视角,  $\psi$  越大, 地面分辨率也越差。阴影现象发生在  $-\alpha \geq \psi$  的场合, 这里的阴影与目视的阴影不同, 后者是外界光源(如太阳、月亮等)照射不到的地方, 而仍处于视角的范围里, 而视线遮挡的合成孔径雷达是主动辐射的探测器, 它不需要外辐射源, 因而只有自身辐射受到阻挡才会形成阴影。

\* 收稿日期: 2010-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60772140, 60901067); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0954)

作者简介: 尹奎英(1977-), 女, 山东潍坊人, 博士生, 主要从事 SAR 图像处理、SAR 目标识别研究。

E-mail: yinkuiying@sina.com

SAR 阴影形成原因使得 SAR 阴影内部不包含任何 SAR 目标的信息,所以阴影相对目标具有 2 个特点:内部相对光滑,轮廓相对明显。因此,试图利用可以保持阴影轮廓特征的处理方法提取 SAR 图像阴影轮廓,进而反映目标的局部空间结构特性,使得基于轮廓特征的 SAR ATR 成为可能。从阴影的产生原理来看,在俯仰角一定的情况下,目标轮廓和阴影轮廓完全可以反应目标的局部空间信息和高度信息。它不随 SAR 入射角、成像环境等变换而变化,是一种稳健的特征。

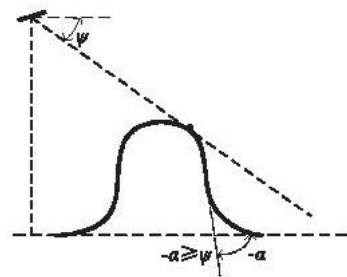


图 1 阴影的形成

Fig. 1 Formation of shadow

## 2 SAR 图像分割

有 2 个原因使得传统的图像分割算法不适用于 SAR 图像分割,其一是相干斑噪声的影响,其二是 SAR 图像相邻像素之间的相互影响和依赖关系<sup>[4-5]</sup>,对于 SAR 图像分割必须要考虑这 2 个因素。

另外,由于文中的分割主要是为了后继识别的需要,因此,分割后的结果必须满足 3 个条件<sup>[6]</sup>:①计算复杂度低,分割效果好;②容易确定感兴趣范围,边缘清晰光滑;③所有处理必须是自动的,不存在人为干预。综合上面的问题和分割要求,文中提出了一种基于控制标记符的最优阈值分割算法。

首先用幂变换将 SAR 图像由近似瑞利分布转换为近似高斯分布<sup>[5]</sup>。

由 SAR 成像原理可知,SAR 目标图像通常表现出严重的相干斑噪声,因此在做 SAR 图像的处理之前必须要首先对 SAR 图像进行去噪。

1990 年 Perona 和 Malik 将各向异性扩散方程应用于图像去斑和边缘检测<sup>[7]</sup>,因为各向异性扩散方程能在保持图像结构的同时有着良好的降噪效果,所以近年来被广泛地应用于图像处理,这种新兴的算法也被应用到了 SAR 图像分割领域中,P-M 扩散方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \text{div}(c(|\nabla u|^2) \nabla u) \\ c(|\nabla u|^2) = \frac{1}{1 + |\nabla u|^2/k^2} \\ u(x, y, 0) = u_0(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

P-M 扩散方程的基本思想是:方程可以看成是图像边缘为界的分片连续的映射。在扩散算子  $c(|\nabla u|)$  的控制下,对初始图像进行扩散,模型根据图像梯度模实现有选择的扩散平滑。因为边缘部分具有较大的梯度模值,这时  $c(|\nabla u|)$  取较小值,模型在边缘处实行较弱的平滑,以保护边缘信息;在平坦区域梯度模值较小,  $c(|\nabla u|)$  较大,扩散程度变大,有较大的平滑作用。

分水岭分割是一种基于边缘检测分割的分割方法<sup>[8]</sup>,不过由于噪声和梯度的很多局部不规则常导致过分割<sup>[9]</sup>,为了控制过分割在分水岭分割中引入了标记符的概念。用局部最小区域作为标记符标记感兴趣区域,这样来避免误分割,不过局部最小区域不只一个,所以这种标记符很容易陷入局部信息。因此,文中必须要找到一种标记点既能满足标记感兴趣区域,又不陷入局部信息。

在这里文中引入一个滑窗,滑窗初始值为边缘部分背景,然后循环对图像所有点进行统计,得到整幅图像的最大最小区域,这样既不会使标记符陷入局部,又因为滑窗统计的是区域信息,这样就避免受到噪声的影响。

用为  $9 \times 9$  的滑窗统计结果对图像进行滑窗统计最大最小值,得到最大最小值后对窗口中心点进行标记,见图 2。

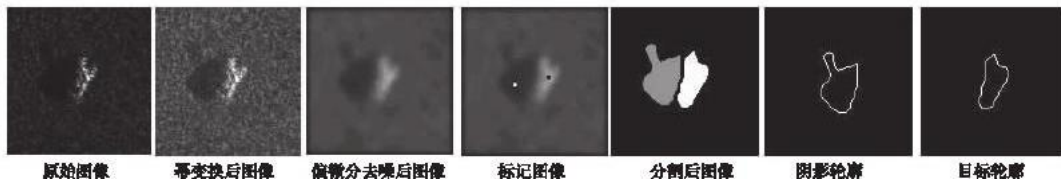


图 2 基于控制标记符的 SAR 图像分割过程

Fig. 2 Example of the application of the marker - controlled based SAR segmentation

偏微分去噪后的 SAR 图像目标,阴影,背景 3 部分内部分布已经比较均匀,背景中一些强反射点仍然会被误分割。有了标记符后,就可以在标记符周围设定一个范围作为目标区域和图像区域,就可以避免感兴趣区域之外的误分割,也避免后继为了处理这些误分割所需要的形态学滤波。

对目标和阴影进行粗分之后,然后再对轮廓之外的背景部分分 4 部分  $20 \times 20$  像素进行统计,得到背景区域的最大最小值作为分割的阈值对图像进行分割。为防止过分割和分割过粗,要对分割后 2 部分设定像素范围,如果分割过大或者过小,则动态地调节阈值。

分割后如果有不连续的区域,考虑后面识别的需要,对于阴影部分,除了极值点所在的连续区域之外别的区域一律抛弃处理,目标部分则适当提高阈值,如果还有不连续的部分,考虑目标散射的复杂性对不连续区域保留。

### 3 目标识别

经过前面的分割之后,文中获得了阴影的轮廓图,轮廓特征能够反应目标的局部空间信息,这里选用傅立叶描述子来描述阴影的轮廓信息。傅里叶描述子的基本思想是:对于二维平面中的封闭边界,共有  $K$  个边界点。将边界点  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{K-1}, y_{K-1})$  采用复数的形式来表示,即  $s(k) = x(k) + jy(k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, K-1$ 。这样就将二维数列变成了一维数列。

计算  $s(k)$  的傅里叶变换可以得到:

$$a(u) = \frac{1}{k} \sum_{k=0}^{k-1} s(k) e^{-j2\pi uk/k}, k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (2)$$

$a(u)$  即称为边界的傅里叶描述子。对  $a(u)$  进行逆变换,可以恢复出原来的  $s(k)$ ,有:

$$s(k) = \frac{1}{k} \sum_{u=0}^{k-1} a(u) e^{j2\pi uk/k}, k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (3)$$

这样通过采用部分傅里叶系数来代替所有的傅里叶系数,从而实现轮廓的重建。例如,只采用前面  $P$  个系数对图像的轮廓进行重建,此时:

$$a(u) = \frac{1}{k} \sum_{k=0}^{k-1} s(k) e^{-j2\pi uk/k}, k = 0, 1, \dots, K-1 \quad (4)$$

因为 Fourier 变换的高频分量对应轮廓的细节分量,而低频分量对应着轮廓的基本形状,因此可以采用少量的低频 Fourier 系数来实现图像轮廓的重建。

下面用讨论傅里叶描述子项数的确定,图 3 是阴影轮廓采用不同项的傅里叶描述子进行重建的结果。可以看出采用前 30 个低频分量就可以有效地表示轮廓的形状特征。



图3 不同项数的 Fourier 描述子重建结果

Fig. 3 The rebuilding result under different number of Fourier descriptors

### 4 分类器设计

分别用阴影轮廓和目标轮廓获得最大相关系数,文中采用基于串接的融合器进行融合。文献[10]指出各种分类算法提供的输出信息可以分为 3 个层次,相应的分为 3 种类型的分类器融合算法,文中在这里采用第 3 种类型来融合分类器。给定样本  $x$ ,分类器  $e_k$  输出为:

$$M_k(x \in C_i | x), i = 1, 2, \dots, c, k = 1, 2, \dots, K \quad (5)$$

式中  $M_k(x \in C_i | x)$  表示分类器  $e_k$  认为  $x$  属于第  $i$  类的一种度量。对于每个分类器  $e_k$ ,其判决结果为:

$$e_k(x) = \text{jif } M_k(x \in C_j | x) = \max_{i \in \{1, 2, \dots, c\}} M_k(x \in C_i | x) \quad (6)$$

考虑式(5)、式(6),基于串联的融合分类器  $E, \mathbf{M}_1$  为目标轮廓的特征矢量,  $\mathbf{M}_2$  为阴影轮廓的特征矢量, 即:

$$M_E(x \in C_j | x) = \{\mathbf{M}_1 \quad \mathbf{M}_2\} \quad (7)$$

融合分类器的判决结果为:

$$E(x) = \text{jif } M_E x \in C_j | x = \max_{j \in \{1, 2, \dots, c\}} E_k(x \in C_j | x) \quad (8)$$

## 5 试验结果与分析

### 5.1 试验数据

实验采用的是 MSTAR 计划录取的地面静止目标 SAR 数据,分辨率为  $0.3 \times 0.3 \text{ m}^2$ 。所有原始图像大小均为  $128 \times 128$ ,根据参考文献[9]设置实验。训练和测试样本分别是 SAR 在俯仰角  $17^\circ$  和  $15^\circ$  时对地面目标的成像数据,见表 1,每类样本的方位覆盖范围是  $0^\circ - 360^\circ$ 。

### 5.2 试验结果与分析

表 2 是文中算法的识别结果,可以看出 3 类目标对于训练样本和识别样本一致的情况下识别率比较高,对于 BMP 和 BTR70 两种变体,由于变体的轮廓改变不大,因此识别率下降不大,而对于由于变体的炮塔位置变化,以及后面加载汽油桶等情况,使得轮廓改变比较大,所以识别率不高,变体的识别率下降比较大。

表 1 训练和测试样本集

类别	型号	$17^\circ$	$15^\circ$
	SNC21	-	196
BMP	SN9563	233	195
	SN9566	-	196
BTR70	C71	233	196
	SN132	232	196
T72	SN812	-	195
	SNS7	-	191

表 2 本文方法识别结果

训练样本	BMP	BTR70	T72	识别率 (%)	平均识别率 (%)
SNC21	183	7	6	93.77	
SN9563	171	2	22	87.69	
SN9566	171	12	13	87.24	
C71	12	126	11	88.72	84.93
SN132	24	14	158	80.61	
SN812	25	16	154	78.97	
SNS7	21	22	148	77.49	

## 6 结束语

随着 SAR 图像分辨率的不断提高,图像轮廓逐渐清晰,由于轮廓可以反映目标的局部空间结构,因此可以作为一种有效的识别特征。文中首先提出了一种基于控制标记符的 SAR 图像分割算法,不但能分割出准确精细的 SAR 目标,还能分割出同样准确精细的 SAR 阴影。然后用傅立叶描述子表示出目标轮廓和阴影轮廓,用基于最大相关法进行模板匹配后再用基于串接的融合器进行融合识别。基于实测数据的试验结果验证了文中算法的有效性。由于识别目标的复杂性,每种目标在实际中都会有所变化,如在识别 T72 的变体中,由于炮塔位置变化等多种原因,识别率急剧下降,因此在实际识别问题中需要依赖于多种特征的综合使用,有效的利用轮廓特征,目标中心距,灰度值,峰值等特征进行融合识别,会有更好的识别效果。

### 参考文献:

- [1] XU Mu, WANG Xuesong, XIAO Shunping. Novel SAR automatic target recognition method based on contour feature[J]. Systems engineering and electronics, 2006, 28(12): 1812 - 1815.
- [2] Timothy Ross, Stephen Worrell, Vincent Velten, et al. Standard SAR ATR evaluation experiment using the MSTAR public release data set [J]. Algorithm for synthetic aperture radar imagery V, 1998, 3370 (4): 566 - 573.
- [3] David Blacknell, Nicholas S, Arini Qineti Q. Morphological models for SAR ATR [J]. Algorithm for synthetic aperture radar

imagery IX, 2002, 4727: 69 – 79.

- [4] Yin Kuiying, Liu Hongwei, Jin Lin. Marker – controlled SAR image segmentation algorithm[C]//IET conference. Guilin: IET press, 2009: 124 – 129.
- [5] 尹奎英, 胡利平, 刘宏伟, 等. 一种符合的大图像去噪算法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2010, 37(2): 224 – 230.
- YIN Kuiying, HU liping, LIU Hongwei, et al. A composite enhancing and denoising algorithm for SAR images[J]. Journal of Xidian university: nature science edition, 2010, 37(2): 224 – 230. (in Chinese)
- [6] Oliver C, Quegan S. Understanding synthetic aperture radar Images [M]. Norwood MA: Artech house, 1998.
- [7] Perona P, Malik J. Scale – space and edge detection using anisotropic diffusion[J]. IEEE trans on pat Anal machine Intel, 1990, 7(12): 629 – 639.
- [8] Beucher S, Meyer F. The morphological approach of segmentation: the watershed transformation mathematical morphology in image processing[C]//E Dougherty. New York: [s. n. ], 1992: 726 – 731.
- [9] Pierre Moreels, Suzanne E. Watershed identification of polygonal patterns in noisy SAR images[J]. IEEE transactions on Image processing, 2003, 12(7): 740 – 750.
- [10] Xu L, Kryzak A, Suen C V. Methods of combining multiple classifiers and their applications to handwriting recognition[J]. IEEE trans on systems man and cybernetics, 1992, 22 (3): 418 – 435.

(编辑: 田新华)

## An SAR ATR Based on Fusion of Target Contour and Shadow Contour

YIN Kui – ying<sup>1</sup>, JIN Lin<sup>2</sup>, LI Cheng<sup>3</sup>, LIU Hong – wei<sup>1</sup>

(1. National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China; 3. Signal and Information Processing Lab, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Automatic target recognition (ATR) using Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery is investigated in this paper. According to the imaging model of SAR image, a SAR ATR based on fusion of target contour and shadow contour is proposed. Firstly, this paper presents a SAR image segmentation method based on marker – controlled, by using which the target contour and the shadow contour of SAR image are obtained. Then, fusion recognition is performed by using these two kinds of contours. The effectiveness of the proposed algorithm is verified by experimental results on MSTAR. The experiments verify that the fusion of these two kinds of contours contains not only the structural information of target but also the height information of SAR target. Compared with the feature of the target contour or the shadow contour when they are used separately, the feature of the fusion of them is more steady.

**Key words:** SAR ATR; SAR image segmentation; SAR image contour; feature fusion