

SAR 图像车辆目标 ROI 的提取技术

李 禹^{①②} 计科峰^① 粟 毅^①

^①(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^②(西安武警工程学院通信工程系 西安 710086)

摘 要: SAR 图像感兴趣目标区域(Region Of Interest, ROI)的提取是目标识别的基础。该文针对 SAR 图像中车辆目标 ROI 提取问题,系统分析了 ROI 提取过程的关键环节,提出了采用基于有序数据可变索引(Ordered Data Variability Index, ODVI)的自适应 CFAR 方法实现目标的恒虚警检测,同时对 ROI 切片计算鉴别特征,并实现序贯鉴别。最后利用 X 波段 SAR 图像数据验证了该文的 ROI 提取技术,给出了鉴别输出的 ROI,处理结果显示该文算法能准确提取车辆目标 ROI,有效消除虚警。

关键词: SAR; 感兴趣区域; 目标检测; 目标鉴别; 聚类

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)09-2105-05

The Method of ROI Extraction for Vehicle in SAR Image

Li Yu^{①②} Ji Ke-Feng^① Su Yi^①

^①(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

^②(Engineering College of Armed Police Forces, Xi'an 710086, China)

Abstract: ROI extraction is the essential technology for target recognition in SAR image. This paper firstly analyses the difficulties of ROI extraction for vehicle in SAR image, presents its key steps and flow chart. And then an adaptive CFAR method for SAR image target detection based on the ordered data variability index (ODVI) is proposed to improve the performance of detection. The discrimination features are calculated to form the statistic of target discrimination. The ROIs can be discriminated by using orderly the features. Finally, the real X band SAR image data is used as test data for this ROI extraction algorithm, and the discriminating results are shown. The performance of this algorithm is good.

Key words: SAR; Region of interest (ROI); Target detection; Target discrimination; Clustering

1 引言

SAR 图像 ROI 的提取是从大场景的 SAR 图像中尽可能快速地检测出可能包含目标的 ROI 切片,并作为任务提供给目标分类识别系统,因此 ROI 提取是 SAR 图像目标识别的基础。战术车辆作为 SAR 图像监测的一类重要的感兴趣目标,对其 ROI 提取技术进行研究具有很大的实用价值,将为 SAR 图像战术机动目标识别奠定基础。

车辆目标 ROI 的提取过程是多种 SAR 图像处理技术的集成,包括 SAR 图像滤波、目标检测、边缘提取与分割、目标鉴别,以及方位角估计等关键技术,其中目标的检测和鉴别是 ROI 提取技术的难点。目前, SAR 图像目标检测主要采用次优的异常检测方法^[1],即基于待测单元的背景统计模型在 Neymann-Pearson 准则下实现 SAR 图像目标的恒虚警检测。常用的检测方法有均值类 CFAR、OS-CFAR 等,然而这两类 CFAR 检测对于待检测目标的背景不具有自适应性。均值类 CFAR 在均匀环境有较好的检测性能,然而在非均匀环境时

检测性能有很大程度下降; OS-CFAR 可以改善均值类 CFAR 在非均匀背景环境的稳健性,但是有较多的虚警。鉴别阶段将对检测阶段得到的 ROI 进行鉴别处理,以去除自然杂波和部分人造杂波虚警^[2]。对 ROI 切片可以提取其尺寸、对比度、纹理特征,极化图像还可以获得极化特征,来构成鉴别统计量,利用二项式距离鉴别器实现 ROI 切片的鉴别^[3]。然而,由于难以准确衡量鉴别特征之间的冗余性和其在鉴别过程的权重,以及鉴别特征本身的不稳定性,上述鉴别器常常同等权重利用鉴别特征构建鉴别统计量,容易产生错误的鉴别。

针对上述 ROI 切片提取过程中的检测和鉴别问题,本文基于有序数据可变索引的 CFAR 算法实现对 SAR 图像的自适应检测;同时依据特征的稳定性准则,选取目标鉴别特征,实现 SAR 图像 ROI 切片的序贯鉴别。另外,本文整合了 SAR 图像 ROI 提取过程中常规的 SAR 图像处理手段,如目标切片的聚类 and 质心坐标的计算,以及目标切片位置和方位角的估计方法,构建了 SAR 图像 ROI 提取的整个流程。文中第 2 节给出了 SAR 图像 ROI 切片的提取方法;第 3 节给出了

ROI 提取包括的关键技术; 第 4 节给出了实验结果及分析, 最后是结束语。

2 SAR 图像 ROI 切片的提取方法

SAR 图像 ROI 切片的提取过程大致分为 3 个部分, 即预处理、目标检测和目标鉴别, 见图 1。

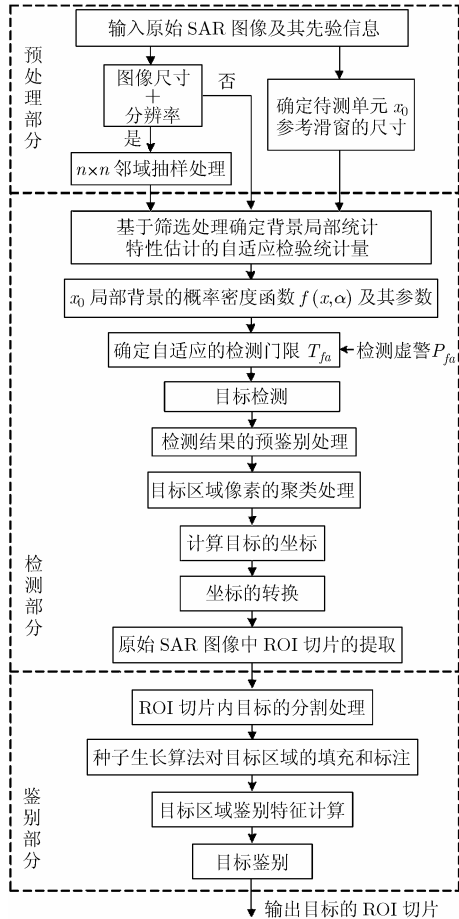


图 1 SAR 图像 ROI 提取流程

预处理部分完成对输入原始 SAR 图像的重采样, 通过降低图像分辨率来减小图像的尺寸, 以提高目标检测的速度。同时利用先验知识估计在目标检测过程中待测单元背景参考窗的尺寸。

目标检测部分采用基于有序数据可变索引的自适应 CFAR 检测算法实现 SAR 图像恒虚警检测。为了降低检测结果中过多的虚警, 减少待鉴别 ROI 切片数目, 对检测结果的二值化图像做进一步的处理, 本文称为预鉴别处理, 包括形态学的填充、连通和去除孤立点等, 以改善检测结果图像中目标区域的连通性, 以及基于目标的面积特征消除面积过小的虚假区域。该面积特征可以在二值化图像中计算得到, 由于重采样处理, 这里的面积特征与后面鉴别阶段的面积特征是不同的。另外对预鉴别的结果进行聚类运算, 得到目标在检测结果图像上的坐标, 将该坐标转换到原始图像, 可以获取检测输出的目标 ROI 切片。

目标鉴别部分对输入的 ROI 切片重新检测, 分割出目标区域更为细致的轮廓边缘。利用种子生长算法对目标的区域进行填充和标注, 可以获取目标区域的像素集合, 基于该集合可以计算目标区域的鉴别特征, 构建鉴别分类器, 完成目标 ROI 切片的鉴别处理。在鉴别阶段还需要对 ROI 切片的坐标和方位角做进一步的估计。

3 SAR 图像 ROI 提取的关键技术

SAR 图像 ROI 的提取过程包括了 SAR 图像目标检测和目标 ROI 切片的鉴别, 需要综合考虑 SAR 图像的目标检测、目标区域的聚类 and 质心坐标的计算、目标位置和方位角估计和 ROI 切片的鉴别等技术。

3.1 SAR 图像目标的检测

本文考虑 SAR 图像背景满足高斯分布, 采用自动筛选处理方法对待测单元 x_0 的背景参考像素做均匀性选择^[4], 来构建目标检测的最优统计量, 并利用双参数 CFAR 实现目标的恒虚警检测。设定 x_0 的背景参考像素做升序排列后为 $\{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$, $E_x = \{X_1, X_2, \dots, X_P, x = X_{N-k} \mid 0 \leq k \leq N - P - 1\}$ 为一个背景像素集合, P 为序列中最小的均匀像素数目, 自动筛选的物理量为 E_x 的可变性索引 ODVI, 记为^[5]

$$V_k(x) = \left(\sum_{i=1}^P X_i^2 + x^2 \right) / \left(\sum_{i=1}^P X_i + x \right)^2 \quad (1)$$

上式分析可知: 可变性索引序列 $\{V_k(x) \mid 0 \leq k \leq N - P - 1\}$ 是一个递减的序列。因此, 在 $0 \leq k \leq N - P - 1$ 的循环中依次计算 $V_k(x)$, 并与第 k 步循环中 V_k 的判决阈值 S_k 进行比较, 筛选出背景局部参考窗中最大的均匀像素集合 $A = \{X_i, i = 1, \dots, N - k\}$ 。 S_k 可以由设定的筛选虚警率 P_{FC} 和下式可以计算:

$$P_{FC} = (N - k) C_N^{N-k} \left\{ \sum_{s=0}^{N-k} C_{N-k-1}^s (-1)^s \frac{1 - \{\Phi^{-1}[h(S_k)]\}^{s+k+1}}{s + k + 1} \right\} \quad (2)$$

式中 $\Phi^{-1}[h(S_k)]$ 是 $\Phi[T]$ 的逆函数, $\Phi[T] = \int_{-\infty}^T \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$ 。

依据筛选得到的集合 A 构建高斯分布双参数 CFAR 的检验统计量:

$$Z = \frac{x_0 - \hat{\mu}_A}{\hat{\sigma}_A} = \frac{x_0 - \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i}{\sqrt{\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i^2 - \left(\frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} X_i \right)^2}} \quad (3)$$

由上式计算检验统计量 Z 的概率密度函数, 并以设定的检测虚警概率 P_{fa} 计算对应于集合 A 的自适应检测阈值 T_k 。

3.2 目标区域的聚类及其质心坐标的计算

SAR 图像目标检测是一种基于像素的异常检测, 其检测的结果也反映了目标本身向散射的异常, 如目标区域内的

断裂和畸变。同时,在中高分辨率 SAR 图像中,同一个感兴趣目标将在图像中包括多个像素。因此,在 3.1 节中,检测得到的感兴趣目标的像素可能是分离的,或是由多个不连通的区域组成。为了提取目标的 ROI 切片,需要计算感兴趣目标在图像中的坐标,这就要求对检测的目标像素进行聚类处理,以计算目标的中心坐标。

设 SAR 图像目标检测的结果中有 r 个不连通的区域,分别为 $\{Y_i, i = 1, \dots, r\}$, 其中 $Y_i = \{y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,N_i}\}$, N_i 为第 i 个目标区域内像素的数目,计算得到 Y_i 的中心坐标为 (x_{Y_i}, y_{Y_i}) 。对这 r 个中心,计算各个目标区域的中心之间的欧氏距离,采用 ISODATA 聚类算法进行自组织聚类处理,其中合并的阈值由目标先验知识比如目标尺寸等确定。两个目标区域合并后的中心坐标为:

$$x'_{Y_i} = x_{Y_i} \cdot N_i / (N_i + N_{i+1}) + x_{Y_{i+1}} \cdot N_{i+1} / (N_i + N_{i+1}) \quad (4a)$$

$$y'_{Y_i} = y_{Y_i} \cdot N_i / (N_i + N_{i+1}) + y_{Y_{i+1}} \cdot N_{i+1} / (N_i + N_{i+1}) \quad (4b)$$

经过聚类处理,可以输出感兴趣目标区域的坐标 $(x'_{Y_i}, y'_{Y_i} | i = 1, \dots, r')$, 目标区域合并为 $\{Y'_i, i = 1, \dots, r'\}$, $Y'_i = \{y'_{i,1}, y'_{i,2}, \dots, y'_{i,N'_i}\}$, N'_i 为聚类处理后第 i 个目标区域内像素的数目, r' 为聚类合并处理后检测图像中目标区域数目。依据聚类后的中心坐标,经过坐标转换和区域截取,可以在原始 SAR 图像中获取感兴趣目标区域。该感兴趣目标区域可能是自然杂波切片或是人造杂波切片,将在鉴别阶段做进一步的处理。

3.3 目标位置和方位角估计

对检测阶段输出的 ROI 切片需要进一步获取目标的位置和方位角,其中本文以目标区域外接矩形的对角线方向为基准,利用旋转矩形拟合方法估计目标的方位角。原始 ROI 切片 $S_{m \times n}$ 中的像素 $s(x_i, y_j)$, 经 θ 角度旋转后坐标为

$$\left. \begin{aligned} x' &= x_i \cos(\theta) + y_j \sin(\theta) \\ y' &= -x_i \sin(\theta) + y_j \cos(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 $\theta = k\Delta\theta$, $k = 1, \dots, 180/\Delta\theta$ 。旋转后的像素 $s(x', y')$ 经过双线性插值可得到旋转 θ 后的图像 $S'_{m' \times n'}$ 。在图像 $S'_{m' \times n'}$ 上构建与目标轮廓相切的矩形 R , R 内的元素为 $f(i, j)$, 目标区域包括在外接矩形内。利用 TBR(Target to Background Ratio)准则即选择矩形内目标像素数目与背景像素数目的最大比值来确定目标的对应方位角^[6], 该相切矩形的长宽分别为 $\text{rect_}l$ 和 $\text{rect_}w$ 。

同样在原始目标切片上构建目标的拟合矩形,利用矩形的边长作为目标窗的边长;利用该目标窗在原始切片上进行滑动,计算窗内像素的能量,最大能量窗的中心记为目标的位置。该位置可以校正检测阶段输出 ROI 切片的中心坐标。

3.4 ROI 切片的序贯鉴别处理

SAR 图像目标鉴别阶段的关键是计算鉴别特征量,常用的 SAR 图像目标鉴别特征包括尺寸、对比度、纹理和极化特征^[2]。尺寸特征、对比度特征和极化特征可以在检测输出

的二值化图像中选取类似目标形状的区域进行估计,纹理特征将在原始强度图像获得的 ROI 切片上进行计算。本文给出了 6 种鉴别特征,及其计算方法。由于难以衡量各个鉴别特征之间的冗余性,本文采用序贯鉴别处理,依次利用鉴别特征进行比较,做出判决,并最终确定满足所有鉴别特征的 ROI 切片。

下面分别从检测结果的二值化图像和 ROI 切片中计算鉴别阶段所需要的特征,包括目标面积 ROI_{mass} , 目标长度 $\text{rect_}l$, 宽 $\text{rect_}w$, 目标的标准偏差 ROI_{sd} , 目标的均值 $\text{CFAR ROI}_{\text{meanCFAR}}$ 和目标的加权填充比 $\text{ROI}_{\text{weighted-fill}}$, 计算公式如下:

$$\text{ROI}_{\text{mass}} = N'_i \quad (6)$$

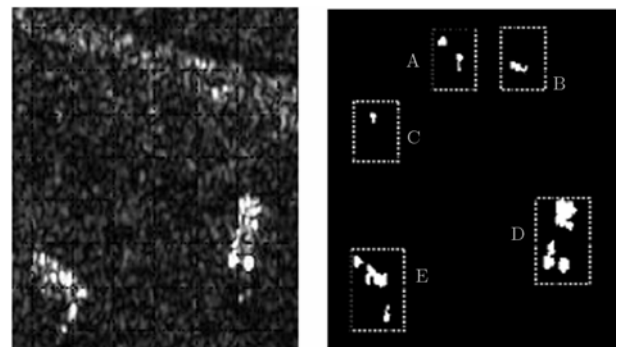
$$\text{ROI}_{\text{sd}} = \left\{ \sqrt{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [s^2(i, j) - \text{ROI}_{\text{mean}}]^2} \right\} \quad (7)$$

$$\text{ROI}_{\text{meanCFAR}} = \frac{1}{\text{rect_}l \cdot \text{rect_}w} \sum_{(i,j) \in R} f(i, j) \quad (8)$$

$$\text{ROI}_{\text{weighted-fill}} = \frac{1}{\text{rect_}l \cdot \text{rect_}w} \sum_{(i,j) \in R} f^2(i, j) \Big/ \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s^2(i, j) \quad (9)$$

4 实验结果的分析

本文利用 X 波段的 0.5m 分辨率的 SAR 图像来实现对车辆目标 ROI 的提取。在车辆目标 ROI 提取过程中,依据图 1 的流程图,逐步实现 SAR 图像的预处理、SAR 图像目标检测、检测结果的预鉴别处理、目标区域的聚类和 ROI 的截取,以及在鉴别阶段提取鉴别特征和序贯鉴别。同一目标由于其散射特性的不连续性,在检测结果中会出现不连通的多个目标区域,见图 2(b),需要聚类处理获取目标的中心坐标。图 2 给出 SAR 图像数据中目标检测和聚类的实验结果,图中 D 和 E 是真实车辆目标,其检测结果出现了 3 个不连通的区域,需要聚类处理形成新的目标区域和中心坐标。经过聚类处理后,检测结果中的 11 个目标区域合并为 5 个区域,其中心坐标见表 1。



(a) 原始 SAR 图像

(b) 检测和聚类结果

图 2 SAR 图像检测与聚类的实验结果

图 3 给出了 ROI 提取整个过程的实验结果,原始数据为 577×461 的大幅图像,图中包括 5 个车辆目标,背景地物中有人造沟壑等设施,形成较强的后向散射。为了提高 ROI 提取的速度,考虑图像分辨率和目标尺寸的关系,对原始图像做 3×3 窗的重采样处理,减小图像尺寸。同时依据目标尺寸的先验知识,选择检测过程中背景参考窗为 41×41,检测结果中有 10 个孤立的目标区域见图 3(b),经过聚类处理输出 9 个待鉴别的 ROI 切片,其中 5 个为真实目标切片,4 个为人造杂波虚警的 ROI 切片。在鉴别阶段,按照 3.4 节的公式计算目标切片的鉴别特征,其中尺寸特征包括面积、长度、宽度,对比度特征为均值 CFAR,以及纹理特征包括标准偏差和加权填充比,见表 2,表中面积、长度、宽度是像素数目表示的。经过训练,设定鉴别的模板为 $M = [70,12,50,45,1.5,0.15]$,其中 $12 < \text{rect}_l, \text{rect}_w < 50$ 。由于难以分析各鉴别特征在鉴别过程中的权重,而采用序贯的鉴别策略,鉴别的结果见图 3(d)。表 3 给出了鉴别输出 ROI 切片的坐标和方位角信息。

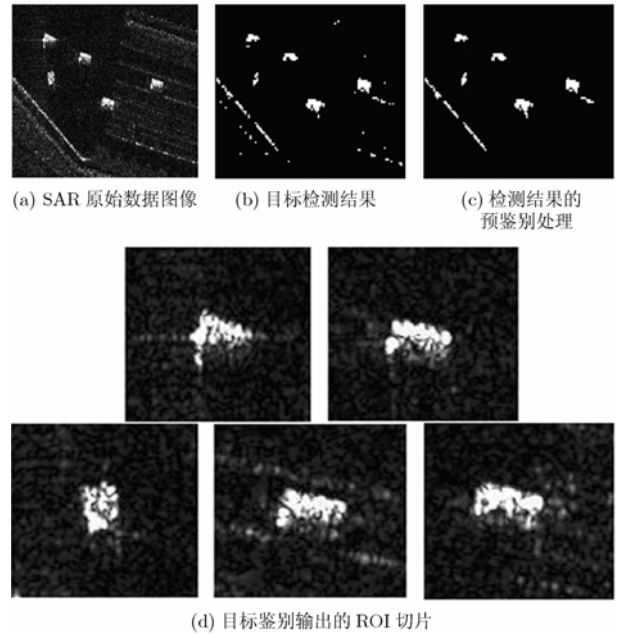


图 3 SAR 图像 ROI 提取的实验结果

表 1 SAR 图像检测与聚类处理算法中目标区域的中心坐标

	A	B	C	D	E
聚类前检测图像中各目标区域中心坐标	(21,74) (33,84)	(37,122) 36,127)	(69,30)	(129,151) (156,142) (162,151)	(193,39) (160,21) (169,32)
聚类后各目标区域的中心坐标	(27,79)	(37,125)	(69,30)	(153,149)	(179,33)

表 2 9 个 ROI 切片的鉴别特征

	面积	长度	宽度	均值 CFAR	标准方差	加权填充比
ROI ₁	194	18	20	188.06	2.5166	0.29489
ROI ₂	231	30	18	173.39	2.7082	0.38251
ROI ₃	343	36	19	160.97	2.3048	0.52917
ROI ₄	87	8	64	49.593	1.5117	0.068926
ROI ₅	223	16	13	209.98	1.9082	0.18372
ROI ₆	40	6	13	59.703	1.7485	0.0069252
ROI ₇	183	21	21	190.07	2.2351	0.25992
ROI ₈	83	7	39	65.797	1.033	0.07693
ROI ₉	91	6	53	49.105	1.2838	0.10105

表 3 SAR 图像提取 ROI 切片的坐标和方位

	ROI ₁	ROI ₂	ROI ₃	ROI ₅	ROI ₇
坐标(像素位置)	(90,106)	(139,226)	(196,121)	(208,446)	(260,289)
方位角(度)	10	5	90	40	35

5 结束语

ROI 目标区域是 SAR 图像解译中目标检测和鉴别阶段的结果,也是输入到 SAR 图像目标识别阶段的任务,因此,提取有效的 ROI 切片是 SAR 图像目标识别的基础。ROI 提取涉及到多种 SAR 图像处理技术,是目标检测、目标区域聚类、目标鉴别和目标姿态估计等集成的子系统。本文分析了 SAR 图像中车辆目标 ROI 提取过程出现的问题,提出了采用基于有序数据可变索引的自适应 CFAR 实现恒虚警检测算法和基于序贯的鉴别策略,解决了 ROI 提取中的聚类问题,给出了 ROI 提取的整个算法处理流程,并用实测的 X 波段 SAR 图像进行处理,验证了本文算法的性能。

参 考 文 献

- [1] Oliver C and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images, Boston, London, Artech House, 1998: 277-296.
- [2] Novak L M, Halversen S D, and Owirka G J, *et al.* Effects of polarization and resolution on SAR ATR. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(1): 102-116.
- [3] Principe J C, Radisavljevic A, and Fisher J, *et al.* Target prescreening based on a quadratic gamma discriminator, *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(3): 706-715.
- [4] Himonas S D and Barkat M. Automatic censored CFAR detection for nonhomogeneous environments. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 1992, 28(1): 286-304
- [5] Smith M E and Varshney P K. Intelligent CFAR processor based on data variability. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(3): 837-847.
- [6] 酃苏丹, 李广侠, 张翠, 王正志. 一种 SAR 图像中目标姿态估计的综合方法, 信号处理, 2003, 19(5): 473-477.
Li Su-da, Li Guang-xia, Zhang Cui, and Wang Zheng-zhi. A synthetical aspect estimate method for SAR targets. *Signal Processing*, 2003, 19(5): 473-477.

李 禹: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为超宽带雷达系信号处理、遥感信息处理。

计科锋: 男, 1974 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为遥感信息处理、SAR 图像解译。

粟 毅: 男, 1961 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为超宽带雷达系统、信号与信息处理、遥感信息处理。