

文章编号: 1001-2486(2007)03-0081-04

一种新的高分辨率 SAR 图像目标自动鉴别方法*

李 禹, 王世晔, 计科峰, 粟 毅

(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 目标鉴别是 SAR 图像目标识别系统的关键环节, 用以消除预筛选阶段因异常检测产生的大量虚假的感兴趣区域切片。针对目标鉴别问题, 提出了一种新的目标自动鉴别方法, 首先对 CFAR 检测的结果做基于面积特征的预鉴别处理, 而后对获得的 ROI 目标切片提取鉴别特征, 并在特征分析的基础上设定特征判决阈值, 实现序贯鉴别处理。利用 X 波段 SAR 图像数据检验了上述方法, 给出了鉴别输出的 ROI 切片。

关键词: SAR 图像; ROI; 目标检测; 序贯鉴别; 聚类

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

A New Method of Automatic Target Discrimination in High-resolution SAR Image

LI Yu, WANG Shi-xi, JI Ke-feng, Su Yi

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Target discrimination is a key step of SAR-ATR, which can remove many false ROI chips obtained by prescreening adopting anomaly detection. A new method of automatic target discrimination was proposed in this paper. Firstly, the results of CFAR detection were discriminated using the area of target, and ROI chips are exported. The features were extracted from the ROI chips, and then the ordered discrimination was realized by comparing the features with the thresholds based on the features. The real X band SAR image data was used to test the discrimination algorithm above mentioned, and finally the discriminated ROIs were presented.

Key words: SAR imagery; ROI(region of interest); target detection; sequential discrimination; clustering

典型的 SAR 图像自动目标识别系统(ATR)包括三个部分: 预筛选(目标检测)、目标鉴别和识别。预筛选阶段由于采用次优的异常检测算法^[1], CFAR 检测的结果仅反映了 SAR 图像中局部区域内强度异常的像素集合。该像素集合可能是感兴趣的人造目标, 也有可能是其他干扰目标和不连续的地物, 后者形成了大量干扰的 ROI 切片。这些虚假的 ROI 切片将在鉴别阶段被区分出来, 并使类似真实目标的 ROI 切片进入计算代价昂贵的目标识别阶段。

目前常用的鉴别算法包括基于 Gamma 核鉴别算法^[2-3]和基于二项式距离鉴别器的算法^[4]。前者仅利用目标和背景的面积特征, 处理结果中仍有较多的虚警; 后者计算切片的多种特征构成鉴别矢量, 利用二项式距离判决进行区分。上述算法都直接对检测的结果提取 ROI 切片, 由于检测结果中干扰 ROI 切片较多, 鉴别效率较低。同时难以分析各鉴别特征的相互关系, 各特征的量级有较大差异, 致使算法复杂度较高, 鉴别判决的精确度较差。

1 CFAR 检测结果的预鉴别处理

SAR 图像目标的预鉴别处理将对检测的异常像素集合进行筛选, 并输出面积上类似目标的 ROI 切片。本文基于 CFAR 检测输出的二值化图像, 提取异常像素集合的面积特征, 并依据 SAR 图像数据的分辨率和其他参数对感兴趣目标(如车辆目标)在图像中的长、宽和面积进行估计, 以此设定面积特征的阈值, 来消除 CFAR 检测结果中的部分虚警。

设定矩形目标长宽分别为 a 、 b , 图像分辨率为 δ , 每分辨单元采样数为 n_0 , 则目标在理想 SAR

* 收稿日期: 2006-10-11

作者简介: 李禹(1975—), 男, 博士生。

图像中的长、宽和面积分别为 $l = a \cdot n_0 / \delta$ 、 $w = b \cdot n_0 / \delta$ 和 $S = l \cdot w$ ，由此可以估计感兴趣类别目标的面积特征 \hat{S} ，由 \hat{S} 可以设定的预鉴别处理中面积特征的最小阈值 S_{\min} 和最大阈值 S_{\max} 。

由于目标 ROI 可能是由多个不连通的像素集合构成的，所以在预鉴别过程中还需要对上述方法获得的异常像素集合做聚类处理。设 SAR 图像目标检测的结果中有 r 个不连通的异常像素集合，分别为 $\{Y_i, i = 1, \dots, r\}$ ，其中 $Y_i = \{(x_{i,1}, y_{i,1}), (x_{i,2}, y_{i,2}), \dots, (x_{i,N_i}, y_{i,N_i})\}$ ， N_i 为第 i 个异常像素集合内像素的数目，计算得到 Y_i 的中心坐标为 (x_{Y_i}, y_{Y_i}) 。利用这个 r 中心坐标，计算各个集合之间的欧氏距离，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的估计值等确定。合并后的中心坐标为：

$$\begin{cases} x'_{Y_i} = x_{Y_i} \cdot N_i / (N_i + N_{i+1}) + x_{Y_{i+1}} \cdot N_{i+1} / (N_i + N_{i+1}) \\ y'_{Y_i} = y_{Y_i} \cdot N_i / (N_i + N_{i+1}) + y_{Y_{i+1}} \cdot N_{i+1} / (N_i + N_{i+1}) \end{cases} \quad (1)$$

经过聚类处理，可以输出感兴趣目标区域的坐标 $(x'_{Y_i}, y'_{Y_i} | i = 1, \dots, r')$ ，异常像素集合合并为 $\{Y'_i, i = 1, \dots, r'\}$ ， $Y'_i = \{y'_{i,1}, y'_{i,2}, \dots, y'_{i,N'_i}\}$ ， 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 ROI 目标切片。

2 SAR 图像 ROI 目标切片的序贯鉴别算法

预鉴别处理提取的 ROI 切片仍需要做进一步的鉴别，以消除在面积上难以区分的干扰 ROI 切片，这要求对 ROI 切片进行分割，获得切片中目标区域像素，以此计算该目标的鉴别特征。通常，ROI 目标切片具有多种鉴别特征，其构建的特征矢量维数较大，不便于实时处理，本文在特征分析和目标鉴别训练结果的基础上，基于类内间隔最小类间距离最大的原则^[5]，选择冗余性较小的特征构成鉴别矢量，并设定特征鉴别阈值，采用序贯鉴别算法，最终输出满足所有鉴别特征要求的 ROI 切片。

2.1 鉴别特征提取

对于 ROI 切片 $s(i, j) (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n)$ ，本文采用平滑性能优良的 OS-CFAR 来分割出目标区域，分割结果形成二值化切片 $f(i, j)$ 。SAR 图像 ROI 目标切片的鉴别处理将基于 $s(i, j)$ 和 $f(i, j)$ 来提取特征量。对于单极化的 SAR 图像，本文主要提取以下常用的特征。

几何特征包括目标面积、长、宽和邻域像素数目，分别设为 ROI_{\max} 、 l 、 w 和 ROI_m ，这些特征可以基于 ROI 切片的分割结果 $f(i, j)$ 来计算。 ROI_{\max} 是目标像素的总数目； l 和 w 分别是目标像素集合最小外接矩形的长主导边界和短主导边界。

纹理特征的计算需要结合 ROI 切片的原始图像数据和分割的二值化图像，包括目标的均值、归一化方差系数、加权填充比、归一化旋转惯量和分形维数，分别记为 ROI_{mean} 、 ROI_{var} 、 $ROI_{\text{weightfull}}$ 、 ROI_{mi} 和 ROI_{fd} ，计算公式如下：

$$ROI_{\text{mean}} = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s(i, j) \quad (2)$$

$$ROI_{\text{var}} = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [s^2(i, j) - ROI_{\text{mean}}^2] / \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s(i, j)^2} \quad (3)$$

$$ROI_{\text{weightfull}} = \frac{1}{l \cdot w} \sum_{(i,j) \in \mathbf{R}} f^2(i, j) \cdot s^2(i, j) / \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s^2(i, j) \quad (4)$$

上式中 $ROI_{\text{weightfull}}$ 反映了目标像素能量聚合的程度。归一化旋转惯量 ROI_{mi} 反映目标像素相对于质心的空间聚合程度。考虑目标像素到质心的距离为 $r(i, j)$ ，则

$$ROI_{\text{mi}} = \frac{1}{ROI_{\text{max}}} \sum_{i,j} r(i, j) \quad (5)$$

对 ROI 切片，采用 Hausdroff 维数来计算目标切片的分形维数 ROI_{fd} 。在 $f(i, j)$ 上只保留 N 个功率

最大散射点,并将其置为 1,其余为 0,构成新的二值化图像 $g(i, j)$ 。利用 $d \times d$ 的矩形窗来覆盖 $g(i, j)$ 亮点,其中 $d = 1$ 时,矩形窗的数目为 $N_1 = N$, $d = 2$ 时需要矩形窗的最小数目为 N_2 ,则

$$ROI_{fd} = \frac{\lg N_1 - \lg N_2}{\lg 2} \quad (6)$$

目标的对比度特征反映了目标像素和周围背景像素的差异程度,常用百分比亮度 CFAR 来衡量,记为 $ROI_{percentCFAR}$,它等于目标区域内 5% 的幅度最大像素的数目与 ROI_{mass} 的比值。目标的峰值 CFAR 和均值 CFAR 分别为 $ROI_{peakCFAR}$ 和 $ROI_{meanCFAR}$;前者是目标像素中最强散射点幅度,后者为目标区域内所有像素幅度的均值。

$$ROI_{peakCFAR} = \max_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n} (f(i, j) \cdot s(i, j)) \quad (7)$$

$$ROI_{meanCFAR} = \frac{1}{ROI_{mass}} \sum_{(i, j) \in R} f(i, j) \cdot s(i, j) \quad (8)$$

2.2 ROI 目标切片的序贯鉴别算法

基于上述鉴别特征采用序贯鉴别算法来实现 ROI 切片的鉴别处理。对选定的各特征 $C = \{c_i, 1 \leq i \leq m\}$,分别设定阈值 $\{c_{i\min}, c_{i\max}\}$,依次对 c_i 进行判决,并计算 $H = \prod_{i=1}^m h_i$,

$$h_i = \begin{cases} 1, & \text{while } c_{i\min} \leq c_i \leq c_{i\max} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$H = 1$ 时,最终输出满足所有鉴别特征要求的 ROI 切片。序贯鉴别的难点在于确定鉴别特征的顺序和各特征对应的阈值。不失一般性,对稳定性较好的鉴别特征如:面积、长宽比、长、宽,百分比亮度 CFAR 和加权填充比进行分析,确定其鉴别特征的顺序和鉴别阈值。

本文将基于特征的物理属性、特征计算的复杂度和特征之间的可分性确定序贯鉴别中特征的顺序,并给出确定阈值的方法。几何特征能直接反映待鉴别目标的尺寸和形状,特征提取算法简单、稳定性强,而且感兴趣目标与自然杂波在该类特征上可分性较强,因此序贯鉴别中将首先采用几何特征。对比度特征计算方法也比较简单,但是目标后向散射的强度随入射参数和观测场景的不同有很大的可变性,所以其稳定性劣于几何特征,在序贯鉴别中处于几何特征后面。纹理特征是描述目标散射点空间分布和强度起伏的重要特征,其计算结构比上两类特征复杂,在序贯鉴别中排在几何特征和对比度特征后面,将区分在尺寸和强度上混淆的目标 ROI 切片和干扰切片。几何特征的阈值可由预鉴别过程的长、宽和面积特征的估计值来确定,对比度特征和纹理特征的阈值需要经过已知类别目标切片的训练得到。

3 SAR 图像目标自动鉴别实验结果

本文利用 X 波段的 0.5m 分辨率的单极化 SAR 图像来实现对车辆目标 ROI 切片的鉴别处理。原始数据为 1750×2070 的 SAR 图像,见图 1(a),由先验知识可知,图中有 5 个战术车辆目标,背景为野外丘陵,具有较为复杂的地表覆盖物,包括树丛、水洼和堤坝等。

根据第一部分对矩形目标像素数目的估计方法,可以得到 SAR 图像中目标长、宽和像素数目的估计值 \hat{l} 、 \hat{w} 和 \hat{S} ,并以此设定双参数恒虚警检测算法的参考窗为 41×41 ,对 SAR 图像进行检测,检测结果见图 1(b)。在虚警率为 10^{-3} 时,检测得到 445 个异常像素区域。预鉴别处理结果见图 1(c),该图中保留的异常像素集合数目为 23 个,它们将分别形成 ROI 切片,该过程消除了 94% 的虚警 ROI。对预鉴别处理提取的 23 个 ROI 切片分别计算其鉴别特征,利用类内距离最小和类间距离最大准则对其特征进行分析,选取互补性较强、冗余性较小特征构成鉴别特征矢量 C ,包括 ROI_{mass} 、 l/w 、 l 、 w 、 $ROI_{percentCFAR}$ 和 $ROI_{weighted-fill}$ 。对特征矢量 C ,设计序贯鉴别算法。由 \hat{l} 、 \hat{w} 和 \hat{S} ,可以确定目标鉴别中几何特征的阈值 $T_0 = [500, 3, 20, 110]$,其中面积 $ROI_{mass} > 500$,长宽比 $l/w < 3$,长宽 $20 < l, w < 110$ 。经过几何特征的鉴别处理保留了 8 个 ROI 切片,其特征矢量见表 1。

鉴别特征矢量 C 中还有对比度特征和纹理特征,包括 $ROI_{percentCFAR}$ 和 $ROI_{weighted-fill}$ 。一般情况下,人造

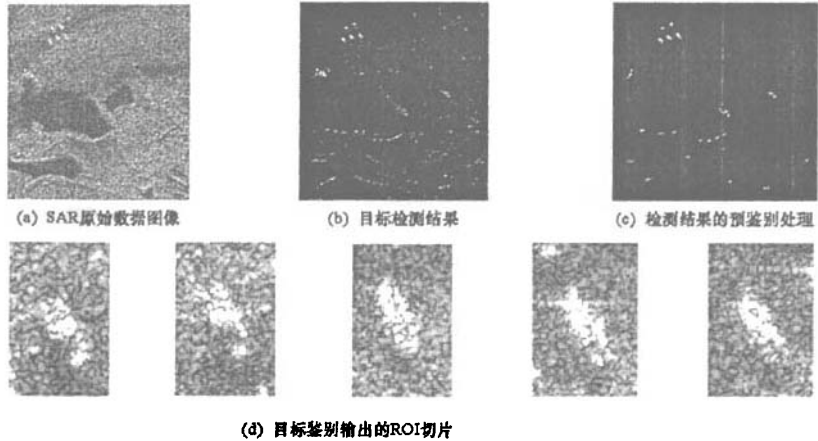


图1 高分辨率 SAR 图像 ROI 提取的实验结果

Fig.1 The result of ROIs which are extracted in high-resolution SAR imagery

目标相比于自然地物具有较多的二面角和三面角结构,在高频入射波照射下,有较多的散射中心,在图像中具有较为密集的强散射点,所以 $ROI_{weighted-full}$ 和 $ROI_{percentCFAR}$ 有较大的值。经过训练,可以设定鉴别特征矢量 C 中纹理和对比度特征的阈值 $T_1 = [0.3, 0.3]$,序贯鉴别处理将保留所有大于阈值 T_1 的 ROI 切片,见图 1(d)。

表1 ROI 切片的鉴别特征

Tab.1 The discriminating features of ROIs

	ROI_{mass}	l/w	(l, w)	$ROI_{percentCFAR}$	$ROI_{weighted-full}$
ROI_1	1316	2.08	(77, 37)	0.331	0.400
ROI_2	1179	2.5	(85, 34)	0.391	0.407
ROI_3	1533	1.82	(71, 39)	0.377	0.512
ROI_4	1601	2.22	(78, 35)	0.439	0.547
ROI_5	1395	1.75	(65, 37)	0.394	0.542
ROI_6	1843	1.32	(89, 67)	0.192	0.495
ROI_7	807	2.75	(99, 36)	0.254	0.300
ROI_8	694	2.26	(86, 38)	0.141	0.215

4 结论

对于 SAR 图像 ROI 切片自动鉴别问题,本文提出了 CFAR 检测结果的预鉴别处理和基于 ROI 切片特征的序贯鉴别处理相结合的方法。前者在检测结果的二值化图像上利用目标简单稳定的面积特征,来消除面积上过小或过大的异常像素集合,具有很高的效率;后者对于相似程度较高的剩余 ROI 切片提取较为精细的几何特征、纹理特征和对比度特征,并通过序贯鉴别处理消除虚假的自然地物 ROI 和其他人造目标形成的干扰 ROI,确保较高的鉴别精度。利用本文的自动鉴别方法对 0.5m 分辨率的实测 SAR 图像进行处理,实验结果显示该方法具有较好的鉴别效果,能确保 ROI 目标切片在没有漏警情况下,消除大量的虚警。

参考文献:

- [1] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Artech House, Boston, London, 1998.
- [2] Principe J C, Radisavljevic A, Fisher J, et al. Target Prescreening Based on a Quadratic Gamma Discriminator[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1998, 34(3):706-715.
- [3] Principe J C, Kim M, Fisher J W. Target Discrimination in Synthetic Aperture Radar Using Artificial Neural Networks[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 1998, 7(8):1136-1149.
- [4] Novak L M, Halvorsen S D, Owirka G J, et al. Effects of Polarization and Resolution on SAR ATR[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33:102-116.
- [5] 孙即祥. 现代模式识别[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2002.

