

一种基于间隙度特征的 SAR 图像车辆目标鉴别算法

王世晞^① 李 禹^{①②} 刘 军^② 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: 该文提出一种新的基于间隙度(lacunarity)特征的高分辨率 SAR 图像车辆目标鉴别算法,用以去除检测阶段的自然杂波虚警。文中着重分析了高频区车辆目标和自然地物后向散射强度不规则性的差异,其中与自然地物相比,车辆目标像素集合在灰度图像上表现为较强的不规则性和较大的间隙尺寸。基于这一特点,利用分形理论提取间隙度特征来定量估算待鉴别目标像素强度分布的不规则性和间隙大小,并以此实现鉴别处理。最后,采用 X 波段的两种实测图像数据验证了该文算法,结果显示该特征具有较好的鉴别性能。

关键词: SAR 图像; 目标鉴别; 散射中心; 分形; 间隙度

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1944-05

An Algorithm of Vehicle Target Discrimination in SAR Imagery with Lacunarity Feature

Wang Shi-xi^① Li Yu^{①②} Liu Jun^② 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: A new algorithm which can use lacunarity feature to discriminate vehicle target from natural clutter in SAR imagery is developed in this paper. Firstly, the variation and irregularity of back-scattered intensity for vehicle target and natural terrain are analyzed, which are resulted from their different scattering centers with different spatial arrangement and other cases. The vehicle image presents more irregularity and largeness of gaps than natural terrain's image. Based on fractal theory, the lacunarity feature is estimated to measure the difference and can be used to eliminate the natural clutter. And then, the real X band SAR image data are applied to validate the above algorithm, and the performance of this algorithm is good.

Key words: SAR imagery; Target discrimination; Scattering center; Fractal; Lacunarity

1 引言

SAR 图像车辆目标的自动识别系统通常采用检测、鉴别和分类的解译流程^[1],由于其检测阶段的恒虚警检测(CFAR)算法是一种次优的异常检测算法^[2],致使其输出结果中常常包含大量的虚警目标,因此需要在鉴别阶段利用真实目标的若干特征进一步去除虚假目标。纹理特征是 SAR 图像鉴别处理常用的目标特征之一,它用来描述高分辨率 SAR 图像车辆目标后向散射强度的起伏特性。

在高频区,目标后向散射可以由多个孤立的散射中心来完全表征。一般情况,车辆目标相对于自然地物具有较为规则的结构特征,也产生更多类型的散射中心。前者的散射中心具有很大的不规则性,而且空间分布较为密集;后者包含的散射中心结构较少,主要表现为漫反射和体散射等特性。这两种差异将导致车辆目标在 SAR 图像中的灰度值比

自然地物的灰度值具有更大的起伏范围,从而表现出更强的不规则性和较大的间隙尺寸。本文针对上述后向散射特性的不同,基于分形理论提取两类目标感兴趣区域(ROI)的间隙度特征,来区分车辆目标和自然杂波产生的虚假目标。

2 车辆目标与自然地物后向散射强度的不规则性分析

在高频区, SAR 图像目标总的电磁散射可以认为是由某些局部位置上等效散射中心的电磁散射合成的,每一个散射中心都相当于斯特拉顿-朱(Stratton-chu)积分中的一个数字不连续处,也就是目标几何形状上曲率不连续处或表面不连续处,还包括镜面反射、蠕动波和行波效应引起的散射。目标总的冲激响应可以表示为^[3]

$$x(t) = \sum_{k=1}^P \sum_{m=-M_1}^{M_2} x_{km} \delta^{(m)}(t - t_k) \quad (1)$$

式中 $\delta^{(m)}(t)$ 表示对 Dirac 单位冲激函数的 m 阶微分 ($m < 0$

时为积分运算), P 为目标上散射中心的个数, M_1 和 M_2 是各散射中心的微分或积分阶数, x_{km} 为各散射中心的幅度, t_k 为各散射中心的时延。 x_{km} 与散射中心的类型、目标几何尺寸, 介电常数、表面粗糙度和雷达参数等有关, 本文主要分析散射中心类型对 x_{km} 的影响。各类散射中心的后向散射截面积(RCS)与雷达频率的关系见表 1^[4], 显然相同雷达参数条件下, 各类型散射中心的后向散射强度有较大的起伏。事实上, 即使同一个目标上相同类型散射中心的后向散射强度也会受多种因素的影响, 也具有很大的可变性, 这就造成了散射中心后向散射强度的不规则性。

表 1 高频区典型散射中心的 RCS 与频率的关系

散射中心类型	频率关系
二面角或三面角(角反射器结构)	f^2
镜面散射(平板结构)	f^2
镜面散射(圆柱或任何单曲)	f^1
镜面散射(球或任何双曲面)	f^0
曲边缘	f^{-1}
尖角(锥尖)	f^{-2}

一般情况下, 车辆目标具有规则的几何形状, 其轮廓主要是边缘散射中心, 以及对应于入射波方向的两面角和三面角散射中心(车辆目标侧面与地表形成的)的后向散射合成的, 通常具有较大的灰度值。它们和背景地物的后向散射有较大的差异, 所以在高分辨 SAR 图像中车辆目标通常有阶跃型的边缘。因此, 车辆目标图像在边缘位置会形成较强的突变, 与背景间也趋于产生较大尺寸的间隙, 同时该类型的散射中心数目较多, 对本文所提取的间隙度特征起到较大的影响。

车辆目标的非边缘区域(中间区域)具有较多、较密集的两面角和三面角散射中心, 甚至局部区域还存在凹腔体散射中心等, 它们具有较强的后向散射强度, 能形成块状的峰值区域。同时, 在该区域还存在一定的镜面反射结构、尖角散射以及行波散射场和蠕动波散射等, 它们与两面角等强散射中心相比, 具有较小的后向散射强度, 在灰度图像中是相对较小幅度, 如目标像素集合中的凹陷和谷底等。因此, 在该区域车辆目标各类散射中心的后向散射强度具有较大的分布范围, 像素灰度值具有较大的起伏和不规则性。另外, 由于车辆目标的复杂空间结构, 致使其强散射点空间分布的密度也具有较大差异, 这也造成该区域的灰度图像具有较大的间隙和不均匀性。

与车辆目标相比, 自然地物一般具有缓变的结构特征, 多表现为漫反射和体散射等, 其局部区域的突变也可能形成一定的两面角和三面角散射中心, 但是与车辆目标的散射中

心相比, 该类散射中心数目较少, 空间分布比较分散, 各散射中心间的差异性也较小, 因此自然地物的后向散射特性相对比较平稳, 起伏较小。同时, 自然杂波像素的灰度值也在一个较小的分布范围, 其对应的灰度直方图具有较大的峰值包络, 灰度分布较密集, 而车辆目标像素的直方图却具有较大的分布范围, 包络也比较平缓。所以, 自然杂波形成的灰度图像具有一定的统计规律性和相对较好的自相似性, 比较满足分形的概念, 其灰度表面的不规则程度和像素间隙都小于车辆目标。

3 分形理论提取 SAR 图像目标的间隙度特征

对于车辆目标后向散射强度分布的不规则性和像素间隙尺寸, 目前, 在欧氏空间中难以建立准确的物理模型来描述和计算, 然而分形作为一种研究非规则几何形状的几何学, 可以有效度量灰度图像纹理的不规则性^[4]和灰度图像的间隙度^[5]。间隙度特征的概念是由 Mandelbrot 提出的^[6], 用来评估图像中间隙尺寸(gap size)或空洞(hole)的大小, 能够描述图像中各种形状的混合程度, 以及间隙的分布^[7]。间隙度较小的图像是均匀的和平移不变的, 间隙度大的图像是不均匀的, 其像素的空间组织规律性较差, 具有较大的畸变。

利用差分盒维法(Differential Box-Counting, DBC)在三维空间中分析 SAR 图像的间隙度特征^[7], 设 X 和 Y 表示二维坐标位置, 第三维坐标 Z 代表像素灰度值。设定一个尺寸为 $r \times r$ 的盒子在尺寸为 $W \times W$ 的图像上滑动, $r < W$ 。对每一个 $r \times r$ 的滑动盒, 盒子内部像素的最大值和最小值分别为 $g(i, j)$ 和 $b(i, j)$, 其差值为

$$n(i, j) = g(i, j) - b(i, j) \quad (2)$$

盒子质量(box mass) $M_{i,j}$ 表示图像局部区域不规则性对第 (i, j) 滑动盒子的贡献, 记为

$$M_{i,j} = \text{ceil}[k \cdot n(i, j) / r] \quad (3)$$

$k = W / G$ 是加权系数, G 是 $W \times W$ 窗内的像素灰度最大值, $\text{Ceil}[x]$ 代表 x 的上限整数值。定义 $n(M, r)$ 是尺寸为 r , 盒子质量为 M 的盒子数目, 其中 $M \in \{M_{i,j}, (i, j) \in W \times W\}$; 它可以与 $W \times W$ 窗内的盒子总数目相除, 转化成概率函数 $Q(M, r)$:

$$Q(M, r) = \frac{n(M, r)}{(W - r + 1)^2} \quad (4)$$

在尺度 r 上的间隙度被定义:

$$\Lambda(r) = \frac{\text{var}(M)}{[E(M)]^2} + 1 \quad (5)$$

上式的间隙度值被设定为图像 $W \times W$ 窗内中心像素的间隙度, 通过在整幅图像上移动 $W \times W$ 窗可以计算每一个像素的间隙度特征。

盒子质量 M 一定程度上也表征了图像各像素后向散射强度的不规则程度, 而间隙度特征进一步反映了盒子质量 M 的分布情况。当 $M_{i,j} = 0$ 时, 表示 (i, j) 位置的 $r \times r$ 盒子

内部各像素的幅度相等,是严格均匀区域;当 $M_{i,j}$ 为较小值时,盒子内部像素幅度起伏较小,可以被认为是均匀的;当 $M_{i,j}$ 为较大值时,盒子内部像素幅度起伏较大,具有较大的不规则性。盒子质量 M 的方差 $\text{var}(M)$ 反映了 $M_{i,j}$ 的起伏程度,能进一步表征像素空间组织的不规则性和间隙尺寸的大小。当 $\text{var}(M)$ 趋向于 0 时,也就是间隙度 $A(r)$ 接近 1 时,盒子质量 $M_{i,j}$ 的起伏较小,图像像素的空间组织有较好规则性,图像局部区域的间隙尺寸较小,通常对应于自然杂波区域;当 $\text{var}(M)$ 较大时,间隙度 $A(r)$ 也较大,盒子质量 $M_{i,j}$ 有较大的起伏,图像的间隙尺寸较大,像素的空间组织不规则,该情况常对应于车辆目标的后向散射特性。

4 基于间隙度特征的鉴别处理及实测实验结果

4.1 基于间隙度特征的车辆目标鉴别处理

从大幅观测场景中提取车辆目标,需要简单稳健的检测算法来快速获取 SAR 图像的异常像素集合,并对异常像素集合进行预鉴别处理,消除明显不是车辆目标的集合。该预鉴别处理将应用车辆目标的面积特征,可利用先验知识来估计面积的判决阈值。

设定矩形目标长宽分别为 a , b (m), 图像分辨率为 δ (m), 每分辨单元采样数为 n_0 , 则目标在理想 SAR 图像中的面积为

$$S = abn_0^2 / \delta^2 \quad (6)$$

由式(6)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 $S_{\max}$ 。

对通过预鉴别处理的异常像素集合,提取 SAR 图像感兴趣的目标区域,作为待鉴别处理的 ROI 数据组,并在鉴别阶段利用本文第 3 节的间隙度特征进行鉴别处理,消除自然杂波虚警和部分人造目标干扰,处理流程见图 1。

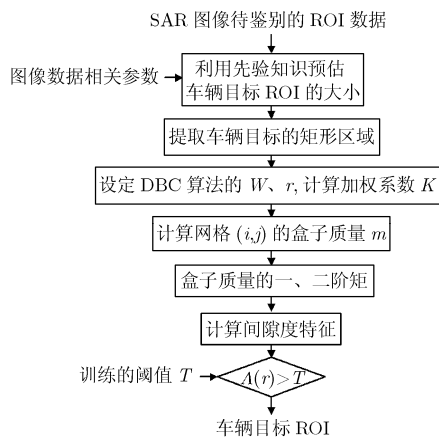


图 1 基于间隙度特征的鉴别处理流程

4.2 实测实验结果及分析

本文采用 X 波段 0.5m 分辨率的两幅 SAR 图像数据来验

证本文的算法。数据 1 的观测场景是较为单一的原野,图像大小为 2104×2192 个像素,场景中包含 5 个坦克车辆目标,背景中有地物的畸变,但没有复杂的人造目标干扰,见图 2(a); 数据 2 的观测场景为城市区域,有较多的人造目标干扰,如建筑、地隆和地沟等,背景杂波功率也较强,图像大小为 2130×1394 个像素,该场景中包含 13 个车辆目标,见图 3(a)。上述数据经过双参数恒虚警 CFAR 检测后,可以得到图像中异常像素的集合。为了降低虚警和简化鉴别处理过程,采用形态学滤波消除图像中孤立的异常像素,并对异常像素集合进行连通和填充,使得目标像素的集合更加完整。同时基于先验知识(目标的大小)对异常像素进行预鉴别处理,以消除面积过小或过大的像素集合,最终得到的二值化图像见图 2(b)、图 3(b)。对二值化图像中的像素集合做聚类处理,计算其中心坐标,可以提取原始图像中车辆目标的 ROI 切片图像,将该 ROI 数据组作为鉴别阶段的输入,计算其间隙度特征做进一步鉴别,来降低虚警。

利用 DBC 算法计算 ROI 切片的间隙度特征,设定盒子的边长 $r = 3$, 滑动窗 $W = 15$, 目标矩形区域为 ROI 切片中心的 64×64 邻域。数据 1 的图像中共有 23 个待鉴别的 ROI 切片,其中前 5 个为车辆目标,其它 18 个为地物杂波,计算其间隙度特征见图 2(c)。显然车辆目标切片的间隙度特征明显大于自然杂波切片的间隙度特征,该特征的分度度较好。通过训练设定阈值为 $T_1 = 1.2$ (见图 2(c)中虚线),可以消除自然杂波切片,同时确保车辆目标全部通过鉴别阶段,达到 100% 的鉴别概率。

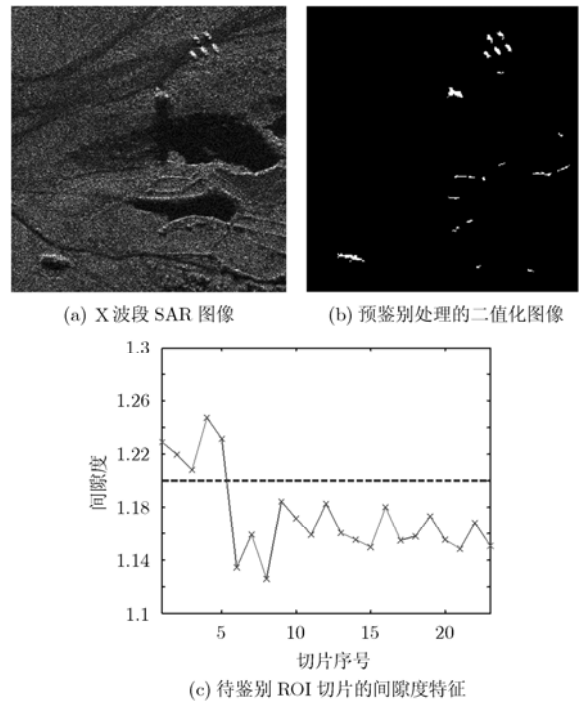


图 2 X 波段 0.5m 分辨率的 SAR 图像中坦克目标的检测与鉴别处理

数据 2 提取的待鉴别 ROI 切片数目为 96 个, 包括 13 个车辆目标, 83 个地物杂波和人造目标干扰切片。将 13 个车辆目标的 ROI 切片排列在数据组的前端, 该组的后 83 个 ROI 为非车辆目标的切片, 计算其间隙度特征见图 3(c)。经训练设定间隙度阈值为 $T_2 = 1.215$ (见图 3(c)中虚线), 则可以鉴别出 19 个目标, 包括全部的车辆目标和 6 个人造目标的干扰切片。实际计算的鉴别虚警率为 6.25%, 车辆目标的鉴别概率为 100%。图 4 给出了基于间隙度特征对数据 2 进行鉴别处理过程, 输出的部分目标 ROI 切片和产生的虚警 ROI 切片。

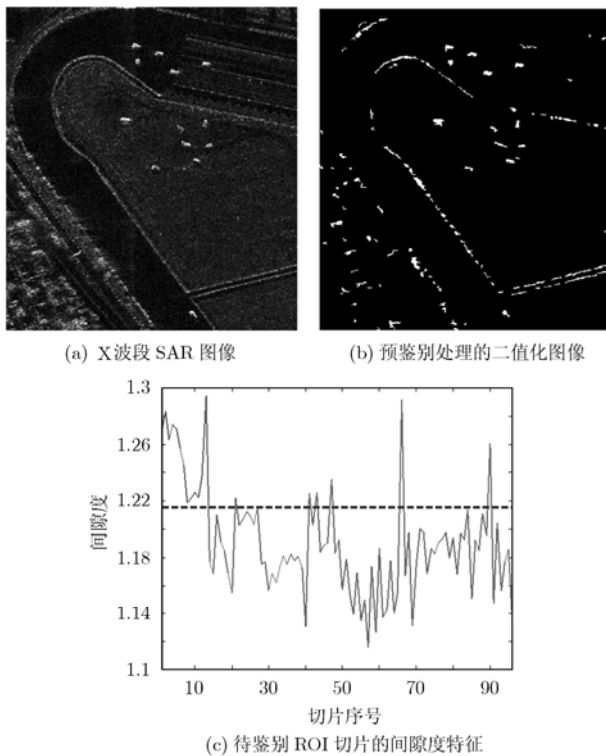


图 3 X 波段 0.5m 分辨率的 SAR 图像中坦克目标的检测与鉴别处理

数据 2 的鉴别处理产生了 6 个虚警, 这与观测场景的复杂度有关。由于数据 2 处于城市环境, 观测地物比较复杂, 存在较多的人造目标干扰, 背景的后向散射特性趋于复杂, 其散射强度的不规则性要大于简单背景环境下的地物杂波(如数据 1 中的杂波), 致使数据 2 中的待鉴别 ROI 数据组的间隙度大于数据 1, 判决阈值也相应提高。同时数据 2 中较多的建筑和地隆结构降低了鉴别的性能, 产生了虚警。为了确保鉴别阶段具有较小的漏警概率, 使真实的车辆目标都通过到分类阶段, 鉴别算法通常设定较小的阈值, 必将产生一定的虚警, 这种处理策略是合理的。对数据 2 的处理产生的部分虚警, 见图 4(b), 主要是非金属类人造目标干扰, 其后向散射强度具有较大不规则性和像素间隙。这种疑似程度较高的虚警可以通过多特征联合的鉴别处理予以消除。

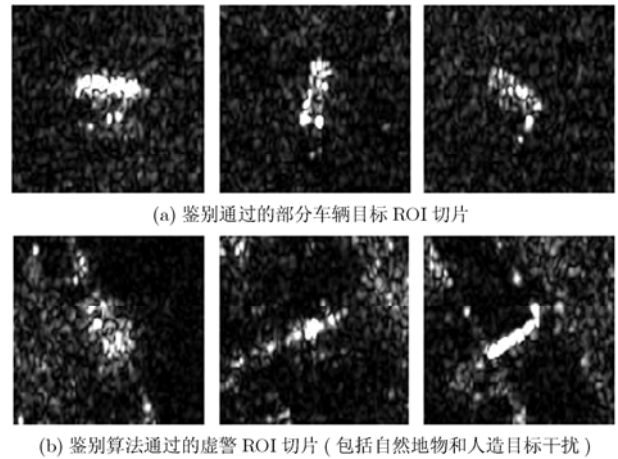


图 4 基于间隙度特征对数据 2 中 ROI 数据组鉴别处理后的部分结果

5 结束语

本文针对 SAR 图像车辆目标的鉴别处理, 着重分析高频区车辆目标散射中心类型和空间分布对其后向散射强度的影响。理论分析得知车辆目标的边缘像素与背景地物像素具有较大的突变和间隙尺寸, 车辆目标中非边缘的像素也具有较大的不规则性和间隙; 而自然地物具有相对平缓的结构特征, 散射中心类型较少, 空间分布较均匀, 主要表现为漫反射和体散射结构, 其后向散射强度具有相对较平缓的波动和较小的不规则性。针对这种差异, 利用分形理论提取间隙度特征来度量这种不规则性和间隙尺寸, 实现对车辆目标和自然地物杂波虚警的鉴别处理。实验结果显示, 利用间隙度特征可以有效去除自然地物的杂波虚警, 而且也能区分部分的人造目标干扰。这是因为在通常情况下, 非车辆类人造目标(地隆和建筑目标)的后向散射强度的不规则性要小于金属车辆目标。因此, 间隙度作为一种新的目标鉴别特征, 可为多特征的联合鉴别处理提供一种优良的候选特征。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Oliver C and Quegan S. *Understanding Synthetic Aperture Radar Images*, Boston, London, Artech House, 1998: 277-296.
- [3] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性. 北京: 电子工业出版社, 2005: 240-242.
- [4] Dong P. Test of a new lacunarity estimation method for image texture analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(17): 3369-3373.
- [5] Soe Win Myint and Nina Lam. A study of lacunarity-based texture analysis approaches to improve urban image

- classification, *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29: 501-523.
- [6] Pentlan A. Fractal-based description of nature sciences. *IEEE Trans. on Pattern Analyses and Machine Intelligence*, 1984, 6(6): 661-674.
- [7] Gan Du and Tat Soon Yeo. A novel lacunarity estimation method applied to SAR image segmentation. *IEEE Tran. on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(12): 2687-2691.
- 王世晞: 男, 1965 年生, 副教授, 主要研究方向为超宽带雷达系
信号处理、遥感信息处理.
- 李 禹: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 图像解译技
术研究.
- 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.