

一种 SAR 图像机动目标检测与分析方法

高 贵 计科峰 匡纲要 高 升

(国防科技大学电子科学与工程学院,长沙 410073)

摘 要 从 SAR(合成孔径雷达)图像中检测和分析目标是进行 SAR 自动目标识别的关键步骤,提出了一种 SAR 图像中地面机动目标检测与分析的方法,该方法在对图像进行预处理后首先利用背景杂波强度分布为指数分布假设的恒虚警率算法以及形态学运算对原始的 SAR 场景数据进行快速检测获得感兴趣的目标区域,然后提取目标区域 8 个特征构成特征矢量以详细描述目标。实验结果表明,该方法计算速度快,能够从获得的目标区域得到大量有用的信息,而且该方法具有一定的通用性。

关键词 合成孔径雷达 图像 特征提取 恒虚警率检测 形态学运算

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2005)12-1517-06

A Mobile Target's Detection and Analysis Method from SAR Image

GAO Gui, JI Ke-feng, KUANG Gang-yao, Gao Sheng

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073)

Abstract The Mobile target's detection and analysis from SAR (synthetic aperture radar) image is a key step of SAR ATR (automatic target recognition). An approach of the mobile target's detection and analysis from SAR image is proposed in this paper. After pre-processing of SAR image, Constant false alarm ratio (CFAR) algorithm based on the hypothesis that the intensity distribution of the clutter is exponential and morphological operation are applied to original SAR scene to get region-of-interest (ROIs), the CFAR detector is a rapid algorithm for detecting targets in clutter and the morphological operation can eliminate false alarms. Then the feature vector consist of 8 features for each target area is extracted to describe target in detail. Features are length, width, area, the position of centroid, azimuth, fractal dimension, rotational inertia and Mean bright. The experimental results show that this algorithm is fast in computing speed, and can get lots of useful information from target areas. Moreover, this algorithm has definite currency.

Keywords synthetic aperture radar (SAR), image, feature extraction, CFAR detection, morphological operation

1 引 言

自 20 世纪 70 年代以来, SAR(合成孔径雷达)由于其卓越的空间信息获取能力以及在国防、环境等方面的战略意义受到了普遍关注,取得了广泛的应用^[1,2]。特别是近几年来,随着目标成像技术的完善,雷达分辨率的提高,从不同的星载或机载 SAR 传感器中获得了大量的高分辨率 SAR 图像,这些图像即使在非常恶劣的气候和环境条件下,经过

解译后仍能够提供所探测地域大量有用的信息,因此, SAR 图像解译具有较大的研究意义。

SAR 图像解译应用的一个主要方面是围绕如何从含有背景杂波的图像中检测和识别地面机动目标展开研究,典型的的目标如:坦克、车辆、飞机、舰船等。对于这些目标的检测和识别,一般的 SAR 系统^[3-5]的处理方法是首先在含有复杂场景的 SAR 图像中快速检测以获得感兴趣目标区域,称之为 ROI,然后再对获得的 ROI 进行进一步的特征分析,以获得目标的位置、尺寸、质量、主轴方向等详细参

收稿日期:2004-02-25;改回日期:2005-04-06

第一作者简介:高贵(1981~),男。2003 年于国防科技大学获信息与通信工程专业硕士学位,现为国防科技大学信息系统与多媒体通信专业在读博士研究生。目前主要从事基于 SAR 图像的自动目标识别、SAR 目标特征分析的研究。已发表论文 10 余篇。E-mail: ggsarxh@sina.com.cn

数,进而可以进行大场景下目标群的信息整编,输出给专业的图像解译人员,作为计算机辅助判读的依据,完成半自动的目标识别,或者直接根据信息整编后获得的目标特征来构造目标特征矢量,然后通过特征矢量的匹配,进行自动目标识别。

2 算法设计

图 1 给出了从 SAR 图像中检测和分析目标的流程,主要包括:预处理、目标检测以及特征分析 3 个处理阶段。由于 SAR 图像的几何失真较大,直接进行处理的误差较大,所以预处理阶段首先需要对 SAR 图像进行几何校正^[6]。同时因为 SAR 图像中存在严重的相干斑噪声,可能造成图像中蕴藏的信息不易提取,目标的检测率降低等不利的情况,所以图像去斑的研究是预处理阶段的另一项重要任务。近年来,涌现出了不少去斑算法,目前应用较广泛的有:中值平滑滤波、均值平滑滤波、Frost 自适应滤波以及小波滤波等。这些算法在不同程度上对 SAR 图像斑点噪声的抑制都有一定的作用,但不可避免会造成一定的图像结构信息的损失,而且很多去斑算法往往在追求图像结构信息保持的同时忽略了计算速度,不能满足实际应用的要求。中值平滑滤波是目前公认的一种计算速度快而且能较大程度保持

图像结构信息的去斑算法^[7],因此本文采用该方法进行图像去斑。

目标检测阶段主要是根据不同目标的电磁散射特性在图像上表现出的差异进行检测进而对感兴趣的区域进行选择。对于地面机动目标而言,主要由金属制成,其后向散射比较强,在高分辨率情况下,一个目标往往由多个较亮的散射中心主导,在图像上表现为区域亮斑的形式,且目标和背景有着不同的对比度。因此,可采用灰度阈值分割技术来进行目标检测,其门限由不同的检测方法决定。本文采用基于背景分布为指数分布假设的 CFAR (constant false alarm ratio) 检测,并对检测后的图像进行数学形态学处理以获得感兴趣区域 (ROI)。

最后,本文对图像中获取后的目标区域进行标记编号,并对每个目标区域进行特征提取,最终进行整幅大场景下的信息整编,然后进行信息输出。

3 目标检测

3.1 CFAR 检测

关于 SAR 图像中的目标检测,目前国际上比较通用的一种 CFAR 算法是基于背景杂波是高斯分布假设下经典的双参数 CFAR 方法^[3]。双参数 CFAR 算法需要 3 个滑动窗口,分别对应目标区、警戒区、背景杂波区,如图 2 所示。

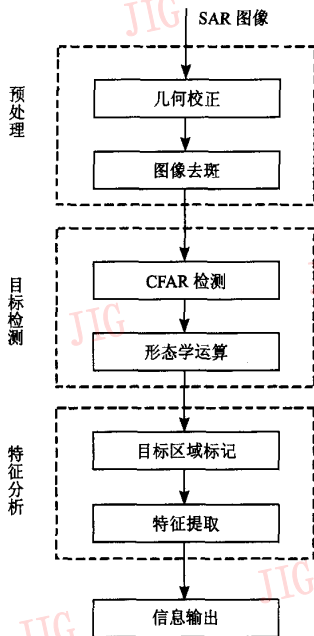


图 1 SAR 图像目标获取与分析流程

Fig. 1 The flow of target acquisition and analysis in SAR image

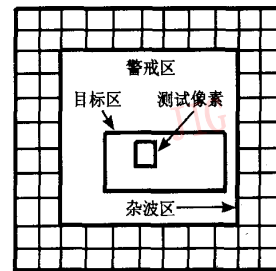


图 2 CFAR 滤波器示意图

Fig. 2 CFAR filter configuration

警戒区的存在是为了防止目标泄漏到背景中,用于计算杂波统计特性的像素位于以测试像素为中心的一个空心正方形内,该正方形的内边长应比期望的目标尺寸大,以保证该用于估计杂波统计特性的区域内不包含目标像素,该正方形外边长的选择应使该区域包含足够多的像素以得到精确的杂波统计特性估计,双参数 CFAR 检测器可简单描述为

$$\begin{cases} \frac{X_i - \bar{X}_c}{\hat{\sigma}_c} > T_{CFAR} & \text{目标区} \\ \frac{X_i - \bar{X}_c}{\hat{\sigma}_c} < T_{CFAR} & \text{杂波区} \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_i 是测试像素的灰度, \bar{X}_c 和 $\hat{\sigma}_c$ 是估计的杂波灰度的均值和标准偏差, 其中,

$$\bar{X}_c = \frac{1}{N_c} \sum_{i,j \in \Omega_c} x(i,j) \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_c = \sqrt{\frac{1}{N_c} \sum_{i,j \in \Omega_c} (x(i,j) - \bar{X}_c)^2} \quad (3)$$

$x(i,j)$ 是 (i,j) 处的像素灰度, Ω_c 表示用于计算图 2 中杂波统计量 \bar{X}_c 和 $\hat{\sigma}_c$ 的空心正方形区域, N_c 是 Ω_c 中的像素数目。 T_{CFAR} 是双参数 CFAR 检测的门限。

双参数 CFAR 检测算法非常简单, 但由于实际的地面目标所处的场景一般较复杂, 所以对目标场景应用高斯分布建模是不合理的, 理论认为实际的灰度场景图像服从指数分布^[8], 因此采用指数分布对背景分布进行建模, 对于场景杂波灰度服从指数分布的情况, 有:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{x}{\sigma}} \quad x > 0 \quad (4)$$

其中, $P(x)$ 表示场景杂波灰度的概率密度函数, σ 为背景的平均 RCS (radar cross section), 假设每个像素灰度值为独立、同分布的, 则 σ 的最大似然估计为

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M x(i,j) \quad (5)$$

其中, M 为背景杂波像素数。于是, 给定虚警率 P_{fa} , 得到指数分布下 CFAR 检测的门限 T_{CFAR} :

$$1 - P_{fa} = \int_0^{T_{CFAR}} P(x) dx \quad (6)$$

将式(4)、(5)代入式(6), 并化简, 可求解得到:

$$T_{CFAR} = -\hat{\sigma} \ln P_{fa} \quad (7)$$

所以对于每一个像素 i , 判定为目标像素或背景像素的条件为

$$\begin{cases} \text{如果 } x_i \geq T_{CFAR} & \text{像素 } i \text{ 为目标像素} \\ \text{其他} & \text{像素 } i \text{ 为背景像素} \end{cases} \quad (8)$$

以此在图像内逐点进行判断即可以实现目标的检测。

3.2 形态学运算

以上经过 CFAR 检测后的场景图像, 可能存在目标的断裂以及“空心”等现象, 进一步采取下式的形态学的膨胀和腐蚀运算, 可以使整个包含目标的区域联接成一个整体。

$$f \oplus B = \{x \mid B(x) \cap x \neq \emptyset\} \quad (9)$$

$$f \ominus B = \{x \mid B(x) \subseteq f\} \quad (10)$$

其中, f 表示 2 维图像, B 是一系列二进制结构元素, x 为像素点, \oplus 表示膨胀操作, \ominus 表示腐蚀操作。

经过前面 3 步的处理, 图像中仍可能包含由背景杂波引起的部分面积较小的区域, 所以需要进一步计算每一个区域的面积, 把面积小于某个阈值的所有区域滤除。经过上述四步的处理, 可以最终从 SAR 复杂场景图像中检测出目标区域 (ROI)。

4 区域特征提取

在整幅 SAR 场景图像中获得了目标区域之后, 对每个区域进行标记编号, 然后对其进行分析, 进而得到目标区域的特征参数。机动目标通常可以等效为一个规则的形状, 而一个规则的形状都有一定的特征参数, 如质量、面积、质心位置坐标、主轴方向角、长度、宽度、平均亮度、转动惯量、分维数等。目标的特征参数非常有用, 如对于一定分辨率的目标图像来说, 目标在图像上的宽度和长度往往可以根据图像的分辨率折算为目标实际的大小, 根据目标实际的大小, 就可以进行一定意义上的目标识别。质心位置、主轴方向角和转动惯量使用力学中的空间矩的概念来计算。

对于离散强度图像 $x(i,j)$, $p+q$ 阶原点矩定义为

$$m_{pq} = \sum_i \sum_j i^p j^q x(i,j) \quad (11)$$

已知质心位置 (\bar{i}, \bar{j}) , $p+q$ 阶中心矩定义为

$$\mu_{pq} = \sum_i \sum_j (i - \bar{i})^p (j - \bar{j})^q x(i,j) \quad (12)$$

区域面积 以目标区域像素总数作为目标区域面积, 不仅简单, 而且是对区域面积的无偏和一致估计^[9]:

$$S = \text{sum}\{\text{目标区像素个数}\} \quad (13)$$

质心位置 (\bar{i}, \bar{j}) 可用一阶矩和零阶矩的比值表示:

$$\bar{i} = \frac{m_{10}}{m_{00}}, \bar{j} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (14)$$

分维数 (fractal dimension) 分维数是一个表征被检测目标空间维数的物理量, 是一个对于二值图中强点排列的紧密关系的度量。实际上, 因为人造目标强点的排列一般较自然杂波像素的排列要更紧密, 所以可以用来区别机动目标和杂波。该特征定

义为在 ROI 区域中最亮的 N 个点的空间分布的 Hausdorff 维数:

$$H_d = \frac{\log N_1 - \log N_2}{\log d_2 - \log d_1} \quad (15)$$

该特征的计算方法是:在分割得到的目标区域中保留 50 个最亮的像素点,从而创建一个最亮的像素点为 1,而其余像素点为 0 的二值图。首先用一个 1×1 pixel 大小的窗口在二值图中滑动,记录所有在窗口中含有亮点的窗口的总数为 N_1 ,然后用一个 2×2 pixel 大小的窗口在二值图上滑动,同样记录所有在窗口中含有亮点的窗口的总数为 N_2 。其中, $d_1 = 1, d_2 = 2$ 为滑动窗口大小。

主轴方向角 对于目标而言,主轴方向角也称目标姿态角或方位角,如图 3 所示,是目标的一个非常重要的几何参数,不同姿态下目标的散射会发生很大变化,图像具有很大的差异。因而,精确地估计目标的姿态角对目标识别而言,意义重大。

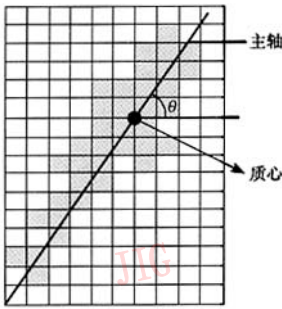


图 3 目标主轴、质心示意图

Fig. 3 The principal axis and centroid of target

主轴方向角通常定义为主轴与 x 或 y 轴的夹角,图 3 中的 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right) \quad (16)$$

尺寸特征 长度和宽度是体现目标尺寸的重要参数。一般目标区域各个方向都存在外接矩形,其中面积最小的称为最小外接矩形 (Minimum Enclosing Rectangle, 简称 MER), MER 的长轴和目标的主轴平行。尺寸特征一般是通过计算最小外接矩形的尺寸获得的。目标尺寸特征的提取,关键在于找出目标正确的矩形拟合,在寻找最优外接矩形的过程中可能产生不同的准则,而且目标的长轴可以提供精确的方位角估计,即在估计尺寸的同时可以得到方位角的信息。

转动惯量 该特征描述了目标质量相对于质心的空间扩展程度,与目标的几何形状,质量分布密切相关,定义为

$$I = \sum_{i \in A_1} n_i r_i^2 \quad (17)$$

其中, A_1 代表目标区, n_i 为目标区像素的灰度值, r_i 为目标像素点到质心的距离。

平均亮度 目标内部像素的平均亮度反映了目标的平均后向散射系数,平均亮度属于目标图像的内部灰度特征,可通过统计目标区域内的所有像素值的灰度值得到:

$$\bar{w} = \frac{1}{S} \sum_i \sum_j x(i, j) \quad (18)$$

其中, S 为目标区域的面积。

5 实验结果及分析

图 4(a) 是一幅 Ka 波段下的 512×2048 像素的大场景图像,图中包含大量的树木、草地等植被,其中含有 4 辆 M77 坦克目标,图像分辨率为 $0.3m \times 0.3m$ 。图 4(b) 是采用文献 [7] 的中值滤波算法对图 4(a) 去斑的结果。

为了比较说明本文检测方法的有效性,将利用本文的检测方法和林肯实验室提出的经典双参数 CFAR 检测方法^[3] 进行比较,首先给定虚警率 $P_{fa} = 0.002$,由图 4(c)、(d) 可知,本文基于指数分布的 CFAR 检测所产生的虚警明显要少于双参数 CFAR 检测方法所产生的虚警,所以指数分布更能正确反映实际背景杂波的分布。对图 4(e)、(f) 进行形态学膨胀、腐蚀、面积阈值消去处理结果,其中面积阈值取值为 100 个像素,其结果如图 4(e)、(f)。由图可知,这两种方法都较完整地从业场景中检测出了目标。上述的实验是在 P III 500M CPU, 128M 内存,采用 VC6.0 代码完成的,表 1 列出了上述两种方法的性能比较,

表 1 两种方法的性能比较

Tab. 1 The compare of performance for two methods

	目标像素数	虚警像素数	耗费时间(s)
双参数 CFAR 检测	616	739	18
进一步形态学滤除	672	0	22
本文 CFAR 检测	637	298	16
进一步形态学滤除	704	0	10

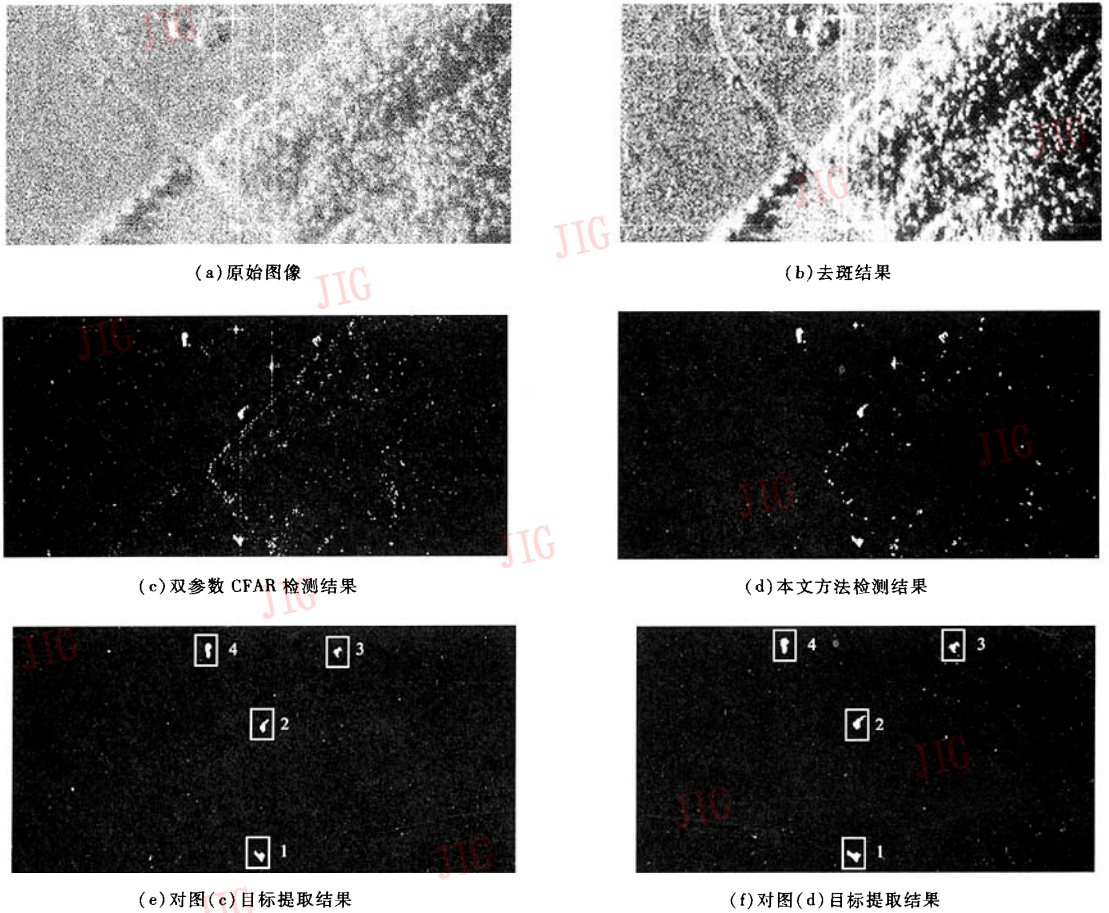


图 4 目标检测结果图

Fig. 4 The result of target detection

双参数 CFAR 从检测到形态学滤除总耗时为 40s, 而本文的方法从检测到形态学滤除需耗时仅为 26s。

对图 4(f) 获得的 4 个目标区, 每个目标区像素

赋予一个标记编号, 然后对每个目标区进行特征提取分析, 结果如表 2 所示, 其中长度和宽度的计算为长度和宽度的像素数和图像像素间隔大小的乘积。

表 2 目标特征参数分析结果

Tab. 2 The result of analysis for target's feature parameters

目标标号 (m)	长度 (m)	宽度 (m)	质心位置	方位角 (°)	分维数	面积	转动惯量	平均亮度
1	6.49	3.31	(1259, 35)	34.00	1.36	181	184 620	204
2	6.27	3.90	(1 266, 304)	115.00	1.51	175	189 875	217
3	6.80	3.02	(1 146, 461)	11.00	1.42	152	158 080	208
4	6.13	3.34	(1 421, 457)	120.00	1.46	196	206 780	211

6 结 论

从 SAR 图像中快速检测和分析地面机动目标

的方法, 在图像预处理的基础上, 利用基于背景分布为指数分布假设的 CFAR 检测算法对目标进行检测, 较大地降低了图像的虚警数, 进而利用形态学的腐蚀、膨胀以及面积阈值消去去除杂波虚警, 获得感

兴趣的目标区,对不同的目标区进行标记编号后进行特征提取分析,最终形成了对整幅场景图像的信息输出。实验结果证明,该方法快速有效,而且检测和分析目标的方法具有一定的通用性,不仅可以用于机动目标的检测和分析,而且还可以用于其他目标的检测和分析。

参考文献 (References)

- 1 Dudgeon D E, Lacoss R T. An overview of automatic target recognition[J]. Lincoln Laboratory Journal, 1993, 6(1): 3~10.
- 2 Bhanu B, Dudgeon D E, Zelnio E G, *et al.* Introduction to the special issue on automatic target detection and recognition[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(1): 1~6.
- 3 Novak L M, Halversen S D, Owirka G J, *et al.* Effect of polarization and resolution on SAR ATR[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(1): 102~115.
- 4 Ross T D, Bradley J, Anderson J C, *et al.* SAR ATR: so what's the problem? An MSTAR perspective[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3721: 662~672.
- 5 Shaw G A, Anderson A H, Anderson J C. RASSP-5, RASSP Benchmark 4 Technical Description [R]. ESC-TR-96-118, Lexington, Massachusetts, USA; MIT Lincoln Laboratory, 1998.
- 6 Wang By-her. An Automatic Target Recognition System For SAR Imagery[D]. Stanford CA, USA: Stanford University, 1997.
- 7 Xu R, Kwan C M, Haynes L S. Target isolation for SAR images[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4382: 191~194.
- 8 Oliver Chris, Quegan Shaun. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. London, UK: Artech House, 1998:127~129.
- 9 Zhang Yu-jing. Image processing and analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 1999: 30~35. [章毓晋. 图像处理与分析[M]. 北京:清华大学出版社,1999:30~35.]