

# 高分辨率 SAR 图像地物分类算法研究

付 琨,匡纲要,郁文贤

(国防科技大学电子科学与工程学院一系,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 本文给出了一种关于高分辨率、单极化 Synthetic Aperture Radar (SAR) 图像目标分类的完整算法。首先,利用基于改进的相关邻域模型的 Radar Cross-Section (RCS) 重构算法进行目标和阴影检测,通过非线性积累把图像分割为“阴影区”、“背景区”和“目标区”;接着通过形态学算子进行地貌滤波和边缘提取,应用改进的 Hough 变换和细线化措施进行线段的连接和编组;最后利用空间联合位置模型进行目标的分类。

**关键词:** SAR; RCS 重构; 目标检测; 分割; 地物分类

**中图分类号:** TN957.52 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 12A-1820-04

## An Algorithm of Extended Terrain Classification in High Resolution SAR Images

FU Kun, KUANG Gang-yao, YU Wen-xian

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

**Abstract:** A target classification algorithm in high resolution and single polarimetric SAR image is presented in this paper. Firstly, a new RCS reconstruction filter based on the modified correlated neighborhood model is used for target and shadow detection. By nonlinear iterated process, the whole image can be classified to “background”, “shadow” and “targets”. Secondly, a series of morphological operators are used to terrain filtering and edge extraction, and then through modified Hough Transform technology and the measure of slimming lines, line structures of man-made clutters in “target” class are linked and grouped. Finally, with special association model, the targets we are interested in are classified.

**Key words:** SAR; RCS reconstruction; target detection; segment; extended terrain classification

### 1 引言

在 SAR 图像解译领域,典型的图像分类算法是把图像分割成 Ocean、Park、Urban 等三类区域,即所谓 ATC (Auto Terrain Classification)。然而在具体分类应用中,经常需要把图像中的 ROI (Region of Interest) 进一步分割成预先定义的一些子类。例如,把 Park 类分成人造杂波(强散射体)、背景(植被、平地等)、自然杂波(树木、树林等),在此基础上根据具体目标进行图像分析和图像理解。

马里兰大学的 S. Kutikkad 和 R. Chellappa<sup>[1]</sup>等充分利用多通道全极化的 SAR 图像所提供的信息在 SAR 图像地物分类方面做了大量工作, Ying Wang 和 Qinfen Zhang<sup>[2]</sup>则利用全极化数据进行单类目标的识别(公路和桥梁识别),已经被 MIT Lincoln 实验室投入应用。但是,对单极化的 SAR 图像分类研究则很少。本文基于 RCS 重构和空间联合位置模型,给出了一个关于高分辨率、单极化 SAR 图像地物分类的完整算法。对图像中的树木(自然杂波类)、公路和建筑物(线性结构类)有良好的分类率。

文章首先利用改进的相关邻域模型的 RCS 重构算法进

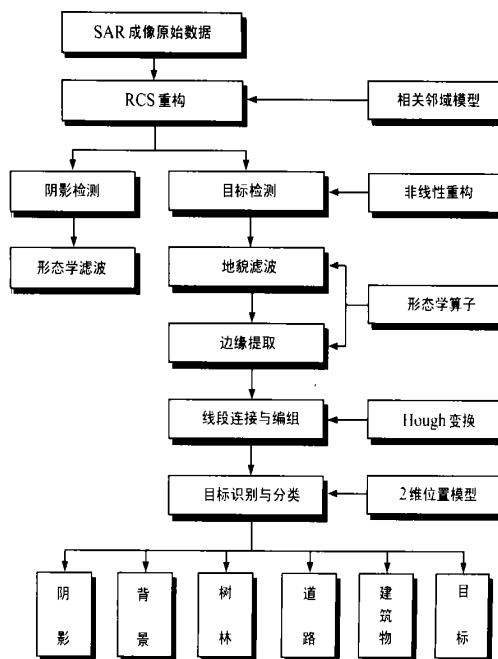


图 1 算法流程图

行目标和阴影检测,把图像分割为“阴影区”、“背景区”和“目标区”,事实上“目标区”就是所谓的 ROI;接着通过形态学算子进行地貌滤波和边缘提取,应用改进的 Hough 变换进行线段的连接和编组;然后利用空间联合位置模型进行目标分类,最后给出了实验结果和算法性能评估.算法流程图如图 1 所示.

## 2 利用 RCS 重构进行目标和阴影检测

对 SAR 图像进行目标检测,根据现有资料,所采用的方法几乎都是首先进行图像去斑,然后利用各种改进的 CFAR 算法进行目标检测,例如双参数的 CFAR、非高斯分布的 CFAR、多参数的 CFAR、利用白化滤波器、BCS/ FCS<sup>[3~6]</sup>来提高检测效果等.对于高分辨率 SAR 图像,效果较好的 CFAR 检测器主要有利用 Weibull 分布和 K 分布的 OS (Order Statistic) CFAR 检测器<sup>[7]</sup>.

但是,CFAR 检测主要是用来检测后向散射系数强烈的人工目标(如建筑物、金属物、车辆等),而对图像中的阴影和后向散射系数较弱的目标(如机场、公路等)则无能为力.本算法利用改进的相关邻域模型进行 SAR 图像 RCS 重构,并对重构后的图像进行非线性积累,使得本身属于图像中的暗区的公路、机场的边缘的 RCS 越来越强,不但能够把去斑和目标检测合并成一步,而且几乎可以得到所有感兴趣目标的信息,也就是说,RCS 重构算法加上非线性积累实际上构成了一种 ROI 的提取算法.

### 2.1 利用改进相关邻域模型进行 RCS 重构和阴影检测

利用改进的相关邻域模型来进行 RCS 重构的详细算法见参考文献[8],算法思路如下:

首先检测图像当前像素属于平滑区还是边缘区,不管像素的 RCS 的强弱,只要属于区域内部,都属于平滑区.对平滑区的像素采用去斑能力最强、速度最快的多视平滑进行高效平滑;边缘区的像素采用结构保持的去斑算子<sup>[8]</sup>进行边缘保持.利用多视平滑算子的 RCS 重构结果为,

$$\hat{M}_L = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j \quad (1)$$

其中  $N$  为以当前像素为中心的邻域的大小.

利用结构保持的去斑算子的 RCS 重构结果为

$$\frac{v}{\mu} \text{MCMAP} + (2 - L + 1 - v) \text{MCMAP} - LI_0 - (x_1 + x_2) = 0 \quad (2)$$

其中,  $L$  是 SAR 图像等效视数,  $I_0$  是当前点的像素值,  $\mu$  和  $v$  分别对应大窗(一般取  $7 * 7$  至  $11 * 11$ )的均值和阶参数,下标 MCMAP 指改进的相关最大后验概率,  $m, \bar{T}$  和 分别对应当前像素相关邻域窗的元素数目、均值和阶参数.由式(1)、(2)即可得出 RCS 重构图像,如图 2(a~d).其中,形态学滤波利用的是 Dilate—Erode 算子.

### 2.2 利用非线性积累进行目标检测

由于重构图像中的目标与非目标有分别聚集的趋势,因此,一个直观的想法就是以重构后的图像作为当前图像,再进行多次重构,将会达到目标检测的效果.可是这种思路实现起来有两个问题:(1)由于重构后的图像的当前点的视数  $L$  需要重新计算,并且每个点的视数都可能不同,增大了计算量;

(2)不管算法的结构保持能力有多好,毕竟还是损失了原始图像中的一部分信息,如果完全用重构后的图像接着重构,必然造成与原始图像所带有的环境信息的差异不断增大.为了减小计算量和尽量保持原始图像的环境信息,本算法采用同时利用原始图像和当前图像的非线性积累的办法<sup>[9]</sup>,发现积累结果直接达到了图像目标检测的效果.

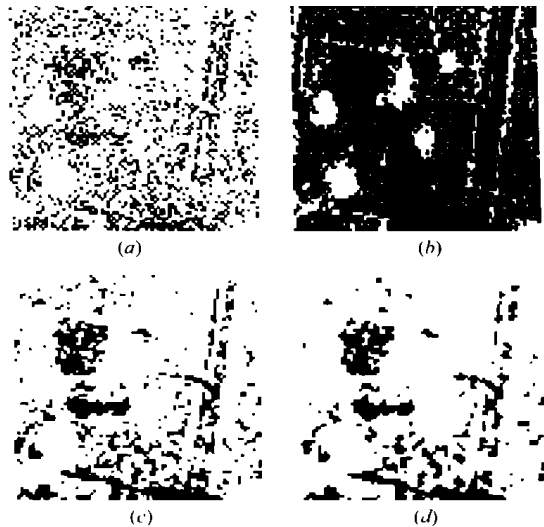


图 2 (a)原始图;(b)去斑图;(c)阴影检测结果;(d)形态学滤波结果

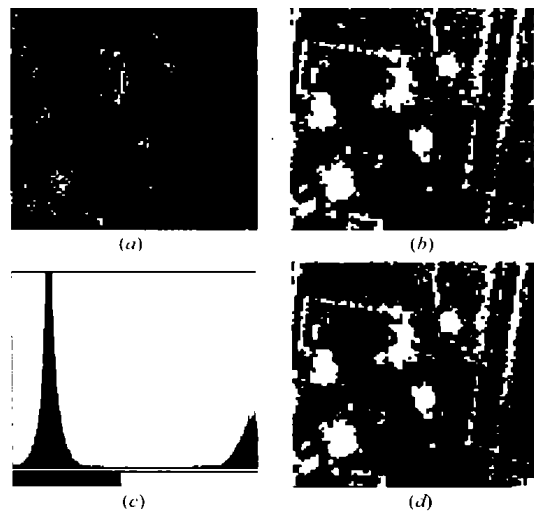


图 3 (a)CFAR 检测;(b)积累重构图;(c)直方图;(d)目标检测结果

如图 3 所示,相对于(a)CFAR 检测来说,(d)非线性积累的检测结果有明显的特点.首先,由于其基础算法是 RCS 重构,因此图像中目标与非目标对比度强,并且轮廓清晰.其次,图像中的目标种类显著增多,具体表现在本来属于散射暗区的一些目标,如公路的边缘,通过积累得到加强,能够出现在目标区.其中,直方图(c)反映了目标与非目标的聚集趋势,因此,目标检测算法可以达到类似自适应的效果.

通过以上的处理过程,图像可以直接通过简单的门限分割算法分割成“阴影区”、“背景区”和“目标区”,并且所有感兴趣

趣的目标都被认为集中在“目标区”(ROI),以下步骤除非特别声明,都是针对“目标区”的二值图。

### 3 利用形态学算子进行图像边缘检测

由于杂波模型和参数估计的限制,RCS 重构算法仍然包括少量的虚警.因此,本算法采用地貌滤波来降低虚警率.地貌滤波是通过一系列的形态学算子来实现的,对目标检测结果的二值图像首先进行一系列的 3 \* 3 的 Dilate—Erode 滤波,消除单点噪声,然后,利用 Majority 和 Bridge 算子对滤波结果进行轮廓修复.最后,利用形态学四连通域算子进行二值图像的边缘(即目标轮廓)提取.图 4(a~b)分别为边缘检测结果。



图 4 (a) 目标检测结果;(b) 边缘检测结果

### 4 利用空间联合位置模型进行目标分类

空间联合位置模型实际上是一个基于专家系统进行目标分类的规则库.模型的元素包括目标的尺寸、形状、纹理和目标的空间联合特性.其中空间联合特性是指图像中目标排列和分布的空间联合相关性.本算法选取了强散射点、暗区和雷达迎面和背面成像的“脊”结构.首先选取经过 RCS 重构的图像作为基图像,检测基图像中的局部相关特性,剔除图像中的背景杂波,然后研究感兴趣目标的尺寸、形状和纹理,最后研究它们之间的空间联合特性,建立合理的目标分类准则.下面根据图 4(b)的结果,分别描述树木类、道路、建筑物的分类算法。

#### 4.1 树木类别判断

首先对边缘检测的结果图 4(b)的二值图进行简单的单连接区域增长算法,对所提取的结果和阴影检测结果图 2(d),然后利用空间联合位置模型进行识别.算法选取的准则包括:区域的尺寸、长宽比、对应阴影区的位置及尺寸和利用阴影计算树木的高度.  $h_M = h_F - [(r_1 + r_2)/2] \cos \theta_M$ ,简单地设散射体为球形(图 5(a)),且  $r_k = (r_2 - r_1)/2$ ,  $h_M$  为雷达高度,  $r_1$ 、 $r_2$  分别为目标前后径的斜距。

图 6(a~d)为树木类别判断的结果。

#### 4.2 道路与建筑物判断

道路和建筑物在图像中都属于线性结构.在无遮挡的情况下,道路表现为平行四边形,并且边缘较弱,需要对 RCS 重构后的图像进行非线性积累,才能得到道路类的边缘;当 SAR 的方位向与建筑物有夹角时,建筑物则表现为面向雷达方向的“L”形,且为强边缘。

根据具体需求,本算法利用改进的 Hough 变换,具体采用动态合并<sup>[10]</sup>和双重 Hough 变换相结合的方法专门针对剔除

树木类目标后的二值图进行线段的连接和编组,算法速度相当快,提线的效率也比较高.对线段连接和编组后的二值图进行细化化处理,再结合阴影图,利用空间联合位置模型进行道路类和建筑物类的判别.道路类的判别准则包括两条平行线的长度、它们之间的距离和线段之间的阴影;建筑物类的判别准则包括强“L”形线段、阴影和目标高度值.其中,目标的高度  $h_{obj} = h_F(1 - r_2/r_4)$ ,如图 5(b),  $h_F$  为雷达高度,  $r_2$  为目标点的斜距,  $r_4$  为目标阴影顶点的斜距。

图 7(a~c)为判别结果。

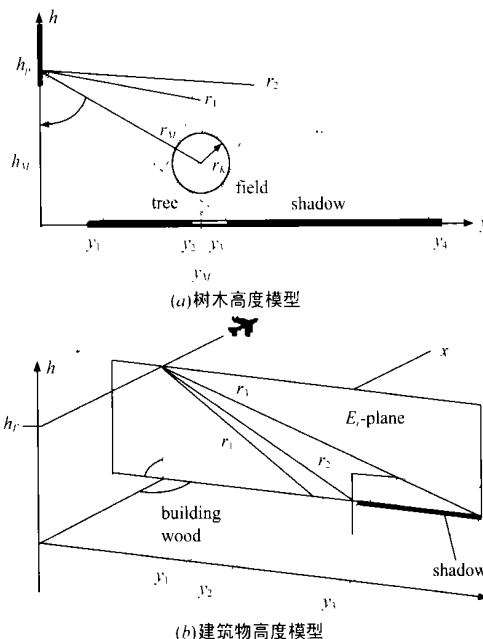


图 5 (a) 树木高度模型;(b) 建筑物高度模型

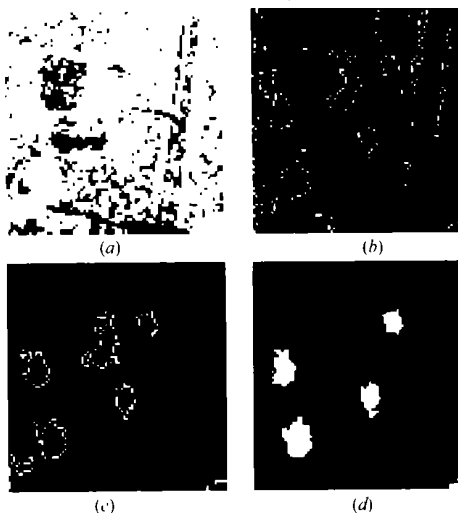


图 6 (a) 阴影检测结果;(b) 边缘检测结果;(c) 区域提取结果;(d) 树木类别判断

#### 4.3 其他目标

剔除道路类和建筑物类目标之后,剩下含有很强虚警的强散射人造目标.本算法通过空间联合位置模型,利用以上判断出的目标类、阴影图来减少虚警。

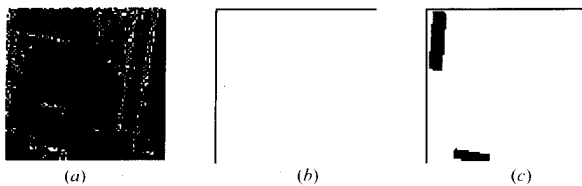


图 7 (a) 剔除区域后的二值图; (b) 道路类别判断; (c) 建筑物类别判断

## 5 实验结果与结论

图 8(a~d) 为整个算法的结果. 实验数据为 MSTAR 中 RedStone 的实测杂波图, X 波段、hh 极化, 分辨率为  $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$ .

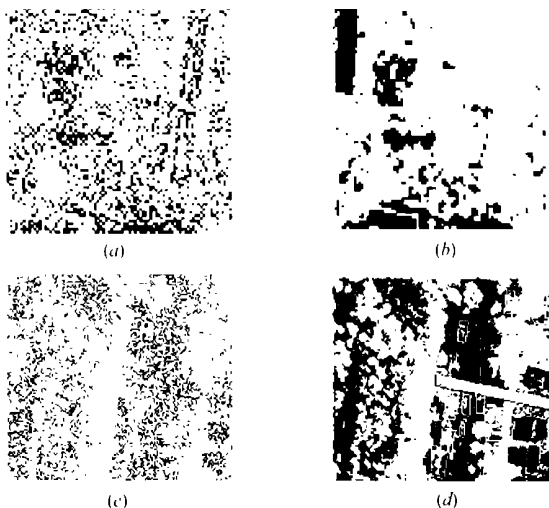
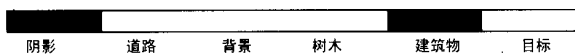


图 8 (a) 原始图(512 \* 512); (b) 判别结果(512 \* 512); (c) 原始图(1847 \* 1784); (d) 判别结果(1847 \* 1784)



大部分基于遥感图像的分割和识别算法用于 SAR 图像, 效果都不是很好<sup>[11]</sup>. 本文充分结合 SAR 成像的特点, 给出了一个地物分类算法, 可较好地用于高分辨率单极化的 SAR 图像解译系统的实践中. 总的来说, 本文算法的主要特点为:

(1) 通常在 SAR 图像解译中, RCS 重构一般用于 SAR 图像的去斑, CFAR 检测用于强散射点检测, 把 RCS 重构、非线性积累和形态学算子相结合, 直接进行图像中目标和阴影检测, 不但可以利用的信息量增多, 而且使得图像中潜在目标的结构保持得很好.

(2) 对线段的连接和编组的算法, 如何既能连接到长线(道路类目标), 又不影响短线(建筑物类目标), 同时能很好的消除线段之间的误连接相当困难, 本算法中针对二值图像的改进的 Hough 变换, 不但性能稳定, 而且算法速度快, 特别是对于“共线不交叠”的情况处理灵活, 能较好的达到应用要求.

(3) 由于 SAR 成像与人眼视觉系统之间的差距, 需要专业的 SAR 图像的判读知识, 才能获取先验知识. 本算法利用基于专家系统的空间联合位置模型, 充分考虑到 SAR 图像中阴影、目标之间的关系以及目标的轮廓和位置信息, 对 ROI

中的目标进行类别粗判, 能较好地为后面的目标识别过程提供目标切片.

但是, 算法也存在一些需要进一步研究的地方, 如 RCS 重构仅对高分辨率 SAR 图像效果比较好, 造成整个算法的适应性不是很强, 自然目标(如树冠)与人造目标之间的误分类还比较高, 这些问题都需要做更细致更深入的工作.

## 参考文献:

- [1] S kuttikkad, R Chellappa. Building Wide-area 2D Site Models from Single and Multipass Single Polarization SAR Data [A]. Proc. SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery III [C], Orlando, FL, 1996:34 - 44.
- [2] Ying Wang, Qinfen Zhang. Recognition of roads and bridges in SAR image [J]. Pattern Recognition, 1998, 31(7):953 - 962.
- [3] G B Goldstein. False alarm regulation in log normal and Weibull clutter [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973, 9(1):84 - 92.
- [4] A M Waxman, et al. Neural processing of SAR image imagery for enhanced target detection [A]. Proc. SPIE on Algorithms for Synthetic Aperture Radar Imagery II [C], Europto Conf., Taormina, Italy, 1995, 2487:201 - 210.
- [5] L M Novak, M C Burl. Optional speckle reduction in polarimetric SAR imagery [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(1):293 - 305.
- [6] S Grossberg, E Mingollar. Neural dynamics of surface perception: boundary webs, illuminants, and shape from shading [J], CVGIP, 1992, 37(1):116 - 165.
- [7] S kuttikkad, R Chellappa. Non-Gaussian CFAR techniques for target detection in high resolution SAR images [A]. Proc. IEEE Intl. Conf. on Image Processing, November 1994:910 - 914.
- [8] 付琨, 匡纲要, 郁文贤. 基于改进的相关邻域模型的高分辨率 SAR 图像 RCS 重构 [J]. 系统工程与电子技术, 2001, (4):48 - 53.
- [9] 付琨, 匡纲要, 郁文贤. 一种合成孔径雷达图像阴影和目标检测的新方法 [J]. 软件学报, 2001, (6)(增刊).
- [10] D Beir Tzvi, V F Leavers, M B Sandler. A dynamic combinational hough transform [A]. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Image Anal., 1990:152 - 159.
- [11] S kuttikkad, R Chellappa. Statistical modeling and analysis of high-resolution synthetic aperture radar images [J]. Statistics and Computing, 2000, (10):133 - 145.

## 作者简介:

付 琨 男, 1974 年 6 月出生于湖北天门. 博士生, 主要从事 SAR 图像理解、雷达目标自动识别、数字视频等方面的研究工作.

匡纲要 男, 1966 年 7 月出生于湖南衡阳. 博士, 副教授, 主要从事雷达信号处理、SAR 图像判读、多光谱图像目标识别、雷达目标特性分析等领域的研究工作. 在国内外学术刊物上发表 30 余篇学术论文.

郁文贤 男, 1964 年 10 月出生于上海. 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达目标识别、信息融合、神经网络等方面的研究工作. 在国内外学术刊物上发表 50 余篇学术论文.