

## 基于模糊理论的 SAR 图像海上舰船检测方法研究

李长军,胡应添,陈学俭

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系,安徽 合肥 230027)

(mu\_sic@sina.com)

**摘要:**舰船检测是合成孔径雷达图像海洋应用的一个重要部分,针对中分辨率近岸海域 SAR 图像,提出了一种基于模糊理论的海上舰船检测方法。该方法先利用改进的模糊增强算法对图像进行增强处理,以改变图像灰度的分布特性,从而分离图像中海洋区域和陆地区域,并结合最大熵分割法提取海洋背景中包含候选舰船的感兴趣区域,最后,对 ROI 区域进行分割,提取舰船的特征,并基于模糊推理技术实现对海上舰船目标的检测。

**关键词:**SAR;模糊推理;模糊增强;舰船检测

**中图分类号:**TP391.41 **文献标识码:**A

## A method for ship detection in SAR images based on fuzzy theory

LI Chang-jun, HU Ying-tian, CHEN Xue-quan

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230027, China)

**Abstract:** Automatic interpretation of synthetic aperture radar (SAR) images was one of the most important application fields in image processing. Focusing on the medium resolution SAR images and combining with the previous algorithms, a novel technique to detecting ship targets from coastal regions based on fuzzy theory was proposed. In this new method, the input image was first processed with improved fuzzy enhancement algorithm so as to alter the characteristics of the gray-level distribution; then, with the threshold method, the sea and land regions could be separated; following that, the maximum entropic algorithm was employed to further process the image and regions of interest which contained candidate ship targets could be extracted; Then ROIs were segmented and the features of ship targets were extracted. Finally the ship targets could be detected based on fuzzy reasoning technique.

**Key words:** SAR; fuzzy reasoning; fuzzy enhancement; ship detection

## 0 引言

作为一种利用微波进行感知的主动传感器,和光学、红外等传感器相比,SAR 成像不受天气、光照等条件的限制,可对感兴趣目标进行全天候、全天时的侦察。目前,SAR 已成为一种不可或缺的军事侦察手段,可以对海域内舰船及其尾迹成像,获取舰船的位置、形状、航向和航速等信息。

对于 SAR 图像,由于受斑点噪声影响,人们对图像边缘、边界、区域和纹理等定义以及对图像低层处理结果的解释都存在模糊性。而由 Zadeh 提出的模糊集合理论以其模糊逻辑推理方式,为不确定因素造成的系统复杂性和决策过程的分析提供了有效手段,利用模糊集合的概念和逻辑推理方式解决图像处理中的不确定性问题比用普通集合的思维更加合理,现已成功应用于图像处理、模式识别、机器视觉等领域。

为克服传统舰船检测算法的局限性,本文将模糊集合论方法引入 SAR 图像海上舰船检测中来,提出了一种基于模糊理论的海上舰船检测方法。该方法用最大熵分割法<sup>[1]</sup>提取海洋背景中包含候选舰船的感兴趣区域,在对 ROI 区域进行分割的基础上提取舰船的特征,并定义了相应的隶属函数,基于模糊推理技术实现对海上舰船的检测。对 20 多幅 L、C 等波段 SAR 图像进行了试验,其结果表明,该方法能有效、快速、准确地检测出图像中的舰船目标。

## 1 SAR 图像的模糊增强和分割

在模糊特征平面上对图像进行非线性变换,改善 SAR 图像的质量,提高目标和背景的灰度对比度,进而改变图像灰度分布特性,并结合阈值分割算法实现对图像的分割。

### 1.1 文献[2]的模糊增强算法的局限性

文献[2]首次将模糊集理论引入到图像处理中,提出了图像的模糊增强算法。其定义的隶属函数为:

$$\mu_{mpn} = G(X_{mn}) = \left[ 1 + \frac{X_{\max} - X_{mn}}{F_d} \right]^{-F_e}$$

式中, $X_{\max}$  为图像的最大灰度级, $F_d$  和  $F_e$  为倒数和指数型模糊因子。根据隶属函数,将待处理的图像映射成模糊隶属度矩阵。然后,文献[2]又定义了模糊增强函数  $T(\cdot)$ ,在模糊空间中对图像进行增强处理,增强了边缘两侧像素的灰度对比度;最后,利用  $G^{-1}$  变换将增强后的图像由模糊空间变换回数据空间。由于对图像进行了非线性的变换,该算法明显优于传统的图像增强方法,并在医学图像处理中得到了广泛的应用。但该算法仍存在如下的缺陷:

(1) 将图像的模糊矩阵元素定义为像素  $(m, n)$  灰度级  $X_{mn}$  相对于最大灰度级  $X_{\max}$  的隶属度,这样的硬性处理必然使图像中一部分本应增强的灰度级没有被增强,不应增强的灰度级却得到很大增强。

(2)  $T_r$  变换中参数  $\mu_r$  选择为 0.5, 不能满足不同类型图像增强处理的要求, 使用该算法在对不同图像进行模糊增强时, 效果存在较大的差异。

## 1.2 图像模糊增强的改进算法

针对文献[2]算法的不足, 本文提出了一种改进的模糊增强算法。首先, 采用图像处理中的迭代阈值法<sup>[3]</sup>确定阈值参数  $X_T$ , 将图像的直方图分为低灰度部分和高灰度部分。然后, 再根据阈值  $X_T$  来定义隶属函数形式, 因此, 算法是在阈值  $X_T$  两边分别进行模糊增强运算来提高图像质量。在低灰度区域主要进行衰减运算从而使得属于该区域的大部分像素的灰度值更低, 而在高灰度区域则主要是进行增强运算, 从而使得属于该区域的大部分像素的灰度值更高。因此, 经过模糊增强后图像的区域之间层次更加清楚, 便于检测和分离 SAR 图像中的陆地和海洋子场景。

图像模糊增强算法过程如下:

① 根据迭代阈值法确定阈值参数  $X_T$ 。

设图像大小为  $M \times N$ , 共有  $L$  个灰度,  $h_k$  是灰度为  $k$  值的像素个数, 初始值  $X_T^0$  为  $0 \sim L-1$  中的一个任意值。阈值迭代计算公式为:

$$X_T^{i+1} = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\sum_{k=0}^{X_T^i} h_k * k}{\sum_{k=0}^{X_T^i} h_k} + \frac{\sum_{k=X_T^i+1}^{L-1} h_k * k}{\sum_{k=X_T^i+1}^{L-1} h_k} \right\} \quad (1)$$

迭代一直进行到  $X_T^{i+1} = X_T^i$  结束, 取结束时的  $X_T^{i+1}$  为图像的分割阈值  $X_T$ 。

② 定义隶属函数<sup>[4]</sup>:

$$\mu_{mn} = G(X_{mn}) = \begin{cases} \left( \frac{X_{mn}}{X_T} \right)^2 & X_{mn} \leq X_T \\ \left( \frac{X_{\max} - X_{mn}}{X_{\max} - X_T} \right)^2 & X_{mn} > X_T \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $m = 0, 1, 2, \dots, M-1, n = 0, 1, 2, \dots, N-1, X_{\max}$  为图像的最大灰度级。

③ 对图像进行模糊增强处理。模糊增强是对  $\mu_{mn}$  进行非线性变换, 其结果是增大 (当  $\mu_{mn} > \mu_r$ ) 或减少 (当  $\mu_{mn} \leq \mu_r$ )  $\mu_{mn}$  的值。参数  $\mu_r = G(X_T)$ , 选用的增强算子  $T_r(\cdot)$  为:

$\mu_{mn}^{(r)} = T_r(\mu_{mn}) = T_1(T_{r-1}(\mu_{mn})), r = 1, 2, \dots$ , 其中:

$$T_1(\mu_{mn}) = \begin{cases} \frac{\mu_{mn}^2}{\mu_r} & 0 \leq \mu_{mn} \leq \mu_r \\ 1 - \frac{(1 - \mu_{mn})^2}{1 - \mu_r} & \mu_r \leq \mu_{mn} \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

④ 对已增强的模糊特征 ( $\mu_{mn}^{(r)}$ ) 进行  $G^{-1}$  逆变换, 得到模糊增强后的空域图像  $X_{mn}'$ 。其逆变换  $G^{-1}$  规定为:

$$X_{mn}' = \begin{cases} X_T(\mu_{mn}^{(r)})^{1/2} & X_{\max} \leq X_T \\ X_{\max} - (\mu_{mn}^{(r)})^{1/2}(X_{\max} - X_T) & X_{\max} > X_T \end{cases} \quad (4)$$

⑤ 对增强后的空域图像进行平滑处理, 以减少噪声的影响, 这里采用极大极小规则法。即: 在像素点  $(m, n)$  邻域内连续使用  $q$  次“min”运算, 然后再连续使用  $q$  次“max”运算来达到平滑图像的目的。平滑后像素点  $(m, n)$  灰度值为:  $X_{mn}'' = \max_{Q_1}^q \min_{Q_1}^q \{X_{ij}'\}$ , 其中,  $(i, j) \neq (m, n), (i, j) \in Q_1, q = 1, 2, \dots$ 。

## 1.3 SAR 图像海洋区域和陆地区域的检测和分割

在舰船检测算法中, 海洋、陆地区域检测和分割是极其重要的一步, 通过海陆分割可以使后续检测限定在可能出现舰

船目标的海洋区域进行, 简化检测模型, 降低检测的复杂度, 提高检测效率。

经过增强的 SAR 图像, 陆地区域的灰度值明显高于海洋区域的灰度值, 图像的直方图呈双峰特性。为了获取最佳分割阈值, 应先平滑图像的灰度直方图, 而后, 根据灰度直方图的双峰特性, 取其谷底为分割阈值, 或通过直方图变换方法<sup>[5]</sup>, 获得最优分割阈值。则图像中各灰度级的像素基于阈值分成两个集合, 令:  $A = \{(x, y) | h(x, y) - HighGray\}, B = \{(x, y) | h(x, y) = LowGray\}$ , 分别对应为可能的陆地区域像素集、可能的海洋区域像素集。

舰船是由金属制造的, 与海面构成角反射器, 舰船表面的突出物也易构成角反射器, 在 SAR 图像上, 舰船以高亮度的斑点特征形式出现。因而, 在进行海陆分割的时候, 往往会将舰船归属为陆地像素集。但是, 根据后续检测的需要, 应消除这些“虚假”的“陆地”像素, 并将它们归为海洋像素集。为此, 先获取二值图像  $h(x, y)$  上属于“陆地”像素的各个独立连通区域, 并统计区域内像素数目, 结合先验知识, 设定相应的“像素数目阈值”, 只有大于阈值的区域才真正属于“陆地”区域。

此外, 经过阈值分割, 整体连通的陆地区域内部还包含许多冗余小空洞, 这影响后续的检测。通过对图像  $h(x, y)$  中  $A$  集进行区域生长处理, 可以消除陆地内部的小空洞。从而完成 SAR 图像海洋区域和陆地区域的检测及分割。

## 2 基于模糊推理的舰船检测算法

由于舰船目标在 SAR 图像中呈现高亮度点目标, 因此, 一般是利用恒虚警 (CFAR) 算法<sup>[6]</sup> 或 p-tile 算法<sup>[7]</sup> 选择分割阈值, 将高于灰度阈值的物体判为舰船目标, 从而实现舰船检测。但由于受噪声、防波堤等虚假目标的影响, 利用此方法往往将这些虚假目标判定为舰船。基于此, 本文改进了已有的检测模型, 提出了一种基于模糊推理技术的舰船检测算法。该算法先构造恰当的隶属函数, 在模糊集合中描述舰船属性, 并结合模糊推理实现对舰船的检测, 试验结果表明, 该算法能降低虚警率。

### 2.1 图像的模糊特征平面

定义 给定的论域  $\Omega$ , 对于任意的  $x \in \Omega$  都指定了隶属函数  $\mu_X(x)$  的一个值, 将序偶集:  $X = (\mu_X(x) | x), \forall x \in \Omega, \mu_X(x) \in [0, 1]$ , 定义为论域  $\Omega$  上的一个模糊子集。

按照模糊子集的概念, 一幅  $M \times N$  维且具有  $L$  个灰度级的图像  $X$ , 可以看作作为一个模糊集合, 记为:  $X = \bigcup_m \bigcup_n \frac{p_{mn}}{x_{mn}}$ , 其中,  $m = 1, 2, \dots, M, n = 1, 2, \dots, N$ 。

这里,  $\frac{p_{mn}}{x_{mn}}$  表示集合中第  $(m, n)$  个模糊单点集的隶属函数为  $p_{mn}$ , 或图像第  $(m, n)$  个像素具有某种特征的程度为  $p_{mn}$  ( $0 \leq p_{mn} \leq 1$ )。该模糊集即为图像模糊特征平面。

### 2.2 包含候选舰船目标的感兴趣区域 (ROI) 提取与分割

在已分离出陆地区域的 SAR 图像海洋子场景中, 舰船的灰度值较高, 所以, 选用合适的阈值, 可以检测出所有的候选舰船目标。这里选用最大熵分割法获取全局阈值, 实现对 SAR 图像的分割, 并结合数学形态学中的开、闭运算滤波器来消除虚假的舰船目标像素。从而, 得到所有候选舰船目标的像素集合。

根据分割结果, 获取各个候选目标的位置信息, 即可在原始 SAR 图像上提取包含候选舰船目标的感兴趣区域。

对获取的包含候选舰船目标的感兴趣区域进行高斯平滑

处理,并根据 SAR 图像中舰船的特点,采用基于视觉非线性的图像分割新算法<sup>[8]</sup>实现对 ROI 的分割,以利于后续的特征提取处理。

### 2.3 基于模糊推理的舰船检测算法

为能在图像的模糊特征平面定量描述目标,需要提取舰船特征,并确定隶属函数的形式。这里选用 3 个具有位移和旋转不变性的特征,即:舰船面积、舰船的灰度均值和舰船的主轴长度。

根据 SAR 图像的成像特点以及舰船在图像中所呈现的特性,定义隶属函数的形式如下:

$$\mu_x(x) = [1 + (d_x/F_d)^{F_e}]^{-1} \quad (5)$$

式中,  $F_e$  和  $F_d$  分别称为指数型和倒指数型模糊因子, (试验中,  $F_d = 33.73$ ,  $F_e = 2.64$ ),  $d_x$  为特征空间  $\Omega$  中的距离参数,定义如下:

$$d_x = \min_{1 \leq i \leq n_i} \left\{ \min_{1 \leq l \leq h_i} \|x - R_n^{(i,l)}\| \right\} = \min_{1 \leq i \leq n_i} \left\{ \min_{1 \leq l \leq h_i} \left[ \sum_{n=1}^N [W_n^{(i)}(x_n - R_n^{(i,l)})]^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (6)$$

其中,  $n_i$  是 SAR 图像中舰船类别总数,  $h_i$  为第  $i$  子类中舰船原型(经测试后专家所选定的舰船模板)的数目,  $N$  为所选取的特征数目,  $R_n^{(i,l)} \in \Omega$ , 代表在第  $i$  子类中,第  $l$  个舰船原型的特征向量,  $W_n^{(i)}$  是第  $i$  子类的加权值 ( $|W_n^{(i)}| \leq 1$ )。

权值  $W_n^{(i)}$  定义为:  $W_n^{(i)} = \rho_n / \sigma_n^{(i)}$ , 其中,  $\sigma_n^{(i)}$  是第  $i$  子类中,第  $n$  个特征的标准差,  $\rho_n$  是第  $n$  个特征的重要性指数。

对于舰船类别,可以依据面积进行简单的划分,在试验中,依据面积(Area)大小,将舰船分为 3 类,即:类别 A ( $Area \leq 90$ pixels), 类别 B ( $90 < Area \leq 200$ pixels), 类别 C ( $Area > 200$ pixels)。

在确定隶属函数后,即可计算感兴趣图像上候选舰船的隶属度。只有隶属度接近于舰船原型的候选目标方可判定为真正的目标,否则,就判为虚警目标。

## 3 试验结果及分析

在 VC++ 环境下实现本文算法,实验所用微机 CPU 为 PIII933,内存为 256 M。实验数据选用某地区的 24 幅

1200 × 1100 像素的 RADARSAT 图像,空间分辨率为 6m ~ 12.5m。人工目视确认的舰船目标共 400 个,检测出 392 个正确目标,检测率为 98%,虚警率为 1%,检测时间在 8s 之内。舰船检测方法的仿真结果如图 1 所示。

图 1(a)是原始 SAR 图像,分辨率为 6.25m;图 1(b)是经过模糊增强处理后的结果图像(参数  $\mu_r = 0.99$ ),可见,陆地区域和海洋区域的灰度差别较大,易于进行分割;图 1(c)是经过直方图阈值分割,并消除了虚假陆地像素的结果图像;最后,基于模糊推理技术完成舰船检测,共检测出 9 个舰船目标,参见图 1(d),剔除了两个虚假的目标(见图 1(d)右上角圆圈内的目标),试验中,舰船面积、区域灰度均值和舰船主轴长度的  $\rho_n$  数值分别为:10,6,5。其中,目标 5,7,8,9 属于类别 A,目标 1,3,4 属于类别 B,目标 2,6 属于类别 C。图 1(e)是 CFAR 算法舰船检测结果图像。本文算法与 CFAR 算法检测结果比较参见表 1,其中检测率  $P_d$  和品质因素  $FoM$  是衡量检测效果的两个重要指标。检测率( $P_d$ ) = 检测目标数/实际目标数 × 100%,  $FoM$  = 检测目标数/(实际目标数 + 虚警目标数),两者越趋近于 1,检测效果愈好。由表 1 可知,CFAR 算法检测的结果出现了虚警目标,同时,算法计算量,检测时间也比本文算法长。

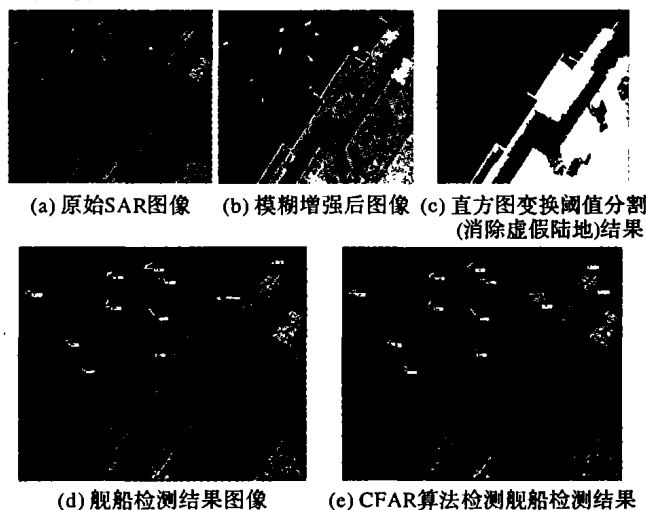


图 1 海上舰船检测结果

表 1 本文算法与 CFAR 算法舰船检测结果比较

舰船检测方法	实际目标数	检测目标数	虚警目标数	检测率(%)	品质因素(FoM)	陆地检测时间	舰船检测时间
本文算法	9	9	0	100%	1.0	2s	1.5s
CFAR 算法	9	9	3	100%	0.75	4s	2.5s

## 4 结语

针对 SAR 图像所具有的模糊性,引入灰度图像的模糊数学描述,提出了基于模糊理论的图像海上舰船检测方法。在分析文献[2]算法局限性的基础上,提出了一种改进的图像模糊增强算法,在模糊特征平面上对图像进行非线性变换,改变图像的灰度分布;在提取包含候选舰船目标的感兴趣区域的前提下,根据舰船特征,构造了恰当的隶属函数,并基于模糊推理技术实现对舰船的检测,有效的剔除了虚假目标。对 RADARSAT 图像进行了试验,其结果表明本方法能快速、准确的检测出图像中的舰船目标。对于复杂海况下的舰船检测将是今后研究的重点。

### 参考文献:

[1] KAPUR, SAHOO, WONG. A New Method of Gray-level Picture Thresholding Using the Entropy of the Histogram[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 29(2): 273 - 285.

[2] PAL SK, KING RA. On Edge Detection of X-ray Images Using Fuzzy Sets[J]. IEEE Transactions Patt Anal and Machine Intell, 1983, 5(1): 69 - 77.

[3] RIDLER TW, CALVARD S. Picture Thresholding Using an Iterative Selection method[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1978, 8(8): 630 - 632.

[4] 周德龙, 潘泉, 张洪才. 图像模糊边缘检测的改进算法[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(4): 354 - 358.

[5] WESZKA JS, ROSENFELD A. Histogram modification for threshold selection[J]. IEEE Transactions Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 38 - 72.

[6] WACKERMAN C, FRIEDMAN K, PICHEL W. Automatic Ship Detection in RADARSAT SAR Imagery[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27(5): 371 - 378.

[7] REY MT, DROSOPOULOUS T, PETROVIC D. A Search Procedure for Ship RADARSAT Imagery[J]. DREO Report 1996, No. 1305.

[8] 张天序, 彭嘉雄. 基于视觉非线性的图像分割新算法[J]. 计算机学报, 1993, 16(4): 248 - 256.