

SAR 图像人造目标检测研究

曹兰英^{***} 夏良正^{**}

*(中国雷华电子技术研究所 无锡 214063)

** (东南大学自动控制系 南京 210096)

摘要: 在合成孔径雷达(SAR)自动目标识别中,人造目标的检测至关重要。该文根据 SAR 图像的特点,对图像中的人造目标进行了检测。首先采用自适应小波滤波方法对图像进行滤波,在保留图像细节的前提下有效地去除了图像中的乘性噪声,使后续的检测变得相对容易。然后采用基于自适应遗传算法的 C-划分二维模糊熵算法对图像进行分割。实验结果表明,该文方法能够有效地检测出图像中的人造目标。

关键词: 合成孔径雷达,小波滤波,模糊熵分割,遗传算法

中图分类号: TN958, TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)12-1872-04

Man-Made Target Detection of SAR Images

Cao Lan-ying^{***} Xia Liang-zheng^{**}

*(Chinese Leihua Electrical Technical Research Institute, Wuxi 214063, China)

** (Department of Automatic Control Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract In the process of SAR (Synthetic Aperture Radar) ATR (Automatic Target Recognition), man-made target detection is very important. In this paper, analyzing the characteristics of SAR images, a new method is proposed to detect man-made targets in SAR images. Firstly, the image is smoothed with the adaptive wavelet filter; the multiple speckles are removed while the edge property of SAR images is sustained. It made the detection easier. Then, the images is segmented with the 2-D C-partition fuzzy entropy method based on adaptive genetic algorithm. Test results show that the algorithm can detect man-made targets effectively.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Wavelet filter, Fuzzy entropy, Genetic algorithm

1 引言

合成孔径雷达具有全天候、全天时、对云层和地表的穿透力强等特点,是现代化电子侦察机的重要装备,在军事上获得了广泛的应用。为了对地面人造目标进行正确的识别,首先必须从图像中将其检测出来,检测结果的好坏直接关系到对目标的识别性能。

合成孔径雷达的成像原理决定了在图像中不可避免地存在相干斑噪声,它是由一个分辨单元内众多反射体对地反射波叠加而成的。这些噪声的存在使目标检测变得相当困难。常用的仅仅依靠灰度特征的分割方法并不能很好地检测人造目标,因而必须有效地利用别的信息。本文提出了一种 SAR 图像目标检测方法,首先对 SAR 图像进行滤波,在有效去除图像中斑点噪声的基础上再综合利用图像的点灰度

和区域灰度信息对目标进行检测。实验结果表明,该方法取得了很好的检测结果。

2 图像滤波

国内外许多学者对 SAR 图像去噪进行了大量的研究,根据噪声模型提出了多种去噪方法。有的是利用图像局域统计特性的去噪,比较典型的有 Lee 滤波^[1], Frost 滤波, Kuan 滤波等,这些方法都是假设图像噪声模型是乘性的。有的是对图像直接滤波,如通用小波阈值滤波^[2]等,该方法可根据 SAR 图像斑点噪声的特殊性,选取合适的门限在小波域内对小波系数进行调整,从而达到去噪的目的。但这两种方法都有一定的局限性,第 1 种方法必须充分了解图像的统计特性,第 2 种方法只有一个阈值,并不适用于高度非平稳的 SAR

图像。

SAR 图像滤波要求既能够有效地消除图像中的相干斑噪声, 同时又能够尽量保持图像的边缘细节。而在实际滤波过程中, 往往很难在这两方面都能取得很好的结果, 只能在这两者之间进行折衷。因此, 本文对通用小波滤波进行了改进, 考虑在调整小波系数时, 分析噪声在小波变换域中的分布和统计特性, 利用贝叶斯估计来找出真实信号的小波系数。同时结合图像的局域统计特性, 针对不同的区域对小波系数进行了相应的调整, 得到了优于经典的局域滤波方法和通用小波阈值滤波方法的滤波性能。

先用高斯混合模型对 SAR 图像的小波系数进行精确拟合, 再用贝叶斯估计来恢复原图。当服从 Gamma 分布的乘性噪声模型取对数后, 为加性噪声, 噪声分布近似为高斯分布^[3]。对于加性噪声模型 $y = x + n$, 小波变换后的信号仍为两部分组成, $Y = X + N$ 。其中, Y 代表输入图像的小波系数, X 代表真实图像的小波系数, N 为噪声的小波系数。

根据贝叶斯估计, X 的估计值为

$$\hat{X} = \frac{\int X P_N(Y|X) P_X(X) dX}{\int P_N(Y|X) P_X(X) dX} \quad (1)$$

式中 P_N 是噪声小波系数的概率密度函数, P_X 是图像小波系数的先验概率密度函数。

根据最小均方差估计, X 的估计值为

$$\hat{X}_i = \sum_{k=1}^m p(s_i = k | Y_i) \frac{\sigma_{sk}^2}{\sigma_{sk}^2 + \sigma_n^2} Y_i \quad (2)$$

式中 σ_{sk}^2 为高斯分布的方差, σ_n^2 为噪声方差, m 为混合高斯模型的高斯分布的个数。

为了达到自适应的效果, 该滤波器按图像非平稳性强弱进行了分段处理。在平稳区域, 用均值来代替所有像素点; 在非均匀区域, 保留当前像素值; 在纹理区域, 采用上述的小波滤波器。

3 目标检测

由于 SAR 图像不同于一般光学图像, 常见的图像分割方法如最大熵方法、OTSU 法的效果并不好。雷达目标检测中常用的恒虚警方法(Constant False Alarm Ratio, CFAR)方法^[4]又需要确切知道图像的分布特性, 而 SAR 图像的统计特性很难分析, 因而, 该方法对 SAR 图像具有很大的局限性。

本文根据 SAR 图像的特点, 改进了 C-划分二维最大模糊熵方法^[5], 综合利用了图像的点灰度和区域灰度特征, 将其应用于 SAR 图像中的人造目标检测。为了在搜索空间内搜索到全局最优阈值和降低计算量, 采用了自适应遗传算法。

假设图像由目标 O 和背景 B 组成, 目标 O 的隶属函数

为 $\mu_o(i, j; a, b, c, d)$, 背景 B 的隶属函数为 $\mu_b(i, j; a, b, c, d)$, 它们分别表示灰度 (i, j) 对目标 O 、背景 B 的隶属程度。其中, (i, j) 为独立的自由变量, $i, j = 0, 1, \dots, L-1$, L 为图像的灰度等级; 参数 (a, b, c, d) 控制隶属函数的形状, $a < b$, $c < d$ 。目标和背景的二维隶属度函数分别为

$$\begin{aligned} \mu_o(i, j; a, b, c, d) \\ = \mu_{ox}(i; a, b) \mu_{oy}(j; c, d) + \mu_{ox}(i; a, b) \mu_{by}(j; c, d) \\ + \mu_{bx}(i; a, b) \mu_{oy}(j; c, d) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\mu_b(i, j; a, b, c, d) = \mu_{bx}(i; a, b) \mu_{by}(j; c, d) \quad (4)$$

其中 $\mu_{ox}(i; a, b)$, $\mu_{oy}(j; c, d)$, $\mu_{bx}(i; a, b)$, $\mu_{by}(j; c, d)$ 分别为目标和背景的一维隶属度函数, 以 $\mu_{ox}(i; a, b)$ 为例:

$$\mu_{ox}(i; a, b) = \begin{cases} 0, & 0 \leq i \leq a \\ 2\beta \left| \frac{i-a}{b-a} \right|^2, & a < i \leq T \\ 1 - 2\beta \left| \frac{i-b}{b-a} \right|^2, & T < i \leq b \\ 1, & b < i \leq L-1 \end{cases} \quad (5)$$

其中 β 为调整系数, T 为阈值, L 为图像的灰度等级。

假设 $P = \{O, B\}$ 是对样本空间的一种二维模糊划分, 其模糊划分熵为

$$H(P) = H(Q|O) + H(Q|B) \quad (6)$$

其中 $H(Q|O)$ 为给定 O 时自然模糊划分 Q 的条件熵:

$$H(Q|O) = \sum \sum \frac{p(Q_{ij}O)}{p(O)} \left(1 - \log \frac{p(Q_{ij}O)}{p(O)} \right) \quad (7)$$

$$p(O) = \sum \sum \mu_o(i, j; a, b, c, d) p_{ij}$$

$H(Q|B)$ 为给定 B 时自然模糊划分 Q 的条件熵:

$$H(Q|B) = \sum \sum \frac{p(Q_{ij}B)}{p(B)} \left(1 - \log \frac{p(Q_{ij}B)}{p(B)} \right) \quad (8)$$

$$p(B) = \sum \sum \mu_b(i, j; a, b, c, d) p_{ij}$$

式中 $i, j = 0, 1, \dots, L-1$, $Q = \{Q_{00}, Q_{01}, \dots, Q_{(L-1)(L-1)}\}$ 是对样本空间的自然模糊划分。

本算法的目的是寻找最大信息熵的模糊划分, 即在参数空间 $G \times G \times G \times G$ 上搜索使目标函数式(6)取最大值的参数, 如式(9)所示。

$$\hat{x} = \arg \max_{x=\{a,b,c,d\}} (H(p)) \quad (9)$$

通过对一幅 SAR 图像的模糊熵分析可知, 在参数空间 $G \times G \times G \times G$ 上有许多极大值点, 如图 1 示。图中, 为了简化计算, 只画出了两维空间的模糊熵。图 1(a)为将图像量化为 32 灰度等级的模糊熵; 图 1(b)为原图 256 灰度等级的模糊熵。

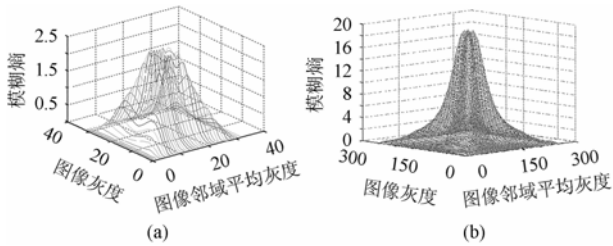


图1 二维模糊熵图

我们处理的 SAR 图像为 256 灰度等级, 因此需要在 $256 \times 256 \times 256 \times 256$ 空间内搜索, 寻找最优参数 (a, b, c, d) 。对于这种极大值点多、搜索空间大的复杂优化问题, 采用常用的寻优方法很难解决问题。人们从仿生学的机理受到启发, 提出了许多优化方法, 如遗传算法、进化策略、模拟退火、蚁群算法等。本文采用了自适应遗传算法进行全局寻优, 取得了很好的实验结果。

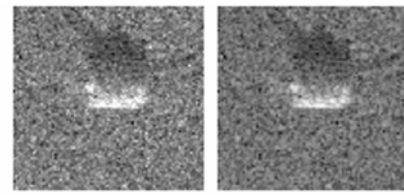
遗传算法则是一种借鉴生物界自然选择和自然遗传机制的高度并行、随机、自适应的搜索算法, 它的基本思想是对待寻优的参数 (a, b, c, d) 进行编码, 再模拟由这些二进制代码组成的群体的进化过程, 对这个群体进行选择、交叉和变异, 自适应地控制搜索过程, 通过寻找群体进化过程中的最优个体, 得到所要的最优参数。它可以有效利用整个搜索空间的信息, 具有较强的鲁棒性, 并且使所得参数具有全局最优的性能。

4 实验结果

本文对 MSTAR 中的一幅坦克图像进行了滤波和检测, 将各个染色体编码为 8 位二进制码, 种群数为 10, 最大繁殖数为 100, 交叉概率初始值取 0.6, 变异概率初始值取 0.1, 结果见图 2。其中, 图 2(a)为原始图像, 图 2(b)为滤波后图像, 图 2(c)为恒虚警方法对图像的检测结果, 图 2(d)为天津分割方法(OTSU)对图像的检测结果, 图 2(e)为本文方法对图像的检测结果。

直观上看, 图 2(b)的斑点噪声明显少于图 2(a)。由于等效视数反映了图像的信噪比, 等效视数越大, 图像的信噪比越高。通过计算, 图 2(a)和图 2(b)的等效视数分别为 3.8 和 4.1, 说明图 2(b)的信噪比高于图 2(a)的信噪比。该滤波方法将图像局域统计特性与小波去噪相结合, 对图像进行自适应去噪。在有效去除斑点噪声的同时保留了目标的细节信息, 为后续的目标检测奠定了良好的基础。

图 2(e)的检测结果明显优于图 2(c)和图 2(d)。这主要是由于以下几个原因: 首先采用了二维直方图。由于目标在图像中占的比例很小, 并且有斑点噪声的影响, 使得 SAR 图像的灰度直方图并不呈现明显的峰和谷, 因此仅用灰度直方图得到的一维最大熵阈值并不能得到满意的分割结果, 往往



(a) 原图

(b) 滤波图



(c) CFAR检测

(d) OTSU检测

(e) 本文方法

图2 实验结果

还会产生严重的分割错误。而二维灰度直方图不仅反映像素灰度级的大小, 而且还反映出像素与邻域的空间相关信息; 通过求此二维直方图的全局最大熵, 得到一个二维阈值矢量, 并用此阈值矢量作为分割门限进行图像分割, 提高最大熵阈值法的抗噪声能力。其次采用熵的概念。熵是平均信息量的表征, 本文基于 SAR 图像信号的特点, 选用式(7)所示的指数熵。将最大熵对应的参数作为图像分割阈值。最后利用了图像所具有的模糊性。在对图像进行两类分割时, 即图像中只有目标和背景, 一个灰度较“暗”, 一个灰度较“亮”。像素灰度级为多大时为“暗”, 灰度为多大时为“亮”等都具有模糊性, 因此对图像进行模糊分类很有必要。所以, 本文将式(6)所示的二维最大模糊熵作为适应度函数, 来寻找合适的阈值对图像进行目标检测。实验结果表明, 该方法可以有效克服斑点噪声的影响, 对图像中的人造目标具有良好的检测性能。

在本文参数寻优中, 将图像的最大信息熵作为遗传算法的适应度函数, 它可以使待寻优的参数 (a, b, c, d) 沿着面向优化组合的方向, 从而得到接近最优的结果。遗传算法中的交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 的选择是影响遗传算法性能的关键问题所在, 直接影响算法的收敛性。在实际应用中, 可以针对不同的寻优问题, 根据经验和多次实验来确定合适的 p_c 和 p_m 。在自适应遗传算法中, p_c 和 p_m 能够随适应度自动改变, 当种群适应度趋于一致或者趋于局部最优时, 使 p_c 和 p_m 值增加; 而当群体适应度比较分散时, 使 p_c 和 p_m 值减小。因而, 我们采用自适应遗传算法^[6]来实时调整 p_c 和 p_m 。为了保证每一代的优良个体不被破坏, 本文采用了精英选择策略, 使它们直接复制到下一代。本文连续进行了 10 次寻优, 每次都能收敛到最优值附近, 寻优结果见表 1。表 1 中, 二维阈值 (T_1, T_2) 分别由寻优参数 (a, b, c, d) 得到, $T_1 = (a + b)/2$, $T_2 = (c + d)/2$ 。

表 1 遗传算法寻优结果

运行次数	达到最优解的迭代次数	最优解
1	10	(158,158)
2	6	(162,169)
3	3	(161.5,165)
4	33	(167,155)
5	9	(156,158)
6	7	(163,160.5)
7	4	(159,162)
8	6	(155,167)
9	6	(159,162)
10	8	(160,162)

表 1 中，有 9 次收敛次数都在 10 以内，有 1 次收敛次数较长，为 33。这主要是由于我们的寻优参数 (a,b,c,d) 是由随机数产生的，如果根据一些先验经验，适当限制寻优参数 (a,b,c,d) 的初值范围，出现收敛次数多的现象就会大大降低。

图 3 为采用本文遗传算法第 1 次运算的阈值进化曲线图。图像的二维分割阈值经过 10 次迭代后，稳定收敛在阈值(158,158)处。

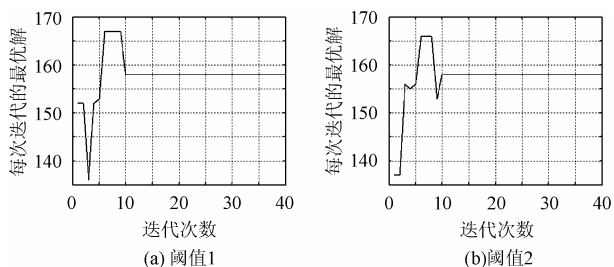


图 3 二维阈值最优解进化曲线图

我们对多幅不同场景、不同分辨率的 SAR 图像进行了滤波和检测。结果表明，本文算法不仅有效可以检测出 SAR 图像中的人造目标，而且还可以克服图像中噪声的影响，特别对斑点噪声具有很强的抑制性。

参 考 文 献

- [1] Lee Jong-Sen. Speckle analysis and smoothing of synthetic aperture radar images. *Computer Graphics and Image Processing*, 1981, 17(1): 24 – 32.
- [2] Donoho D L. De-noising by soft-thresholding. *IEEE Trans. on Information Theory*, 1995, 41(3): 613 – 627.
- [3] Arsenault H H, April G. Properties of speckle integrated with a finite aperture and logarithmically transformed. *J. Opt, soc*, 1976: 1160 – 1163.
- [4] Touzi R, Lopes A, Bousquet P. A statistical and geometrical edge detector for SAR images[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(7): 764 – 773.
- [5] 金立左, 袁晓辉, 赵一凡, 夏良正. 二维模糊划分最大熵图像分割算法. *电子与信息学报*, 2002, 24(8): 1040 – 1048.
- [6] 王小平, 曹立明. 遗传算法—理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 73 – 74.

曹兰英：女，1970 年生，博士生，高级工程师，目前从事 SAR 图像处理、目标识别、计算机视觉以及跟踪控制等方面的研究工作。

夏良正：男，1942 年生，教授，博士生导师，目前的研究领域为图像处理、计算机视觉、数字视频处理、自动目标识别。