

基于小波变换的高分辨 SAR 港口目标自动分割^{*}

侯彪 刘芳 焦李成

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西, 西安, 710071)

摘要 根据图像边缘检测的思路, 在研究 SAR 图像特性的基础上, 提出了一种高分辨 SAR 图像中港口目标的自动分割算法, 并将小波分析成功地应用在预滤波和去噪以及真伪目标识别上, 取得了良好的检测效果。

关键词 合成孔径雷达, 边缘检测, 图像分割, 小波分析。

AUTOMATIC SEGMENTATION AND RECOGNITION OF PORTS IN HIGH RESOLUTION SAR IMAGES^{*}

HOU Biao LIU Fang JIAO Li-Cheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xi'an Univ., Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract Based on analysis of the features of SAR images, a novel algorithm for automatic segmentation of ports in high-resolution SAR images was proposed according to the idea of detecting the targets along the edges of the image. At the same time, wavelet analysis was successfully used in pre-filtering, denoising and recognition of real and false targets, and good segmentation results are thus obtained.

Key words SAR, edge detection, image segmentation, wavelet analysis.

引言

合成孔径雷达^[1](Synthetic Aperture Radar, 简称 SAR)是一种主动式微波遥感器,它利用脉冲压缩技术提高距离分辨率,利用综合孔径原理提高方位分辨率,从而获得大面积的高分辨率雷达图像。对于高分辨的 SAR,其目标图像背景复杂,伪目标和真实目标在有些图像中难以识别,图像所含的纹理信息丰富,且具有一定的相似性,边缘轮廓含有大量的高频信息,同时 SAR 图像受噪声的干扰较大,也给真实目标的判别带来了困难。为了抑制噪声,对于受噪声干扰的图像,用图像平滑方法来滤除噪声,由于图像的细节在频率域反映为高频分量,与噪声的高频混淆,因此,如何既保持图像细节又能滤除随机噪声,一直是图像平滑的关键问题。小波分析^[3,4]以其优良的特性在去噪和滤波中^[2,5]具有优势。本文在对 SAR 图像特性分析的基础上,结合小波分析和图像处理,提出了高分辨 SAR 图像的港口目标自动

分割的方法,能够使港口目标的图像分割更为方便。

1 SAR 图像的预处理和边缘检测

对于高分辨 SAR 图像(如图 1,取自美国 Sandia 实验室开放资源),通过分析 SAR 成像结果和仿真实验,发现 SAR 目标图像背景复杂,伪目标和真实目标在有些图像中难以识别,图像所含的纹理信息丰富,且具有一定的相似性,边缘轮廓含有大量的高频信息。SAR 图像受噪声的干扰,也给真实目标的判别带来了困难,为了抑制噪声,通常选用低通滤波器,由于丰富的高频信息,在过滤噪声的同时,必然使得边界变模糊。反之,为了提升边缘轮廓,需要用高通滤波,同时噪声也被加强了。因此合理的抑制噪声的干扰是首选的处理思路,即前滤波。由于港口目标与河流有关,因此检测河流的主轮廓成为分割港口目标的首要条件。

1.1 预处理和前滤波

通常可以获得的 SAR 图像为黑白(256 级量化

*国家自然科学基金(批准号 60073053)资助项目
稿件收到日期 2001-12-10,修改稿收到日期 2002-03-04

*The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 60073053)

Received 2001-12-10, revised 2002-03-04

的图像)图像,但也有一部分是人工上彩的伪彩图像,则整幅图像可以表示成一个三维的向量组,即 RGB 三色灰度级图像,每一维均是 0~255 之间的一个整数,这样虽然得到了 3 幅灰度图像,但其大大降低了特征维数,可以在一定精度和准确度上满足分析的需要.对于得到的 3 幅灰度图像,采用像素发生频数加权的方法,合成为一幅图像,设为 $C(i, j)$.

直方图修正^[6]是图像增强最常用最重要的方法之一.利用图像灰度分布(直方图)信息,对灰度分布形式做校正来修正图像灰度,最终达到图像增强的目的.我们将合成的图像利用直方图均衡做图像增强,是为了使弱特征的港口显现出来.

在计算机视觉中,检测图像的边缘具有极其重要的意义.图像的大部分信息往往携带在图像的不规则结构中,这些边缘信息是图像重要特征之一,在分析图像的结构和性质中起着重要的作用.实际应用中,图像数据往往被噪声污染,所以在检测之前,必须对图像进行预处理,即对图像进行局部滤波.因此在检测图像的边缘时,所用的方法必须既能检测强度的不连续性,确定边缘精确位置,同时又能抑制无关的细节和噪声.在结合小波分析和 OSTU 阈值法的基础上,成功地将河流的主轮廓检测出来,而且引入了多个边缘点模板,并有效地将其去除,为提取单像素边缘奠定了基础. SAR 图像由于受多方面的干扰,噪声尤为突出,而且对于所要检测的港口目标(沿河岸线凸出的连续的矩形齿状目标),目标的尺寸较小,形状和陆地目标有相似之处,但港口均位于

河流的边缘上,因此尽可能排除陆地目标的干扰,而检测河流的主轮廓,同时也抑制噪声的干扰.小波分析对于未知光滑性的目标对于均方误差有最优的性质.二进小波变换^[4]是小波分析中比较重要的一种变换,在图像滤波和去噪中得到了广泛的应用.二进小波^[4]是一种非抽取的小波变换,对图像而言,分解的本质是将原图像的直流分量和交流分量尽可能的分开,并且捕获在不同的图像中,而直流分量对应于原图像的基本轮廓,交流分量对应于原图像的细节特征,也包括了噪声分量.变换的结果就是把原图像中的高频分量(边缘特征)和噪声干扰的分量通过小波捕获到小波变换域中,而将基本轮廓捕获到尺度变换域中.对于高分辨 SAR 图像,所要达到的目标正是这样,需要检测出河流的边缘轮廓,而尽可能的排除陆地目标的干扰(对处理方法来说是噪声干扰),而且陆地目标的形状也成一定的噪声分布.

设灰度增强后的图像为 $C(i, j) (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N)$,令小波变换算法中的 $d_{m, n} = C(m, n)$,将二进小波作为一种滤波的算子,对原图像进行二进尺度小波变换,得到其模糊图像,也就是剔除细节(高频)信息的前滤波图像.小波分解的次数选取为 2,即 $j = 1, 2$.滤波结果虽然使图像有了一些模糊,但河流的边缘轮廓却保持了下来,同时陆地目标也淡化了,弱特征的港口目标也保留了下来.

1.2 图像的二值化及边缘模板点处理算法

为了检测河流的主轮廓的边缘线,采用改进的单阈值法来处理,以期望获得更主要的河流轮廓和



图 1 降维后的 SAR 图和河流边缘

Fig. 1 The dimension-reduced SAR image of its edge of the river

边缘.

基本处理算法如下:(1) 对前滤波后的图像,其灰度值范围在 0 到 255 之间,求整幅图像的像素值发生的频率,设 $number(i)$ ($0 \leq i \leq 255$) 为像素值大小为 i 的像素的个数;(2) 求像素频数的概率分布 $prob(i) = \frac{number(i)}{\sum_{i=0}^{255} number(i)}$, ($0 \leq i \leq 255$);(3) 求初始阈值 $T = OSTU(prob(i)_{i=0}^{255})$.

设定最终的阈值为 $T = \frac{T}{2} - K$ (对于 SAR 图像,因河流轮廓相对较大,较小的阈值法会使小的区域在二值化时消失, K 为阈值平移参数),这样的取法使得最终保留下来的只剩下河流的主轮廓.我们的处理方法更为有效地捕获了河流的基本轮廓边缘,而初始阈值的二值化结果引入了过多的干扰边缘(即小的区域比较多).

对二值化后的黑白图像,可以通过简单的搜索算法检测到实际的单线边缘.在实际分析中,发现二值化后的图像边缘有许多的内刺和外刺,还存在“T”形、正方形、短矩形等模板的边缘点,这些边缘点使得搜索到的边缘的某些地方发生了重叠,失去了单像素边缘轮廓的意义,对这些模板需要一一剔除.剔除的方法是将这些突出的地方拔掉即可,使得边缘轮廓成单点分布,然后通过简单的算法检测出单线的边缘图.大体思路是:自上而下、自左至右扫描,遇到黑点和白点的分界点,保留白点即可完成检测.

1.3 二值图像边缘轮廓的后处理

对于检测到的单线边缘,有许多比较小的区域对分割港口无关紧要,而且,有些区域内部还嵌着另一个区域,也可以剔除,这需要对整幅图像全局搜索每一条完整的闭合曲线.全局搜索算法的基本思想是:在单线边缘图上自上而下、自左至右扫描,遇到一个初始点,以这个初始点为起点,以其为中心在 3×3 的区域内搜索一个未访问的点,然后以这个点为起点继续搜索,直到遇到最初的起始点为止,再开始下一条闭合区域的搜索.

2 港口目标的自动分割算法

2.1 港口可能存在区域的分割

把原 SAR 图像及其河流边缘叠加,并把闭合区域中的所有像素点的灰度值都设置为 255 (二值化为 0 和 255),处理后的结果如图 1 所示.对于图 1,沿着检测到的边缘进行搜索,搜索的原则是基于像素值的分布,找出像素值分布沿边缘比较集中的边

缘区,就是港口可能存在的边缘区,然后对这些检测到的边缘相关的区域再次应用小波分析来检测具有矩形齿形状(船坞的形状)的区域,从而最终可以确定港口的确切位置.

其基本思想是:设 T 是搜索到的一条闭合区域,长度为 $newlength$,沿区域 T 的边缘爬行,并以走过的每一个点为中心的 3×3 的区域为基本区域 L_i ($1 \leq i \leq newlength$),求 L_i 像素值的平均值曲线,设每一基本区域 L_i 的像素平均值为 T_i ,设定阈值,求得连续大于某个阈值的边缘坐标的范围.每一个闭合区域可能存在多个这样的范围.记下每一个范围的起始位置和坐标,以此来分割区域.

算法 1(分割算法):(1) 扫描图 1,设初始搜索到的区域为 T ,长度为 $newlength$,即共有 $newlength$ 个边缘点,设为 $i = 1, \dots, newlength$,以此为横坐标.以区域上的每一个点为中心的 3×3 的区域为基本区域 L_i ($1 \leq i \leq newlength$),求 L_i 的像素值的平均值 T_i ,以此为纵坐标,绘制曲线(如图 2 所示,以图 1 中的区域 1 为例).(2) 设定阈值 TS (这里取 $TS = 45$),修正图 2 的曲线为图 3,即把连续大于阈值 TS 且距离在一定范围(距离设为相近 25 个像素范围)之内的像素边缘归为一类,并记录位置坐标. TS 的取法如下:以 25 个像素间隔为初始剖分单位,均匀的剖分图 2 的曲线,设为 n 段,求每小段曲线的平均值,设为 $meanvalue(n)$;搜索曲线 $meanvalue$ 的极大值,去掉最大和最小的极大值后,求其余极大值的均值即为初始的 TS ,增加像素间隔,可以较为精确的得到 TS 的值.(3) 求每一类的像素边缘的起始点(在图 3 上即可搜索到,如 AB, CD, EF),应用起始位置坐标来分割图像.对应于区域 1 的分割结果如图 4 所示(共 3 块,如图 1 所示的 2、3、4 位置处,我们取 2 和 3 位置).

由图 2~4 可以看到,上述算法能有效地将每一

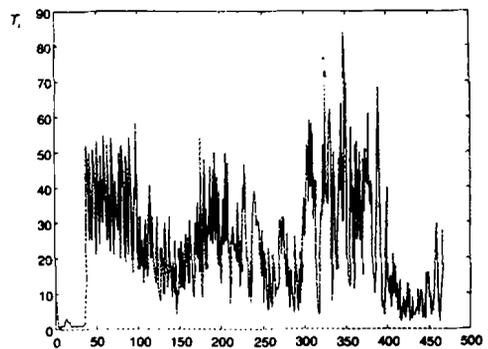


图 2 区域 1 的边缘像素平均值曲线
Fig. 2 The mean value of edge pixels of region 1

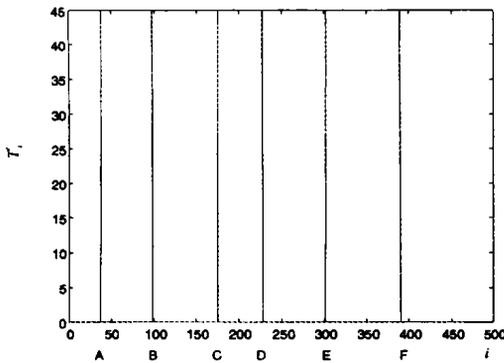


图 3 区域 1 的归一化边缘像素平均值曲线

Fig. 3 The mean value of normalized edge pixels of region 1

个区域中包含矩形齿状港口的区域分割出来,虽然也有一些伪目标,这些伪目标在后文将要进一步通过其它算法进行剔除,例如图 4 中的 1 是伪目标,3 是港口所在的区域.对每一个区域应用上面的算法,可以将所有满足条件的区域分割出来,共得到 26 个分割块,并且所有的港口均包含在其中.

2.2 港口分割块的预处理——小波分析的检测

应用算法 1,所有可能包含港口的区域已经被完全地分割出来,这里,我们对这些区域来检测真正港口存在的确切位置,从而剔除一些伪目标.小波分析的奇异性检测被广泛地应用在图像处理中,本文借用小波分析的思想提出一种分割图像港口检测的有效方法.基本思想是应用小波分析提取分割图像块的边缘的模值图,然后对模值图进行阈值处理并检测,以图 1 的区域 1 中的分割区域 2 和 3 的两个分割块为例.

算法 2(检测算法):(1)因原分割块比较小,首先进行图像的放大(放大 3 倍),采用双三次插值来

处理,以突出港口的特性;(2)应用二进小波离散算法对放大后的图像做小波变换,得到两幅细节像,一幅是水平方向,一幅是垂直方向,大小相等,并把这两幅细节图的像素值量化到区间 $[0, 255]$,然后由这两幅细节图像来合成一幅模值图.设水平细节为 $A(i, j)$ ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$),垂直细节为 $B(i, j)$ ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$),则模值图由 $M(i, j) = \sqrt{A(i, j)^2 + B(i, j)^2}$, $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 求得;(3)对于模值图 $M(i, j)$, $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ 应用单阈值法进行二值化,得到一幅黑白图像;(4)预处理结束.

图 4 中块 1 和块 3 的最终处理结果如图 4 中块 2 和块 4 所示.标号 1 和 3 对应于原分割块,标号 2 和 4 对应于模值图的单阈值化结果.

本算法不但能将港口目标的特性体现出来,还能将港口和非港口目标有效的区分开来.由图 4 可以明显地看出,小波模值图的阈值为矩形齿状港口的有效检测打下了基础.该算法的本质是奇异性检测,小波分析的优良特性使其在边缘检测方面得到了广泛地应用.小波细节图像就是边缘所在的地方,通过两个方向的叠加可以搜索到全局边缘,也就是港口目标和伪目标的形状利用小波变换能明显地区分开来.

2.3 港口伪目标的剔除

利用港口的特性,并利用 2.2 节中预处理的结果,并应用 1.3 节中的全局搜索算法提取图 4 中的标号 2 和 4 的子图的边缘.对于搜索到的边缘,求每一个闭合边缘长度的平均值,以这个平均值作为基准,来搜索相似于这个平均值的区域的个数.这里,取在平均值周围长度为 10 的范围内扰动,同时结合港口的特

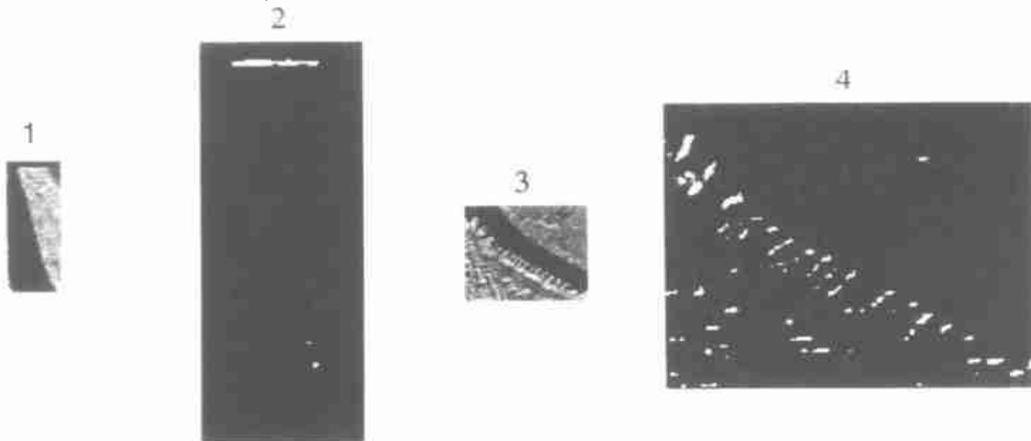


图 4 港口分割块的二进小波模值图二值化结果(2 对应 1, 4 对应 3)

Fig. 4 Thresholding the modular image of dyadic wavelet transform of the segmented ports(2 for 1, 4 for 3)



图5 对应于图1的港口分割结果

Fig. 5 The segmented results of ports corresponding to Fig. 1

表1 图1与分割结果图5的对应关系
Table 1 The labels in Fig. 1 corresponding to that of the segmentation results in Fig. 5

图1中的标号	图5的分割结果对应的标号
A	4
B	1
C	2
D	5
E	6
F	7
伪目标	3

性,把每一幅分割图像中检测到的闭合边缘的个数不足5个(港口矩形齿形状所定)的区域剔除掉,之前先对每一幅分割图像的像素平均值做阈值处理,小于某个阈值的分割图像剔除掉,经过这些处理,对于2.1节中检测到的26个分割子块,最终的检测结果如图5所示,只有7个子块、6个港口和一个伪目标,其与图1的对应关系如表1所示。

由分割和检测结果可以看到:本文提出的算法能将所有的港口都检测并分割出来,而且算法的复杂度也较低,很容易编程实现,同时算法在自动分割过程中还可以将港口目标定位,因为自动分割本身就包含着定位信息。

3 结论

本文沿图像边缘检测的思路,在研究 SAR 图像

特性的基础上,结合小波分析优良的滤波和去噪特性以及边缘检测特性,提出了一种高分辨 SAR 图像中港口目标的自动分割算法,并取得了良好的检测效果。对于分割的结果,存在着一些伪目标,这些伪目标和港口目标明显的区别在于矩形齿的特性,利用这个区别,并结合小波边缘检测成功地将港口伪目标减少到最低限度,取得了良好的检测和分割效果。本文的方法复杂度低,算法简单,易编程实现。

REFERENCES

- [1] WANG Yun-Feng, TANG Zhi-Wei, WANG Jian-Guo, et al. The study of identifying method about bridge on SAR image. Systems Engineering And Electronics(王运锋,汤志伟,王伟国,等.SAR 图像中桥梁的识别方法研究.系统工程与电子技术),2001,23(6):76-78
- [2] LI Qiang, WANG Zheng-Zhi. The wavelet-based synthetic technology of denoising and data compression of SAR image. Systems Engineering And Electronics(李强,王正志.基于小波分析的噪声抑制和数据压缩综合技术—SAR 图像的噪声抑制和数据压缩.系统工程与电子技术),1998,12:15-17
- [3] Daubechies I. The wavelet transform: time-frequency localization and signal analysis. IEEE Trans. Inform. Theory, 1990,36:961-1005
- [4] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multi-scale edges. IEEE Trans. Patt. Recong. And Mach. Intell., 1990,12:629-639
- [5] Odegard J, Guo H, Burrus C. Wavelet based SAR speckle reduction and image compression. Proceeding of SPIE, 1995,4:17-21
- [6] Kenneth R Castleman. Digital Image Processing. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1996