

一种基于极化熵的极化 SAR 海岸线提取方法

折小强^{1,2,3} 雷 斌^{1,2}

(1. 中国科学院空间信息应用与应用系统技术重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100190)

摘 要:提出了一种可用于极化合成孔径雷达图像的海岸线提取方法。通过对极化 SAR 数据的分析,极化熵由于其对极化相关纹理敏感的特性而被选用来进行海陆之间的边缘检测与海岸线提取。针对极化熵图像,首先通过均值比率算子进行边缘图提取,包括边缘强度图和边缘方向图。在此基础上,提出了一种新的“coarse-fine”的海岸线提取方法。该方法包括两个步骤:首先利用边缘方向图,采用一种新的边缘跟踪的方法得到海岸线的粗检测轮廓;然后基于边缘强度图,在粗检测轮廓的基础上进行典型边缘点的提取,这些边缘点被称为控制点,最后利用控制点对粗检测轮廓进行修正,得到最终的海岸线。最后,基于 Radarsat-2 全极化数据进行了实验,实验结果证明,该方法可以很好的描绘出实验区域的海岸线,并优于其他对比方法。

关键词:极化合成孔径雷达;海岸线提取;极化熵

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

New polarimetric entropy based coastline extraction method for PolSAR images

She Xiaoqiang^{1,2,3} Lei Bin^{1,2}

(1. Key Laboratory of Technology in Geo-spatial Information Processing and Application System, Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper propose a new coastline extraction method for polarimetric SAR images. Through detailed analysis of the polarimetric SAR (PolSAR) data, this paper selects the polarimetric entropy as the basis of the edge detection and coastline extraction since it is sensitive to the polarization-dependent variation of texture. Firstly, the polarimetric entropy image is used to generate the edge maps including an edge intensity image and an edge orientation image. Based on the edge maps, a new “coarse-fine” method is proposed to extract the coastline. The latter is divided into three steps: first, a rough contour is extracted based on the edge orientation image; second, significant edge points, which are named control points, are extracted based on the edge intensity images, then correct the rough contour by using the control points and achieve the final coastline. The proposed method is used to extract the coastline on the Radarsat-2 quad-pol data and the results prove that the proposed method could better delineate the coastline than the comparative methods.

Keywords: polarimetric sythentic aperture radar; coastline extraction; polarimetric entropy

0 引 言

合成孔径雷达(sythentic aperture radar, SAR)是一种有效的海岸带观测手段。在海岸带遥感应用研究中,海岸线提取是其中的首要步骤。海岸线是海洋与陆地的分界线,更确切的定义是海水向陆到达的极限位置的连线。由于受到潮汐作用以及风暴潮等影响,海水有涨有落,海面

时高时低,这条海洋与陆地的分界线时刻处于变化之中。了解海岸线的方向、位置以及轮廓是海洋导航、目标定位以及区域划分等应用的关键。因此对海洋和陆地进行分离并提取出海岸线是海岸带地物解译研究中必不可少的基本步骤,对后续的海岸带地物分类^[1],典型目标提取^[2-3]以及地物分类^[4]等研究有着重要的意义。

对于海岸线的提取,传统的海岸调查在水线资料获取

等方面有着较大的局限性,主要表现为海岸带部分区域的可通行性较差以及海岸环境较为复杂多变难以大面积的实时同步观测记录等方面。因而,SAR 尤其极化 SAR 由于其全天候全天时大面积观测能力,而受到了研究者们的关注。全极化 SAR 提供了 4 个通道的 SAR 图像,可以直接展示出不同极化模式下的海岸带图像。因此,研究者们提出了很多基于不同极化模式下地物差异性的海岸线提取方法^[5-10]。在这些方法中,一般首先利用计算模型将多个通道的极化 SAR 图像映射为一幅图像,计算模型包括 IEM 模型^[5]或者模数相关性模型等^[6-7]。在该幅图像中,海面区域与陆地区域有着较为明显的分离度。然后对图像进行边缘提取处理得到初步的海陆边界,最后对初步的海陆边界进行精细化处理获得最终的海岸线。此外,还有一些方法通过对各个通道的极化 SAR 图像进行分割,然后根据实际情况将分割结果进行融合处理获得海岸线。这些方法能够利用一些极化 SAR 各个通道的信息,并相比单极化 SAR 图像能获得更为精确的海岸线,但是这些方法对极化 SAR 数据的利用局限在其原始数据的处理上,未能充分利用其极化分解特征等信息。

另外,由于海岸带区域在海陆相互作用下,其环境复杂多变的。因此对于复杂的海岸带区域,部分边界模糊不清,已有的方法不能很好的描绘出准确的海岸线。

针对以上问题,提出了一种基于极化熵的海岸线提取方法,用于复杂海岸带的边界检测与海岸线精确提取。类似已有的海岸线提取方法的思路,该方法通过对海岸线附近地物的散射特性的分析,将极化 SAR 图像映射到极化熵图像域来进行海岸线提取操作。在极化熵图像中,首先利用均值比率(ratio of average, ROA)算子提取出边缘方向图与边缘强度图^[11]。在此基础上,利用边缘方向图,采用边缘连接的方法获得海岸线粗检测的轮廓。随后基于边缘强度图和粗检测轮廓,提取出边缘控制点。最后利用形态学滤波器通过边缘控制点对粗检测结果进行修正,获得精确的海岸线。实验结果表明,该方法兼具精确性与鲁棒性,并通过由粗到细的边缘检测方式,能够很好的适应不同场景的需求。

1 理论与方法

在全极化 SAR 模式中,SAR 系统以水平极化和垂直极化两种模式的组合来发射和接收电磁波。极化散射矩阵为:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

极化总功率 S_{pan} 记录了极化散射矩阵中 4 个通道的全部信息^[12],其定义如下:

$$S_{\text{pan}} = |S_{HH}|^2 + |S_{HV}|^2 + |S_{VH}|^2 + |S_{VV}|^2 \quad (2)$$

一般来说, $S_{HV} = S_{VH}$,因此 Pauli 散射矢量定义为:

$$\mathbf{k} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T \quad (3)$$

式中: T 表示转置。基于 $\mathbf{k}$ 可以得到极化相干矩阵 $\mathbf{T}_3$:

$$\mathbf{T}_3 = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \mathbf{k} \mathbf{k}^* \quad (4)$$

式中: L 为视数,上标 $*$ 代表了复共轭。从极化相干 $\mathbf{T}_3$ 矩阵中可以提取出来极化熵 $H^{[13]}$,首先对 $\mathbf{T}_3$ 进行矩阵分解,如式所示。

$$\mathbf{T}_3 = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \mathbf{T}_{3i} = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i^* \quad (5)$$

式中: λ_i 是 $\mathbf{T}_3$ 矩阵的特征值,代表着第 i 个归一化分量 $\mathbf{T}_{3i}$ 的比重,其概率可以用 P_i 来表示。

$$P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^3 \lambda_i} \quad (6)$$

极化熵可以通过对 λ_i 进行计算得到。

$$H = - \sum_{i=1}^3 P_i \log P_i \quad (7)$$

极化熵 H 描述了散射的随机性,其取值范围为 0 到 1。当极化熵值较低时,可以认为只有一种主导散射机制;当极化熵值较高时,此时表现出较为强烈的去极化特性,散射机制趋向随机;当极化熵接近于 1 时,散射机制接近于噪声。

在遥感图像中,海岸线可以看成是一系列边界点的结合。而边界点的强度和位置则可以通过边界附近区域的纹理信息来决定。在复杂海岸带的边界附近区域,不同的地物有着不同的极化特性。文献[14]中证明极化熵由于对散射随机性敏感,因此可以很好的描述极化相关的纹理变化。因此,极化熵可以作为海岸线提取的重要工具。

基于上述的分析,本文在极化熵图像的基础上提出了一种新的海岸线提取算法,其流程如图 1 所示。包括边缘图提取、边缘跟踪及轮廓粗检测和基于控制点的形态学滤波及海岸线精确提取 3 个主要步骤。

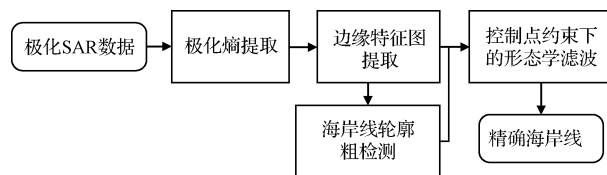


图1 海岸线提取流程

1.1 边缘图提取

本文利用了 ROA 算法进行边缘图提取,在 ROA 算法中,采用一个移动窗口以每个点为中心,沿着一个特定方向将其分为 P 和 Q 两部分^[11],然后求 P 和 Q 部分的均值比率,其计算模板如图 2 所示。图 2(a)中给出了本文使用的 4 个方向选项。对于每个方向,其均值的计算方式为:

$$R^d = \max(\bar{I}_P^d / \bar{I}_Q^d, \bar{I}_Q^d / \bar{I}_P^d) \quad (8)$$

式中:上标 d 为方向选项, $\bar{I}_P$ 和 $\bar{I}_Q$ 为 P 和 Q 两部分的均值。对于每个点,其最终的比率值 R 为:

$$R = \max\{R^d, d \in O\} \quad (9)$$

式中: O 为方向选项集合。

通过计算 R ,可以得到边缘强度图。对于每个点,其最终比率值对应的方向即为其方向图的值,基于此,即可获得边缘方向图。

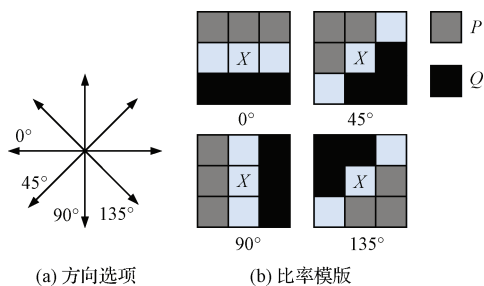


图2 边缘特征提取模板

1.2 海岸线轮廓粗检测

前面的边缘提取方法中,最后得到的结果包括一副边缘强度图和一副边缘方向图。但是对于海陆边界附近地物类型较为复杂的海岸带,强边缘点在边界处通常是不连续的。这对边缘图的直接利用带来了困难。针对这个问题,包括边缘跟踪、边缘平滑等方法已经在近十年来相继提出。其中比较典型是 Jong-Sen Lee 的边缘跟踪方法^[15]。在 Jong-Sen Lee 的方法中,边缘追踪连接分成3步进行。首先,通过人工操作在图像中选取一个海岸线的起始点;其次,通过边缘信息确定搜索方向;最后,在当前点出发,沿着给定方向在一个 $n \times n$ 窗口中确定连接点。Jong-Sen Lee 的方法巧妙的利用了边缘的方向信息,后序的边缘跟踪研究基本延续了这一思路。然而,对于海岸线附近地物复杂的情况,通过 $n \times n$ 窗口搜索连接点的方法有一定的局限性。例如对于潮间带水产养殖区域,其复杂的环境可能导致此处边缘点之间的距离过大, $n \times n$ 窗口范围内可能没有正确的连接点存在。因此 Jong-Sen Lee 的方法不能适应这种情况。另外,在 Jong-Sen Lee 的方法中,起始点选择的条件苛刻的,必须严格落在真实海岸线的起点上。为了解决这些问题,本文在 Jong-Sen Lee 方法思路的基础上,利用获得的边缘方向图实现复杂海岸带中的边缘追踪和连接。

在边缘强度图中,每一个强边缘点都在边缘方向图中有一个对应的边缘方向。在本方法中,对每一个边缘方向图中的点,都会沿着自己的方向两侧延伸直到连接到下一个边缘点。边缘跟踪连接线的模板如图3所示,其中图3(a)为 0° 方向,图3(b)为 45° 方向,图3(c)为 90° 方向,图3(d)为 135° 方向。另外,连接线是随着距离而衰减的,意味着当距离足够远时,找到下一个连接点的可能性会降低。本文中连接线的衰减模式按照高斯函数来衰减。当某一点的某一侧未能找到下一个点时,则该侧连接线取消。这样,不需要依赖 $n \times n$ 窗口的尺寸来实现边缘跟踪。当所有的边缘点都进行边缘连接处理后,边缘跟踪即完成。

图4给出了本文边缘跟踪连接的示意图。对比 Jong-Sen Lee 的方法,本方法有两个优点:首先,其不依赖起始点的选取;其次,寻找下一个点的过程不依赖检索窗口的尺寸。但是,在海陆边界处并非所有点的边缘方向和海岸线的方向一致,因此得到的边缘连接结果会存在毛刺。因此在边缘连接后,对图像做一次平滑滤波来消除毛刺^[16],获得粗检测的海岸线轮廓。

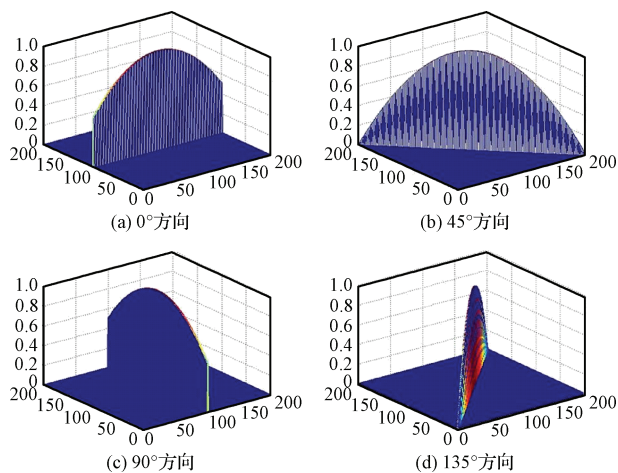


图3 边缘跟踪连接模板

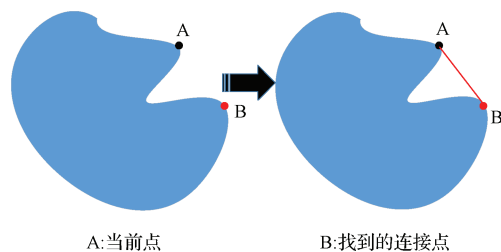


图4 边缘跟踪连接示意图

1.3 海岸线精确提取

在边缘图的基础上,通过对不连续边缘的追踪和连接,获得了海岸线粗检测轮廓。但是这个轮廓只是个不精确的结果,主要原因有两个:1)边缘点的方向并不是总是和海岸线的走向一致,因此可能导致错误的连接;2)均值平滑滤波器在平滑毛刺的同时并不能保证轮廓的精确性。因此,针对这个问题,利用边缘强度图来修正粗检测轮廓,并获得精确的海岸线。

根据轮廓粗检测方法,真实海岸线与粗检测轮廓之间的关系可以定义为:

$$u'(x) = u(x) + \lambda D(u(x), u'(x)) \quad (10)$$

式中: $u'(x)$ 是真正的海岸线, $u(x)$ 是得到的粗检测轮廓, $D(u(x), u'(x))$ 为粗检测轮廓与真实海岸线之间的偏离度。 λ 为常数,当 λ 取值为1时, $u(x)$ 在 $u'(x)$ 内部;当 λ 取值为-1时, $u(x)$ 在 $u'(x)$ 外部。

通过式(10)可以看出,对粗检测轮廓的修正和精确海岸线的提取的关键是计算偏离量 $D(u(x), u'(x))$ 。但是

主要问题是真正的海岸线 $u'(x)$ 是未知的。考虑到海岸带区域和海洋区域的总体地物散射特性的不同,海岸线 $u'(x)$ 上必定会有大量的强边缘点出现。因此,可以通过从边缘图中提取合适的边缘点来替代的描述和表达真实海岸线 $u'(x)$ 。文中这些边缘点被称为“控制点”。控制点的提取分为两步。首先,沿着粗检测轮廓,在其边缘附近在边缘强度图中选择一组强边缘点作为候选点;第二,在粗检测轮廓的每个点附近,寻找出候选点中边缘强度最大的点作为控制点。

基于上面的分析,粗检测轮廓与真实海岸线之间的偏离度 $D(u(x), u'(x))$ 可以改写为 $D(u(x), R)$, 其中 R 为控制点集合。而 $D(u(x), R)$ 可以通过计算 $u(x)$ 和 R 之间的欧拉距离获得。 λ 值可以根据轮廓和控制点之间的关系确定。最后基于 $D(u(x), R)$ 对 $u(x)$ 进行形态学滤波实现精确海岸线提取。利用 MATLAB 函数“strel”和距离 $D(u(x), R)$ 构建形态学结构体 B , 其中形状参数为“disk”模式。形态学滤波器包括膨胀和腐蚀两种,当 λ 为 -1 时选择腐蚀滤波,当 λ 为 1 时,选择膨胀滤波。形态学滤波器如下所示^[17]:

$$E(u, B) = u \ominus B = \bigcap \{u - b; b \in B\} \quad (11)$$

$$D(u, B) = u \oplus B = \bigcup \{u + b; b \in B\} \quad (12)$$

式中: $E(u, B)$ 为腐蚀, $D(u, B)$ 为膨胀。

2 实验与分析

提出的海岸线提取方法通过旧金山海岸带区域 C 波段 Radarsat-2 全极化数据验证,其数据分辨率为 8 m,其 Pauli 伪图如图 5 所示,其中红色框选范围为实验区域。所选实验区域的 $Span$ 影像和极化熵图像如图 6 所示。对比图 6 中上面一行的 $Span$ 图像与下面一行的极化熵图像,可以看出在极化熵图像中海陆之间有着更显著的分隔度。这也佐证了前面的理论分析,即极化熵是海岸线提取的良好工具。实验中,首先针对图 6 中的实验区域数据使用本方法进行海岸线提取,然后将其结果和几种典型的海岸线提取方法的结果进行对比,最后通过真值数据对上面几种方法进行定量分析。

2.1 实验结果

根据图 1 给出的海岸线提取流程,针对图 6 中实验区域的极化 SAR 数据进行海岸线提取。图 7 展示了提取出来的边缘图,其中图 7(a)、(b) 一行为边缘强度图,图 7(c)、(d) 为边缘方向图,其中 φ 为边缘方向并有 4 个选项,即 0° 、 45° 、 90° 和 135° 。从图中可以看出,边缘强度图和边缘方向图很好的描述了不同海岸带区域的边缘信息,并且在大多数区域保证了边缘的连续,但是也有部分边缘出现断裂情况。

为了进一步获得连续的海岸线轮廓,在图 7 所示的边缘图基础上,利用其边缘方向信息进行边缘跟踪与轮廓粗检测,然后通过边缘强度图提取控制点对粗检测轮廓进行



注:方框为所选的实验区域

图 5 实验数据的 Pauli 伪图

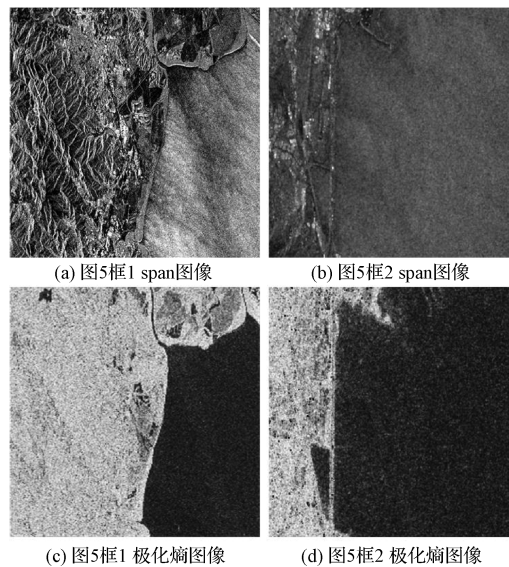


图 6 所选实验区域的 $Span$ 图像和极化熵图像

精确校正获得最终结果,如图 8 所示。图 8(a)、(b) 为粗检测轮廓,图 8(c)、(d) 边缘控制点,图 8(e)、(f) 最终修正后的海岸线。从图中可以看出,通过轮廓粗检测,边缘点校正,得到的海岸线在极化熵图像中有着很好的视觉匹配效果。

2.2 实验分析

图 8(e)、(f) 可以看出,本文的实验结果和图像中的海岸线可以较好的吻合。为了更好的验证方法的有效性,采用两种经典的方法对实验区域进行海岸线提取,并和结果进行对比。对比实验的方法分别为 Mason 于 1996 年提出

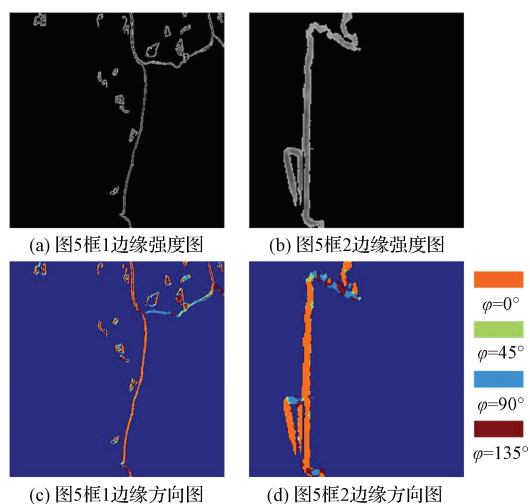


图7 实验数据边缘图

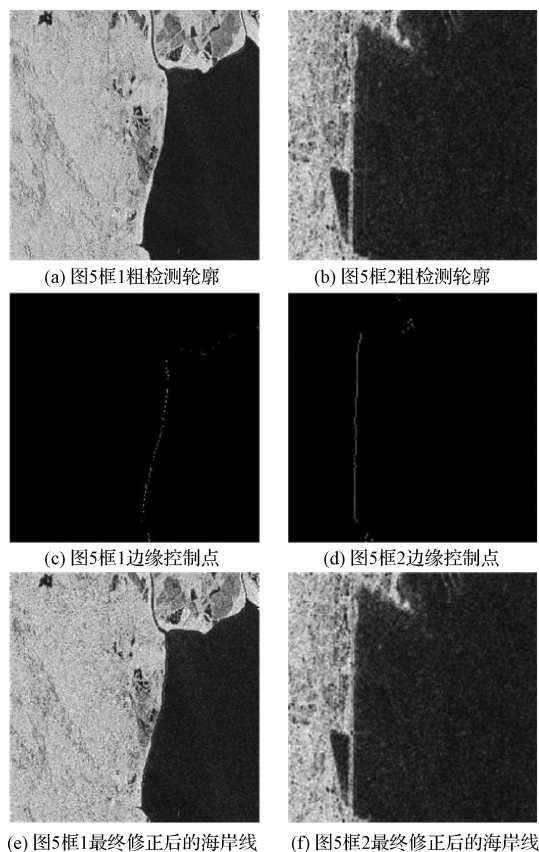


图8 海岸线精确提取过程

的海岸线提取方法以及一种基于 Graph Cut 的方法^[18]。其中 Mason 和 Davenport 的方法于 1996 年提出,其方法原理为首先提取边缘信息然后用活动轮廓模型获得最终的海岸线,而基于 Graph Cut 点方法是一种交互式的方法,其通过人工标记海陆区域然后通过最小割来获得海陆边界线。在实验中,两种方法均对极化熵图像进行处理,其结果分别如图 9(a)、(b) 所示。图 9 中,(a)、(b) 为基于 Graph Cut 的方法的结果,(c)、(d) 为 Mason 和 Davenport

的方法结果,(e)、(f) 为本文方法提出的海岸线,(g)、(h) 为海岸线真值。在图 9(a)、(c)、(e)、(g) 中 Mason 和 Davenport 的方法无法保证海岸线的平滑。图 9(b)、(d)、(f)、(h) 中基于 Graph Cut 的方法的结果在部分区域和真实海岸线产生偏离,其他两种方法和真值较为一致。通过和真值的对比和分析,可以看出其他两种方法在复杂海岸带区域得到的海岸线和真值有着一定的偏离,而本方法和真值最为吻合。

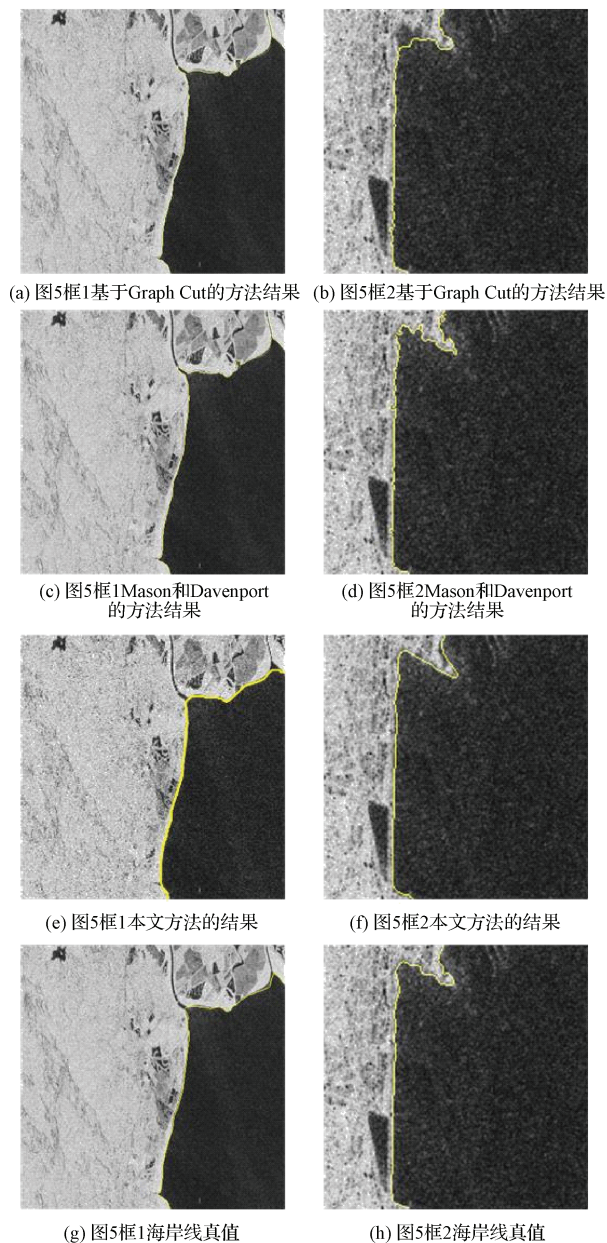


图9 对实验区域进行对比实验的结果

因此,本方法的结果和真值有着最好的视觉匹配并优于其他方法。为了进一步评价方法的性能,可以利用图像质量评价准则来评估实验结果^[19]。采用 Pratt 于 1997 年提出的 FOM(pratt's figure of merit) 质量评价指标来定

量分析这3种方法^[20]。 FOM 的定义如式(13)所示。

$$FOM = \frac{1}{\max\{\hat{N}, N_{\text{real}}\}} \sum_{i=1}^{\hat{N}} \frac{1}{1 + d_i^2 \alpha} \quad (13)$$

式中: $\hat{N}$ 为提取出来的海岸线中的点的个数, N_{real} 为真实海岸线中像素点的个数, d_i 为第*i*个提取出来的海岸线点与最近的真实海岸线点的距离, α 为一个正的尺度参数,在实验中设为0.1。 FOM 的值域范围从0到1,其中 $FOM=1$ 意味着最佳匹配,而 $FOM=0$ 意味着完全失配。

针对每种方法,先计算其在每个实验区域的 FOM 值,然后将两个实验区域的 FOM 值进行平均得到该方法最终的 FOM 质量值,如表1所示。从表1中可以看出,本方法结果在边缘点定位方面有着令人满意的结果,而其他方法不能很好的拟合真实的海岸线。

表1 3种方法的平均 FOM 值

方 法	FOM/%
本文方法	98.12
Mason 和 Davenport 的方法	96.02
基于 Graph-cut 的方法	95.73

3 结 论

针对海岸线提取问题,提出了基于极化熵的极化 SAR 海岸线提取方法。基于极化熵图像,提取出其边缘图,随后利用边缘图进行海岸线提取。实验中利用 C 波段 Radarsat-2 全极化数据实现了对旧金山地区的两个场景的海岸线提取。对比真值图方法可以给出较好目视结果并优于其他两种典型方法。最后的定量分析证明文方法具有较好的准确性。

参 考 文 献

- [1] 胡桂香,李宁,邢艳肖. 基于 KMM 与超像素的 SAR 海面暗斑分割算法[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(6): 101-108.
- [2] 赵泉华,高郡,李玉. 基于区域划分的多特征纹理图像分割[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11): 2519-2530.
- [3] 朱贺,李臣明,张丽丽,等. 联合灰度阈值分割及轮廓形态识别的河道提取[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(11): 1288-1296.
- [4] 乔寅骐,肖健华,黄银和,等. 基于改进 RHT 的 SAR 图像机场区域提取算法[J]. 电子测量技术, 2016, 39(2): 56-60.
- [5] BUONO A, NUNZIATA F, MASCOLO L, et al. A multipolarization analysis of coastline extraction using X-band COSMO-SkyMed SAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(7): 2811-2820.
- [6] NUNZIATA F, MIGLIACCIO M, LI X F, et al.

Coastline extraction using dual-polarimetric COSMO-SkyMed pingpong mode SAR data[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 11(1): 104-108.

- [7] NUNZIATA F, BUONO A, MIGLIACCIO M, et al. Dual-polarimetric C- and X-band SAR data for coastline extraction[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2016, 9(11): 4921 - 4928.
- [8] DING X, NUNZIATA F, LI X, et al. Performance analysis and validation of waterline extraction approaches using single- and dual-polarimetric SAR data[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2015, 8(3): 1019-1027.
- [9] DENG Y, ZHANG H, WANG C, et al. Object-oriented water extraction of PolSAR image based on target decomposition[C]. IEEE, Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2015: 596-601.
- [10] CHUGH T J S, DUBEY R B, SUJATA. A new classification approach for PolSAR images[J]. International Journal of Advanced Computer Research, 2012, 2(5): 2333-2345.
- [11] XIUSHAN L U, YAN Z. Application of improved ROA algorithm in SAR image edge detection[J]. Journal of Shandong University of Science & Technology, 2016(6): 17-23.
- [12] NASCIMENTO A D C, HORTA M M, FRERY A C, et al. Comparing edge detection methods based on stochastic entropies and distances for PolSAR imagery[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2014, 7(2): 648-663.
- [13] WANG S, LIU K, PEI J, et al. Unsupervised classification of fully polarimetric SAR images based on scattering power entropy and copolarized ratio[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(3): 622-626.
- [14] ZHANG L, ZOU B, ZHANG J, et al. Classification of polarimetric SAR image based on support vector machine using multiple-component scattering model and texture features[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2010(1): 1-9.
- [15] 刘春,殷君君,杨健. 基于混合边缘检测的极化 SAR 图像海岸线检测[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1262-1267.
- [16] 金长江,师廷伟. 红外弱小目标检测背景抑制算法研究[J]. 中国测试, 2016, 42(4): 115-119.
- [17] ARMAROLI C, CIAVOLA P, PERINI L, et al. Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coast-

- line, Italy [J]. Geomorphology, 2012, 143-144 (2): 34-51.
- [18] CHENG D, MENG G, XIANG S, et al. Efficient sea-land segmentation using seeds learning and edge directed graph cut [J]. Neurocomputing, 2016 (207): 36-47.
- [19] 闻新, 张婉怡, 王嘉轶, 等. 基于视觉感知的全参考图像质量评价算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(11): 1780-1789
- [20] HAGARA M, HLAVATOVIC A. Video segmentation based on Pratt's figure of merit[C]. International Conference, 2009: 91-94.

作者简介

折小强, 1989 年出生, 博士研究生, 主要研究方向为极化 SAR 图像处理。

E-mail: sxq@mail. ustc. edu. cn

(上接第 58 页)

- [12] 钟文涛. 基于单片机的野外信息检测记录系统[J]. 机电工程技术, 2013, 42(5): 26-30.
- [13] 丁凡, 周永明. 基于 ZigBee 的多路温度数据无线采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2013(8): 72-78.
- [14] 潘玲娇, 张自嘉, 樊延虎, 等. 嵌入式 16 通道同步数据采集系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2013(11): 91-94.
- [15] 陈涛, 郭得科, 罗雪山, 等. 一种基于移动基站的无线传感器网络数据收集方法[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(2): 49-53.

作者简介

胡应坤, 硕士研究生, 电子工程师, 讲师。主要研究方向为电子电气。

E-mail: 523792534@qq. com

(上接第 75 页)

- [9] 石柱名, 冀勇钢, 彭海龙. 基于 AD9850 的信号发生器的设计与实现[J]. 现代电子技术, 2010, 33(1): 43-44.
- [10] 刘畅生, 赵明英, 刘煦, 等. 运算放大器使用备查手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] 梁海礁. 新型大功率运放 PA12A 的功率倍增设计[J]. 舰船光学, 2005, 41(1): 44-48.
- [12] 于鹏. PA12 功率放大器的原理分析及仿真[J]. 数字通信世界, 2016(8): 224, 249.
- [13] 刘延华, 张承学, 代芬. 12 位高速 ADC 存储电路设计与实现[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2003(5): 33-35.
- [14] 袁海强, 徐宏海, 李娟. 基于 CY7C68001 的数据采集系统 USB 接口设计[J]. 机电工程技术, 2008, 37(2): 48-50.
- [15] 王楠, 王伟, 马小光, 等. 基于多融合技术的变压器绕组变形测试与诊断方法[J]. 绝缘材料, 2015, 48(11): 69-75.

作者简介

薛亮红, 1978 年出生, 工学学士, 助理工程师, 主要研究方向为电力设备的故障诊断技术, 变电站现场测试技术, 变压器绕组变形诊断等。

E-mail: xuelianghong@sgepri. sgcc. com. cn

刘之方, 1977 年出生, 工学硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为串联补偿关键技术、电气设备故障监测等。

E-mail: fangkite@epri. sgcc. com. cn