

基于 Pauli 分解散射参数特性的潮沟信息提取

朱言江¹, 韩震^{1,2*}, 和思海¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海市河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306)

摘 要:以长江口九段沙为研究对象, 利用 2015-04-05 全极化 Radarsat-2 影像数据, 首先进行了多视处理和精极化 Lee 滤波; 然后通过 Pauli 极化分解提取出九段沙水体、潮沟、低矮植被和芦苇的奇次散射系数、45°二面角散射系数和二面角散射系数, 并且对 4 种地物类型(潮沟、水体、低矮植被和芦苇)的 3 种参数的散射强度分别进行了统计分析; 最后选择二面角散射系数作为潮沟信息提取的判别标准, 采用区域生长法提取了潮沟信息, 并利用数学形态学对区域生长法中的断裂潮沟进行了连接和非潮沟信息的消除。研究结果表明, 潮沟和水体的奇次散射强度值分别为 0.040 和 0.038, 二者的 45°二面角散射系数值为 0.001 和 0.002; 潮沟的二面角散射强度值为 0.007, 低矮植被和芦苇的二面角散射强度值分别为 0.783 和 0.104。

关键词:Pauli 分解; 散射; 极化; 潮沟; 长江口

中图分类号:P73

文献标识码:A

文章编号:1671-6647(2020)01-0113-08

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.01.012

引用格式:ZHU Y J, HAN Z, HE S H. Information extraction of tidal channels based on the scattering parameter of Pauli decomposition[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(1): 113-120, 朱言江, 韩震, 和思海. 基于 Pauli 分解散射参数特性的潮沟信息提取[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(1): 113-120.

利用全极化合成孔径雷达(Full-polarization Synthetic Aperture Radar)数据可以获得研究对象的全散射矩阵, 该矩阵包含了研究对象的重要散射信息、空间结构信息和纹理信息, 利用这些信息可以深入了解研究对象的物理及几何特性^[1-3]。目前, 全极化 SAR 数据的极化特征提取工作已经取得了一系列的研究成果, 经过数十年的努力, 国内外学者在不同理论的基础上, 提出多种方法进行极化特征分解。如 Cloude 提出的 H/Alpha 分解^[4]、Freeman 等提出的 Freeman-Durden 分解^[5]、Yamaguchi 等提出的 Yamaguchi 分解^[6]。对于不同的地物类型, 有不同的分解方法, 例如: Kiran 等^[7]利用不同分解方法对城市地区进行分类研究, 结果表明, 在城市居民点螺旋散射成分更多, Yamaguchi 分解效果良好, 其次是 Freeman-Durden 分解, 而在水体等表面散射的区域 Pauli 分解效果更好。陈军等^[8]以 ALOS 卫星的 PALSAR 影像为研究数据, 提出一种综合 Pauli 极化特征分解和支持向量机(SVM)的分类策略, 研究结果表明 Pauli-SVM 算法可以有效地提高分类的准确性。马腾等^[9]采用 Radarsat-2 全极化数据, 利用极化目标分解方法提取到了散射熵、平均散射角、反熵、平均特征值、单次反射特征值相对差异度和二次反射特征值相对差异度, 结合实测数据, 分析了各参数对于耕地、裸地、含植被水体和建筑等类别的可分离性。Geng 等^[10]利用 Radarsat-2 数据的目标分解分析了在不同的环境条件下中国江苏沿岸潮间带的极化特征和散射机制, 定量比较分析了 Radarsat-2 数据分解极化参数对潮间带中不同物体的极化特性, 表明潮汐对滩涂和水产养殖场的主要散射机制具有不同的影响。

如何有效地选择极化特征和分类算法是全极化 SAR 影像分类领域亟待解决的问题。经过反复试验, 同时结合长江口九段沙研究区域地物类型, 利用 Pauli 分解的极化散射参数可以准确地获取地物实际物理特性相对应的极化特征。综合不同提取算法和分类算法的基础, 本文选取 2015-04-05 Radarsat-2 全极化 SAR

收稿日期:2018-05-11

资助项目:国土资源部公益性行业科研专项项目——淤泥质海岸带遥感地质环境监测技术研究(201211009)

作者简介:朱言江(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋遥感数据处理方面研究。E-mail: 1017574006@qq.com

*** 通讯作者:**韩震(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事海洋信息探测与应用方面研究。E-mail: zhhan@shou.edu.cn

(王燕 编辑)

数据,分析 Pauli 极化分解出的散射参数对九段沙地物散射特性的影响,并利用区域生长法和数学形态学提取潮沟信息。

1 研究区域

九段沙(图 1)位于长江入海口处($121^{\circ}46' \sim 122^{\circ}15' \text{E}$, $31^{\circ}03' \sim 31^{\circ}17' \text{N}$),是上海市的重要湿地之一。由于受潮流的影响,九段沙一直处于变化中,其植物群落主要有 3 种,分别为互花米草、芦苇和海三棱藨草^[11]。

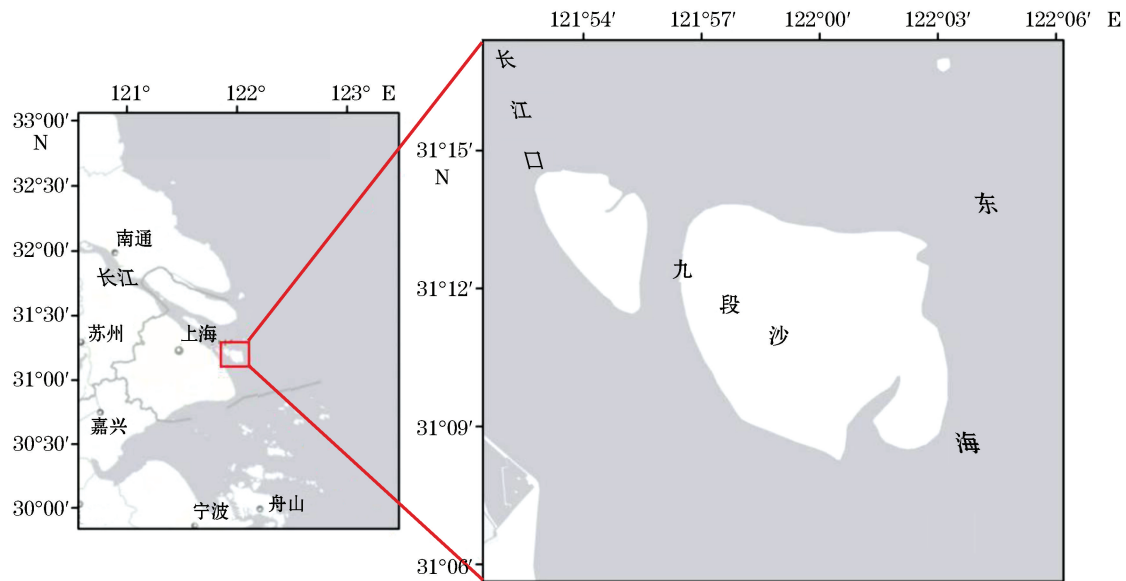


图 1 研究区域

Fig.1 Geographic position of the study area

2 研究方法

首先对 Radarsat-2 全极化数据进行预处理,包括数据多视处理和相干斑滤波;然后对得到的数据进行 Pauli 极化相干分解,分别得到 3 种散射机制系数 K1, K2 和 K3,并且将这 3 个系数转化为散射强度;随后统计分析不同地物类型散射强度值;最后选取合适的散射机制,利用区域生长法和数学形态学中的形态膨胀腐蚀和去除短枝处理提取九段沙潮沟信息(图 2)。

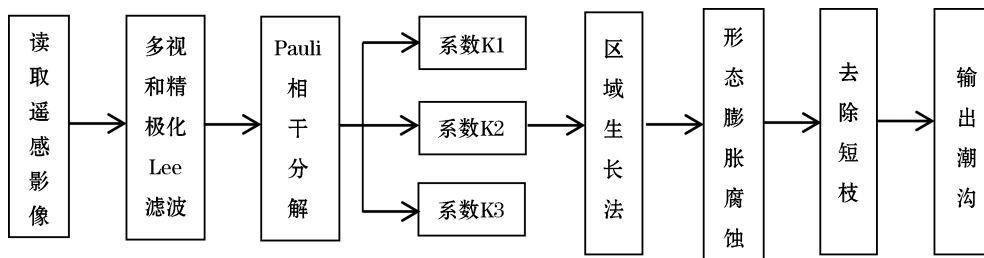


图 2 九段沙潮沟信息提取流程

Fig.2 Flow chart of the tidal channel extraction

2.1 数据预处理

对获取到的 Radarsat-2 全极化数据进行多视处理,比例为 4:2,之后对多视处理后的图像采用精极化 Lee 滤波进行相干斑滤波,对比其结果,发现 5×5 窗口对降低相干斑噪声的效果较好,同时九段沙地物和潮沟的边缘信息保持得比较清晰完整。

2.2 全极化 SAR 数据的 Pauli 分解

全极化 SAR 数据目标分解主要是基于极化数据的散射矩阵来揭示不同散射体的物理表现形式,这样可以更好地认识和利用极化信息来提取目标信息。其优势是可以将复杂地物回波信号分解为多个简单的标准目标回波信号之和,通过分析不同散射机制下的各分量获得原目标的信息^[12]。由于极化分解技术与获取目标信号中的相位有关,Pauli 目标分解的散射特征参数能够准确获得与其地物物理特性相对应的极化特征,同时可在一定程度上抑制 SAR 成像系统自身产生的相干斑噪声,即使在有噪声或去极化效应的情况下,仍然可以用它进行分解,这样很好地保持了目标信息的完整性。

Pauli 分解是基于极化散射矩阵 $\mathbf{S}$,通过定义不同的极化基矩阵提取极化特征的方法,不同的极化基矩阵代表不同的地物类型^[13]。

首先定义基本的散射矩阵,称为 Pauli 基 $\{\mathbf{S}_a, \mathbf{S}_b, \mathbf{S}_c, \mathbf{S}_d\}$, 公式为

$$\begin{cases} \mathbf{S}_a = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}_b = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}_c = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{S}_d = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \end{cases}, \quad (1)$$

式中, a 为单次散射强度; b 为入射角 0° 的偶次散射强度; c 为入射角 45° 的偶次散射强度; d 为 $\mathbf{S}$ 矩阵中反对称组分的强度; $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 表示奇次散射,指表面散射,如地面等; $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 表示偶次散射,指二面角散射,如建筑物和树干等; $\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$ 表示 $\pi/4$ 偶次散射,指体散射,如灌木和树冠等; $\begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$ 表示不存在的地物类型,因此 d 取值为零^[8]。

基于已定义的 Pauli 基,对于本文将研究的散射矩阵,式(1)可以写成:

$$[\mathbf{S}] = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{HH} & \mathbf{S}_{HV} \\ \mathbf{S}_{VH} & \mathbf{S}_{VV} \end{bmatrix} = a[\mathbf{S}_a] + b[\mathbf{S}_b] + c[\mathbf{S}_c] + d[\mathbf{S}_d], \quad (2)$$

式中, H 表示水平方向, V 表示垂直方向, $\mathbf{S}_{VH}$ 表示水平极化发射、垂直极化接收的回波强度。可以写成向量 $\mathbf{K}$ 的形式:

$$\mathbf{K} = [a \ b \ c \ d] = \frac{1}{\sqrt{2}} [\mathbf{S}_{HH} + \mathbf{S}_{HV} \quad \mathbf{S}_{HH} - \mathbf{S}_{VV} \quad \mathbf{S}_{HV} + \mathbf{S}_{VH} \quad i(\mathbf{S}_{VH} - \mathbf{S}_{HV})]^T. \quad (3)$$

当介质满足互易条件时, $\mathbf{S}_{HV} = \mathbf{S}_{VH}$, 公式(3)变为

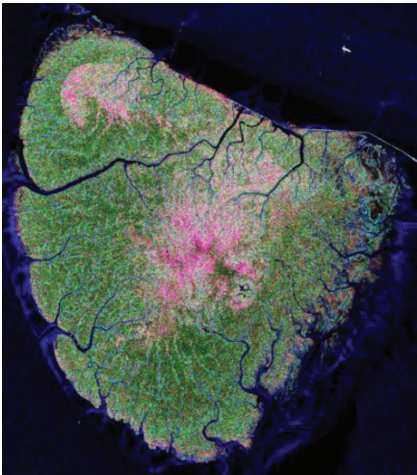
$$\mathbf{K} = [a \ b \ c] = \frac{1}{\sqrt{2}} (\mathbf{S}_{HH} + \mathbf{S}_{VV} \quad \mathbf{S}_{HH} - \mathbf{S}_{VV} \quad 2\mathbf{S}_{HV})^T. \quad (4)$$

Pauli 相干极化分解将极化散射矩阵 $\mathbf{S}$ 反映到 3 个基本散射类型上,分别为奇次散射、绕轴旋转 0° 的二

面角散射和绕轴旋转 45°的二面角散射。

经过数据预处理后的 Pauli 分解结果表明(图 3):在平坦表面的区域,如河流、潮沟等表现得相对平滑,呈现出奇次散射,Pauli 分解的结果呈现蓝色,这是因为奇次散射是水域的主要散射类型;在陆地上由于受到低矮植被的影响,绝大部分呈现绿色,主要为二面角散射,植被主要分布在潮沟附近;九段沙的中沙和下沙的中心区域呈现偏红色,这是由于这两处区域受到高大芦苇的影响,呈现为 45°的二面角散射。

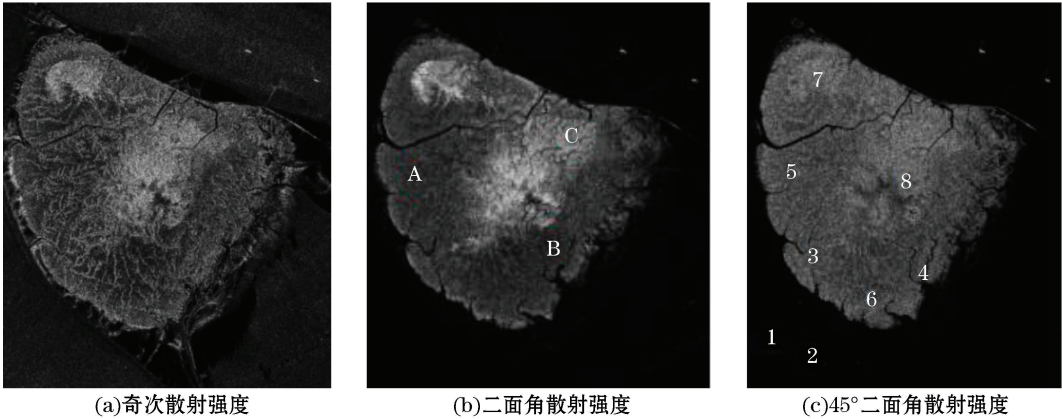
潮沟、水体、低矮植被和芦苇是九段沙典型的 4 种地物类型,为了更好地分析它们的物理散射特性,将 Pauli 分解的 3 个系数转化成散射强度(图 4)。每种地物类型选择 2 个区域,共 8 个区域(图 4c),每个区域内选择 40 个采样点。统计分析这 4 种典型地物的 3 种散射强度值,结果见表 1。可以看出,芦苇的奇次散射强度平均值远大于其他 3 种地物类型的奇次散射强度平均值,潮沟和水体的奇次散射强度值较为接近,分别为 0.040 和 0.038,所以,其可以被看作是平静的表面。相对于潮沟和水体,低矮植被的奇次散射强度值并没有太大的变化。在九段沙典型类型地物中,各种散射机制分布较为复杂,其中植被的二面角散射成分更多些,这主要是由于九段沙低矮植被与地面形成散射的结果。从表 1 也可以看出,研究目标潮沟的



注:蓝色为奇次散射成分,绿色为二面角散射成分,红色为 45°二面角散射成分

图 3 Pauli 分解结果的假彩色图

Fig.3 The false color composite image of Pauli decomposition



注:图 b 中 A,B 和 C 分别代表潮沟 A,潮沟 B 和潮沟 C;图 c 中数字 1~8 代表地物类型,1 和 2 为水体,3 和 4 为潮沟,5 和 6 为低矮植被,7 和 8 为芦苇

图 4 Pauli 分解的散射强度

Fig.4 The scattering intensity image of Pauli decomposition

表 1 不同地物类型的散射强度值

Table 1 The statistics of the scattering intensities of different land types

地物类型	奇次散射强度平均值	二面角散射强度平均值	45°二面角散射强度平均值
水体	0.040	0.002	0.001
潮沟	0.038	0.007	0.002
芦苇	0.318	0.783	0.063
低矮植被	0.070	0.104	0.036

二面角散射强度平均值为 0.007,而低矮植被和芦苇的二面角散射强度平均值分别为 0.783 和 0.104,相较于奇次散射和 45°二面角散射强度值,潮沟和植被的强度平均值差异较大。因此,Pauli 分解中二面角散射系数更能体现出潮沟和植被之间的差异性。

2.3 基于区域生长法和数学形态学的潮沟信息提取

为了进一步分析分解参数的选择对潮沟信息的提取效果,我们在 Pauli 分解的二面角散射强度图像上选取具有代表性的 3 条潮沟(图 4b 中 A,B 和 C)作为研究对象,基于区域生长法和数学形态学提取潮沟信息。

2.3.1 区域生长法

区域生长法的基本原理是:在每个分割的区域找种子像素作为生长的起点,再将种子像素周围邻域中与种子像素有相同或相似性质的像素(根据某种事先确定的生长或相似准则来判断)合并到种子像素所在的区域中,然后将这些新像素当作新的种子像素继续进行上述过程,直到再没有满足条件的像素可被包括进去^[14]。

区域生长法提取潮沟信息的步骤主要有 5 步^[15]:

- 1) 输入原始图像,选择初始种子点并标记为潮沟点,并对原始图像进行掩膜;
- 2) 取出种子点,计算其与邻域中其他像素的灰度差;
- 3) 将灰度差小于给定阈值的像素点与种子点合并,继续生长并且覆盖掩膜;
- 4) 阈值分割;
- 5) 输出潮沟提取结果。

在运用区域生长法提取潮沟信息过程中,不同潮沟的复杂程度不一样,选取种子点的个数也是不同的。潮沟 A,由于土壤出露,因此选择 2 个种子点;潮沟 B,在 2 个分叉分别选择 1 个种子点,共计 2 个种子点;潮沟 C,由于空间结构较复杂,则在每级分叉都选择的潮沟选择 1 个种子点,共选择 3 个种子点。

2.3.2 数学形态学

数学形态学主要是以膨胀、腐蚀为基础,使用这 2 种简单基础的运算来推导其他较为复杂的运算以实现图像处理,具有计算快、算法较为简单的特点。对潮沟信息进行数学形态学处理可以改善潮沟信息在提取时发生的断裂情况,并且可以降低潮沟信息中的噪声。4 种基本的算子包括膨胀和腐蚀运算、结合膨胀和腐蚀的开运算和闭运算。

- 1) 膨胀和腐蚀,记 M 为要处理的图像, N 为结构元素, x 为图像 M 中的一个点:

$$\text{腐蚀: } M \ominus N = \{x \mid N + x \cup x \neq \Phi\}. \quad (5)$$

$$\text{膨胀: } M \oplus N = \{x \mid N + x \subseteq M\}, \quad (6)$$

式中, Φ 为空集。

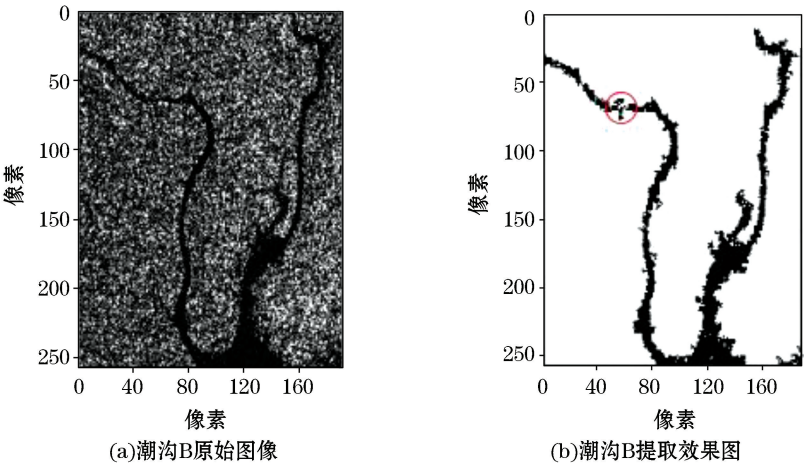
- 2) 结合膨胀和腐蚀的其他运算主要有:

$$\text{开运算: } M \circ N = (M \ominus N) \oplus N, \quad (7)$$

$$\text{闭运算: } M \bullet N = (M \oplus N) \ominus N. \quad (8)$$

选取的 3 条潮沟的发育形态和地理位置都不相同,提取这 3 条潮沟的信息,可以检验 Pauli 分解出的二面角散射机制对整体潮沟的提取效果。首先以潮沟 B 为对象利用该方法提取信息,提取效果如图 5 所示。采用同样的方法对潮沟 A 和潮沟 C 提取信息,提取效果如图 6 所示。

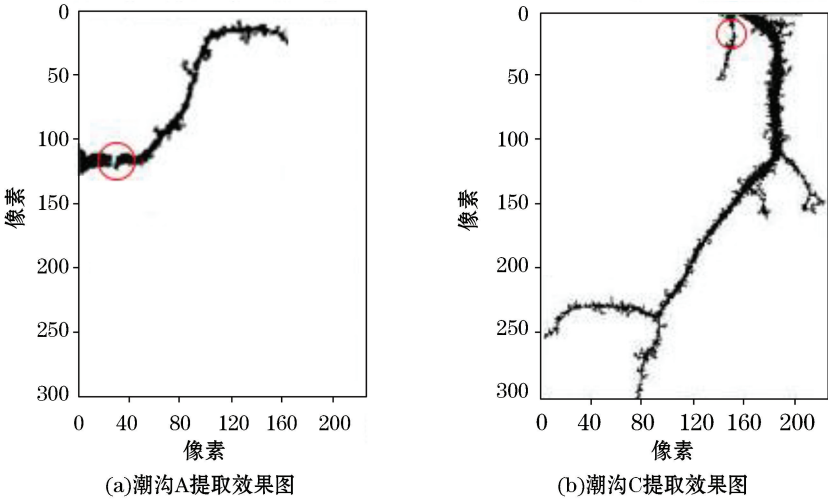
从图 6 可以看出,利用区域生长法对经过 Pauli 分解后的二面角散射系数进行潮沟 A,B 和 C 提取的总体效果较好,但是在提取潮沟信息的过程中,有些潮沟有断裂现象,并且出现了一些非潮沟,如图 5b 和图 6 中圆圈标记出来的潮沟显示,它们并没有生长到一起。这主要是因为该区域原始图像潮沟边缘受植被的遮挡或者由潮沟中的土壤出露影响所致。另外,由于区域生长法的阈值的设置,也会导致一些非潮沟信息被提取出来。针对区域生长法提取过程中出现的问题,利用数学形态学进行了进一步的处理。



注:图 b 圆圈位置表示区域生长法提取潮沟时出现的断裂位置

图 5 潮沟 B 原始图像及其提取效果图

Fig.5 Raw image and the extracted result of tidal channel B



注:图中圆圈位置表示区域生长法提取潮沟时出现的断裂位置

图 6 潮沟 A 和 C 信息提取效果

Fig.6 Extracted tidal channels (A and C)

对于潮沟断裂现象,考虑到潮沟在图像上呈现出形态细长和曲率变化较大的特点,选取了尺寸较小的结构元素进行膨胀腐蚀处理。这样不仅可以使断裂的潮沟得到连接,而且不会导致提取的潮沟长度和宽度发生变化。本文对选取的潮沟采用 3×3 正方形结构元素(图 7)进行先膨胀后腐蚀处理,直到断裂潮沟被连接上为止。

由于区域生长法和数学形态学分别对潮沟提取和断裂连接过程中会产生非潮沟像素点,因此在此基础上利用 `spur` 函数进行去除毛刺处理,函数值根据实验要求进行设定,最后得到较为完整的潮沟信息,利用同样的方法提取了潮沟 B 和潮沟 C 的信息(图 8)。



图 7 正方形结构元素

Fig.7 Square structural elements

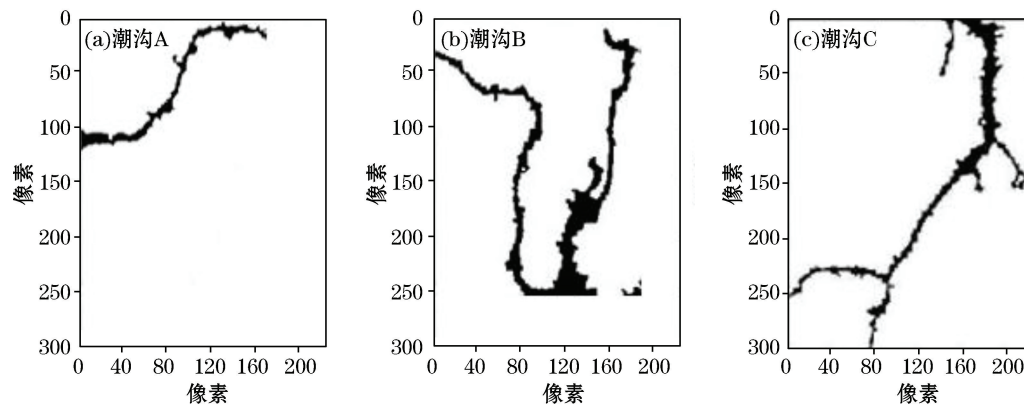


图8 潮沟 A, B 和 C 信息提取效果

Fig.8 Extracted tidal channels (A, B and C)

3 结 语

通过对长江口九段沙地区 SAR 影像进行 Pauli 目标极化分解,分析了研究区不同地物的散射特性,最后利用区域生长法和数学形态学进行了潮沟信息提取,得到主要结果:

1)利用目标分解技术对长江口九段沙进行 Pauli 分解,可以将九段沙不同地物类型的散射回波简单化。

2)Pauli 目标极化分解出的奇次散射、二面角散射和 45° 二面角散射的特征参数能够反映出水体、潮沟、低矮植被和芦苇之间的地物差异,其中二面角散射差异最大。潮沟的二面角散射强度值为 0.007,低矮植被和芦苇的散射强度值为 0.783 和 0.104。

3)利用二面角散射参数,结合区域生长法和数学形态学可以有效地提取潮沟信息。

参考文献(References):

- [1] ARMANDO M, IRENA H. A change detector based on an optimization with polarimetric SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4781-4798.
- [2] ALBERGA V. A study of land cover classification using polarimetric SAR parameters[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(17): 3851-3870.
- [3] STEFAN U, SERKAN K. Integration color features in polarimetric SAR image classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(4): 2197-2216.
- [4] CLOUD S R, POTTIER E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR[J]. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 68-78.
- [5] FREEMAN, DURDEN S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 963-973.
- [6] YAMAGUCHI Y, MORIYAMA T, ISHIDO M, et al. Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(8): 1699-1706.
- [7] DASARI K, LOKAM A, JAYASRI P V. A study on utilization of Polarimetric SAR data in planning a smart city[J]. Procedia Computer Science, 2016, 93: 967-974.
- [8] CHEN J, DU P J, TAN K. A supervised classification algorithm based on Pauli decomposition and SVM on polarimetric SAR image[J]. Science Technology and Engineering, 2014(17): 104-108. 陈军, 杜培军, 谭琨. 一种基于 Pauli 分解和支持向量机的全极化合成孔径雷达监督分类算法[J]. 科学技术与工程, 2014(17): 104-108.
- [9] MA T, WANG Y Q, LI R P, et al. Land cover/land use classification based on polarimetric target decomposition of microwave remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 259-265. 马腾, 王耀强, 李瑞平, 等. 基于微

- 波遥感极化目标分解的土地覆盖/土地利用分类[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 259-265.
- [10] GENG X M, LI X M, VELOTTO D, et al. Study of the polarimetric characteristics of mud flats in an intertidal zone using C- and X-band space borne SAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 176: 56-68.
- [11] TANG C J, LU J J. Studies on plant community on the Jiuduansha shoals at the Yangtze Estuary[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(2): 399-403. 唐承佳, 陆健健. 长江口九段沙植物群落研究[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 399-403.
- [12] WANG Q, ZENG Q M, LIAO J J. Feature extraction and classification of SAR image based on target decomposition and scattering mechanism index[J]. Remote Sensing Information, 2012(2): 9-14. 王庆, 曾琪明, 廖静娟. 基于特征向量分解与散射机制判别指数的全极化 SAR 图像地物提取与分类[J]. 遥感信息, 2012(2): 9-14.
- [13] CHEN J S, SHAO Y, LI Z. Neural networks classification of quad-polarization SAR data based on target decomposition[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(5): 42-46. 陈劲松, 邵芸, 李震. 基于目标分解理论的全极化 SAR 图像神经网络分类方法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(5): 42-46.
- [14] LUO J H, FENG P. Application of MATLAB7.0 in image processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 213. 罗军辉, 冯平. MATLAB7.0 在图像处理中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 213.
- [15] GUO Y F, HAN Z, ZHANG K. Information extraction with region growing method and fractal dimension research in the Jiuduansha tidal channels of Yangtze River Estuary[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011(2): 31-35. 郭永飞, 韩震, 张琨. 长江口九段沙潮沟信息区域生长法提取及分维研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011(2): 31-35.

Information Extraction of Tidal Channels Based on the Scattering Parameter of Pauli Decomposition

ZHU Yan-jiang¹, HAN Zhen^{1,2}, HE Si-hai¹

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China)

Abstract: Jiuduansha in the Yangtze River Estuary was chosen as the study area to explore the method of tidal channel extraction from the full polarization Radarsat-2 image. Multi-look processing and refined Lee filter were applied to the image which was acquired on April 5th, 2015. Then the Pauli polarization decomposition was used to extract the singular scattering coefficient, dihedral scattering coefficient and 45° dihedral scattering coefficient for different types of ground objects, including water bodies, tidal channel, low vegetation and reed. The results showed that the tidal channel and water body had similar singular scattering coefficients (0.040 versus 0.038) and 45° dihedral scattering coefficients (0.001 versus 0.002), whereas the dihedral scattering coefficient of the tidal channel (0.007) showed noticeable distinction with those of low vegetation (0.783) and reed (0.104). The dihedral scattering coefficient was thus selected as the index to detect the tidal channel, and the information of tidal channels in the study area was derived accordingly with the methods of regional growth and mathematical morphology.

Key words: Pauli decomposition; scattering; polarization; tidal channel; the Yangtze River estuary

Resived: May 11, 2018