

# 星载 SAR 水域分割研究进展与趋势分析<sup>①</sup>

牛世林 郭拯危 李 宁 毋 琳 赵建辉

(河南大学 计算机与信息工程学院,河南 开封 475004)

**摘 要** 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动微波成像传感器,能够不受天气、光线以及云层的影响,实现全天候、全天时的成像.因此,SAR 图像已成为遥感水域监测的主要数据源之一.该文从技术方法的角度出发,论述了近年来国内外基于 SAR 图像进行水域分割的几种方法及其典型应用,从技术原理、实验效果等方面对各个方法进行了介绍,最后对星载 SAR 水域分割技术的发展趋势进行了分析和展望.

**关键词** 合成孔径雷达(SAR);遥感;水域分割

**中图分类号** TN959

**文献标识码** A

## 0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式的微波成像传感器,获得的图像能够反映目标散射特性.与传统光学遥感和高光谱遥感相比,SAR 具备全天候、全天时的成像能力,并具有一定的穿透性,在多云多雨天气下也能进行有效的对地观测,是人类获取地物信息的一种重要技术手段<sup>[1]</sup>.由于以上优势,SAR 技术已成为遥感监测大型湖泊、海岸线等水域的主要途径之一.

水域作为区域陆地水循环中的一个重要载体,与河流、湖泊、海洋等紧密相关,对区域生态系统的发展有着重要的影响.研究水域信息对洪涝灾害的预报、预警、监测,以及环境与水资源的全面调查、合理规划等具有十分重要的意义,同时可以为农业灌溉、区域水管理等工作提供数据支持和指导建议<sup>[2]</sup>.近年来,利用 SAR 图像提取水域的研究已经取得了很多成果,各种基于 SAR 图像水域分割算法不仅实现了水域信息的自动识别,且精度也在日益提高.伴随着 SAR 技术的持续发展,获取水域的方式不再局限于单幅图像的处理,多极化、多波段、多数据源融合、以及 InSAR 等多种技术手段越来越多地被应用于该项研究中.

本文围绕近几年基于星载 SAR 技术的水域分割方法的研究进展与发展趋势展开论述.第 1 部分简述了目前星载 SAR 的发展现状.第 2 部分论述了星载 SAR 水域分割的各种方法及应用,第 3 部分对星载 SAR 水域分割技术的发展趋势进行了展望,第 4 部分是本文总结.

## 1 星载 SAR 的发展现状

SAR 能够全天候、全天时获取高精度、连续覆盖的地面散射信息、地面高程信息和地表形变信息,具有地表多维度成像能力,在地形测绘、重大工程设施形变监测(铁路、桥梁、大坝和高楼等)、全球环境变化(冰川消融、冻土退化、冰川漂移、极地冰层变化等)、灾害监测评估(地震地壳形变、火山运动、山体滑坡、区域地面沉降等)、能源资源勘查(油气田开采、矿藏资源开采、地下水抽采等)等相关领域得到广泛应用<sup>[3]</sup>.纵观星载 SAR 技术 40 年的发展历史,面向不同应用需求的各种先进星载 SAR 系统不断出现.美国成功发射了第一颗星载 SAR 卫星 Seasat-1 以来<sup>[4]</sup>,星载 SAR 逐渐成为对地观测领域的研究热点,各国先后发射了数十颗 SAR 卫星<sup>[5-11]</sup>.本节将介绍常见的几颗星载 SAR 卫星,部分在轨 SAR 卫星如表 1 所示.

① 收稿日期:2018-03-16

基金项目:国家自然科学基金项目(U1604145,61601437);河南省高校重点研究项目(18B520016);河南省科技计划项目(182102210233)资助

通讯作者:李宁,男,汉族,博士,教授,研究方向:雷达技术,E-mail:lining\_nuaa@163.com.

表 1 部分在轨 SAR 卫星

SAR 卫星/星座	COMSO-Skymed	TerraSAR-X 姊妹星	Sentinel-1	Radarsat-2	ALOS-2	GF-3	RISAT-1	KompSat-5
国家	意大利	德国	欧空局	加拿大	日本	中国	印度	韩国
服役年份/年	2007	2007	2014	2007	2014	2016	2012	2013
波段	X	X	C	C	L	C	C	X
重访周期/d	16	11	6	24	14	29	未知	未知
轨道高度/km	500	619.6	693	600	628	755	609	550

### 1.1 TerraSAR-X/TanDEM-X<sup>[6]</sup>

TerraSAR-X 是德国研制的一个可军民两用的雷达成像卫星(如图 1 (a)所示),工作在 X 波段,具备全极化的能力.该卫星于 2007 年 6 月 15 日发射成功并开始服役.作为 TerraSAR-X 的姊妹星,TanDEM-X 卫星于 2010 年发射成功,两颗卫星协同工作,完成对地表的三维测量,精度可达到 2 m.

### 1.2 ERS-1/2 & ENVISAT-1<sup>[7]</sup>

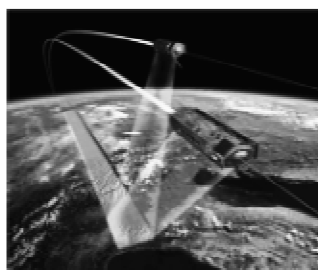
ERS-1、ERS-2 和 ENVISAT-1 由欧空局(European Space Agency,ESA)研制、发射并管理.ERS-1 卫星是 ESA 的第一颗对地观测卫星,它于 1991 年 7 月 17 日发射升空,2000 年 3 月 10 日停止工作.ERS-1 卫星的后继星 ERS-2 卫星于 1995 年 4 月 21 日发射,2010 年 7 月 1 日停止工作.ENVISAT-1 的载荷为先进合成孔径雷达(ASAR),于 2002 年 3 月 1 日发射升空,2012 年 4 月 8 日停止工作.这些 SAR 卫星的分辨率可达到 30 m.

### 1.3 Sentinel-1<sup>[8]</sup>

Sentinel-1 系列卫星是 ESA 第一套用于环境监测和安全监控的雷达卫星,该系列包含两颗 C 波段 SAR 卫星,其中 Sentinel-1A(如图 1 (b)所示)于 2014 年 4 月 3 日发射升空并服役,Sentinel-1B 于 2016 年 4 月 25 日发射升空并服役,其重访周期为 6 d.

### 1.4 高分三号<sup>[11]</sup>

高分三号(GF-3)卫星是中国第一颗分辨率达到 1 m 的全极化 C 波段 SAR 民用卫星(如图 1 (c)所示),是高分对地观测系统中重要的一员,具备 12 种工作模式:聚束、超精细条带、精细条带 1、精细条带 2、标准条带、窄幅扫描、宽幅扫描、全极化条带 1、全极化条带 2、波成像模式、全球观测成像模式、扩展入射角模式.重访周期为 29 d.



(a) TerraSAR-X/TanDEM-X



(b) Sentinel-1A



(c) GF-3

图 1 卫星示意图

## 2 星载 SAR 水域分割方法及应用

SAR 图像反映的是地物对雷达波束反射的信息,主要是地物目标对雷达发射信号的后向散射信息形成的灰度图像.散射指标被称为后向散射系数(Backscatter Coefficient),影响后向散射系数的因素主要分为两类:一是雷达系统的工作参数,如工作波长、入射角、极化方式等;二是地物目标的类型,如山体、水体、树木以及表面的粗糙程度等因素.

水域在雷达图像中的反射特性大致可分为以下三种情况:

(1) 平静的水面,如水库、平静的内陆湖等区域.由于水面平静,水面会对雷达波束产生镜面反射,导致后向散射系数较低,在 SAR 图像中呈现黑色较暗区域,与其它地物有明显区分.

(2) 由中低风或其他原因造成的具有轻微波澜的水面.水面后向散射系数会有一定的提升,主要表现

为布拉格散射,但相比陆地的后向散射强度,其反射依然相对较弱。

(3) 波涛汹涌的水面,如在台风之下的海面. 由于水面波动非常剧烈,可能会导致后向散射系数非常大,甚至出现反射信号过强,雷达接收机过饱和现象,在 SAR 图像中会呈现非常亮的区域。

图 2 是 GF-3 卫星拍摄的丹江口水库、太湖、台湾海峡海面的 SAR 图像,其中图 2(a)为丹江口水库,由于水库水面比较平静,水面后向散射系数低,水域区域呈现黑色. 图 2(b)为太湖,由于低风导致水面稍有波澜,后向散射系数稍有增大,水域区域比平静水面灰度值略高. 图 2(c)为台湾海峡海面,图像中无任何陆地或岛屿,但有很大一部分区域的灰度值很高,这是由于海面较大的风浪导致的后向散射系数增大的结果。

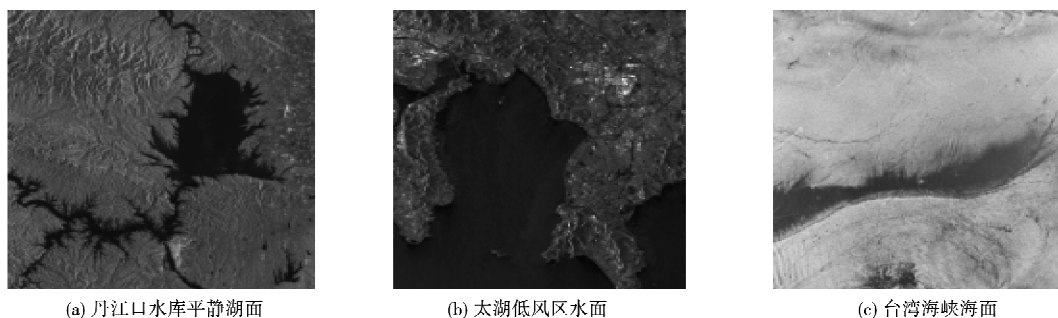


图 2 GF-3 获取的 SAR 图像

基于以上情况,本文介绍的水域分割算法主要适用于在平静水面或具有轻微波澜的水面进行水域分割. 下面就不同水域分割方法分别予以论述。

### 2.1 阈值分割法

阈值分割是一种简单有效的图像分割方法,它利用一个或多个阈值对图像灰度级进行划分,灰度值在同一阈值范围内的被认定为同一类型地物. 阈值分割法计算简单,效率非常高,但抗噪声能力较弱. 由于 SAR 图像属于灰度图像,基于阈值的分割方法被广泛应用于 SAR 图像水域分割中<sup>[12-21]</sup>。

2.1.1 基于阈值分析后向散射系数进行二值化. 由前述内容可知 SAR 图像中水体的特征,文献[16]中,Zeng 等人对 2017 年鄱阳湖水域的 Sentinel-1A 图像进行研究,通过对水体后向散射系数与像素数目直方图的分析,将分割阈值确定为  $-16.35$  dB,低于该值的像素点被认定为水体区域. 通过这种阈值方法,可以将图像转换为可区分水域和陆地的二值图像,从而进行后续的水体信息分析. 如图 3 所示,其中图 3(a)为后向散射系数与像素数目直方图,图 3(b)为鄱阳湖原始的 Sentinel-1A 图像,图 3(c)为经过阈值分割后的二值图像,其中白色区域为水域,黑色区域为非水域。

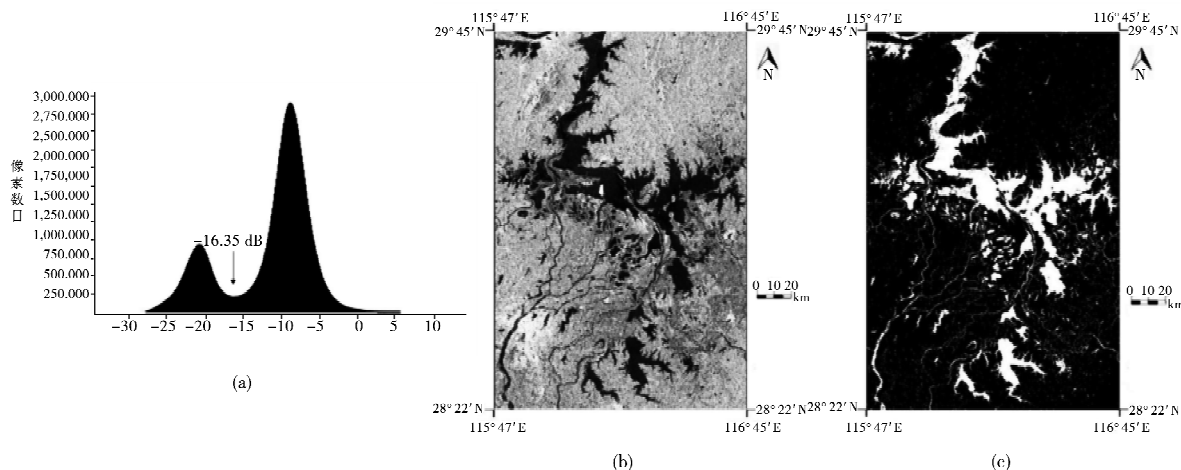


图 3 Sentinel-1A 鄱阳湖 SAR 水域分割<sup>[16]</sup>

2.1.2 全局阈值分割. 全局阈值法是指利用整个图像的信息,例如统计图像的灰度直方图,求出最优阈值并进行分割,这里的阈值可以是单个也可以是多个. 文献[17]中,Sun 等人于 2016 年使用 COMSO-Skymed 卫星获取的 12 景鄱阳湖地区 SAR 图像,采用全局阈值分割方法,对鄱阳湖水域进行分割,并进行时间序列分析. 图 4 是 2014 年 1 月到 12 月鄱阳湖水域分布情况,其中蓝色区域表示水域。

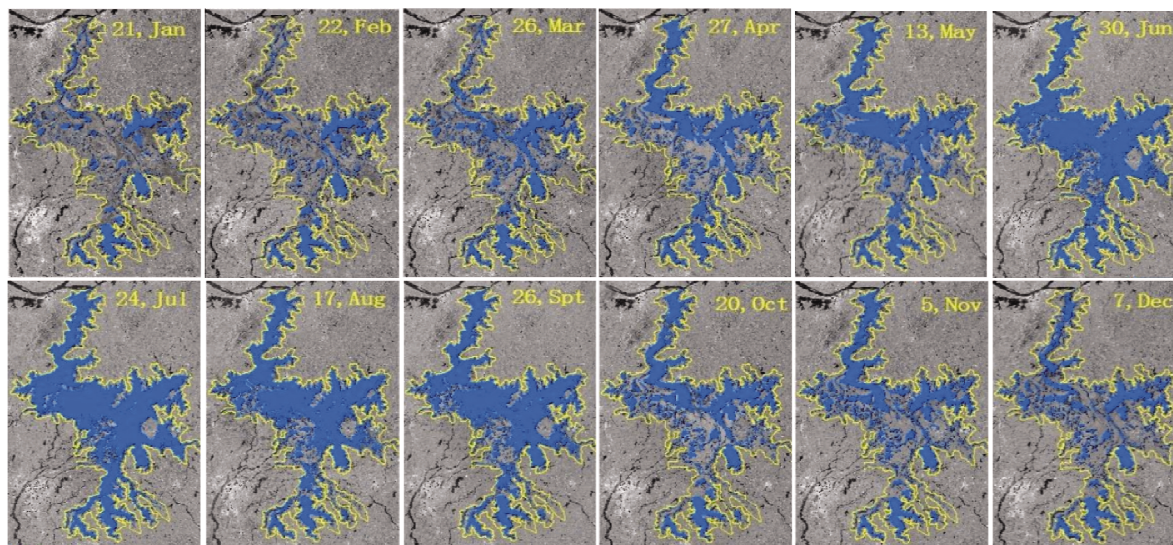


图 4 COMSO-Skymed 鄱阳湖 2014 年 SAR 时间序列<sup>[17]</sup>

2.1.3 基于最大类间方差法的阈值分割. 最大类间方差法又称大津法(Otsu)<sup>[18]</sup>, 基于灰度直方图将图像分为背景和前景两部分, 二者之间的类间方差越大, 两部分的差别越大, 分割错误概率就越小. 由于 SAR 图像是反映后向散射系数的灰度图, 因此 Otsu 方法在 SAR 图像水域分割中也有着广泛的应用<sup>[19-21]</sup>.

文献<sup>[19]</sup>中, Guo 等人于 2017 年提出一种改进的二维 Otsu 算法, 并将其应用在 TerraSAR-X 卫星的 SAR 图像水域分割上. 传统二维 Otsu 算法考虑的是邻域灰度信息, 这个改进算法将邻域灰度信息替换为纹理特征, 从而提高了算法的实用性. 这里用到的纹理特征包括对比度、熵、同质性等因素. 结果如图 5 所示, 其中图 5(a)为原始数据, 图 5(b)为传统二维 Otsu 算法分割结果, 图 5(c)为改进的二维 Otsu 算法分割结果.



图 5 TerraSAR-X 数据使用二维 Otsu 检测水域<sup>[19]</sup>

### 2.2 边缘检测方法

SAR 图像中很多地物信息的提取是基于边缘划分结果得到的. 边缘一般在图像中表现为局部特征不连续, 且灰度值变化比较大. 由于水体后向散射系数与陆地相差较大, 水体与陆地边缘的灰度值会明显变化, 因此边缘检测方法也常常作为 SAR 图像水域分割的一种有效的方法<sup>[21-25]</sup>. 该方法最大优点是计算量小、速度快, 缺点是抗噪声能力较弱, 适用于简单场景中. 本节将介绍常用的 Sobel、Canny 和 ROEWA 算子在 SAR 图像水域分割中的应用.

2.2.1 Sobel 算子. Sobel 算子含有两个  $3 \times 3$  的卷积核, 如图 6 所示, 分别用于检测横向和纵向边缘. 像素权值大小与距离有一定关系. Sobel 算子考虑了邻域灰度的权值, 不但可以得到较好的检测结果, 对噪声也具有一定的平滑作用.

-1	-2	-1	-1	0	1
0	0	0	-2	0	2
1	2	1	-1	0	1

图 6 Sobel 算子卷积核

文献<sup>[23]</sup>中, Wiehle 等人于 2015 年对 TerraSAR-X 获取的 2013 年 11 月与 12 月两景瓦登海某个岸边的 SAR 图像, 采用 Sobel 算子提取海岸线, 结果如图 7 所示, 其中绿色线为 Sobel 算子检测到的海岸线, 蓝色线为地标海岸线.

2.2.2 Canny 算子. Canny 算子是一种边缘检测算子, 它先使用 Gauss 滤波器对图像进行平滑滤波, 再对平滑后的图像应用 Sobel 算子, 获取水平方向和竖直方向上的一阶导数与, 再获取边缘的梯度 M 和方向

Q,最后进行非极大值抑制.由于在梯度矩阵中,极大值不一定是边缘,因此需要对整幅图像进行扫描,保留相同方向下梯度值最大的像素点作为边缘.

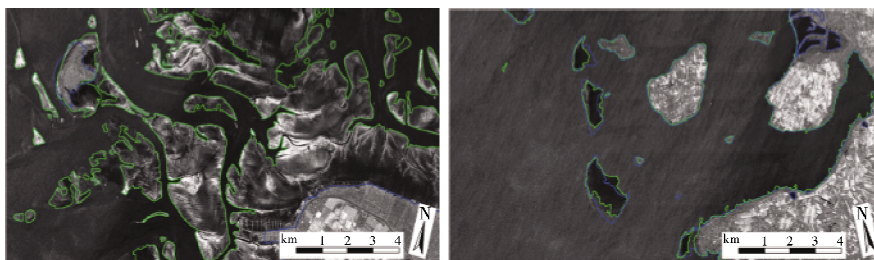


图7 Sobel算子提取 TerraSAR-X 瓦登海海岸线<sup>[23]</sup>

文献[24]中,Bachofer 等人于 2013 年对 TerraSAR-X 获取的坦桑尼亚北部马尼雅拉湖 SAR 图像,使用 Canny 算子提取到湖岸线,结果如图 8 所示,其中图 8 (a)为该地区光学遥感图像,图 8 (b)为该地区 TerraSAR-X 的原始图像,图 8 (c)中红色线条为利用 Canny 算子提取到的湖岸线.

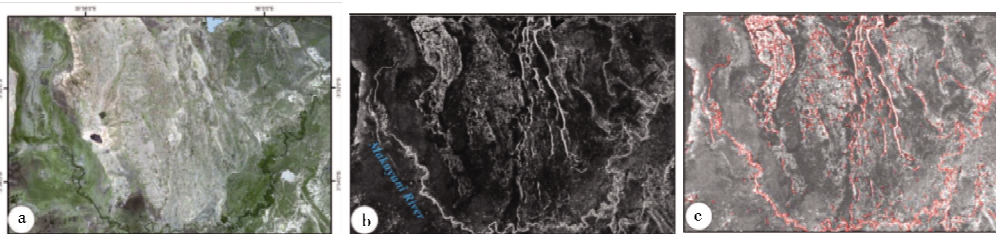


图8 Canny算子提取 TerraSAR-X 马尼雅拉湖湖岸线<sup>[24]</sup>

2.2.3 指数加权均值比算子.指数加权均值比(ROEWA)算子实质是一种基于线性最小均方误差(MMSE)的指数平滑滤波器.该算子采用多边缘模型<sup>[27]</sup>,并具有恒虚警率的特性.文献[25]中,吴戌等人于 2017 年针对 SAR 图像中大量人造地物导致强散射干扰的复杂情况,利用 ROEWA 算子对水域边缘进行特征提取.结果如图 9 所示,其中图 9(a)为原始 SAR 图像,黑色区域为水域区域,周围灰度值较高的区域为建筑物等人造地物,图 9(b)中白色线条为水域边缘的识别结果.

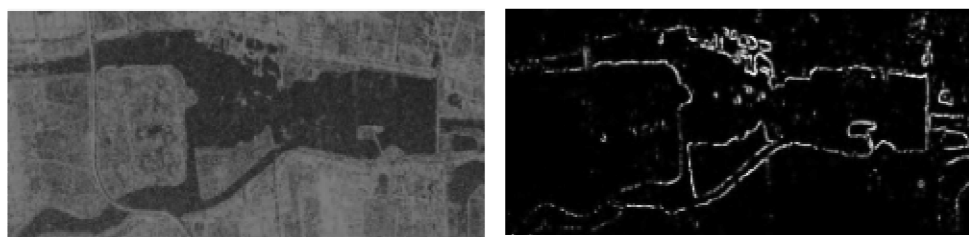


图9 Canny算子水域边界提取结果<sup>[25]</sup>

### 2.3 水平集方法

水平集(Level Set)算法是通过曲线演变实现分割的一种方法<sup>[29]</sup>.它需要一条初始轮廓,通过迭代控制曲线上的点朝着图像中梯度大的方向以不同的速率趋近,二维轮廓线被映射到三维曲面中,控制三维锥面运动可以实现二维曲线运动的控制.水平集方法有着优秀的拓扑自适应能力,如图 10 所示.该方法被广泛应用于 SAR 图像水域、河流、海岸线等地物的识别和检测中<sup>[30-40]</sup>,其优点是鲁棒性强、抗噪声能力强、缺点是计算量非常大、效率低.

文献[30,31]中,Silveira 等人于 2009 年对 2003 年到 2005 年由 EN-VIST-ASAR 获取的西班牙塔霍河的 4 景 SAR 图像,采用水平集方法提取水域边界.结果如图 11 所示,其中黄色线为设置的初始轮廓线,红色线为使用水平集方法提取的水域边界.

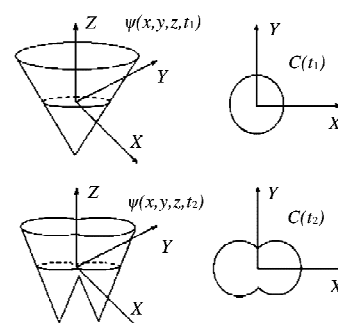


图10 水平集原理示意图

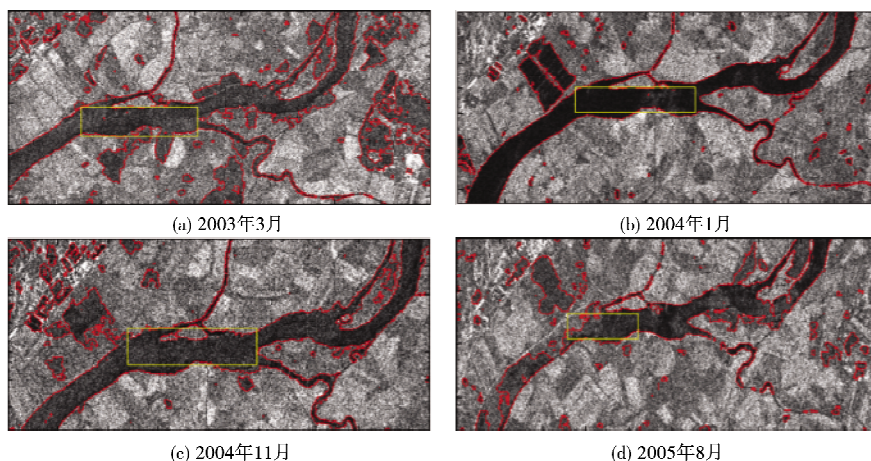


图 11 西班牙塔霍河 SAR 图像水域边界提取<sup>[30,31]</sup>

文献[40]中,Sui 等人于 2018 年以 RADASAT-2 获取的中国雁栖湖、雁荡湖 SAR 图像和 GF-3 卫星获取的中国松花江某区域 SAR 图像为实验数据,使用水平集方法分割水域,以 ASAR 获取的 30 m 分辨率、20 m 测高精度的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)提取到的轮廓作为水平集的初始边界,获得了良好的水域分割效果,结果如图 12 所示.

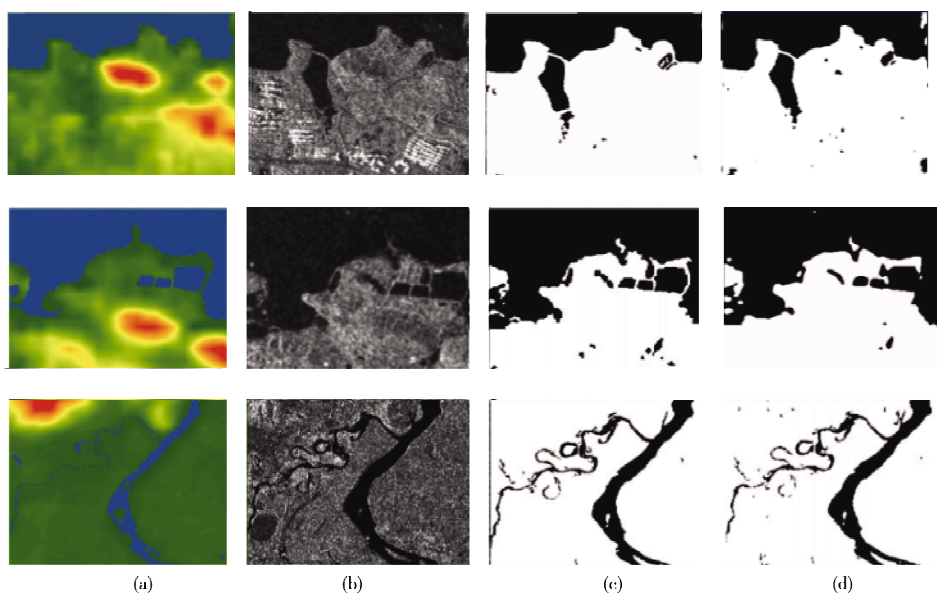


图 12 雁栖湖(第 1 行)、雁荡湖(第 2 行)、松花江(第 3 行)水域分割结果  
(a)该区域 DEM,(b)原始 SAR 图像,(c)实际水域,(d)水平集分割结果<sup>[40]</sup>

#### 2.4 主动轮廓模型法

1988 年,Kass 等人提出了一种主动轮廓模型(Active Contour Model, ACM),也称作 Snake 模型<sup>[41]</sup>,将图像分割问题转换为求解能量泛函数最小值问题. ACM 方法中,按照不同的轮廓曲线表达式可分为参数主动轮廓模型(Parametric ACM, PACM)和几何主动轮廓模型(Geometric ACM, GACM),按照曲线的演化方式又可分为基于边界的主动轮廓模型(Edge-Based ACM, EACM)和基于区域的主动轮廓模型(Region-Based ACM, RACM)<sup>[42]</sup>. ACM 方法以及其改进算法以其良好的鲁棒性和抗噪声能力被广泛应用于 SAR 图像水域边界检测中<sup>[43-60]</sup>. 但是该方法的缺点是计算量大、效率低.

文献[49,50]中,Li 等人于 2013 年将 ACM 方法应用于高分辨率机载 SAR 图像中,检测唐家山堰塞湖的水域区域. 唐家山堰塞湖是 2008 年汶川大地震中由于唐家山山体大量崩塌,两处相邻的巨大滑坡体夹杂巨石、泥土冲向湔江河道而形成的. 该堰塞湖蓄水量最大时超过了  $3.2 \text{ m}^3$ ,对下游的安全具有非常大的威胁. 堰塞湖区域如图 13 所示,图 13(a)为地震前 2001 年该区域的光学遥感图像,图 13(b)为地震后采用机载 SAR 获取到的该区域 SAR 图像. 图 14 是利用 ACM 方法获取到的堰塞湖水域轮廓,在此基础上

可以求出水域区域的面积,从而能够快速确定堰塞湖的危险度.

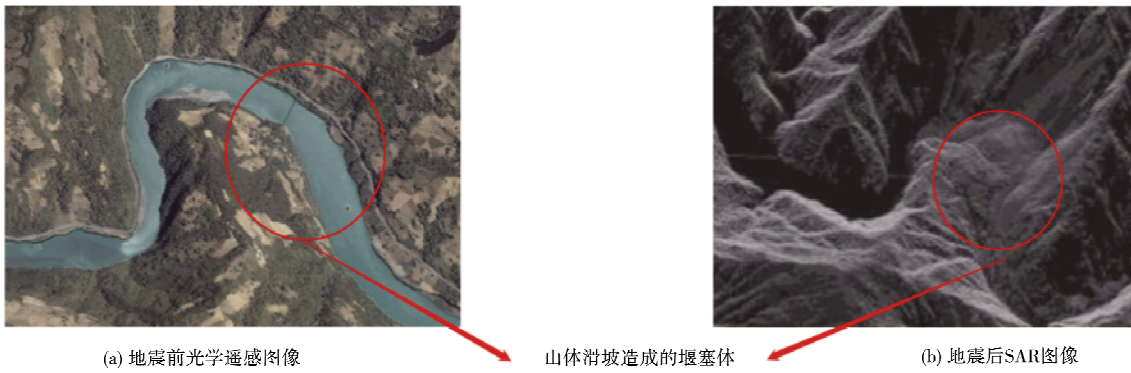


图 13 唐家山堰塞体光学遥感与 SAR 图像<sup>[49,50]</sup>

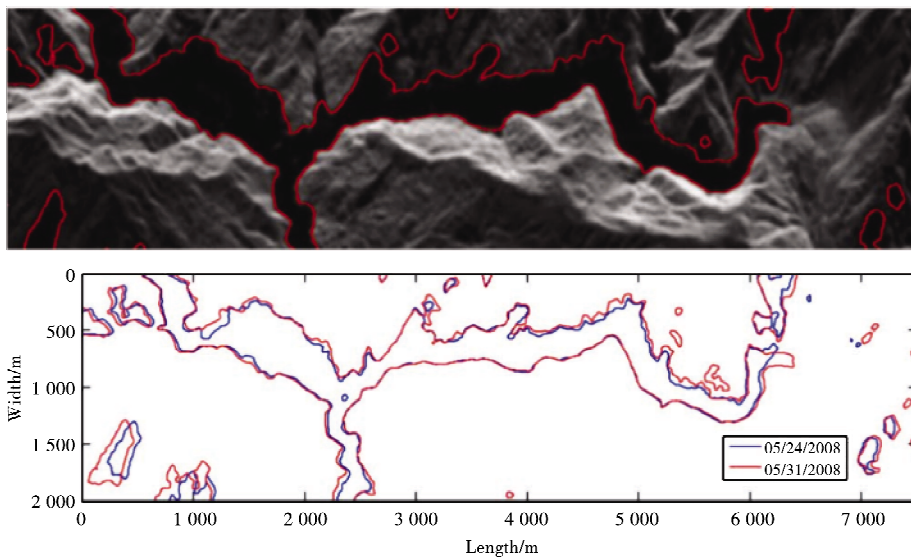


图 14 唐家山堰塞湖机载 SAR 图像水域分割结果<sup>[49,50]</sup>

文献[43]中,冷英等人于 2017 年使用基于窄带的 ACM 方法对 Sentinel-1A 获取的鄱阳湖水域时间序列 SAR 图像进行水域分割,并分析了 2016 年 1 月到 2016 年 7 月之间鄱阳湖水域分布情况,其结果如图 15 所示.

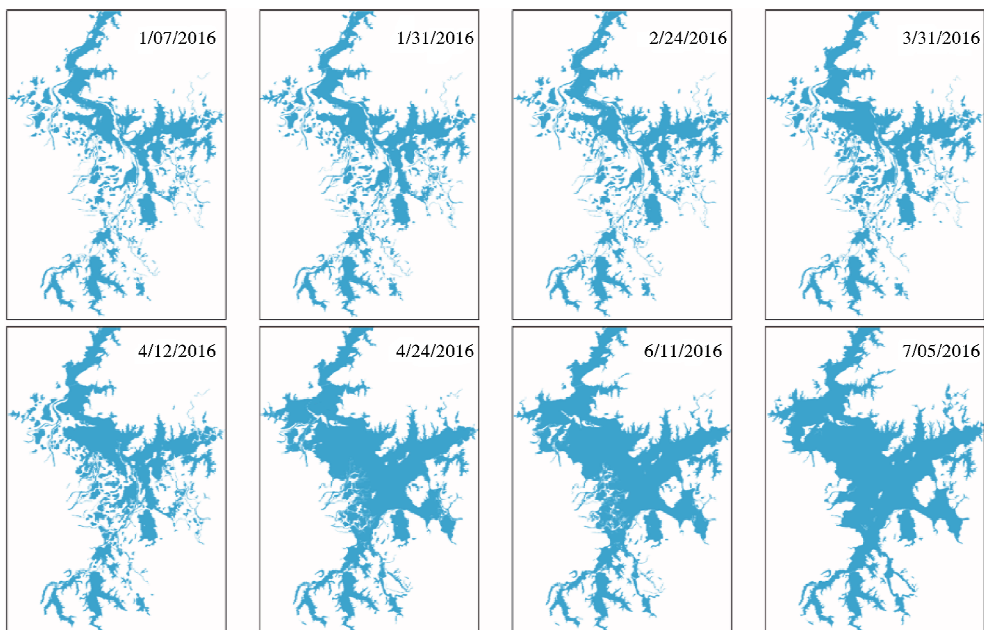


图 15 Sentinel-1A 鄱阳湖 2016 年 SAR 时间序列<sup>[48]</sup>

基于窄带的 ACM 算法属于 RACM 的一种,其步骤是先通过 Otsu 阈值分割算法对水域进行粗分割,结果作为 ACM 的初始轮廓,沿着初始轮廓形成一条宽度为  $E$  的窄带,在窄带中再进行 ACM 方法处理.该方法可减少无关区域的运算,减少处理时间,提高分割效率<sup>[48]</sup>.

## 2.5 聚类法

聚类算法是一种无监督的学习算法,在图像处理中应用非常广泛.聚类是把具有相似特性的事物划分为同一类,运用数学方法对图像中的像素进行分类,常用的相似度计算方法为欧氏距离法.鉴于水域在 SAR 图像中的特征,大量的学者也将聚类算法应用于 SAR 图像水域分割中<sup>[61-70]</sup>.聚类算法的优点是不需要先验知识、自动化程度高,缺点是抗噪声能力一般、运算复杂度高.本节将介绍常用的 K-means 和模糊 C 均值(Fuzzy C-mean, FCM)两种聚类方法及其在 SAR 图像水域分割中的应用.

2.5.1 基于 K-means 聚类算法. K-means 算法是一种硬聚类算法.其实现步骤是先确定代表最终聚类数目的常数  $K$ ,随机选定每个类别的初始聚类中心,通过计算每一个像素与中心的相似度,将其划分到不同类别,重复上述流程,直到达到聚类数目完成分割.该算法在计算过程中需要不断的迭代,因此对于大规模的数据收敛速度较慢.

文献[62]中, Wang 等人于 2013 年应用 K-means 算法,结合形态学滤波,对 TerraSAR-X 获取的印度海东部维沙卡坡特南港的 SAR 图像进行水域分割,结果如图 16 所示.

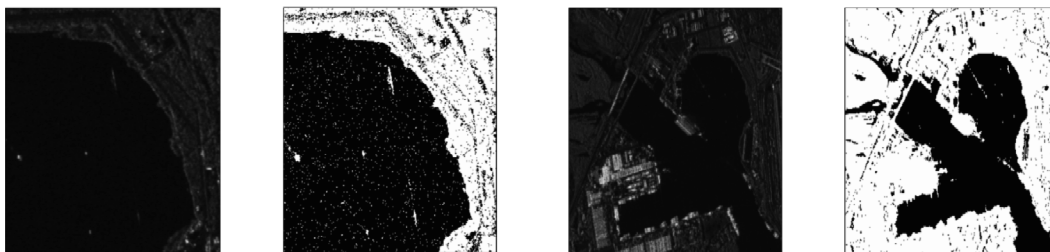
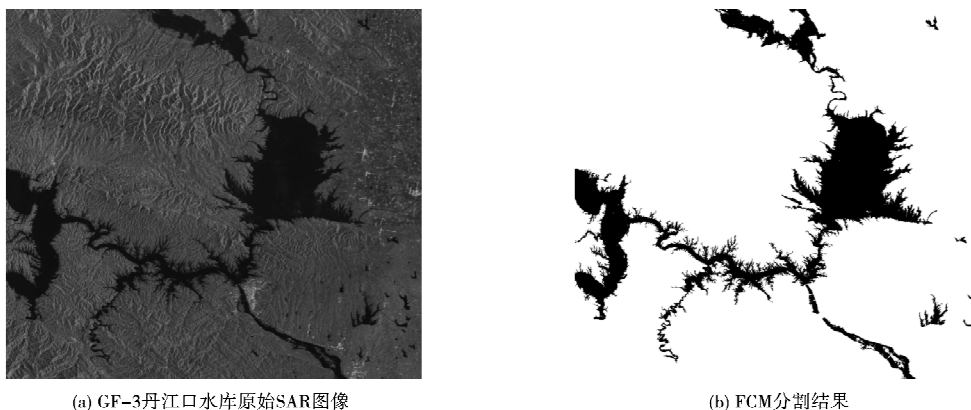


图 16 K-means 算法水域分割结果<sup>[62]</sup>

2.5.2 基于 FCM 算法. FCM 算法是在 K-means 算法的基础上发展而来的,它是一种模糊聚类算法.假设图像含有  $n$  个像素集合  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , 设置  $c$  个聚类中心  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_c\}$ . 通过多次迭代使模糊  $C$  目标函数不断收敛,最终将  $n$  个像素集合划分在  $c$  个聚类中.

FCM 算法可与形态学滤波结合,减少噪声对分割结果的干扰.图 17 是对 GF-3 卫星获取的丹江口水库 SAR 图像进行水域分割,聚类数目设置为 4,初始聚类中心分别设置为  $\{0, 30, 90, 180\}$ , 图 17 (a) 为原始图像,图 17 (b) 为分割结果,其中水域区域为黑色.



(a) GF-3丹江口水库原始SAR图像

(b) FCM分割结果

图 17 FCM 算法水域分割结果

## 2.6 机器学习方法

机器学习(Machine Learning, ML)是一门多领域交叉学科,涉及概率论、统计学、逼近论、凸分析、算法复杂度理论等多门学科.随着技术的发展,基于机器学习的 SAR 图像水域特征提取已有了一些进展<sup>[71-81]</sup>.本节将选取机器学习中的支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、马尔可夫分割法(Markovian)等典型算法在 SAR 图像水域分割上的应用进行介绍.

2.6.1 支持向量机 SVM. SVM 是在统计学基础上,由线性可分情况下的最优分类超平面发展而来的一种二分类模型<sup>[80]</sup>.其基本思想可用图 18 说明,图中实心点和空心点分别代表了两种类型的样本,H 为分类超平面, $H_1$  与  $H_2$  为通过各类样本中最边缘的点,且与 H 相互平行,距离相等的平面,它们之间的距离被称为分类间距.所谓最优分类超平面就是以最大间隔将两类样本分开的超平面.

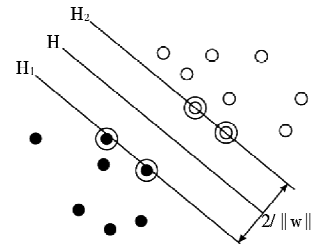


图 18 最优分类超平面示意图

文献[72]中,Qu 等人于 2013 年,以 TerraSAR-X 获取的多景 SAR 图像作为实验数据,利用灰度共生矩阵(Gray-level Co-occurrence Matrix, GLCM)提取水域特征,并将其作为 SVM 的训练样本,进行水域分割.结果如图 19 所示,其中第 1 行为水域分割结果,第 2 行为将水域边界映射到原始图像的结果.

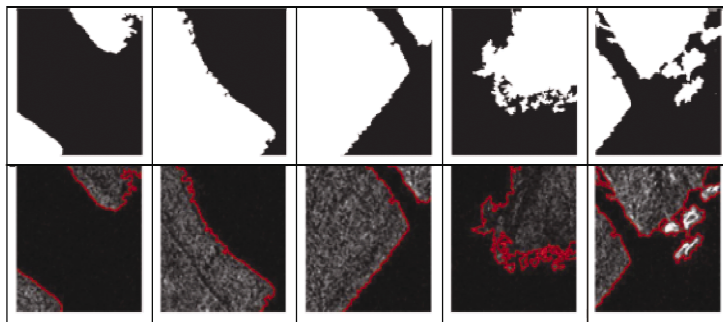


图 19 基于 SVM 的 SAR 图像水域分割<sup>[72]</sup>

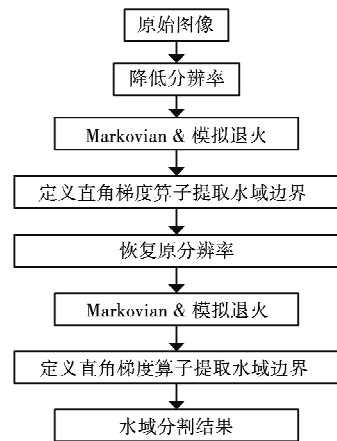


图 20 Markovian 分割法流程

2.6.2 Markovian 分割法. Markovian 分割法是基于马尔科夫随机场(Markov Random Field, MRF)的一种 SAR 图像水域分割方法,该方法引入模拟退火算法进行计算,流程如图 20 所示.

文献[76]中,Liu 等人于 2016 年以 Sentinel-1A 获取的印度尼西亚龙目岛东部港口的 SAR 图像为实验数据,采用 Markovian 分割法对海岸线进行了提取,结果如图 21 所示.

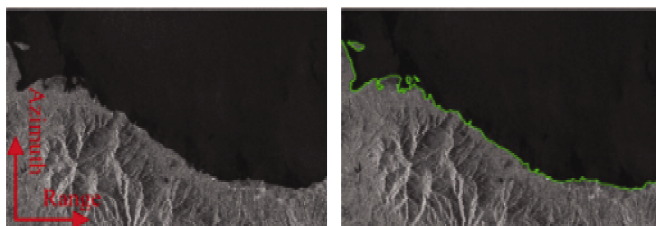


图 21 基于 Markovian 的 SAR 图像海岸线提取<sup>[76]</sup>

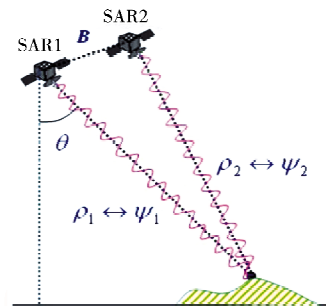


图 22 InSAR 原理图

### 2.7 InSAR 相干性方法

合成孔径雷达干涉(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)结合了合成孔径雷达成像技术和干涉测量技术,是一种用于测绘和遥感的雷达技术,利用合成孔径雷达对同一区域两次观测获得的复数数据(包含幅值与相位)进行相干处理以获取表面高程信息的技术<sup>[82]</sup>,其原理如图 22 所示. InSAR 最初设计是为了对地表面进行地形测绘,随着 InSAR 技术的发展,被广泛地应用于数字高程模型获取、洋流、水文、森林、地面沉降、地震活动监测等领域,其中对水域、洪水的检测也有着较多的应用<sup>[83-88]</sup>.

在 InSAR 测量中,有许多原因会导致水域、湿地等地物的失相干现象<sup>[89]</sup>.如平静的水面会造成镜面反射,导致后向散射系数非常低,无法进行相干处理;波动的水面在某个方向有一定的速度,雷达回波会产生多普勒中心频移;不同波段的雷达信号会对水体有一定的穿透作用等.因此,采用 InSAR 技术是无法直接测量

水域区域的,但是由于水域的失相干特征,可根据水域相干性系数将水域区域与其它地物进行区分。

文献[83]中,Refice 等人将 COSMO-SkyMed 获取的 4 景巴斯利卡塔大区流域的图像组成 2 个干涉对,采用 InSAR 技术和假彩色合成技术,对该区域的水域进行了提取,可以清晰地识别出该区域中的水体区域。结果如图 23 所示,其中图 23(a)-图 23(b)分别为 2010 年 11 月 3 日与 4 日的强度图像,图 23(e)为其干涉图。图 23(c)-图 23(d)分别为 2011 年 2 月 19 日与 18 日的强度图像,图 23(f)为其干涉图。图 23(g)-图 23(h)为通过假彩色合成技术来检测水域,分别是 2010 年 11 月 4 日与 3 日的假彩色图和 2011 年 2 月 19 日与 18 日的假彩色图。图 23(g)的假彩色合成通过将图 23(a)放置于 R 通道,图 23(b)放置于 G 通道,图 23(e)放置于 B 通道,其中水域区域呈现绿色。图 23(h)的假彩色合成通过将图 23(d)放置于 R 通道,图 23(c)放置于 G 通道,图 23(f)放置于 B 通道,其中水域区域呈现红色。

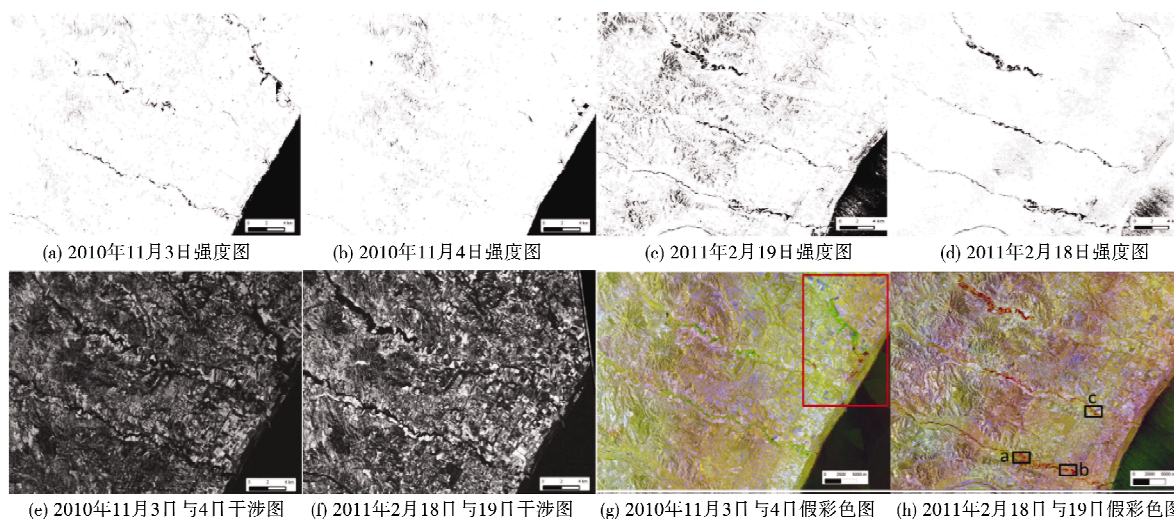


图 23 InSAR 水域检测<sup>[83]</sup>

## 2.8 多数据源融合方法

随着遥感技术的不断发展,利用星载 SAR 技术进行水域分割的方式也在不断地创新和发展,研究人员提出了基于多极化 SAR 数据的水域分析<sup>[90-95]</sup>、基于多频段水域边缘检测<sup>[96]</sup>、基于多光谱与 SAR 融合的水域边缘检测<sup>[97]</sup>等各种新的方式方法。图 24 是[97]中 Manaf 等人使用法国 SPOT5 光学遥感卫星与 TerraSAR-X 卫星获取的数据,采用 Brovey、Gram-Schmidt、ISH 等方法进行波段融合,在结果图像中,水域与陆地,以及陆地上的各种不同地物都有着明显的特征可将其区分。

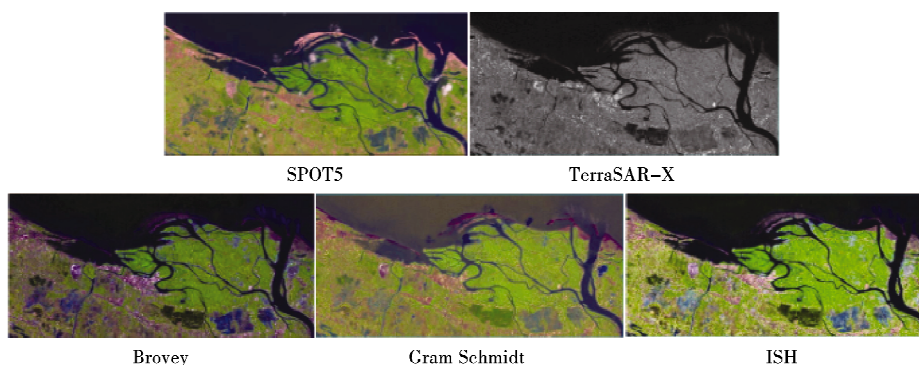


图 24 基于多光谱与 SAR 图像融合的水域检测<sup>[97]</sup>

## 3 星载 SAR 水域分割发展趋势

目前,基于星载 SAR 数据的水域分割研究,以单幅图像为研究对象的方法中使用阈值分割、边缘检测、活动轮廓、聚类等技术仍是主流。这些方法虽然在一定情况下取得了良好的效果,但依然存在一些难以克服的问题,如鲁棒性差、对 SAR 图像相干斑敏感、抗噪声能力差、不适用于复杂环境、算法计算量大等。

随着计算机技术与 SAR 技术的协同发展,更多的研究人员将机器学习、InSAR 技术、多极化多数据融合等新方法应用于 SAR 水域分割中,取得了令人满意的结果.这些不断涌现的新思路、新方法指示着未来星载 SAR 水域分割的发展趋势,大体可归纳为如下几点:

### 3.1 InSAR 技术用于水域分割

InSAR 技术以其精确的相位测量实现高精度地形或形变量的获取而著称<sup>[98]</sup>. InSAR 通常使用重轨的时间序列 SAR 图像来监测地震或塌陷造成的地面形变,其利用的是图像的相干性.地面变化越大,相干性越小,同样的原理可用于水体检测.由于水面并非完全平静,其失相干现象非常严重.对于星载 SAR 图像而言,其时间分辨率通常为几天,就目前重访周期最短的 Sentinel-1A 卫星而言,需要 6 d.在此期间,水面的特征几乎完全发生了改变,但水域旁的陆地特征一般仍然保持<sup>[99]</sup>.因此,在干涉图中,水域相干性表现非常低,几乎为 0.通过 InSAR 技术进行水域分割,将分析水体后向散射强度的问题转化为分析水体相干性的问题.在第 2 部分中,叙述了风浪会造成水体后向散射系数增大的现象,这一现象会导致 SAR 图像中水域区域的灰度值会有一定的提升.采用传统算法进行水域分割时,高灰度值的水域会被误认为非水域区域.而采用 InSAR 技术可在一定程度上忽略这一现象带来的影响,因此基于相干性检测水域的方式将会成为 SAR 水域分割的一个新的发展趋势.

### 3.2 多极化综合、多数据源融合、多维度复合

随着 SAR 卫星技术的发展,目前主流的星载 SAR 都支持全极化的工作模式,使得全极化 SAR 数据在对地观测领域中的应用日益丰富.全极化 SAR 含有的特征信息是单极化 SAR 所不具有的,这为目标分类研究提供了新的角度和新的方法.利用极化目标分解技术<sup>[100]</sup>进行 SAR 水域分割,根据散射机制,水体对交叉极化回波信号较弱,故在交叉极化的图像上水陆对比度与同极化图像相比明显很多<sup>[101]</sup>.利用多极化进行分析可根据回波特性对地物进行分类,从而实现对水域的分割.

在多极化的基础之上,依靠多数据源融合、多维度特征分析等方式进行 SAR 水域分割也正在快速发展.如利用多光谱遥感图像的辅助,选择对水域敏感的波段与 SAR 图像进行波段融合,可使得水域信息更为突出,从而实现水域分割;在多维度方面,可从时间、空间等角度对 SAR 水域分割实现指导性作用.

综上所述,多极化综合、多数据源融合、多维度复合等方法,依靠其独有的优势,将会成为 SAR 水域分割领域中快速发展的技术方向.

### 3.3 机器学习与人工智能

近些年,机器学习与人工智能相关技术蓬勃发展,一些学者已经将其方法初步应用到 SAR 图像水域分割中,并取得了不错的成果.这些方法综合概率统计、控制论、信息论、哲学、生理学、神经生物学等多学科的成果,模拟人类的学习活动,进行知识学习和获取,并通过反馈机制不断改善性能和完善过程<sup>[102]</sup>.在 SAR 水域分割中应用这些方法可以模拟人的意识,实现面向目标的水域区域分割,可以在一定程度上克服仅通过图像像素来分割水域的局限性.但目前此类方法的研究刚刚起步,成果并不丰富,引入机器学习与人工智能到 SAR 水域分割将会成为一个长远的发展方向.

## 4 总结

本文总结了近年来在国内外公开发表的基于星载 SAR 技术进行水域分割的研究成果,并对其发展趋势做了进一步的展望. SAR 图像水域分割的常见技术方法包括阈值分割、边缘检测、水平集、主动轮廓、聚类等,基于这些方法的大量研究将使水域分割的可用性和实用性逐步提高.多技术、多领域融合的创新方法也在不断涌现,如通过分析 InSAR 相干性进行水域分割;通过多极化与多维度的检测方法进行水域分割;将机器学习与人工智能的方法引入到 SAR 水域分割中,这些都极大地推动着 SAR 遥感技术的发展.总之,传统的技术方法不断地提高其精度,新的技术方法在以新的思路解决问题,实用性也在不断增强.

纵观 SAR 水域分割发展过程,从单幅图像、单一方法的处理到时序图像、多种新方法的融合,百花齐放,百家争鸣,相信在不久的将来,会出现更多的新技术、新方式,并且精度、效率、实用性会更上一个台阶.

### 参 考 文 献

- [1] 邓云凯,赵凤军,王宇.星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J].雷达学报,2012,1(1):1-10.
- [2] 王海波,马明国.基于遥感的湖泊水域动态变化监测研究进展[J].遥感技术与应用,2009,24(5):674-684.

- [3] 保铮 邢孟道 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [4] Townsend W. An initial assessment of the performance achieved by the seasat-1 radar altimeter[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1980, 5(2):80-92.
- [5] Caltagirone F, Spera P, Vigliotti R, et al. SkyMed/COSMO mission overview[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, IEEE International, 1998:683-685.
- [6] Townsend W. An initial assessment of the performance achieved by the Seasat-1 radar altimeter[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1980, 5(2):80-92.
- [7] 中国遥感数据网. 欧空局雷达卫星系列[EB/OL]. <http://rs.ceode.ac.cn/satelliteintroduce/introESAradars.jsp>.
- [8] Geudtner D, Torres R, Snoeij P, et al. Sentinel-1 mission capabilities and SAR system calibration[C]. // *Radar Conference IEEE*, 2013.
- [9] CHIABOT M, DECOUST C, LEDANTEC P, et al. RADARSAT-2 system operations and performance[C]. // *Proceedings of the 2014 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec City, Canada, 2014.
- [10] Kankaku Y, Suzuki S, Osawa Y. ALOS-2 mission and development status[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*, 2014.
- [11] Sun J, Yu W, Deng Y. The SAR payload design and performance for the GF-3 mission[J]. *Sensors*, 2017, 17(10):2419.
- [12] Amitrano D, Ciervo F, Martino G D, et al. Modeling watershed response in semiarid regions with high-resolution synthetic aperture radars[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(7):2732-2745.
- [13] Ferrentino E, Nunziata F, Migliaccio M. Full-polarimetric SAR measurements for coastline extraction and coastal area classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(23):7405-7421.
- [14] Cutler P J, Schwartzkopf W C, Koehler F W. Robust automated thresholding of SAR imagery for open-water detection[C]. // *Radar Conference*, IEEE, 2015:0310-0315.
- [15] Li Z, Chen X, Luo P, et al. Water area segmentation of the Yangcheng Lake with SAR data based on improved 2D maximum entropy and genetic algorithm[C]. // *Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications IEEE*, 2012.
- [16] Zeng L, Schmitt M, Li L, et al. Analysing changes of the Poyang Lake water area using Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(23):7041-7069.
- [17] Sun Y, Huang S, Li J, et al. Monitoring seasonal changes in the water surface areas of Poyang Lake using Cosmo-Skymed time series data in PR China[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE*, 2016.
- [18] otsu N. A Threshold selection method from gray-level histogram[J]. *IEEE TraPs*, 1979, SMC-9:62-66.
- [19] Guo Y, Zhang J. a New 2d otsu for water extraction from SAR Image[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2017, XLII-2/W7:733-736.
- [20] Sui H G, Xu C. Automatic extraction of water in high-resolution SAR images based on multi-scale level set method and otsu algorithm[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2012, 132(5):233-254.
- [21] 张磊, 陈海花. 基于 Otsu 方法和数学形态学的 SAR 图像海岸线检测[J]. *微计算机信息*, 2011, 27(7):207-208.
- [22] Karamali M, Lokman, M H, et al. Comparison of different edge detection algorithms for shoreline boundaries extraction using radar-sat sar imagery[J]. *Journal of Sustainability Science & Management*, 2007, 25:36-45.
- [23] Wiehle S, Lehner S. Automated waterline detection in the wadden sea using high-resolution terraSAR-X images[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 15:1-6.
- [24] Bachofer F, Quéhérvé G, Märker M. The delineation of paleo-shorelines in the Lake Manyara Basin using terraSAR-X data[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(3):2195-2212.
- [25] 吴戌, 叶伟. 复杂场景下的 SAR 图像水域边缘特征提取[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(8):136-139.
- [26] Wu T D, Lee M T. Geological lineament and shoreline detection in SAR images[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE International, 2007.
- [27] Fjørtoft R, Lopès A, Marthon P, et al. An optimal multiedge detector for SAR image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 1998, 36(3):793-802.
- [28] Osher S, Sethian J A. Fronts propagating with curvature-dependent speed; algorithms based on hamilton-jacobi formulations[J]. *Journal of Computational Physics*, 1988, 79(1):12-49.
- [29] Malladi R, Sethian J, Vemuri B C. Shape modeling with front propagation; a level set approach[J]. *IEEE Trans Pami*, 1995, 17(2):158-175.
- [30] Silveira M, Heleno S. Water/land segmentation in SAR images using level sets[C]. // *IEEE International Conference on Image Processing*, IEEE, 2008.
- [31] Silveira M, Heleno S. Classification of water regions in SAR images using level sets and non-parametric density estimation[J]. *IEEE*, 2009, 9:1685-1688.
- [32] 徐川, 华凤, 陆海刚, 等. 多尺度水平集 SAR 影像水体自动分割方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39(1):27-31.
- [33] 欧阳越, 种劲松. 基于改进水平集算法的 SAR 图像海岸线检测[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(6):456-460.

- [34] Ouyang Yue, Chong Jinsong, Wu Yirong. Two coastline detection methods in synthetic aperture radar imagery based on level set algorithm[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, 31(17-18):4957-4968.
- [35] Xu Chuan, Hua F, Sui H G, et al. Automatic water segmentation method in SAR images using multi-scale level set[J]. *Geomatics & Information Science of Wuhan University*, 2014(1):27-31.
- [36] Xu C, Sui H, Xu F. Land surface water mapping using multi-scale level sets and a visual saliency model from SAR images[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2016, 5(5):58.
- [37] Zhao L, Fan L, Wang C, et al. A non-supervised method for shoreline extraction using high resolution SAR image[C] *International Conference on Computer Vision in Remote Sensing*, IEEE, 2013.
- [38] Liu C, Yang J, Yin J, et al. Coastline detection in SAR images using a hierarchical level set segmentation[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 9(11):4908-4920.
- [39] Shu Yuanming, Li Jonathan, Gary Gomes. Shoreline extraction from RADARSAT-2 intensity imagery using a narrow band level set segmentation approach[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(2-3):187-203.
- [40] Sui H, An K, Xu C, et al. Flood detection in polSAR images based on level set method considering prior geoinformation[J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2018, PP(99):1-5.
- [41] Kass M. Snakes: active contour models[J]. *Intl J Computer Vision*, 1988, 1:50-56.
- [42] 王相海, 方玲玲. 活动轮廓模型的图像分割方法综述[J]. *模式识别与人工智能*, 2013, 26(8):751-760.
- [43] 冷英, 刘忠玲, 张衡, 等. 一种改进的 ACM 算法及其在鄱阳湖水域监测中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5):1064-1070.
- [44] Liu C, Xiao Y, Yang J. A coastline detection method in polarimetric SAR images mixing the region-based and edge-based active contour models[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017, 55(7):3735-3747.
- [45] Alonso M T, Lopez-Martinez C, Mallorqui J J, et al. Edge enhancement algorithm based on the wavelet transform for automatic Edge Detection in SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 49(1):222-235.
- [46] Cao K, Fan J, Wang X, et al. Coastline automatic detection based on high resolution SAR images[C]. // *International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications*, IEEE, 2016.
- [47] Modava M, Akbarizadeh G. Coastline extraction from SAR images using spatial fuzzy clustering and the active contour method[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(2):355-370.
- [48] Sheng G, Yang W, Deng X, et al. Coastline detection in synthetic aperture radar (SAR) images by integrating watershed transformation and controllable gradient vector flow (GVF) snake model[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2012, 37(3):375-383.
- [49] Li N, Wang R, Liu Y, et al. Robust river boundaries extraction of dammed lakes in mountain areas after Wenchuan Earthquake from high resolution SAR images combining local connectivity and ACM[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 94(4):91-101.
- [50] Li N, Wang R, Deng Y, et al. Waterline mapping and change detection of Tangjiashan Dammed Lake after wenchuan earthquake from multitemporal high-resolution airborne SAR imagery[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2014, 7(8):3200-3209.
- [51] Tan Q, Liu Z, Fu Z, et al. Lake shoreline detection and tracing in SAR images using wavelet transform and ACM method[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2005 IEEE International, 2005:3703-3706.
- [52] Niedermeier A, Romaneessen E, Lehner S. Detection of coastlines in SAR images using wavelet methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(5):2270-2281.
- [53] Niedermeier A, Lehner S, Sanden J V D. Monitoring big river estuaries using SAR images[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE 2001 International, 2001:1756-1758 vol. 4.
- [54] Ahtonen P, Hallikainen M. Automatic detection of water bodies from spaceborne SAR images[C]. // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE International, 2005:3845-3848.
- [55] Mason D C, Davenport I J. Accurate and efficient determination of the shoreline in ERS-1 SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 34(5):1243-1253.
- [56] Huang K. A coastline detection method using SAR images based on the local statistical active contour model[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(4):737-749.
- [57] Seppke B, Dreschlerfischer L, Brauer M. The Use of Active Contours for the Detection of Coastlines in SAR Images; a Modular Knowledge-Based Framework[J]. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2014, XXXVIII-4/W19(4):297-301.
- [58] 姜大伟, 范剑超, 黄凤荣. SAR 图像海岸线检测的区域距离正则化几何主动轮廓模型[J]. *测绘学报*, 2016, 45(9):1096-1103.
- [59] Alonso M T, Lopez-Martinez C, Mallorqui J J, et al. Edge Enhancement Algorithm Based on the Wavelet Transform for Automatic Edge Detection in SAR Images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2010, 49(1):222-235.
- [60] Jinping Sun, Shiyi Mao. River detection algorithm in SAR images based on edge extraction and ridge tracing techniques[M]. *Taylor & Francis, Inc*, 2011.

- [61] Paes R L, Nunziata F, Migliaccio M. Coastline extraction and coastal area classification via SAR hybrid-polarimetry architecture [C]. //2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2015.
- [62] Wang Hao, Yao Ping, Chen Longtao; et al. Coastline detection in SAR images using a fast unsupervised method[C]. //Proceedings of theAPCIIT,2013.
- [63] Ding X, Li X. Coastline detection in SAR images using multiscale normalized cut segmentation[C]. // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2014.
- [64] Ding X, Li X. Shoreline movement monitoring based on SAR images in Shanghai, China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11-12):3994-4008.
- [65] 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, 2017, 8(3):1019-1027.
- [66] 冷英, 李宁. 一种改进的变化检测方法及其在洪水监测中的应用[J]. 雷达学报, 2017, 6(2):204-212.
- [67] Amitrano D, Martino G D, Iodice A, et al. Unsupervised rapid flood mapping using sentinel-1 GRD SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2018(99):1-10.
- [68] Taha E D, Elbeih S F. Investigation of fusion of SAR and landsat data for shoreline super resolution mapping; the northeastern mediterranean sea coast in Egypt[J]. Applied Geomatics, 2010, 2(4):177-186.
- [69] Demir N, Kaynarca M, Oy S. Extraction of coastlines with fuzzy approach using SENTINEL-1 SAR image[J]. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2016, XLI-B7:747-751.
- [70] Wang M, Zhou S D, Bai H, et al. SAR water image segmentation based on GLCM and wavelet Textures[C]. // International Conference on Wireless Communications NETWORKING and Mobile Computing, IEEE, 2010.
- [71] Cafaro B, Canale S, Pirri F. X-SAR SpotLight images feature selection and water segmentation[C]. // IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques, IEEE, 2012.
- [72] Qu G, Yu Q, Wang Y. An improved method for SAR image coastline detection based on despeckling and SVM[C]. // Radar Conference 2013, IET International, IET, 2013.
- [73] D'Addabbo A, Refice A, Pasquariello G, et al. A bayesian network for flood detection combining SAR imagery and ancillary data [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(6):3612-3625.
- [74] Baselice F, Ferraioli G, Pascazio V. Coastal line extraction from SAR multi-channel images[C]. // Advances in Radar and Remote Sensing, 2012.
- [75] Baselice F, Ferraioli G. Unsupervised coastal line extraction from SAR images[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 10(6):1350-1354.
- [76] Liu Z, Li F, Li N, et al. A novel region-merging approach for coastline extraction from sentinel-1A IW mode SAR imagery[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2016, 13(3):324-328.
- [77] Palazzo F. A new automatic technique for coastline extraction from SAR images[J]. Proc Spie, 2012, 8536(4):448-453.
- [78] Latini D, Frate F D, Palazzo F, et al. Coastline extraction from SAR COSMO-SkyMed data using a new neural network algorithm [C]. // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2012.
- [79] Seixas F, Silveira M, Hueleno S. Segmentation of SAR images using textons[C]. // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2014.
- [80] Cherkassky V. The nature of statistical learning theory[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 38(4):409-409.
- [81] 吴涛, 阮祥伟, 谭剑波. 支持向量机在 SAR 图像解译中的研究进展[J]. 遥感信息, 2009(5):90-95.
- [82] 刘国祥. InSAR 基本原理[J]. 四川测绘, 2004, 27(4):187-190.
- [83] Refice A, Capolongo D, Lepera A, et al. SAR and InSAR for flood monitoring; examples with COSMO/SkyMed data[C]. // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2014:703-706.
- [84] Selmi S, Ben Abdallah W, Abdelfatteh R. Flood mapping using inSAR coherence map[J]. International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing & S, 2014, XL(7):161-164.
- [85] Pulvirenti L, Chini M, Pierdicca N, et al. Use of SAR data for detecting floodwater in urban and agricultural areas; the role of the interferometric coherence[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 54(3):1532-1544.
- [86] Soares F. Waterline extraction in optical images and InSAR coherence maps based on the geodesic time concept[J]. Proc Spie, 2010, 9(2-3):301-317.
- [87] Mason D C, Davenport I J, Flather R A, et al. A sensitivity analysis of the waterline method of constructing a digital elevation model for intertidal areas in ERS SAR scene of Eastern England[J]. Estuarine Coastal & Shelf Science, 2001, 53(6):759-778.
- [88] Cho J, Cho J, Yun H, et al. A study of Shoreline Changes in Antarctica (Terra Nova Bay) based on SAR data[J]. Journal of Coastal Research, 2005, 2101-2106.
- [89] 周建民, 李震, 邢强. 基于雷达干涉失相干特性提取冰川边界方法研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1):133-138.
- [90] 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.

- [91] Nunziata F, Migliaccio M, Li X. Dual-polarized COSMO-SkyMed SAR data for coastline detection[C]. // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, 2012.
- [92] Nunziata F, Migliaccio M, Li X, et al. Coastline extraction using dual-polarimetric COSMO-SkyMed pingpong mode SAR data[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2013, 11(1):104-108.
- [93] 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.
- [94] 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.
- [95] Ferrentino E, Nunziata F, Migliaccio M. Monitoring waterline variation of the monte Cotugno lake using dual-polarimetric SAR data [C]. // IEEE, International Forum on Research and Technologies for Society and Industry, IEEE, 2017.
- [96] Horritt M S, Mason D C, Cobby D M, et al. Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85(3):271-281.
- [97] Manaf S A, Mustapha N, Nasir M, et al. Fusion of optical and sar in extracting shoreline at northeast coast of peninsular mal aysla [C]. // The Asian Conference on Remote Sensing, 2015.
- [98] Hsansen R F. Radar interferometry data interpretation and error analysis[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001, 2(1):5577-5580.
- [99] 王华, 罗丽芳. 利用 InSAR 相干性提取青藏高原湖泊边界[J]. 广东工业大学学报, 2014(1):118-120.
- [100] Cloude S R, Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1996, 34(2):498-518.
- [101] 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.
- [102] Mitchell T, Buchanan B, Dejong G, et al. Machine Learning[M]. McGraw-Hill Education (Asia); China Machine Press; 2003.

## Research Progress and Trend Analysis of Water Extraction by Spaceborne SAR

NIU Shi-lin GUO Zheng-wei LI Ning WU Lin ZHAO Jian-hui

(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract** Synthetic Aperture Radar (SAR) is an active microwave imaging sensor that can image earth all-time and all-weather without being affected by weather, light and clouds. Therefore, SAR images have become one of the main data sources for water monitoring based on remote sensing. From the perspective of technical methods, several typical methods and applications for water extraction based on SAR images at home and abroad in recent years were discussed; The various methods were introduced from the aspect of technical principles and experimental results. Finally, the development trend of water extraction technology based on Spaceborne SAR is prospected.

**Key words** synthetic aperture radar (SAR); remote sensing; water extraction

(上接第 71 页)

## New Generalized Binomial Theorems Involving Two-variable Hermite Polynomials Via Quantum Optics Approach and Their Applications

MENG Xiang-guo

(School of Physical Science and Information Engineering, Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Communication  
Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract** We extend the ordinary binomial theorem to the case which involves two-variable Hermite polynomials  $H_{l,k}(x, y)$  in the context of quantum optics, and analytically obtain several new generalized binomial theorems and their corollaries. As their applications, we analytically prove that the multiple-photon-subtracted squeezed state  $a^m b^n e^{\alpha^\dagger b^\dagger | \alpha^\dagger | b^\dagger} | 00 \rangle$  is equivalent to the Hermite-polynomial-weighted quantum state serving as an easily controlled non-Gaussian entangled information resource, and the Wigner functions of the spin coherent states are respectively the Laguerre polynomials.

**Key words** new binomial theorem; entangled state representation; the method of integration within ordered product of operators; Wigner function