

The Water Extraction and Flood Season Changes Detection of Poyang Lake Based on Dual Polarized Sentinel-1A Image Data

Ruikai Hong¹, Xudong Guo¹, Jinsheng Tu¹, Rui Zhang^{1,2*}

¹Department of Remote Sensing and Geospatial Information Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

Email: *zhangrui@swjtu.edu.cn

Received: Sep. 29th, 2018; accepted: Oct. 12th, 2018; published: Oct. 19th, 2018

Abstract

Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite image data has the advantage of being unrestricted by climatic conditions, and has a high revisit rate. It can obtain images of disaster areas timely under severe weather conditions in flood season, providing an evidence and information insurance for scientific flood fighting and disaster relief. According to the application requirements of flood emergency monitoring and water area changes analysis, this paper selects the Poyang Lake area, located in Jiujiang City Jiangxi Province, as the research area. Based on the two-view dual-polarization SAR obtained from the peak water level on June 25 and July 7 Image data, by using H/A/Alpha decomposition results comprehensively to carry out polarization target analysis, and depended on Wishart (distance principle) unsupervised classification to extract water bodies, we successfully obtained the spatial distribution map with spatial resolution of 15 m before and after the flood season. By statistical analysis, it shows that the newly increased area of the Poyang Lake area in Jiujiang City has reached 56 km². The experimental results show that the intervention of polarization decomposition technology has better adaptability to the identification of waters with larger waves and higher sediment concentration, and also can correctly identify and retain such water targets. Meanwhile, this method can also effectively reduce the misjudgment that caused by the radar shadow area.

Keywords

Sentinel-1A, Dual-Polarization SAR, Polarimetric Target Decomposition, Water Extraction, Change Detection

基于双极化Sentinel-1A影像数据的鄱阳湖水域提取与汛期变化检测

*通讯作者。

文章引用: 洪瑞凯, 郭旭东, 涂晋升, 张瑞. 基于双极化 Sentinel-1A 影像数据的鄱阳湖水域提取与汛期变化检测[J]. 测绘科学技术, 2018, 6(4): 298-308. DOI: 10.12677/gst.2018.64035

洪瑞凯¹, 郭旭东¹, 涂晋升¹, 张 瑞^{1,2*}

¹西南交通大学, 地球科学与环境工程学院测绘遥感信息系, 四川 成都

²西南交通大学, 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都

Email: *zhangrui@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018年9月29日; 录用日期: 2018年10月12日; 发布日期: 2018年10月19日

摘 要

合成孔径雷达(SAR)卫星影像数据具有不受气候条件限制的优势, 且具有较高的重访率, 可以在汛期恶劣气候条件下及时获取灾区影像, 为科学开展抗洪救灾提供依据和信息保障。面向汛期应急监测和水域变化分析的应用需求, 本文选取位于江西省九江市的鄱阳湖区域为研究区域, 基于汛前6月25日和7月7日水位高峰期获取的两景双极化SAR影像数据, 综合利用H/A/Alpha分解结果开展极化目标分析, 并基于Wishart (距离最短原则的)非监督分类提取水体, 成功获取了汛期前后空间分辨率为15 m水域空间分布图, 经统计分析探明九江市鄱阳湖区域汛期新增面积达56 km²。实验结果表明: 极化分解技术的介入, 对于波浪较大和含沙量较高的水域识别具有较好的适应性, 能正确辨识和保留该类水体目标; 同时, 该途径还能够有效降低雷达阴影区造成的误判。

关键词

Sentinel-1A, 双极化SAR, 极化目标分解, 水体提取, 变化检测

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球气候变化的大背景下, 水灾的发生渐趋频繁, 已是世界上对人类生存环境威胁最为严重的自然灾害之一。我国幅员辽阔, 从北至南约有 50 度的纬度差异, 受多种气候条件影响。特别是我国南部地区, 常年受热带季风气候和亚热带季风气候的影响, 夏季内陆地区温度上升迅速气压降低, 海洋温度上升较慢相对内陆气压较高, 暖湿空气受到压力作用向大陆运动, 冷热空气对流易形成强降雨。强降雨和上游地区的冰雪消融造成的水灾每年对我国造成巨大的损失, 因此导致的洪水灾害每年造成 500 亿以上的经济损失。其中 1998 年特大洪水灾害直接造成了 1660 亿的经济损失和 4150 人死亡, 受灾人口达 2.23 亿。有效而快速的监测水灾的形成, 确定水灾发生的区域, 评估造成的损失对保障国民人身财产安全具有十分重要的意义。

由于强降雨的发生常伴随极端恶劣天气, 成像条件较差, 传统的光学传感器无法实时准确地获得云层下的信息, 这就制约了光学遥感技术在水情监测中的应用。合成孔径雷达(SAR)具有全天时全天候对地成像的能力, 不受气候条件的限制获取地物的后向散射信息, 在水域范围的精确提取方面应用潜力巨大。目前在轨运行的合成孔径雷达卫星主要有中国发射的 GF-3、美国宇航局(NASA)发射的 Seasat-A、欧空局(ESA) ERS/Envisat/Sentinel 系列卫星、意大利的 COSMO-Skymed 卫星、德国宇航局(DLR)的 TerraSAR-X/TanDEM-X 卫星、加拿大航天局(CAS)的 RadarSAT 卫星以及日本的 JERS 和 ALOS 卫星等。其中 Sentinel-1 是由欧空局发射的由两颗卫星组成的卫星星座, 包括分别于 2014 年 4 月和 2016 年 4 月发射升空的 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B。

卫星采用双极化模式对地表成像，两颗卫星协同工作可将重访周期缩短至 6 天，且数据免费对外开放，为世界各国及时开展水灾和各类地质灾害的应急监测提供了科学有效的数据支撑[1]。

目前，国内外对于极化 SAR 图像的分类的研究聚焦在目标分解问题，主要解决思路分“基于极化散射矩阵的分解”和“基于相干矩阵或协方差矩阵的分解”两大方向[2]。因研究对象具有时变复杂特征，故多采用相干矩阵和协方差矩阵实施目标分解[3]。如 Cloude 等于 1997 年提出的特征分解法[4]与 Freeman 提出的基于散射模型的三元分解法[5]，在分类的过程中均取得了较好的效果。当前针对双极化信息的分解研究尚不多见，国防科学技术大学的吴永辉等[6]提出的双极化修正方法在传统特征分解法的基础上对有效区域边界进行修正，在双极化信息分解的过程中具有较好的适应性。为充分利用 Sentinel-1 系列卫星具备双极化通道成像的优势，本文研究通过利用 Sentinel-1 系列卫星的双极化影像来提升水体提取和变化监测的精度。并针对之前利用极化信息的研究区域较为单一，结果可能存在特殊性的现象，进一步探究基于极化分解的分类结果在实际应用中可行性。

2. 基于 Sentinel-1 系列双极化数据的水域提取与变化监测方法

为准确提取双极化 SAR 数据中的水体目标，本文将基于 Sentinel-1 系列影像数据预处理得到的标准化后向散射信息，依次开展极化协方差矩阵的分解和基于 H-A-Alpha 值的非监督分类，提取不同时相的水域范围并获取其变化的客观信息[7]。上述基于 Sentinel-1 双极化 SAR 数据与变化监测的总体流程如图 1 所示。

2.1 影像预处理

影像预处理部分主要包括影像裁剪、辐射定标、滤波和多视。其中辐射定标是极化 SAR 系统相较于传统的单极化系统的预处理过程的最大区别，对单极化系统应用来说，辐射定标可能不是必要，但对于多极化 SAR 系统来说是必须的[8]。因为极化 SAR 系统要求不同极化通道的数据联合完成极化合成，不同极化通道的信息必须处于同一标准，才可以确保不同极化波之间的相干性。

受制于合成孔径雷达的成像机理，相干斑点噪声是其固有的原理性缺陷。SAR 图像中的斑点噪声主要是由雷达波束照射到地面，经不同的散射体散射的后向散射信号之间相互干涉，合成的信号矢量相加结果有强有弱，反映在图像上为类似斑点的噪声。选择合适的滤波方法去除斑点噪声就显得尤为必要。精致极化 Lee 滤波(Refined Lee Filter)能够很好的解决极化协方差矩阵次对角线元素的噪声既不为乘性模型也不为加性模型的滤波问题[9] [10]，并且很好的保持极化信息。因此，本文选用精致极化 Lee 滤波对研究区域进行滤波处理。

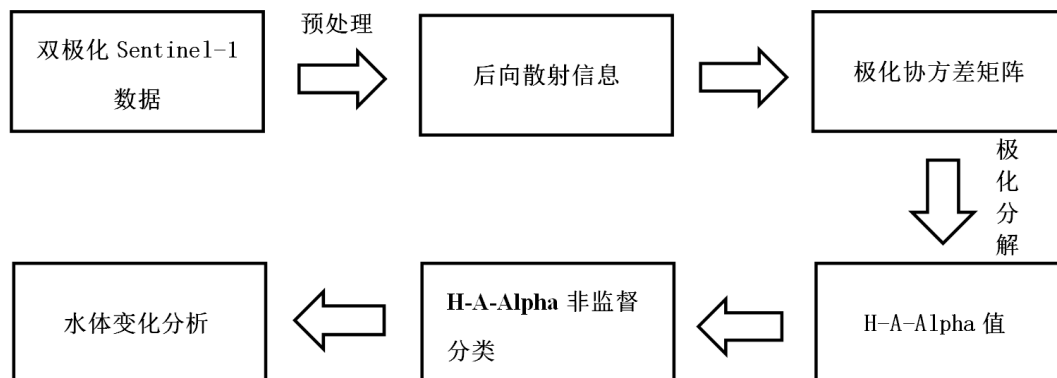


Figure 1. Flow chart of water extraction from dual-polarization information

图 1. 双极化信息提取水体变化流程图

2.2 基于双极化信息的极化分解技术

在极化数据的分析中主要针对分布式目标的后向散射特性分析, 常将目标的后向散射矩阵表示为散射矢量 k_4 的形式。

$$S = \begin{pmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \text{Trace}([S]\psi) = [k_1, k_2, k_3, k_4]^T \quad (2.1)$$

其中 S 表示某一像元的后向散射系数矩阵, S_{ij} 下标 i, j 表示以极化方式 j 发射, 极化方式 i 接收的后向散射系数。Trace 表示矩阵的迹。 ψ 表示正交单位矩阵, 根据常用的两组正交单位矩阵可将全极化数据散射矢量可以分别表示为:

$$K_{4L} = [S_{HH}, S_{HV}, S_{VH}, S_{VV}]^T \quad (2.2)$$

$$K_{4P} = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV}, S_{HH} - S_{VV}, S_{HV} + S_{VH}, i(S_{HV} + S_{VH})]^T \quad (2.3)$$

将 K_{4L}, K_{4P} 分别与其共轭转置 K_{4L}^{*T}, K_{4P}^{*T} 做外积可以得到极化协方差矩阵和极化相干矩阵, 我们通常使用这两种矩阵来描述散射过程。因为极化相干矩阵更容易解释其物理意义, 所以在实际中更多采用的是极化相干矩阵[11] [12]。

Sentinel-1 系统的数据只提供双极化信息, 所以要对其散射矢量的表达做修正, 基于 VH/VV 极化方式的后向散射系数矩阵可表示为

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

采用 Lexicographic 基和 Pauli 基分别对 S 矢量化, 并基于总功率不变的前提简化得到:

$$K_{2L} = [S_{VH} \quad S_{VV}]^T \quad (2.5)$$

$$K_{2P} = \begin{bmatrix} S_{VV} & \frac{S_{VH} + iS_{VH}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}^T \quad (2.6)$$

由此得到极化协方差/相干矩阵为:

$$C_2 = \begin{bmatrix} \langle |S_{VH}|^2 \rangle & \langle (1+i)S_{VH}S_{VV}^* \rangle \\ \langle (1+i)S_{VV}S_{VH}^* \rangle & \langle |S_{VV}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

易得到:

$$T_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle 2|S_{VV}|^2 \rangle & \langle (1+i)S_{VH}S_{VV}^* \rangle \\ \langle (1+i)S_{VV}S_{VH}^* \rangle & \langle |S_{VH}|^2 \rangle \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2C_{22} & (1+i)C_{12} \\ (1+i)C_{21} & C_{11} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

上式中 $C_{11}, C_{12}, C_{21}, C_{22}$ 分别表示协方差矩阵中的元素。

极化相干矩阵中包含充分的目标的极化散射信息, 且与极化协方差矩阵也存在明显的对应关系。为进一步实现检测, 分类和识别等目的, 我们还需对这些数据做进一步的分析, 建立极化协方差矩阵、极化相干矩阵与后向散射信号之间的联系。本文拟采用 H-A-Alpha 分解的结果基于 wishart 距离最短原则对研究区域进行分类。

$H - \alpha$ 分解在双极化分解中需对边界区域做修正[6] [8] [13] [14]。

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}, T_2 = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, 0 \leq m \leq 1 \quad (2.9)$$

将 $H-\alpha$ 平面有效边界区域修正为如下图 2 所示, 由曲线 1 和曲线 2 包围, 关于 $\alpha = 45^\circ$ 对称。

区域 Z1 对应低熵面散射, 包括平静水面, 海冰面, 非常光滑的陆地表面等。

区域 Z2 对应低熵偶极子散射, 常来自于各向异性的植被。

区域 Z3 对应低熵二面角散射, 常来自于孤立的电介质和含金属的二面角。

区域 Z4 对应中熵面散射。

区域 Z5 对应中熵偶极子散射, 表现为被植被覆盖的地表散射。

区域 Z6 对应中熵二面角散射, 在林业应用中表现为树冠对散射过程得影响。

区域 Z7 对应高熵多次散射。

区域 Z8 对应高熵二次散射, 一般来源于植被。

其中第九个部分为高熵表面散射, 表明目标的去极化效应很强, 接近于随机噪声, 基于散射机制的认知这个区域通常被认为是不可实现的区域。

2.3. 基于 Wishart 距离最短的非监督分类

非监督分类分类速度快, 且无需任何先验知识, 但分类的结果不能确定类别的属性。基于 Wishart 距离最短的非监督分类是计算每个聚类中心的相干矩阵:

$$V_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n_i} \langle T \rangle_i \quad (2.10)$$

其中 n_i 为类 ω_i 中像素的个数。然后计算每个像素的相干矩阵 $\langle T \rangle$ 到各个类中心的 Wishart 距离, 并重新分类:

$$d(\langle T \rangle, V_m) = \ln |V_m| + Tr(V_m^{-1} \langle T \rangle) \quad (2.11)$$

将非监督分类与 H-Alpha 分解的结果结合可以将类别与物理散射机制相关联。当确定具体地物与当前环境下的散射的机制的联系, 就可以得到非监督分类结果的属性。

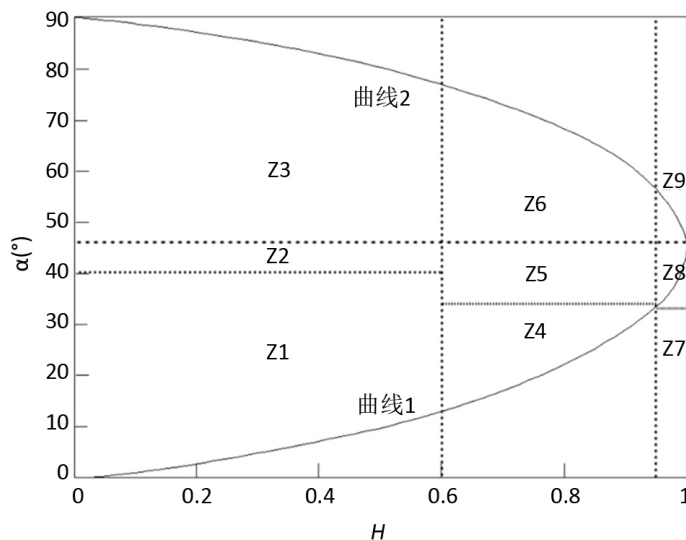


Figure 2. H-Alpha effective area boundary and division
图 2. H-Alpha 有效区域边界及划分

2.4. 水域变化叠置分析

叠置分析是将两层或多层地图要素进行叠置产生一个新要素层的操作，其结果将原来要素分割成新的要素，新要素在综合了多层要素原有属性的基础上能够反映新的属性特征。本文在进行洪灾过后的水域变化检测时，首先通过对汛期前后两个时相的雷达影像分别进行面向对象分类，获得洪灾区域的水体部分，然后采用逻辑差运算的叠置分析方法，旨在获取洪灾后影像相对于灾前影像水域增加的位置和面积。

3. 鄱阳湖水域 2018 年汛期遥感监测与分析结果

3.1. 研究区域与实验数据

2018 年 7 月 3 日长江防总启动防汛Ⅳ级应急响应，5 日长江委水文局召开的防汛综合会发布消息称“长江第一号洪水”已经形成，江西省是本次水灾的重灾区。截止 8 日，灾害已造成江西省南昌，九江，抚州等 9 个设区市 39 县 91.5 万人受灾。本次洪水危害面积较广，十分典型。因此，本次实验将研究区域选定在江西省九江市周边范围研究区域(如图 3 所示)。

通过汛前 6 月 25 日和汛期 7 月 7 日两景 Sentinel-1A IW 成像模式雷达影像开展分析处理。提取汛期来临前和汛期的水域分布，用于开展变化监测。Sentinel-1 搭载 C 波段 SAR 传感器，轨道高约 700 km，工作频率 5.4 GHz 可采用单极化或双极化方式，IW 成像模式只提供 VH/VV 极化方式成像。表 1 列举了 Sentinel-1 系列卫星的主要性能指标，并与同类卫星做了简要对比。

经与我国高分系列 SAR 卫星 GF-3、加拿大新型商业卫星 RadarSAT-2 比较分析表明，Sentinel-1 因其较短的重访周期，高质量的成像能力在灾害发生时能够及时的获取可靠的灾区影像数据，用以研究水害灾情分析十分有利，可为科学的抗洪救灾提供可靠的依据。因此本文选用 Sentinel-1 的数据作为后续研究的数据源。为充分体现将双极化信息引入水体提取的效果，本文拟将最终实验结果与 VV 极化方式得到的监督分类结果进行比对。

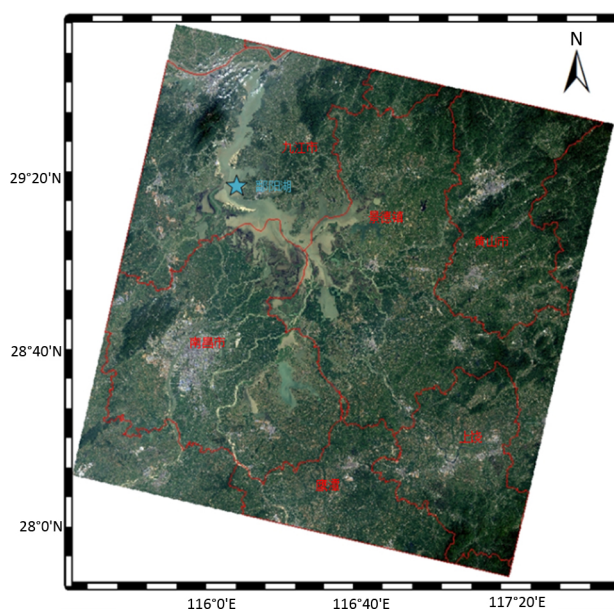


Figure 3. Schematic diagram of the study area (the base image is landsat8 optical image)

图 3. 研究区域示意图(底图为 landsat8 光学影像)

Table 1. Comparison of Sentinel-1 satellite and international similar satellite SAR load indicators
表 1. Sentinel-1 卫星与国际同类卫星 SAR 载荷指标对比

指标	Sentinel-1 卫星	GF-3 卫星	RadarSAT-2 卫星
轨道类型	太阳同步轨道	太阳同步轨道	太阳同步轨道
轨道高度/km	693	755	798
波段	C	C	C
整星重量/kg	2300	2779	2300
峰值功率/kw	4700	1.5	1.27
入射角范围/(°)	20~45	10~60	10~60
天线面积	12.3 × 0.84 m	15 × 1.5 m	15 × 1.37 m
发射带宽/MHz	0~100	0~240	0~100
极化	单极化/双极化	单极化/双极化/全极化	单极化/双极化/全极化
天线类型	波导缝隙相控阵	波导缝隙相控阵	微带相控阵
俯仰向扫描角度/(°)	±11	±20	±20
成像模式	条带、干涉宽幅、超宽幅、波浪	聚束、条带、扫描、波浪、超精细等 12 种	扫描、条带、超精细等 10 种
分辨率/m	5~20	1~500	1~100
成像幅宽/km	20~400	10~650	20~500
寿命/a	7.25	8	7.25

3.2. 实验结果分析

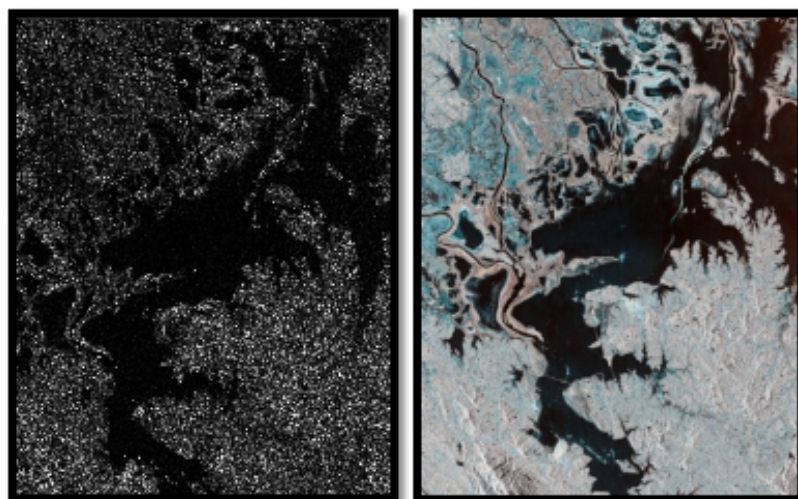
从原始的单极化强度图(图 4a)来看, 水体在图像中呈现暗色调与周边地物形成明显的差异, 整体轮廓较为清晰, 采用阈值分割的方法能够快速提取水体, 其对应关系明确, 物理解释也较为简单, 但对表面光滑的地物和泥沙含量较高的水体不能有效判别。右图为 Pauli 假彩色图像, 可以观察到在简单利用双极化信息后水体与非水体之间的边界更加容易识别, 可进一步降低分析的难度。

为进一步利用极化反射特性, 将图像根据极化协方差矩阵分解为熵值(H), 平均反射角(Alpha), 反熵(A)来分析水体在极化特性上的表现, 如图 5 所示。从研究区域熵值图不难发现, 水体在实验中熵值较正常水准略高, 集中在中熵区域, 部分出现在高熵区域。经过分析, 我们认为造成水体熵值升高的主要原因是由于降雨和汛期水流加速引起的。对此我们查询了九江市 6 月 25 日和 7 月 7 日天气状况。6 月 25 日阴天, 7 月 7 日小雨转中雨。比较了前后两景影像的熵值图(见图 6)也反映了这一结论。6 月 25 日熵值图如图左, 蓝色框内水体熵值较低; 而 7 月 7 日熵值图显示(如图右所示), 水体熵值有明显增加。

水体的熵值偏高, 为取得更好的结果, 需要我们重新定义在该实验条件下, 水体所对应的极化散射机制。对此, 我们选择部分水体作为感兴趣区域来观察其在 H-Alpha 空间的分布, 以此为依据来对初始的空间划分做一定程度的修正, 使水体能够更好地被区分, 其 H-Alpha 空间分布如图 7 所示。

结合水体在 H-Alpha 空间的分布, 将整个区域划分为如图 7(b)所示的 8 个区域, 低熵区为 0~0.5; 中熵区为 0.5~0.95; 高熵区为 0.95~1; 表面散射区为 0°~40°左右; 偶极子散射区约为 40°~50°; 偶次散射区约为 50°~90°; 和反熵组成 16 个初始聚类中心, 基于 wishart 距离最短原则进行分类, 经过 4 次迭代计算和类别合并最终获得研究区域空间分辨率约为 15 米的水体提取结果如图 8(b)所示。

将基于 H-A-Alpha 的非监督分类结果, 与基于强度图的阈值分割提取水体的结果做分析比对。并采用混淆矩阵和 Kappa 系数做精度评估。在采用阈值分割得到的结果中 I 区域水体未能被识别, 但在基于

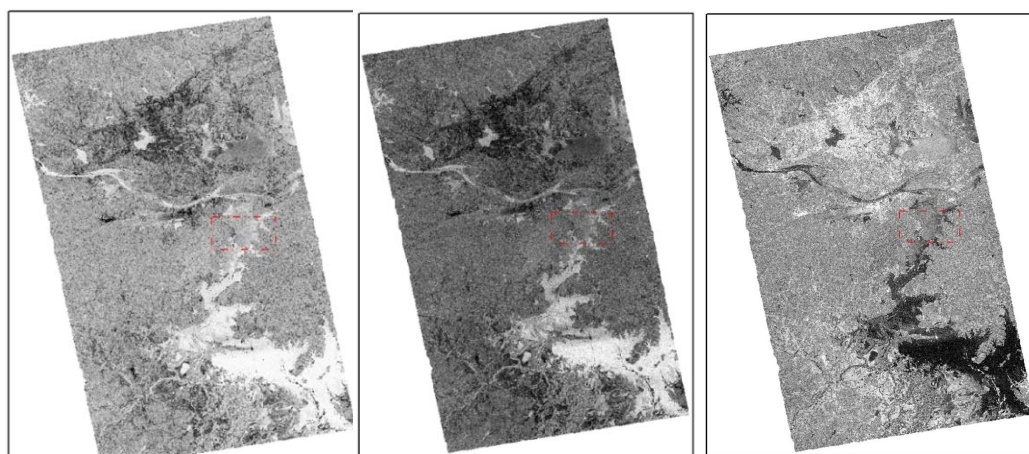


(a) VV 通道 SAR 影像

(b) Pauli 假彩色合成影像

Figure 4. Sentinel-1A image data imaging renderings

图 4. Sentinel-1A 影像数据成像效果图



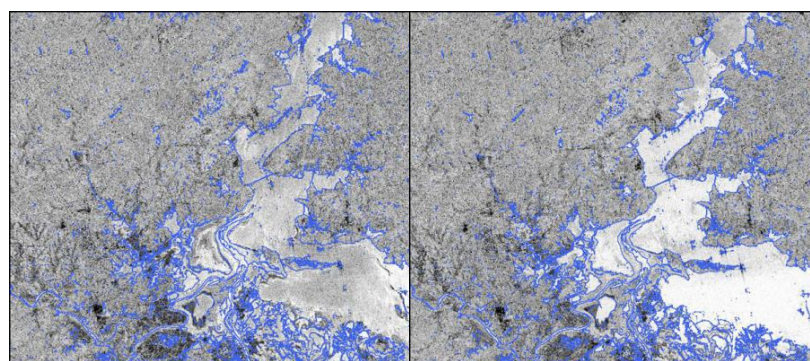
(a) H 值图

(b) Alpha 值图

(c) Anisotropy

Figure 5. July 7 decomposition results grayscale

图 5. 7月7日分解结果灰度图



(a) 6月25日熵值图

(b) 7月7日日熵值图

Figure 6. Entropy map of the main lake area of Poyang Lake

图 6. 鄱阳湖主湖区熵值图

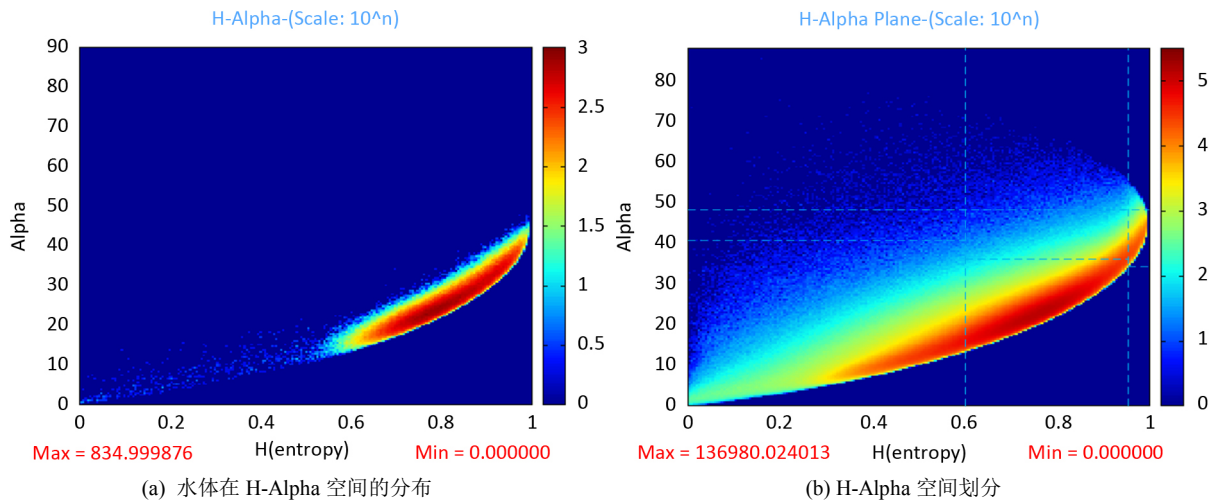


Figure 7. 7 H-Alpha scatter plot
图 7. H-Alpha 散点图

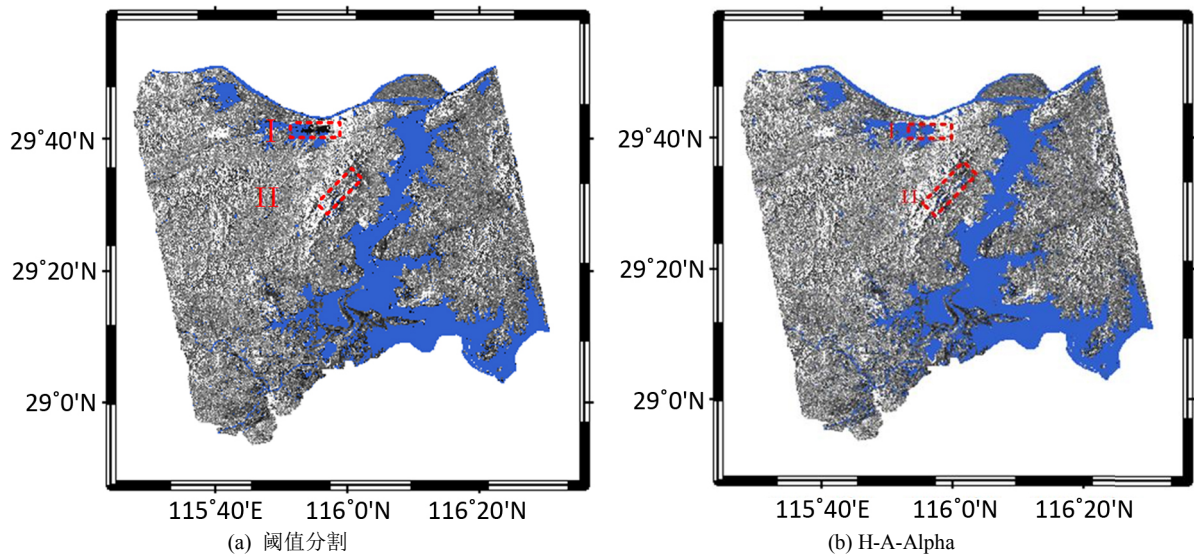


Figure 8. Water extraction results in Poyang Lake area of Jiujiang City
图 8. 九江市鄱阳湖区域水体提取结果

极化目标分解的结果中成功将其归类为水体。在 II 区域，可以明显看到，部分地物表现出较低的后向散射强度，从而使阈值分割将其识别为水体，而 H-A-Alpha 非监督分类的结果有效降低了错分的数量。因此引入极化信息可以有效的提升水体提取的精度。混淆矩阵和 Kappa 系数(见表 2)也较好的证明了这一点。

显然，H-A-Alpha 在水体提取精度上得到了一定程度的提升，识别的准确度达到了 94.13%，较阈值提取结果有一定程度的额提升。对其他目标正确识别的准确度达到了 99.67%，可以看到在防止其他地物错分方面较为突出，对于波浪较大和泥沙混杂的水域，能做到较好的的辨识和保留相对于传统的阈值提取方法优势明显。但是，该结果只能与极化散射机制相对应，仍不能确定真实的地物类别。因真实的地物与极化散射机制的对应关系受外界环境以及雷达系统的影响较大，最终类别的确定仍需要一定先验知识。最后采用 H-A-Alpha 分类结果做为最终的水域提取结果。得到 2018 年 6 月 25 日水体面积约为 1626 平方公里，2018 年 7 月 7 日水体面积为 1682 平方公里，可知受“长江一号洪水”和江西本地强降雨的影响，九江市鄱阳湖区域水体面积增加迅速，12 天内的新增水域面积为 56 平方公里见图 9。

Table 2. Comparative analysis of water extraction results in the study area
表 2. 研究区域水体提取结果精度对比

	阈值分割	H-A-Alpha
水体	93.99%	94.13%
其他	94.69%	99.67%
kappa	0.8865	0.9444
O/A	95%	97.29%

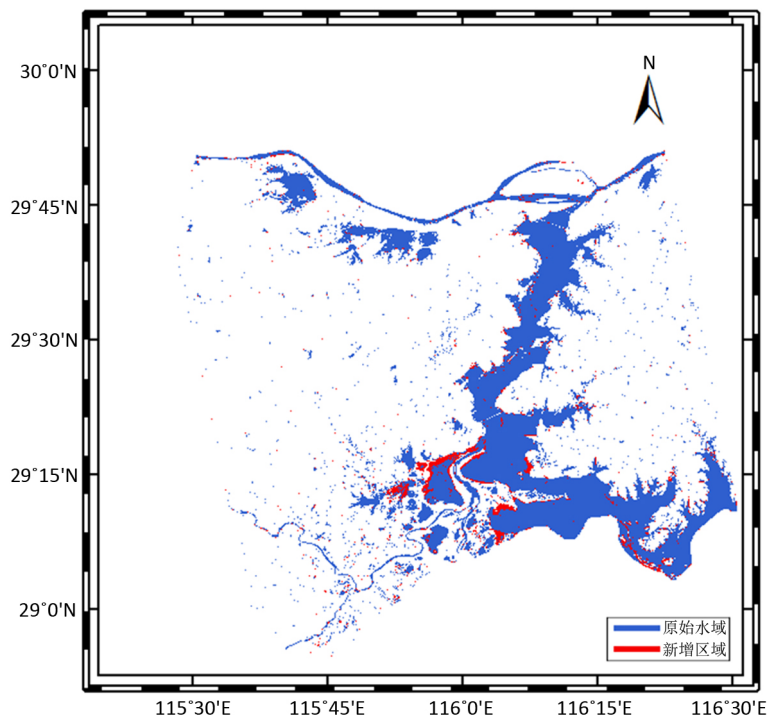


Figure 9. Water changes in the Poyang Lake area of Jiujiang City
图 9. 九江市鄱阳湖区域水体变化

4. 结论

合成孔径雷达影像本身具有全天候观测的优势，本文为进一步挖掘极化信息在水体提取中的潜力，围绕极化信息的分解，应用以及解决实际问题的能力等问题开展研究。选取位于长江中下游的九江市鄱阳湖区域为研究区域开展实验。针对洪水爆发前 6 月 25 日和洪水高峰期 7 月 7 日两幅雷达影像，采用双极化分解结果作为遥感解译提取水体的基础研究数据开展分析。结合基于 Wishart 距离的非监督分类提取水体，旨在充分利用极化信息，降低阴影区域和泥沙含量较高对提取结果的干扰，并取得了良好的效果。随后，我们对汛期前后获取的雷达影像进行叠置分析，根据差异值评判洪灾期间的淹没区域和淹没面积。基于 15 米分辨率的水域提取结果，经变化检测得出整个九江市鄱阳湖区域在汛期的新增淹没面积达 56 平方公里。实验结果不仅论证了方法与流程的可行性，也充分反映出多极化雷达影像数据在洪灾应急监测应用中高分、精准的性能优势。

致 谢

本文获得了国家重点研发计划“地球观测与导航”领域重点专项课题(2017YFB0502700)，国家自然

科学基金青年科学基金项目(41601503), 四川省科技计划项目(2018JY0564), 西南交通大学理工类科技创新项目(2682016CX087), 西南交通大学“雏鹰学者”人才计划项目(2682016CY19)的联合资助。此外, 欧洲空间局为本研究提供了 Sentinel-1A 卫星影像数据, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 李晟铭, 刘吉平, 王铭, 尚盈辛, 宋开山. 基于 Sentinel-1A 的 2016 年长江中下游重灾区洪水遥感监测及灾情评估[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(10): 68-74 + 91.
- [2] 姜媛. 极化 SAR 图像特征提取与分类方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [3] Cloude, S.R. and Pottier, E. (1996) A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, **34**, 498-518. <https://doi.org/10.1109/36.485127>
- [4] Cloude, S.R. (1995) Concept of Polarization Entropy in Optical Scattering. *Optical Engineering*, **34**, 1599-1610. <https://doi.org/10.1117/12.202062>
- [5] Freeman, A. and Durden, S.L. (1993) Three-Component Scattering Model to Describe Polarimetric SAR Data. *Proceedings of SPIE*, **1748**, 213-224. <https://doi.org/10.1117/12.140618>
- [6] 吴永辉. 极化 SAR 图像分类技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [7] Chen, L., Liu, Z. and Zhang, H. (2014) SAR Image Water Extraction Based on Scattering Characteristics. *Remote Sensing Technology & Application*, **29**, 963-969.
- [8] 王超, 等. 全极化合成孔径雷达图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [9] 王静. 双极化 SAR 影像分类研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [10] Lee, J.-S. and Pottier, E. 极化雷达成像基础与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [11] 廖静娟, 王庆. 利用 Radarsat-2 极化雷达数据探测湿地地表特征与分类[J]. 国土资源遥感, 2009, 21(3): 70-73.
- [12] 邓滢, 张红, 王超, 刘萌. 结合纹理与极化分解的面向对象极化 SAR 水体提取方法[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 714-723.
- [13] 李贺. 面向对象的 PolSAR 图像典型地物提取关键技术研究[D]: [博士学位论文]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012.
- [14] 刘晓英, 肖虹雁, 岳彩荣. 基于极化目标分解地物类型识别方法研究[J]. 林业调查规划, 2015, 40(5): 1-4.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2329-549X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: gst@hanspub.org