引文格式：徐广东, 胡兆国, 高升, 等. 基于GF-3全极化SAR影像的水域提取与监测分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 53-57. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.014

# 基于GF-3全极化SAR影像的水域提取与监测分析

徐广东[1]，胡兆国[1*]，高　升[1]，姬晴川[1]，王铭远[1]，张永三[1]
（1. 中国冶金地质总局山东正元地质勘查院，山东 济南 250014）

**摘　要：**GF-3作为我国首颗高分辨率C波段雷达卫星，能够及时获取高质量的高分辨率遥感影像数据，为充分发掘GF-3全极化SAR影像数据在水域变化分析和应急监测评估中的应用潜力，以龙湖水域为例，基于GF-3全极化影像数据，开展水体面向对象分类、叠置分析等关键问题研究，并提出了一种基于GF-3全极化SAR数据的水域提取与变化检测的方法。结果表明，提出的方法在波浪较大和泥沙混杂的水域表现出良好的适应性，能够做到正确的判识和保留，最终成功获取了两期空间分辨率为8 m的水域分布图，可为进一步推动相关研究及后续应用提供借鉴和参考。

**关键词：**高分三号；水域提取；全极化Freeman-Durden分解；面向对象分类；叠置分析；变化检测
**中图分类号：**P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0053-05

## Water Area Extraction and Monitoring Analysis Based on GF-3 Fully Polarized SAR Image

XU Guangdong[1], HU Zhaoguo[1], GAO Sheng[1], JI Qingchuan[1], WANG Mingyuan[1], ZHANG Yongsan[1]
(1. Geological Exploration Institute of Shandong Zhengyuan, China Metallurgical Geology Bureau, Jinan 250014, China)

**Abstract:** As our country's first high-resolution C-band radar satellite, the GF-3 radar satellite can obtain high-quality high-resolution remote sensing image data in time. In order to fully explore the application potential of GF-3 fully polarized SAR image data in water area change analysis and emergency monitoring and evaluation, taking the waters of Long Lake as the experimental object, based on GF-3 fully polarized SAR image data, we carried out research on key issues such as object-oriented classification and superposition analysis of water bodies, and proposed a water area extraction and change detection method based on GF-3 fully polarized SAR data. The experimental results show that the proposed method has good adaptability in the waters with large waves and mixed sediment, and can correctly identify and retain the water information. Finally, we obtained water distribution maps with a spatial resolution of 8 m in the two phases, which could provide a certain degree of reference for further promoting related research and practical applications.

**Key words:** GF-3, water area extraction, fully polarized Freeman-Durden decomposition, object-oriented classification, overlay analysis, change detection

近年来，用SAR图像进行水域变化检测已成为该应用领域的热点[1]。多极化综合、多数据源融合、多维度复合等方法，已经成为遥感应用相关技术的发展趋势[2-6]。为充分挖掘GF-3影像数据在水域变化分析和应急监测评估中的应用潜力，以提升水域分类提取和变化监测分析的自动化程度和精度水平为目标，围绕GF-3全极化影像的面向对象分类、高精度叠置分析与变化监测等关键问题开展研究，提出了一种水域提取与变化检测的方法，该方法是基于GF-3全极化SAR数据的来进行研究的，并以2017年6月3日—7月2日期间获取的湖北、江西和安徽三省交界处的龙湖区域影像序列为数据源开展了实验，获取了汛期前后龙湖水域面积的变化量与空间分布，验证算法精度与处理流程的可行性。同时，该实验进一步体现了GF-3雷达数据在暴雨等极端条件下实施应急监测的优越性能。

## 1　研究区及实验数据选取

2017年6月底，我国南方发生罕见暴雨，多地遭受洪涝灾害。长江中下游流域的龙湖水域南面接长江主干流，东面与另一湖泊水域相连，在此期间受洪灾影响，水域面积变化显著，属较为典型的研究区域，

收稿日期：2022-01-14；修回日期：2022-04-01。
项目来源：中国冶金地质总局山东局青年科技基金资助项目（SDYJ-QNKY202111）。
第一作者简介：徐广东（1987—），工程师，研究方向为地质灾害监测，E-mail：770776657@qq.com。
通信作者：胡兆国（1983—），硕士研究生，高级工程师，研究方向为自然地理，E-mail：278968540@qq.com。

适合开展实验分析。为及时掌握洪灾对实验区域的影响，选取位于29.81°~30.16°N，115.95°~116.32°E的区域，选取了洪峰期间7月2日影像和汛前6月3日SAR影像，采用全极化条带1模式成像，空间分辨率达8 m，其具体参数如表1所示。

表1 龙湖水域高分三号影像数据

| 时间 | 成像模式 | 分辨率/m | 幅宽/km | 极化方式 |
|---|---|---|---|---|
| 2017-06-03 10:14 | QPSI | 8 | 16.2 | HH/HV/VV/VH |
| 2017-07-02 10:17 | QPSI | 8 | 17.6 | HH/HV/VV/VH |

## 2 基于GF-3全极化SAR数据的水域提取与变化检测方法

研究基于GF-3全极化SAR数据的水域提取与变化检测方法主要包括全极化数据的预处理、基于全极化Freeman-Durden分解信息的面向对象分类和水域变化叠置分析三部分主要内容。

### 2.1 全极化数据的预处理

合成孔径雷达遥感影像由相位和振幅强度信息两部分组成，可用一个复数形式表示：

$$S=a+b\times i=\sqrt{a^2+b^2}\times e^{i\varphi}$$
$$\Phi_{\text{diff}}=\Phi_{\text{def}}+\Phi_{\text{topo}}+\Phi_{\text{res}} \quad (1)$$

式中，$a$ 为雷达信号的实部；$b$ 为雷达信号的虚部；$i$ 为虚数；$\sqrt{a^2+b^2}$ 为振幅值；$\varphi$ 为相位值。根据以上原理，可提取不同极化方式下雷达影像的振幅强度值并生成强度图。

根据雷达波的散射特性，SAR影像的后向散射强度（振幅）由系统参数（包括波长、斜视角、极化方式等）、地物复介电常数、地物形状和粗糙度等决定。当地面目标为粗糙表面时，雷达信号将会是漫反射，产生大量的后向散射，后向散射强度强，遥感影像呈现出近乎亮白色；当地面目标为光滑表面时，雷达信号将会是镜面反射，大量雷达信号沿镜面反射方向传播，只有少量后向散射，散射强度低，遥感影像呈现出近乎黑色[5]。

为提高目视分辨效果和水体自动分类的精度，可将单极化强度图进行假彩色合成[6]。合成后的彩色影像同样存在较多的斑点噪声[7]，为此首先采用自适应滤波对影像进行初步处理，以抑制斑点噪声对水体提取的影响[8]，然后采用面向对象水位分类方法进行分类。

自适应滤波能根据影像区域像素强度信息调整滑动窗口的大小和调整计算参数以选择最适应的估计方法[9]，特别是在水域和陆地影像中，能对像素强度很低的水域和强度较高的陆地区域进行较好的增强处理。在利用自适应滤波处理全极化数据时，首先需要通过计算得到权值参数 $K$，然后对研究区域进行滤波处理。根据实验区SAR影像质量特征，本次实验采取了5×5和10×10等滤波窗口进行实验，经对比实验发现，采用5×5窗口已经可以很好的滤除斑点噪声的影响，得到较高的处理效果。

面向对象分类是根据像元值的大小，采用空间多尺度分割的方法，将研究区域分割为多个类对象，将整体影像通过设置相关参数，分割成不同大小的小块对象。该分割方式可以将多个波段进行参与分割，并对各波段分别进行设置其在分割中所占权重。对于常规水体的分割参数一般100~150左右是比较合适的。经过对比实验发现尺度参数选择150能够保证影像既不分割的过于破碎，又能保证地物的独立完整。

### 2.2 基于全极化Freeman-Durden分解信息的面向对象分类

随着雷达系统极化方式的变化，地面目标所表现出来的后向散射特性也有所不同。水体表面为光滑表面，故雷达信号会产生镜面反射；陆地表面较为粗糙，将会产生漫反射，二者在遥感影像上容易区分。而对于波浪较大或泥沙与悬浮物混杂的水体，难以进行准确的判识。为此，提出基于全极化Freeman-Durden分解信息的面向对象分类方法，结合不同极化方式下每个像元的后向散射特性差异[10]，采用投票法综合判定每个像元的属性，并通过空间多尺度分割的方法，将研究区域分割为多个类对象，旨在最大程度上消除对象内部斑点噪声的干扰，并对波浪较大和泥沙混杂的水域进行正确判识和保留以提升分类结果的精度水平。

#### 2.2.1 基于全极化Freeman-Durden分解信息判定像元属性

全极化雷达数据经Freeman-Durden分解，可得到3种不同散射机制下的影像[15]，分别为面散射、偶次散射、体散射，这3种强度影像分别对应地物目标在不同散射机制下的物理散射特性。其中，在面散射机制下，光滑的目标表面（如平静的水面等）将会是弱散射体，非常容易辨别，图像上呈现暗黑色；偶次散射机制下，直角反射体（如直立的建筑物等）将表现为强散射体，图像上呈现亮白色，有利于辨别水面和陆地的分割交界；体散射机制下，电磁波在目标中发生多次散射，能够有效识别树林或者较为密集的建筑群等[12]。

通过Freeman-Durden分解方法得到面散射强度、

偶次散射强度、体散射强度三幅强度影像，对三幅影像进行综合判别分析，能够更为有效地判定每个像元的属性[13]。具体到水体的判识，基本思路如下：若3种散射机制下存在2种及2种以上，将某个像元判定为水体，则认为该像元为水体；反之，若只有一种或没有散射机制将某个像元判定为水体，则认为该像元为非水体。这种类似于投票的判别方法，可减少阴影对水体对象的影响，并可为波浪较大和泥沙混杂的水域辨别创造有利的条件，有助于提升水体边界区分和水体类别提取的精度和可靠度。

2.2.2　面向对象分类处理

采用空间多尺度分割的方法，将研究区域分割为多个类对象，这样在很大程度上消除了对象内部斑点噪声的干扰，为高精度分类结果提供了保障[14-15]。考虑到尺度选择过大影响水体边界的提取精度，尺度选择过小则会受到噪声的干扰[16]，空间尺度的选择将根据研究区域的特征经多次实验对比后确定。

影像经多尺度分割后，得到多个未分类的块状对象。此时，通过对Freeman-Durden分解方法得到的各像元属性进行统计，若某对象内部水体像元数量超过对象内部像元数量的一半，则认为该对象为水体；反之，若某对象内部水体像元数量低于对象内部像元数量的一半，则认为该对象为非水体[12]。

经过对水体和非水体对象类别的划分后，影像呈现为零碎的对象块体。因此，需要应用Lambda合并算法将同质类别的对象进行合并处理，以便获得水体区域的空间分布。

### 2.3　水域变化叠置分析

叠置分析是将两层以上地图要素进行叠置产生一个新要素层的操作，进而将本来的地图要素分割成新的地图要素，新地图要素在结合了原有属性的基础上能够反映新的属性特征。进行洪灾过后的水域变化检测过程中，第一步是将汛期前后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。

### 2.4　结果分析

从原始单极化HH强度图（如图1所示）可以看出，水体部分表现为暗黑色，陆地非水体部分则为亮白色，水体轮廓呈现的较为清晰。但仍存在较多的斑点噪声，而且从单一波段去对影像进行解译时存在诸多不确定性。为此，提出的方法综合利用了GF-3全极化的优点，将HH/HV/VV极化数据强度影像图进行假彩色合成（如图2所示），以提升层次感，使水体和非水体之间的区别更为突出，从而降低目视判读和分类提取的难度。考虑到合成图中仍有较多噪声存在，采用自适应滤波进行了降噪处理，最终得到6月3日和7月2日两期GF-3全极化强度假彩色合成图。

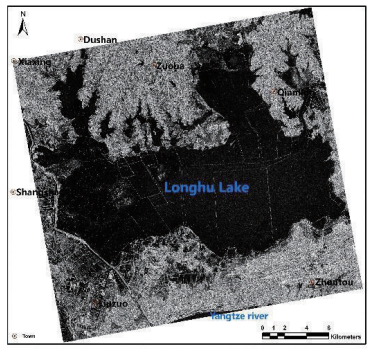
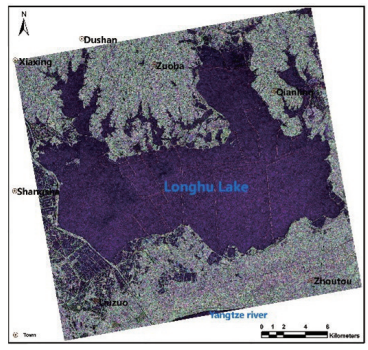
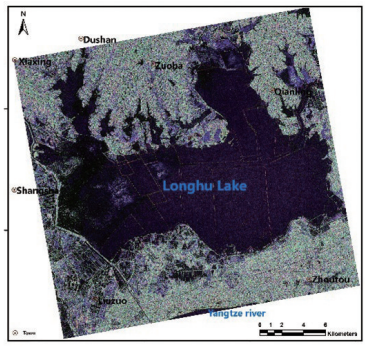



图1　GF-3原始单极化HH强度图




a　2017-06-03合成图




b　2017-07-02合成图

图2　GF-3全极化强度假彩色合成图（HH，HV，VV）

经过几何校正、配准、裁剪后的前后2个时相雷达影像，分别采用面向对象的分类方法，将地面目标分为水体和非水体两大类，最终获取了两期空间分辨率为8 m的水域分布（图3），通过比较2个时相的水体（图中蓝色部分）分布结果不难发现，汛期前后该水域的分类提取结果具有较高的一致性。尽管受到暴雨和洪峰的影响，GF-3在7月2日成像期间可能存在波浪较大和水质较为浑浊的情况，但应用所提出的面向对象分类的方法，仍实现了精准的水域提

取。与采取阈值分割的单极化分类方法相比，通过对全极化SAR数据Freeman-Durden分解信息的综合判读，基于对面散射强度、偶次散射强度、体散射强度的全面分析实施面向对象的分类，能够最大程度的降低对地形阴影区的误判；而且，针对泥沙混杂和波浪较大的水域，也能做到正确的判识和保留，有效提升了分类精度与可靠性。

通过对2个时相的水体进行叠置分析，最终得到7月2日相对于6月3日水体增加的区域，如图4红色部分所示。由图可知，龙湖西侧的堤坝较为稳定，沿堤坝沿线水域未有明显的变化，而东北部和南部因水位上升有新增水体区域出现，这主要和局部地表多为水田主以及较为平缓的地势有关。经统计，相较于6月3日，整个龙湖水域在7月2日增加面积达25.9 km$^2$。




a 2017-06-03合成图




b 2017-06-02合成图

图3 龙湖水域提取结果

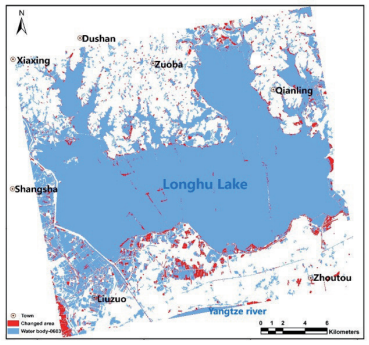



图4 汛期前后龙湖水域变化图（红色为水域新增部分）

## 3 结 论

为充分发掘GF-3影像数据在水域变化分析和应急监测评估中的应用潜力，围绕GF-3全极化影像的面向对象分类、叠置分析等关键问题开展研究，提出了基于GF-3全极化SAR数据的水域提取与变化检测方法，并选取位于长江中下游的龙湖水域为研究区域开展实验。针对洪水爆发前6月3日和洪水高峰期7月2日两幅GF-3雷达影像，采用全极化强度假彩色合成图作为遥感解译提取水体的基础研究数据开展分析。考虑到合成后的强度假彩色影像中仍残存斑点噪声，首先采用自适应滤波对影像进行初步处理。然后，结合不同极化方式下每个像元Freeman-Durden分解信息判定每个像元的属性，并采用空间多尺度分割的方法开展面向对象的分类，旨在消除对象内部斑点噪声的干扰，有效降低对阴影区域的误判，并对波浪较大和泥沙混杂的水域予以判识和保留，提升了分类结果的精度水平。接着，对汛期前后获取的雷达影像进行叠置分析处理，依据差异值来分析洪灾期间的淹没范围和面积。分析结果表明，整个龙湖水域在汛期的新增淹没面积达25.9 km$^2$，主要分布在无堤坝拦阻的东北部和南部区域。实验结果论证了方法与流程的可行性。

GF-3作为我国首颗高分辨率C波段雷达卫星，不受暴雨、云、雾等气候条件的制约，能够及时获取高质量的高分辨率遥感影像数据，在今后的灾害应急监测与相关领域的应用拓展中必将扮演更为重要的角色。提出的算法与处理途径，在波浪较大和泥沙混杂的水域具有较好的适应性，可为进一步推动相关研究及后续应用提供借鉴和参考。

## 参考文献

[1] 张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报，2017,46(3):269-277

[2] Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-level Histogram[J] IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics,2007,9(1):62-66

[3] 唐德可,王峰,王宏琦. 基于马尔科夫分割的单极化SAR数据洪涝水体检测方法[J],电子与信息学报,2019,41(3):619-625

[4] Zhang J S,Xing M D. Water Body Detection in High-Resolution SAR Images With Cascaded Fully Convolutional Network and Variable Focal Loss[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2021,51(1):316-332

[5] Chen Y,Liu X. Research on Methods of Quick Monitoring

and Evaluating of Flood Disaster in Poyang Lake Area Based on RS and GIS[J]. International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling Workshop, Kam Workshop,2008:1 105-1 108

[6] 万剑华,臧金霞,刘善伟. 顾及极化特征的SAR与光学影像融合与分类[J]. 光学学报,2017,37(6):284-293

[7] Yang W, Yang X, Yan T, et al. Region-based Change Detection for Polarimetric SAR Images Using Wishart Mixture Models[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing,2016,54(11):6 746-6 756

[8] 郎丰铠,杨杰,李德仁. 极化SAR图像自适应增强Lee滤波算法[J]. 测绘学报,2014,43(7):690-697

[9] 龙江平,丁晓利,汪长城. 自适应精致极化Lee滤波的复相干性估计方法[J]. 测绘学报,2015,44(12):1 331-1 339

[10] Cloude S R, Pottier E. A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry[J]. Trans Geosci Remote Sensing,1996,34(2):498-518

[11] Freeman A, Durden S L. A Three-component Scattering Model for Polarimetric SAR Data[J]. Transactions on Geoscience & Remote Sensing,1998,36(3):963-973

[12] Deng Y, Zhang H, Wang C, et al. Object-oriented Water Extraction of PolSAR Image Based on Target Decomposition[J]. Synthetic Aperture Radar,2015:596-601

[13] Ballester B J D, Lopez S J M. Applying the Freeman-Durden Decomposition Concept to Polarimetric SAR Interferometry[J]. Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2009,48(1):466-479

[14] Shi X, Lu L, Yang S, et al. Object-oriented Change Detection Based on Weighted Polarimetric Scattering Differences on Polsar Images[J]. ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences,2015,XL-7/W4:149-154

[15] 杨雨晴,王冬梅,徐佳. 基于局部自适应阈值的GF-3 SAR影像洪涝水体提取[J]. 地理空间信息,2021,19(6):54-59

[16] 陈军,杜培军,谭琨. 一种改进的全极化SAR影像面向对象分类方法[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(5):944-951

（上接第16页）

标靶进行拟合。通过设计球形标靶拟合实验，得到5种距离的球形标靶拟合结果，验证分析了该方法的可行性和可靠性，得到如下结论：

1）针对球形标靶的特点，分析了入射角与拟合参数精度的关系，确定了基于入射角定权方法，并将该方法与传统最小二乘法拟合结果进行比较，在50 m的扫描距离内其拟合参数的精度均高于传统最小二乘法拟合参数的精度。

2）通过基于入射角定权方法对2种靶球进行拟合，20 m扫描距离内拟合国产靶球的标准差为0.42~0.52 mm，进口靶球的拟合标准差为0.21~0.55 mm，该方法达到1 mm以内的精度，能够有效提高国产靶球点云的拟合参数精度，且接近进口靶球点云的拟合参数精度。

3）在20~40 m的扫描距离内，激光入射角对点云拟合参数精度影响明显，使用该方法可使拟合参数的标准差减小0.44~4.80 mm，能够有效提高后续点云数据处理的精度。

## 参考文献

[1] Shakarji C M. Least-squares Fitting Algorithms of the Nist Algorithm Testing System[J]. Journal of Research of the National Institute of Standards & Technology,1998,103(6):633-641

[2] 余腾,李明峰,胡伍生,等. 基于点云去噪的球形标靶中心拟合研究[J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(8):849-855

[3] 陶武勇,鲁铁定,吴飞,等. 求解球面拟合的改进总体最小二乘算法[J]. 大地测量与地球动力学,2018,38(1):92-96

[4 卢主兴,郭际明,宋胜登,等. 三维激光标靶球球心整体最小二乘拟合方法研究[J]. 测绘通报,2019(增刊):48-51

[5] 张婷婷,姚恩涛,贾俊涛. 激光光斑形状及入射角对PSD位置输出影响的研究[J]. 计测技术,2012,32(1):15-18

[6] Franco C, Paolo S. Radiometric Correction in Laser Scanning[J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(15):3 097 -3 104

[7] 王春林,郑德华,孟敏,等. 点云中混合像元的探测与剔除算法[J]. 测绘与空间地理信息,2016,39(1):102-105

[8] 陆旻丰,吴杭彬,刘春,等. 地面三维激光扫描数据缺失分类及成因分析[J]. 遥感信息,2013,28(6):82-86

[9] 王瑞鹏,王力,李明磊,等. 扫描入射角对点云测量精度的影响[J]. 测绘通报,2015(增刊):199-201