

doi: 10.7702/dlydxkx20130424

# 像素级 SAR 影像时间序列的建模方法研究

王亚飞,程亮,钟礼山,李满春,蒋洁

(江苏省地理信息技术重点实验室,南京大学,江苏 南京 210093)

**摘要:**像素级遥感影像时间序列保留了更多的原始影像信息和地表细节层次信息,能够更准确地提取地物信息、揭示地物的变化规律。针对 SAR 影像堆积数据,提出了一种像素级 SAR 影像时间序列的建模方法,主要步骤包括辐射校正和高精度的几何配准,将 SAR 影像数据集转换为一系列由离散的后向散射系数组成的时间序列文本化数据。利用 2006—2009 年 21 幅分辨率为 150 m 的 WSM 模式 ENVISAT ASAR 影像进行建模试验,构建了像素级 SAR 影像时间序列。试验表明:该建模方法具有较高的几何精度和辐射精度,能够直接应用于地物识别,在地物信息提取、聚类分析、变化检测等方面发挥独特的优势。

**关键词:**像素级;SAR;时间序列;后向散射系数;建模

**中图分类号:**TP751 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-0504(2013)04-0109-04

## 0 引言

遥感时间序列挖掘是时空数据挖掘的重要内容,研究如何有效地从海量、复杂、不同时间分辨率的遥感数据中挖掘潜在的有用知识,具有重要的理论价值和现实意义<sup>[1]</sup>。遥感时间序列的构建是遥感时间序列挖掘的前提,因此,大数据背景下的遥感时间序列的建模方法研究显得尤为迫切和必要。在微波遥感领域,SAR 能够不受日照和天气条件的限制完成对地观测任务,并对某些地物具有一定的穿透能力,具有多极化、多入射角、多模式、短重访周期等特点<sup>[2]</sup>。SAR 影像时间序列具有一定的稳定性,能够在一定程度上克服单幅影像后散射值误差较大而难以应用于地物的信息提取、分类和变化监测的缺点<sup>[3,4]</sup>,可以在海洋观测、环境监测、灾害监测、军事等方面发挥独特的优势。

目前,SAR 影像时间序列的研究主要围绕影像级 SAR 影像时间序列和区域级 SAR 影像时间序列展开。影像级 SAR 影像时间序列是把整体影像作为研究对象,从每幅影像中提取特征信息,建立影像特征值与时间的关系。如 Grings 等利用 14 幅 ENVISAT ASAR 影像和统计模型建立了影像纹理特征统计量的时间序列,研究湿地的后向散射分布统计参数与生物物理变量之间的关系<sup>[5]</sup>;Ding 等对 30 幅 ENVISAT ASAR 影像分别提取洞庭湖的水边线,利用水边线矢量化湖面区域,建立湖表面积的时间

序列,从而监测湖面积的变化趋势<sup>[6]</sup>。区域级 SAR Image 时间序列是从影像的局部入手,选取整体影像中的不同区域,提取区域内的特征信息,是基于一组像元的整体特征值建立的时间序列。如 Blaes 等利用 3 幅 RADARSAT 影像和 15 幅 ERS 影像对数字化地块内的所有像元的后向散射系数求均值,从而建立地块的时间序列,据此识别农作物的种类<sup>[7]</sup>;Moran 等利用 57 幅 RADARSAT-2 C 波段全极化 SAR 影像,选取不同农作物类型的多边形区域,建立基于多边形内像素的平均值的时间序列,监测农作物与土壤条件<sup>[8]</sup>。相对于区域级和特征级的 SAR 影像时间序列,像素级时间序列尽可能多地保留了原始数据的信息量及地物的细节层次信息,能够更准确地提取地物信息、揭示地物的变化规律。然而,由于 SAR 影像侧视成像的特点,且辐射特性受多种因素影响,导致同种地物的辐射值差异明显,同时 SAR 影像中存在大量噪声,特征点难以获得导致几何配准精度不高,这些都给像素级 SAR 影像时间序列的准确表达带来一定难度。现有的针对像素级 SAR 影像时间序列的研究主要集中在时间序列干涉测量<sup>[9,10]</sup>、时间序列相干点目标识别<sup>[11,12]</sup>等方面,关注的是 SAR 影像数据的相位信息,而基于 SAR 影像特有的地物后向散射信息的时间序列构建及应用一直很少被关注。

为充分利用 SAR 影像堆积数据的时间属性和地物特有的后向散射信息,本文提出了一种像素级

收稿日期:2012-12-21; 修回日期:2013-03-06

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAH28B02);国家自然科学基金资助项目(41001238);南京大学大学生创新训练计划项目(XY1110284008)

作者简介:王亚飞(1988-),男,硕士研究生,研究方向为复杂地理计算、时空数据挖掘、GIS 研发等。E-mail: yfwang\_nju@gmail.com

SAR 影像时间序列的建模方法,主要步骤包括辐射校正和几何精配准,并提出一套针对大数据量 SAR 影像堆积数据的像素级时间序列的建模流程,为 SAR 影像堆积数据的时空挖掘提供有效数据支持。本文利用 2006—2009 年 21 幅分辨率为 150 m 的 ENVISAT ASAR 宽幅模式影像进行建模试验,并从几何精度和辐射精度两方面评价建模结果。

### 1 像素级 SAR 影像时间序列

#### 1.1 定义

遥感影像时间序列是由遥感影像和观测时间组成的元素的有序集合<sup>[13]</sup>。假设有  $n$  幅遥感影像,符号标识  $L = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ ,其中  $t_i$  代表第  $i$  幅影像的获取时间,且观测时间  $t_i$  是严格增加的 ( $i < j, t_i < t_j$ )。若从第  $i$  幅影像中提取特征  $v_i$ ,如 DN 值、NDVI 值、反演模型参数值,则遥感影像时间序列可记为  $V = \{(v_1, t_1), (v_2, t_2), \dots, (v_n, t_n)\}$ 。 $t_i$  的提取单元可以是整体影像,也可以是指定区域(如分类后的地块),甚至是一个像元。当  $v_i$  的提取单元为一个像元时,就是像素级的遥感时间序列。

因此,对于  $p \times q$  行列的  $n$  幅 SAR 影像,其构建出的像素级时间序列为  $X = \{((x_1, y_1), V_1), \dots, ((x_{p \times q}, y_{p \times q}), V_{p \times q})\}$ ,其中  $(x_i, y_i)$  表示第  $i$  个像元的行列坐标, $V_i$  表示第  $i$  个像元的时间序列。通过 SAR 影像像素级时间序列的建模,可以将遥感影像堆积数据转换为一系列由离散值组成的时间序列文本数据。

#### 1.2 分类

像素级 SAR 影像时间序列是以像元为单元建立的时间序列轨迹,它属于时间序列数据的范畴。根据关注点的不同,像素级 SAR 影像时间序列有不同的分类方式。本文从对地变化监测的角度,将像素级 SAR 影像时间序列分为稳定型 SAR 影像时间序列和变化型 SAR 影像时间序列。

对于相同类型的 SAR 影像,稳定型的像素级 SAR 影像时间序列是指在相同极化方式和一定的入射角条件下,该像素的属性信息在研究时段内平稳变化,包括直线型和周期型两种类型。直线型像素级 SAR 影像时间序列(图 1a)像元的后向散射值  $\sigma^0$  随着时间变化沿一条直线在一定区间范围内上下波动,如建筑物和水体像元等;周期型像素级 SAR 影像时间序列是指该像元的后向散射值随时间变化呈周期型变化特征(图 1b),如季节性植被像元。稳定型像素级 SAR 影像时间序列可以有效地应用于地

物识别。

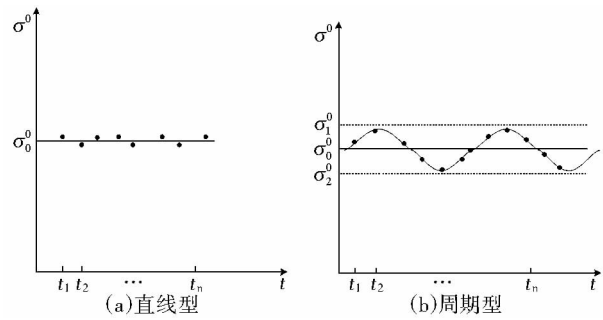


图 1 稳定型时间序列曲线  
Fig. 1 Stable time series curve

变化型像素级 SAR 影像时间序列是指在一定时期内地表覆盖类型发生改变的像元,一般由 2 个及以上的稳定型 SAR 影像时间序列组成(图 2)。变化型像素级 SAR 影像时间序列可应用于地表变化检测,根据变化曲线可有效提取地表覆盖类型变化的时间点和变化类型,即由哪一类型变为另一类别。

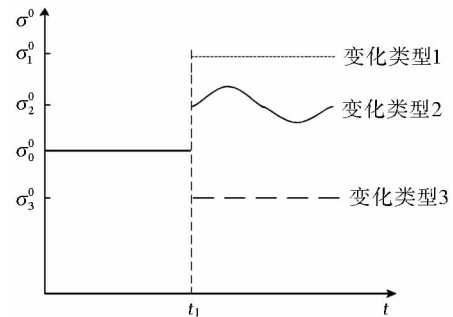


图 2 变化型时间序列曲线  
Fig. 2 Change type time series curve

## 2 建模方法

### 2.1 辐射校正

由于 SAR 斜距成像的特点,原始影像的像元 DN 值或辐射强度值并不能真实地表达地表反射的雷达后向散射值,导致不同传感器、不同时段、不同模式和处理器下获取的 SAR 影像之间的比较通常非常困难。因此,需要将原始影像的 DN 值转换为后向散射系数值,这一过程通常也称为辐射校正<sup>[14]</sup>。辐射校正的方法有很多,本文聚焦于 ENVISAT ASAR 影像的处理,采用下式计算每个像元的后向散射系数值。

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{DN_{ij}^2}{K} \sin(\alpha_{ij}) \quad (1)$$

式中: $\sigma^0$  为雷达后向散射系数; $DN$  为图像像元灰度值; $\alpha$  为像元入射角; $K$  为绝对定标因子; $i, j$  为图像各像元所在的行列数。

作为 SAR 影像的基本物理参数, $\sigma^0$  的大小与被照射地物的几何、物理特性有关。为压缩变化范围,

便于后续数据处理,将  $\sigma^0$  以分贝 (dB) 表示,转换关系为:

$$\sigma^0[\text{dB}] = 10 \log_{10} \sigma^0 (m^2 \cdot m^{-2}) \quad (2)$$

## 2.2 几何配准

像素级 SAR 影像时间序列构建的核心问题是高精度影像间的几何配准。几何配准之前需要对影像进行地形校正。本文利用距离—多普勒地形校正方法,根据各影像元数据中的轨道状参数和下载的 90m SRTM DEM 数据对 SAR 影像进行地形纠正。目前,能够取得像素级配准精度的 SAR 影像处理软件有欧空局的 NEST 软件、GAMMA 公司的 GAMMA 软件和荷兰 Delft 大学的 Doris 软件等,匹配的思想大致相同,通常采用基于窗口的自动配准技术,利用主图像和副图像在空间域或频率域进行配准<sup>[15]</sup>。在主图像上选取匹配窗,副图像上选取搜索窗,在搜索窗内按行列以不同的整像元偏移量计算匹配窗与对应窗的匹配质量评价指标,通过迭代的方式,将误差大的匹配对删除,保留误差小的匹配对,逐步迭代求精。本文采用 NEST 软件对 SAR 影像进行几何配准,总体步骤包括主副影像的确定、特征点对 (GCPs) 的选取、特征点对偏移量的初始估计、移动窗口的相关系数计算和配准多项式的仿射变换。通过调节采样窗口大小、总体 RMS 阈值和匹配多项式的阶数可以提高匹配的精度,保证几何配准的误差精度保持在 0.5 个像素以内。

## 2.3 建模流程

针对大数据量的 SAR 影像堆积数据,本文利用 NEST 软件的批处理功能和现有的并行技术构建像素级 SAR 影像时间序列,并将建模的结果存储到大型数据库中。像素级 SAR 影像时间序列的建模流程如图 3 所示,主要步骤如下:1) 影像集选取与预处理。像素级 SAR 影像时间序列的预处理一般包括影像的选取、裁剪和拼接、元数据更新、辐射校正、地形校正等,其中,辐射校正和地形校正不可或缺。NEST 软件提出了批处理的功能,通过模块化的设计和脚本语言编程,可以迅速完成影像数据集的预处理。2) 高精度几何配准。选取一幅 SAR 影像作为主影像,其他影像为从影像,利用 NEST 软件分别作影像匹配,采用二次多项式仿射变换并将特征点的 RMS 阈值设为 0.4 像素,确保影像重采样后的精度达到 0.5 像素以内。3) 去斑除噪。由于 ASAR 成像过程中的相干波特性的存在,使影像中存在大量的相干斑点噪声,将导致时间序列结果中产生大量的异常值。本文采用  $3 \times 3$  窗口的 Enhanced Lee 滤波方法

对 SAR 影像剔除光斑噪声。4) 按时序建立 SAR 影像文件列表,并行读取影像数据。按时序建立影像文件列表,并按进程数划分 SAR 影像块。各进程以行为单位,依次读取每幅影像,根据像元坐标标识提取该像素在所有影像中的后向散射系数值。5) 并行写入数据库。每个像素的时间序列形成一条记录,将所有 SAR 影像像素级时间序列数据并行写入现有的数据库管理软件中,如 Oracle、SQL Server、PostgreSQL 等,保存像素级时间序列的构建结果以便之后的分析处理。

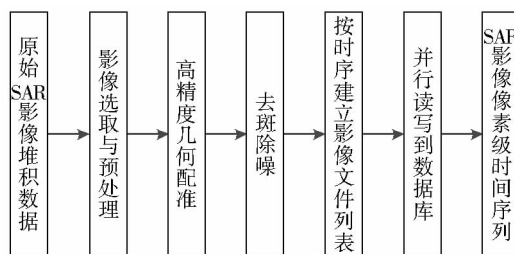


图 3 像素级 SAR 影像时间序列的建模流程  
Fig. 3 Pixel-level SAR image time series modeling process

## 3 试验结果与分析

### 3.1 研究区与数据集

本文研究区选取珠江流域广东省西江段,范围为  $113^{\circ} 419' W \sim 113^{\circ} 553' E, 22^{\circ} 648' S \sim 22^{\circ} 782' N$  (图 4)。研究区绝大部分地形平坦,处于亚热带季风气候区,暖湿多雨,植被茂盛,主要地表覆盖类型包括河流、建筑物、植被等。选用的数据为 2006—2009 年不同时期的 21 景 WSM 模式的 ENVISAT ASAR 影像,该数据是标准格式的 1B 级产品,空间分辨率为 150 m,像素间距为 75 m,极化方式有 HH 和 VV 两种,入射角为  $19^{\circ} \sim 27^{\circ}$ 。研究区的像元总数为  $200 \times 200$  像素。

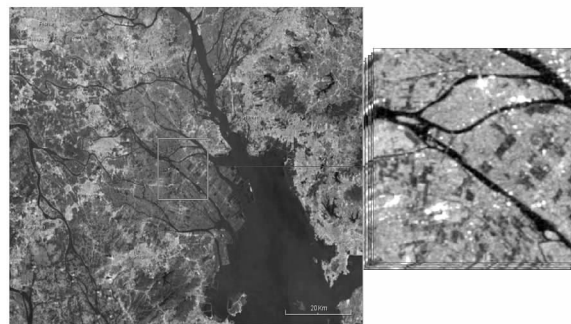


图 4 研究区与数据集  
Fig. 4 The study area and datasets

### 3.2 建模结果

本文对研究区 ASAR 堆积数据进行像素级时间序列建模,得到  $4 \times 10^4$  条像素为单元的时间序列曲线。选取水体、建筑物、植被、山体等典型地物,各自

视采样选取 20 个像素的时间序列,得到时间序列曲线图(图 5,见封 2)。由图 5 可知,同种地物在不同时段、不同极化方式和不同入射角下后向散射差异较大,利用单幅或多时相 ENVISAT ASAR 影像很难准确区分不同的地物类型。而对于同种地物类型像素的时间序列曲线,形态上有较好的相似性,利用像素级的时间序列曲线能有效提取相应的地物,同时根据时间节点可进行地表覆盖的变化检测。

### 3.3 精度分析

3.3.1 几何精度 试验以 2006 年 9 月 28 日的 ENVISAT ASAR 影像作为主影像,对其他时期的 ENVISAT ASAR 影像做几何相对配准。分别从影像中选取 20 个地面特征点(地面检查点主要选择影像的 4 个角点、河流交叉处等典型的标志点),计算所有检查点的点位误差( $R$ ),评价该建模方法下的 SAR 影像时间序列的几何精度, $R$  表达式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{l=21} \sqrt{(x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2}}{l} \quad (3)$$

其中: $R$  表示第  $j$  个控制点的点位总体误差, $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  表示该控制点在主影像上的经纬度坐标, $x_i$ 、 $y_i$  表示配准后该控制点在第  $i$  时刻副影像上的经纬度坐标。

本文中  $R$  的计算结果是以度为单位的地理坐标,需要根据影像元尺寸转换为像素坐标。经计算,20 个检查点的点位总体误差均在 0.4 个像素以内,平均点位误差为 0.214 个像素。结果表明,几何配准方法能够满足 SAR 影像像素级时间序列构建的几何精度要求。

3.3.2 辐射精度 以水体为例,通过人工目视采样,选取不同水体区域内的 40 个水体像元(图 6,见封 2),采用 Pearson 简单相关系数进行相似度分析如下:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

式中: $r$  为像素级时间序列的相关系数值, $n$  为构成像素级时间序列的影像个数, $x_i$  为像元  $x$  第  $i$  时间节点的后向散射系数值, $y_i$  为像元  $y$  第  $i$  时间节点的后向散射系数值。

经计算,该 50 个像元的时间序列互相关系数均在 0.80 以上,具有很强的相似性,说明该像素级时间序列具有较高的辐射精度。由于影像极化方式和入射角不同,不同时期影像中水体像元的后向散射系数差异较大。

## 4 结语

本文提出一种像素级 SAR 影像时间序列建模方法,并对 2006—2009 年 21 幅 ENVISAT ASAR 影像进行建模试验,取得了预期效果。试验分析表明,像素级 SAR 影像时间序列建模方法具有较高的几何精度和辐射精度,同种地物的时间序列曲线具有较高的相似性,像素级 SAR 影像时间序列能有效应用于地物识别、聚类分析、变化检测等。然而,面对海量 SAR 影像堆积数据,如何利用时间序列挖掘的相关理论和方法推进 SAR 像素级时间序列具体应用有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] JULEA A, MEGER N, BOLON P, et al. Unsupervised spatio-temporal mining of satellite image time series using grouped frequent sequential patterns[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(4): 1417—1430.
- [2] 郝洪美, 张永红, 石海燕, 等. 统计假设检验方法在全极化 SAR 变化检测中的应用[J]. 遥感学报, 2012, 16(3): 520—532.
- [3] 曹云刚. 多时相 ASAR 数据的地表覆盖分类研究[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 103—105.
- [4] ZHU Z, WOODCOCK C E, ROGAN J, et al. Assessment of spectral, polarimetric, temporal, and spatial dimensions for urban and peri-urban land cover classification using Landsat and SAR data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012(117): 72—82.
- [5] GRINGS F, SALVIA M, KARSZENBAUM H, et al. Statistical information of ASAR observations over wetland areas: An interaction model interpretation[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2010, 65(1): 77—85.
- [6] DING X W, LI X F. Monitoring of the water-area variations of Lake Dongting in China with ENVISAT ASAR images[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(6): 894—901.
- [7] BLAES X, VANHALLE L, DEFOURNY P. Efficiency of crop identification based on optical and SAR image time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 96(3—4): 352—365.
- [8] MORAN M S, ALONSO L, MORENO J F, et al. A RADAR-SAT-2 Quad-polarized time series for monitoring crop and soil conditions in Barrax, Spain[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(4): 1057—1070.
- [9] 王腾, PERISSIN D, ROCCA F, 等. 基于时间序列 SAR 影像分析方法的三峡大坝稳定性监测[J]. 中国科学(地球科学), 2011, 41(1): 110—123.
- [10] SELEEM T A, PARCHARIDIS I, FOUMELIS M, et al. Detection of ground deformation over Sharm El-Sheikh-Ras Nasrani coastal zone, South Sinai (Egypt), by using time series SAR interferometry[J]. African Earth Sciences, 2011, 59(4): 373—383.

(下转第 116 页)

信息定位错位处并进行改正,不需要原来两幅具有重叠区域的相邻图像;同时,该算法有效避免了不同错位点寻找到相同对应错位点的情况,提高了算法的准确性且算法速度较快、效率较高;此外,该算法在消除错位的情况下基本保持了原图像的特性和清晰度,拼接缝消除后图像的结构相似度增大。实验证明该算法是一种有效、可行的结构拼接缝消除方法。

#### 参考文献:

- [1] 邵向鑫. 数字图像拼接核心算法研究[D]. 吉林大学, 2010.  
 [2] HAYAT K, PUECH W, GESQUIERE G. Seamless heterogeneous tessellation via smoothing and mosaicking in the DWT do-

- main[J]. *Visual Information Processing and Communication*, 2010, 7543: 1-8.  
 [3] 张显伟. 图像拼接技术初步研究[D]. 中国科学技术大学, 2009.  
 [4] 王娇颖, 陈卫东, 李良福. 一种基于特征不变描述的图像无缝拼接算法[J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 59-64.  
 [5] WEN H Y, ZHOU J Z. An improved algorithm for image mosaic[A]. *International Symposium on Information Science and Engineering*[C]. 2008, 497-500.  
 [6] CHON J, KIM H, LIN C-S. Seam-line determination for image mosaicking: A technique minimizing the maximum local mismatch and the global cost[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2010(65): 86-92.  
 [7] 蒋红成. 多幅遥感图像自动裁剪镶嵌与色彩均衡研究[D]. 中国科学院遥感应用研究所, 2004.

### A Novel Method for Structural Seamline Removal Based on Dynamic Triangle Correction Area

ZHENG Yue, CHENG Hong, SUN Wen-bang, ZHANG Feng-jing

(Department of Aviation & Spaceflight Intelligence, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Finding an optimal seam-line is generally used to eliminate the structural dislocation, but it can not remove all the dislocation. Thus this paper puts forward a novel method for seam-line removal which focuses on the dislocations in some parts of the image. Firstly, the corresponding dislocation points are found according to the minimum difference in the template. And then the dynamic correction boundary is determined. The dislocation is eliminated gradually in the triangle area which is formed by the corresponding dislocation points and the correction boundary point. The image with a good sense of sight is obtained finally. Experiments results indicate that this new method can find the corresponding points precisely and eliminate the dislocation effectively so that the image can be restored consistently and completely. Moreover, this method deals with the image that has been geometric matched instead of the two overlapping images. In conclusion, it is an effective and efficient algorithm for structural seamline removal.

**Key words:** seamline removal; structural seamline; dislocation; template method; dynamic triangle

#### (上接第 112 页)

- [11] 艾彬, 刘凯, 黎夏. 时序 SAR 影像相干点目标识别方法研究[J]. *热带地理*, 2011, 31(4): 388-392.  
 [12] 卢丽君, 廖明生, 王腾, 等. 一种在长时间序列 SAR 影像上提取稳定目标点的多级探测法[J]. *遥感学报*, 2008(4): 561-567.  
 [13] LHERMITTE S, VERBESSELT J, VERSTRAETEN W W, et al. A comparison of time series similarity measures for classification and change detection of ecosystem dynamics[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3129-3152.  
 [14] ROSICH B, MEADOWS P. Absolute calibration of ASAR Level 1 products[S]. ESA/ESRIN, ENVI-CLVL-EOPG-TN-03-0010, 2004.  
 [15] 张登荣, 俞乐. 一种高精度的干涉雷达复数影像配准方法[J]. *遥感学报*, 2007, 11(4): 563-567.

### Research on Modeling Method for Pixel-Level SAR Image Time Series

WANG Ya-fei, CHENG Liang, ZHONG Li-shan, LI Man-chun, JIANG Jie

(Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Pixel-level remote sensing image time series retain more raw information and detail level information on surface features. It contributes to extract feature information more accurately and reveal the surface change rules. Aimed at SAR image data set, this paper presented the modeling method of pixel-level SAR image time series, the main procedure of which includes radiometric correction and high-precision geometric registration. The method transforms SAR images stacked data into time series textual data consisting of discrete backscattering coefficients. 21 wide-swath ENVISAT ASAR images from 2006 to 2009 which have 150 m resolution with a pixel spacing of 75m were utilized to model pixel-level SAR image time series. Geometric accuracy and radiometric accuracy were evaluated respectively in the experiment. The experimental results showed that the modeling method possesses high precision both in geometry and radiation and applied to identify the ground object type. It will play a unique advantage in features extraction, clustering analysis and change detection, bearing strong potential in application.

**Key words:** pixel-level; SAR; time series; backscattering coefficient; modeling

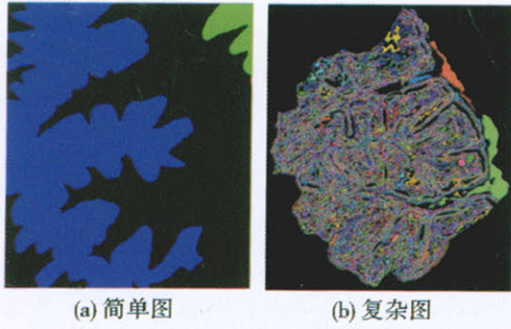


图 3 测试数据中连通域分布情况

Fig. 3 Distribution of connected components within test data

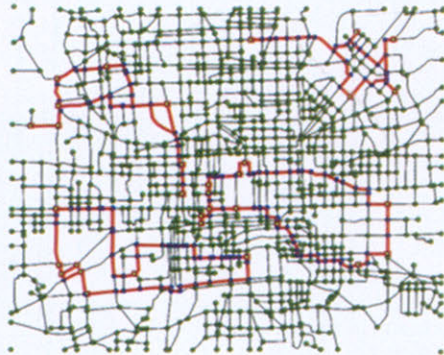
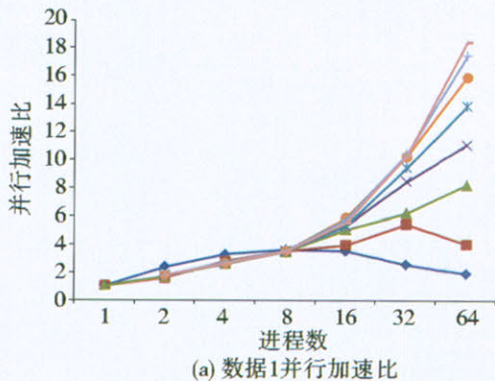
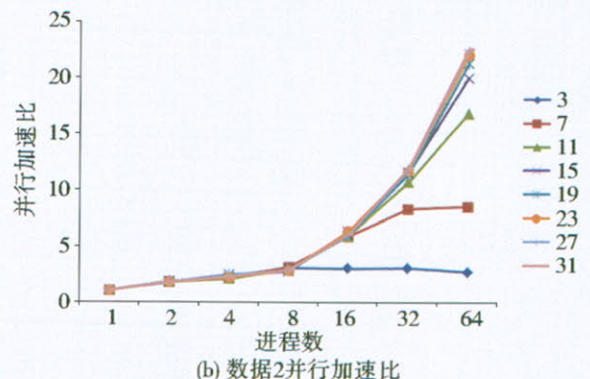


图 5 运行结果

Fig. 5 Operation result



(a) 数据1并行加速比



(b) 数据2并行加速比

图 6 不同数据及窗口大小并行效率测试  
Fig. 6 Test of parallelism with different data size and window size

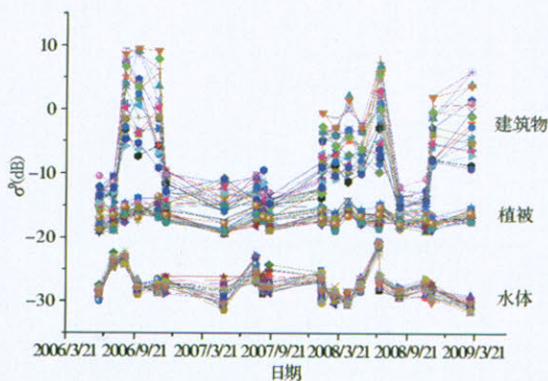


图 5 像素级 ENVISAT ASAR 时间序列的构建结果  
Fig. 5 The modeling result of pixel-level ENVISAT ASAR time series

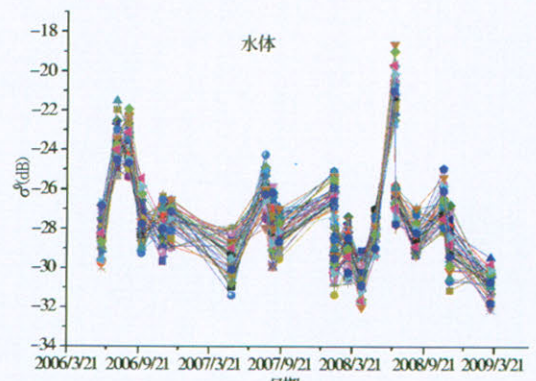


图 6 采样水体的像素级 ENVISAT ASAR 时间序列曲线  
Fig. 6 Pixel-level ENVISAT ASAR time series of sampled water

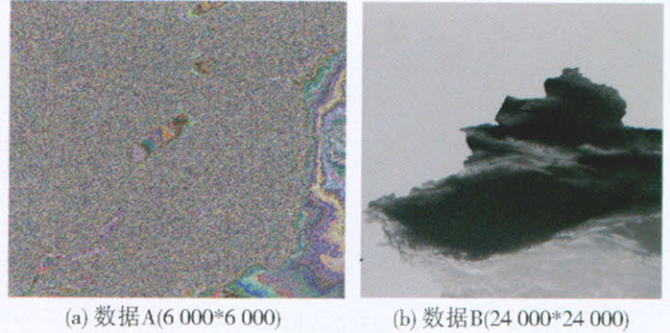


图 3 实验数据源  
Fig. 3 Experiment data

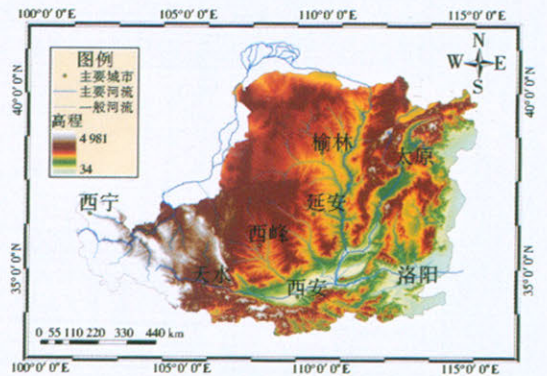


图 4 实验样区  
Fig. 4 The study area