

# 时序 InSAR 离散相干点相位解缠误差 检查与校正方法研究

李永生<sup>1,2</sup> 张景发<sup>1</sup> 李振洪<sup>3</sup> 姜文亮<sup>1</sup> 罗毅<sup>1</sup> 赵勇<sup>4</sup>

1 中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室,北京,100085

2 中国地震局工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨,150080

3 英国纽卡斯尔大学土木工程与地球科学学院,英国纽卡斯尔,NE1 7RU

4 中国石油化工股份有限公司石油工程技术研究院,北京,100101

**摘要:**提出了一种基于三角形闭环残差的离散相干点解缠相位误差检测与校正算法,该算法能有效提高离散相干点解缠相位的精度。以沧州市沿海地区为实验区域,利用 2008~2010 年 18 景 ENVISAT ASAR 数据进行 InSAR 时序分析,对解缠相位跳变误差进行检测和校正,并对校正前后时序分析结果的精度。实验结果显示,解缠相位一致性检查和误差校正可以有效改正解缠干涉图中的主要相位跳变误差,与改正前相比:① 离散点时序累积形变特征的时间连贯性更强,减少了很多突跳;② 增加了有效相干点,实验区内有效相干点个数由 68 000 个增加到 186 400 个;③ 两个验证点累积形变量的 RMS 值分别降低了 8.1 mm 和 13.2 mm,证明了该方法的有效性。

**关键词:**干涉测量时序分析;相位解缠误差;相位一致性;闭环残差

**中图法分类号:**P237.3

**文献标志码:**A

InSAR 高级时序分析方法可以测量大范围地表的微小形变场,空间分辨率达到 m 级,测量精度可以达到 mm 级<sup>[1-2]</sup>。Berardino 等提出的短基线集 InSAR 技术及后续改进方法<sup>[3-4]</sup>目前被广泛应用于监测地下水开采<sup>[5]</sup>、地壳活动<sup>[6]</sup>、火山运动<sup>[1]</sup>、煤矿、石油和天然气开采引起的地面沉降<sup>[7]</sup>等。短基线集可以有效减少干涉图受到时空去相干因素的影响,提高时序分析的精度<sup>[3-4]</sup>。

时序分析要达到微小形变监测的要求,必须对 InSAR 过程中的各类误差源进行估计和削弱。影响 InSAR 时序分析结果的因素很多,主要有大气延迟影响、轨道误差、DEM 误差、解缠误差等。除了解缠误差外,其他几种误差都可以在时序分析过程中进行消除,这方面的研究比较多<sup>[3-4]</sup>,而相位解缠误差识别和校正的研究却相对较少。相位解缠精度不但直接影响到其他误差的估计,而且会影响到最终时序分析结果的精度<sup>[1]</sup>。由于相干点采样过疏或者受到了噪声影响,在干涉图上会造成一些相位不连续区域。这些不连续区域会

在解缠干涉图上形成相位跳变误差。目前,离散点解缠相位跳变误差的检测和校正还面临很多挑战,部分学者已开展了类似多视干涉图的相位跳变误差校正的研究。如 Biggs 等提出了用短基线集网络关系构建闭环进行相位解缠误差的检测和校正方法<sup>[8]</sup>;王华等利用最小生成树方法生成非冗余干涉图集,通过增加干涉对构成闭环,再对每一个干涉环进行解缠误差识别<sup>[2,9]</sup>。上述方法主要针对多视解缠相位干涉图中的分布式散射体。

本文将多视解缠干涉图闭环残差检测方法扩展到时序分析中的离散点相位解缠误差校正中,可以处理全分辨率相干点,该方法可以有效地提高微小形变的探测精度。本文同时也阐述了适合离散相干点解缠相位误差检测和校正的处理流程。

## 1 解缠相位一致性

InSAR 干涉图中只是原始相位值的缠绕相

收稿日期:2013-04-07

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41204004);中央级公益性科研院所基本科研业务专项资助项目(ZDJ2013-22);爱丁堡皇家协会与国家自然科学基金联合资助项目(443570);国家科技部、欧洲空间局龙计划三期资助项目(10607)。

第一作者:李永生,博士生。现主要从事 InSAR 处理研究。E-mail: yongsheng2009@gmail.com

通讯作者:张景发,博士,研究员。E-mail: zhangjingfa@hotmail.com

位主值,而整数周期未知。相位解缠步骤就是恢复干涉相位的整周模糊度,并生成一幅连续的解缠相位图。相位解缠的相位一致性(phase consistency)是指相位解缠过程与积分路径不相关,也就是解缠干涉图中任意两点的相位差与这两点的积分路径无关,这是相位解缠的精度评价标准之一。相邻点之间的相位差绝对值要小于 $\pi$ 是InSAR相位一致性的必要条件<sup>[10-11]</sup>。当满足相位一致性条件时,解缠处理相对比较容易,解缠误差发生的概率也比较低。

在实际InSAR处理中,干涉图的相位不一致性主要由以下原因造成<sup>[12]</sup>:①去相干影响以及热噪声影响<sup>[13]</sup>,这一类原因比较常见,如干涉对的时间间隔较长,目标区域植被覆盖丰富等。②复杂地形下生成的干涉图也常常会造成相位不一致,特别是在多山区域或者植被覆盖茂密地区,使得相位相干性较高的区域呈块状分布。这些区域之间的相位差绝对值一般会超过 $\pi$ 。这种相位点在采样不充分的情况下也会造成解缠误差,具体表现是相位会呈现 $2k\pi$ ( $k$ 为非零整数)的相位跳变<sup>[8]</sup>。相位跳变在解缠相位图上通常呈现出斑块状,目视解译比较容易,可以进行人工校正。

## 2 相位解缠误差检测与校正

### 2.1 相位解缠误差检测和校正方法

在短基线集时序分析(small baseline subset, SBAS)处理中,首先需要构建由最优干涉图集组成的时空基线网络<sup>[4-5]</sup>。网络的构成包含一个内在的限制条件,即这些网络中相邻干涉图之间存在一幅共同影像。干涉图影像的时间序列可以在空间构成多个三角形。Biggs等提出了一种利用三角形相位闭合环特性进行解缠误差检测的方法<sup>[8]</sup>。三角形闭合环和GPS测量技术中的基线闭合环的概念类似,即假设对同一个区域进行三次SAR成像,三个时刻的SAR影像可以生成三幅干涉图,构成一个闭合环。由于这些干涉图之间存在着一定的内在联系(两两之间都共用一幅SAR影像),闭合残差在理论上应为一个常量。如果部分相干点的闭合残差与周围其他点存在 $2k\pi$ 相位差( $k$ 为非零整数),说明该闭合环中至少有一幅干涉图在该点上存在解缠相位整周跳变误差。如果要确定哪些干涉图存在相位整周跳变误差,可以通过多个相邻闭合环进行联合识别。相反,如果所有相干点的闭合残差上都保持着相同水平,可以认为在解缠相位质量上绝大多数相

干点的解缠是合格的。

假定在每个三角形中,三个顶点分别代表三幅影像的获取时间(即 $A$ 、 $B$ 和 $C$ ),三条边分别代表三幅干涉图(即 $\varphi_{AC}$ 、 $\varphi_{AB}$ 和 $\varphi_{BC}$ ),即

$$\varphi_{AC} - \varphi_{AB} - \varphi_{BC} = 0 \quad (1)$$

在理想情况下,式(1)是成立的<sup>[8]</sup>。在实际情况下,如果不存在相位解缠误差,干涉图上每个相位贡献(地表缓慢变形、轨道误差以及大气误差等)在空间上表现出连续的特性,在一个闭合环中的所有相干点,式(1)中等号右边为一常量值。如果干涉图上存在不连续区域,导致这个区域的解缠相位与其他常量值存在 $2k\pi$ 的相位跳变( $k$ 为非零整数)。将式(1)得到的闭合环残差与三个原始相位图进行对比,根据该闭合环残差进行相位跳变区域的检测,并将解缠误差与具有低频性质的构造运动、轨道误差和大气相位贡献进行分离。

解缠相位跳变被检测出来后,就可以进行相位校正,一般产生跳变的相位值是 $2k\pi$ ( $k$ 为非零整数)<sup>[8]</sup>。通过在相位跳变区域进行 $2k\pi$ 补偿处理,修正解缠误差。理论上可以采用相位自动检测与校正的方法进行所有解缠误差的改正,但是在实际情况下,解缠干涉图中存在很多局部误差,这些误差加上噪声等因素造成的误差,校正非常复杂,也非常耗时,因此,目前通用的方法是通过人工交互进行手动校正。

### 2.2 离散点相位误差检查和校正

对上述多视干涉图解缠相位跳变误差的校正方法进行扩展,使该方法能应用到全分辨率离散相干点上。具体的处理流程如下。

1) 构建网络闭环。基于干涉图集合的基线网络可以构建出大量三角形,每个三角形作为一个分析单元检测三角形上每条边对应的干涉图的相位解缠误差。

2) 计算每个闭合环上的残差图。在每一个相干点上利用步骤1)组合三角形闭合环,根据式(1)计算每个三角形内的解缠相位闭合残差。对闭合环上干涉图进行累加,查看闭合环残差,依据残差分布对解缠误差进行识别。

3) 将得到的每一幅残差图和解缠干涉图进行降采样处理,将离散点问题转换为规则格网问题<sup>[1]</sup>。

4) 对相位跳变区域进行识别。可以采用类似§2.1中的方法进行干涉图的识别。为了识别解缠误差的来源,每个干涉图需要依次进行检查。检查出相位跳变的精确位置有时比较复杂,需要几个相邻的三角形同时进行。

5) 对跳变区域的离散点进行相位校正。通过查询每个区域的相位值与相邻区域的相位差,计算最佳的  $2k\pi$  跳变相位值,并将之补偿到对应跳变区域的原始解缠相位值中。

有时在一个解缠图上有多个相位跳变区域,需要重复 4)、5) 步,对每一个区域进行识别校正。对所有解缠图进行检测和校正后,可以重复一次 1)~4) 步,以保证每一幅解缠图上主要的相位误差区域都得到校正。

### 3 实验结果分析

本文利用 2008 年 1 月至 2010 年 9 月期间 18 景 ENVISAT ASAR 条带模式数据进行 InSAR 时序分析,数据覆盖区域位于河北沧州沿海地区,该地区长期受到地下水开采引起地面沉降的威胁。利用 FRAM-SBAS 软件构建了一个短基线集干涉像对集,见图 1,共生成 47 幅干涉图(灰色虚线)。在该网络图中提取出 34 幅三角形,以其中的 20090419-20090524-20090802 闭合环(见图 1 中黑色三角形)为例,进行解缠相位跳变误差的检测和校正。

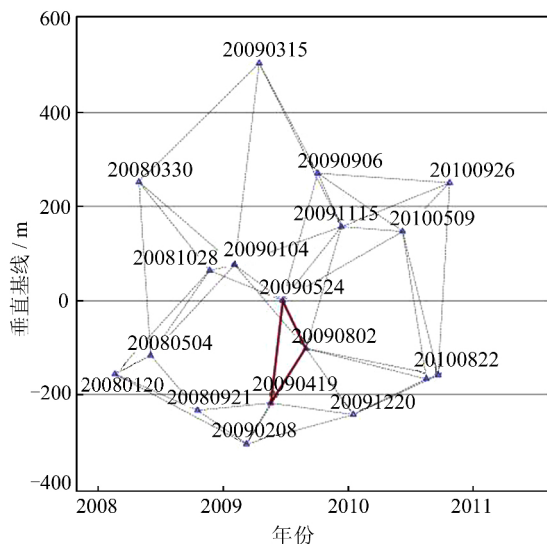


图 1 短基线集干涉图时空网络分布

Fig. 1 ENVISAT Images Used in This Study

#### 3.1 误差检测与校正

闭合环构建完成后,即可以对解缠相位进行误差检测。如图 2 所示,在 20090419-20090524-20090802 闭合环进行干涉图解缠相位累加。经过闭合残差计算得到相位残差图(图 2(d))。在图 2(d)中,可以明显看出多个相位跳变区域,标识分别为 I、II 和 III。通过和图 2(a)、2(b)、2(c) 进行对比,可以比较容易地识别每个干涉图上对

应的跳变区域。一般地,可以根据图 2(d) 中相位跳变区域的形状就可以识别出对应解缠相位图中的解缠误差。如果一个闭合环还不能进行完整的误差识别,则需要结合相邻的闭合环三角形进行整体分析。

在识别出闭合环上干涉图的主要解缠相位误差后,逐个改正每个跳变区域的相位值。在相位校正结束后,重新进行闭环计算,可以发现主要相位跳变区域都得到了有效改正,见图 3。

在对干涉图上的主要解缠误差区域进行校正之后,可以看出依然存在一些离散的相位跳变点,见图 3。因为在后续时序分析中有专门针对这些点的处理过程,所以这类离散误差点可以暂时忽略。

#### 3.2 误差校正后的时序分析

对整个解缠干涉图集进行分析和校正之后,即可以进行后续的时序分析。图 4(a)、4(b) 分别表示解缠相位误差校正前后的 InSAR 时序分析结果。下面分别从空间维和时间维对比解缠误差校正对后续时序分析结果的影响。

在空间维度上,分析有效高质量相干点的个数以及空间分布特征。为了评估每个相干点的质量,计算每一个相干点的系统闭合差,用均方根(root mean square, RMS)表示:

$$\varphi_{\text{RMS}} = \frac{1}{N} \left[ \sum_N (\varphi_{ij} - \sum_{k=i}^{j-1} m_k)^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

其中,  $\varphi_{ij}$  表示第  $i$  幅影像和第  $j$  幅影像生成的干涉图的相位值;  $\sum_{k=i}^{j-1} m_k$  表示  $\varphi_{ij}$  对应的重构相位值;  $N$  表示干涉对个数。  $\varphi_{\text{RMS}}$  值越小,该相干点的质量越高。设定阈值为 0.45 rad(对于 ASAR 而言,相当于 2 mm 的 LOS 向距离变化),去除部分高于该阈值的低质量相干点。对比图 4(a)、4(b) 发现,在解缠误差校正之后,保留了更多高质量的有效相干点。原始候选相干点的个数是 250 342,经过校正后,有效相干点从原来的 68 000 个增加到 186 400 个(近 3 倍)。经过误差校正之后,时序分析结果在空间上的分布更加连贯,更能反映主要沉降区域的特征,见图 4(a)、4(b) 中的 I 区和 II 区。图 4(b) 中的 I 区相对图 4(a) 包含了更高密度的相干点,能更细致地描述该地区沉降的细节信息。II 区经过对比,校正前后不仅增加了有效相干点的个数,还消除了部分平均速率跳变,见图 4(b)。

在时间维度上,分析相干点在时序上形变演变中的特征。针对图 4 中的 I 区和 II 区分别选择

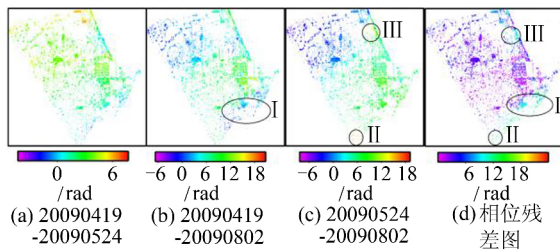


图2 离散点的解缠相位闭环检查

Fig. 2 Consistency Checking for Discrete Points

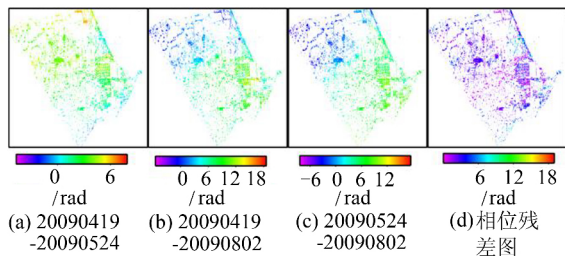
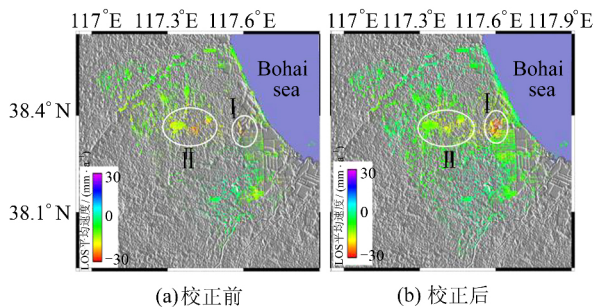


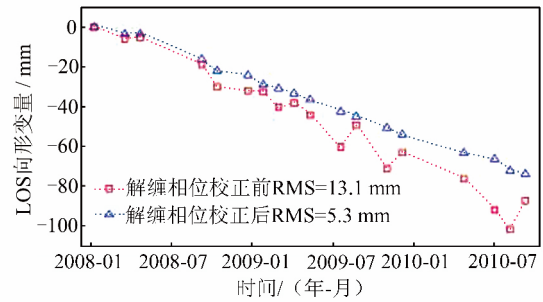
图3 经过校正的解缠相位图及闭环残差图

Fig. 3 Phase Consistency and Closure Residual  
After Phase Errors Correction图4 经过相位解缠误差校正前后年平均  
沉降速率场对比Fig. 4 Comparison of the Mean Displacement Fields  
Before and After Phase Errors Correction

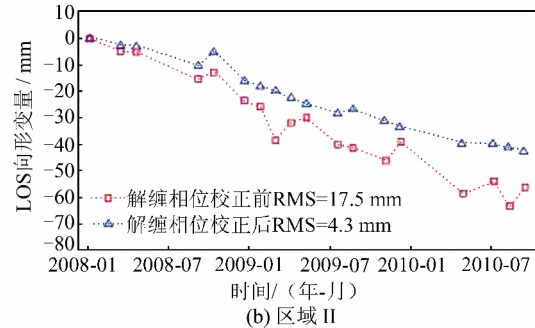
一个点区域,分析其形变时序变化特征,见图5。I、II两个区域分别对应图5(a)、5(b)。从图5中可以看出,上述区域在经过相位校正之后,形变特征在时间上的连贯性更强,减少了很多突跳,而且RMS也得到了明显的降低。I区点的RMS从原来的13.1 mm降到5.3 mm,II区点的RMS从17.5 mm降到4.3 mm,说明解缠相位误差校正可以明显降低时序分析结果的不确定水平。通过对比解缠相位误差校正前后的平均速度形变场可知,在相位误差校正之后,明显抑制了平均速度场的误差。

## 4 讨论与结语

本文利用三角形闭环残差算法阐述了从离



(a) 区域I



(b) 区域II

图5 两个验证区域的形变累积量

Fig. 5 Displacement Time Series over Two Areas

散点相位解缠误差检测到校正一系列的处理流程。利用18景ENVISAT ASAR数据进行基于离散相干点的时序分析,比较了相位跳变校正前后的时序分析结果。由于缺乏该区地面的实测数据,本文分别从空间维度和时间维度上进行了对比。在空间维度上,在对存在相位跳变的干涉图进行校正之后,有效相干点的个数明显提高,从原来的68 000个增加到186 400个。在时间维度上,用RMS表征时序分析结果的不确定性,在经过相位误差校正之后,该不确定性也明显降低,所选两个区域验证点的形变累积量RMS值分别降低大约8.1 mm和13.2 mm。另外,在相位误差校正后,选择区域的估计形变速率值都有不同程度的减低。这是由于在解缠相位跳变误差校正之前,误差是从第一个时刻累积传递到最后时刻的。

目前使用该方法需要注意以下几点:① 三角形闭环残差算法主要是针对解缠干涉图上大区域的相位跳变误差,忽略了一些离散的小区域。② 在一些形变量比较大的干涉图(如同震干涉图)上,在断层附近的相位跳变是合理存在的,在遇到类似的情况时,需要保留该相位跳变。③ 在两个相位跳变的边界容易造成新的相位跳变,这种情况下需要进行人工干预。有时过校正会改变原本正确的相位信息,所以需要查看解缠前的干涉图,对比干涉图的变化情况,而且只针对主要解缠误差。④ 对解缠相位跳变误差可以进行自动识别,但目前还没有完全实现跳变误差的自动校正,

需要进行手工交互处理。下一步的研究方向是进行自动或者半自动解缠相位跳变校正算法的研究。

致谢:感谢国家科技部、欧洲空间局龙计划三期提供的 ENVISAT ASAR 原始数据。

### 参 考 文 献

- [1] Hooper A. Persistent Scatter Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation[D]. San Francisco: Stanford University, 2006
- [2] Wang H, Wright T J, Yu Y, et al. InSAR Reveals Coastal Subsidence in the Pearl River Delta, China [J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 191(3): 1 119-1 128
- [3] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40: 2 375-2 383
- [4] Li Z, Fielding E, Cross P. Integration of InSAR Time Series Analysis and Water Vapour Correction for Mapping Postseismic Deformation After the 2003 Bam (Iran) Earthquake[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3 220-3 230
- [5] Li Yongsheng, Zhang Jingfa, Luo Yi, et al. Monitoring Land Deformation Using PSInSAR with TerraSAR-X High Resolution Spotlight SAR Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1 452-1 455 (李永生, 张景发, 罗毅, 等. 利用高分辨率聚束模式 TerraSAR-X 影像的 PSInSAR 监测地表变形[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(12): 1 452-1 455)
- [6] Wang H, Wright T J, Biggs J. Interseismic Slip Rate of the Northwestern Xianshuihe Fault from InSAR Data [J]. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L03302, doi:10.1029/2008GL036560
- [7] Gournelen N, Amelung F, Casu F, et al. Mining-related Ground Deformation in Crescent Valley, Nevada: Implications for Sparse GPS Networks[J]. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L09309
- [8] Biggs J, Wright T, Lu Z, et al. Multi-interferogram Method for Measuring Interseismic Deformation: Denali Fault, Alaska[J]. *Geophysical Journal International*, 2007, 170(3): 1 165-1 179
- [9] Chen Tao, Qin Tianyi, Chen Xiaosen, et al. Application of Minimum Closed Loops Searching Algorithm in Detecting InSAR Phase Unwrapping Errors [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(4): 88-91 (陈涛, 秦天亦, 陈晓森, 等. 最小独立闭环搜索算法在探测 InSAR 相位解缠误差中的应用[J]. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33(4): 88-91)
- [10] Goldstein R, Zebker H, Werner C. Satellite Radar Interferometry: Two Dimensional Phase Unwrapping[J]. *Radio Science*, 1988, 23(4): 713-720
- [11] Chen C, Zebker H. Network Approaches to Two Dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms[J]. *J Opt Soc Am*, 2000, 17: 401-414
- [12] Liu Guolin, Zhang Lianpeng, Jiang Tao. Analysis of Consistency and Inconsistency in Phase Unwrapping [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 8A(z1): 188-190 (刘国林, 张连蓬, 江涛. 相位解缠中的一致性与非一致性分析[J]. *中国图像图形学报*, 2003, 8A(z1): 188-190)
- [13] Zebker H A, Howard A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959

## Detection and Correction of Phase Unwrapping Errors in InSAR Time Series Analysis with Discrete Coherent Points

LI Yongsheng<sup>1,2</sup> ZHANG Jingfa<sup>1</sup> LI Zhenhong<sup>3</sup> JIANG Wenliang<sup>1</sup> LUO Yi<sup>1</sup> ZHAO Yong<sup>4</sup>

1 Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

2 Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, China

3 School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle Upon Tyne, NE1 7 RU, UK

4 Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

**Abstract:** Due to temporal and spatial decorrelation and other noise, the integer-cycle jumps always appear in the unwrapped phase. It is well known that phase unwrapping errors represent one of the major limitations of Interferometric SAR (InSAR). A phase closure method is presented to detect and

(下转第 1213 页)

## A Gross Error Detection Method of Vehicle-borne Cubic Panoramic Image Sequence

ZHANG Zhengpeng<sup>1, 2</sup> JIANG Wanshou<sup>1</sup> ZHANG Jing<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing,  
Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

**Abstract:** Because the epipolar geometry model estimation of panoramic images is unstable under the low match inlier ratio cases, large numbers of outliers or errors cannot be detected using RANSAC method. A new gross error detection method based on multiple constraints is presented for vehicle-borne panoramic image sequences. First, the initial matching points are extracted using SIFT and nearest neighbor matching, then independent random matching points are constructed by redundant gross error constraints. Second, the movement relationships between panoramic images are approximately expressed by the histogram statistics of optical flow magnitude and direction, which can effectively improve the matching inlier ratio. Finally, the epipolar geometric constraint, scale constraint and sky point constraint are used for gross error detection. Several panoramic images were selected and used for experiments. An analysis and comparison were carried out on these data. The results show that the proposed method works well in short-baseline conditions for the number and accuracy of correct matching points, especially for complex scenes in low inlier ratio cases. The algorithm performance is relatively stable, and provides better constraint for gross errors usually caused by repeated textures, scale changes, and moving objects.

**Key words:** vehicle-borne panoramic images; optical flow; gross error detection; SIFT feature

**First author:** ZHANG Zhengpeng, PhD candidate, lecturer, specializes in vehicle-borne mobile survey technology. E-mail: zhangzhengpeng2004@126.com

**Corresponding author:** JIANG Wanshou, PhD, professor. E-mail: jws@lmars.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National 973 Program of China, No. 2012CB719904; the National Natural Science Foundation of China, No. 41101452; the Research Fund of Doctoral Program of Higher Education, No. 20122121120003.

(上接第 1203 页)

correct phase unwrapping errors for discrete coherent points in InSAR time series analysis. Its application to ENVISAT Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) data over the coastal zone of Cangzhou, Hebei Province showed a significant improvement in the InSAR time series results, with the number of valid coherent pixels increasing from 68 000 to 186 400 and the root mean square (RMS) decreasing from 13.1 mm to 5.3 mm and 17.5 mm to 4.3 mm for two deforming areas respectively.

**Key words:** InSAR time series analysis; phase unwrapping error; phase inconsistency; phase closure residuals

**First author:** LI Yongsheng, PhD candidate. He is concentrated on InSAR processing. E-mail: yongsheng2009@gmail.com

**Corresponding author:** ZHANG Jingfa, PhD, researcher. E-mail: zhangjingfa@hotmail.com

**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41204004; the Special Fund for Basic Scientific Research of Institute of Crustal Dynamics, No. ZDJ2013-22; the Royal Society of Edinburgh and the National Natural Science Foundation of China, No. 443570; Dragon Programme III, No. 10607.