

影响四轨法 D-InSAR 形变测量精度 误差的相关性分析^①

余景波^{1,2}, 刘国林², 王肖露¹

(1. 青岛求实职业技术学院建筑工程学院, 山东 青岛 266108;

2. 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 卫星成像的基线、视角、基线倾斜角、斜距、卫星距离地面径向距离以及地面分辨率等因素严重影响着合成孔径雷达差分干涉测量监测地面形变的能力和形变监测结果的精度。本文在分析四轨法 D-InSAR 基本原理和数据处理流程基础上, 详细给出了相位测量误差对形变测量精度影响的定量关系式; 分析讨论了基线长度误差、基线倾斜角误差、斜距误差、卫星高度误差和地形因素误差对形变测量精度的影响。从而在定量分析方面得出了这些误差对四轨法 D-InSAR 形变测量精度影响的结论。

关键词: 四轨法 D-InSAR; 数据处理; 误差; 相关性分析

中图分类号: P227 文献标志码: A 文章编号: 1000-0844(2013)02-0296-06

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.02.0296

Related Analysis of Effecting Errors in Deformation Measurement Accuracy of Four-pass D-InSAR

YU Jing-bo^{1,2}, LIU Guo-lin², WANG Xiaolu¹

(1. Institute of Architecture and Engineering, Qingdao Qiushi College, Qingdao Shandong 266108, China;

2. Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China)

Abstract: Differential interferometry synthetic aperture radar (D-InSAR) is further development of InSAR, and four-pass D-InSAR is one type of data processing by this method. Because many uncertain factors affect the accuracy of data processing of four-pass D-InSAR, it is not applied widely in the monitoring of land deformation. However, four-pass D-InSAR does not require an external digital elevation model and has the advantage of a possible guarantee of the accuracy of monitoring deformation. The baseline, visual angle, baseline tilt angle, slope range, satellite orbit height, ground resolution, and other satellite imaging factors significantly affect the capability and accuracy of D-InSAR measurement in monitoring land subsidence; satellite orbit error is the main factor affecting the accuracy of deformation measurement when using four-pass D-InSAR. The difference in satellite orbit and radar frequency is generated by various sensors of satellites acquiring radar images, which could also significantly affect deformation measurement with this method. The system and speckle noise, loss of pixel registration, visual number, and temporal and baseline decorrelation are the main sources of phase measurement error and significantly af-

① 收稿日期: 2013-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41274007); 山东省自然科学基金项目(ZR2012DM001); 山东科技大学科研创新团队支持计划(2011KYTD103)

作者简介: 余景波(1983-), 男(汉族), 山东济宁人, 工学硕士, 主要从事现代测量数据处理理论及其应用等研究工作。

E-mail: 918ky@sina.com

fect each pixel of images from the coherent radar, for which the phase error affecting the accuracy of deformation measurement when using four-pass D-InSAR is created. The baseline is generated by two different satellite orbits, which causes the baseline error to be systematic; hence, the baseline length error is also systematic. The baseline tilt angle affecting high altitude onboard the satellite is created by various uncertainties of the satellite and changes in baseline length. Consequently, the baseline tilt angle error has an effect on four-pass D-InSAR. The uncertainty of slant range is determined by the delay of the troposphere and ionosphere to the space-borne SAR satellite radio transmission, sampling clock jitter, and uncertainties of timing system of the SAR satellite, for which the interference phase of the InSAR diagram from four-pass D-InSAR is unstable. The uncertainty of terrain factors is generated by variation from the ground flatness, high and low topography, and vegetation coverage in the study area, which prevents the coherent radar images from effectively containing deformation information of target objects; thus, the influence on four-pass D-InSAR is apparent through the terrain factor error. An effective quantitative formula of phase on deformation measurement accuracy of four-pass D-InSAR is presented in this paper on the basis of the basic principle and data processing flow of four-pass D-InSAR. In addition, the effects of baseline length, baseline tilt angle, satellite orbit height, slope range, and terrain factors on deformation measurement accuracy of four-pass D-InSAR are analyzed and discussed. Finally, conclusions of the effects of errors on deformation measurement accuracy when using four-pass D-InSAR are drawn by the quantitative analysis.

Key words: Four-pass differential InSAR; Data processing; Error; Related analysis

0 引言

合成孔径雷达差分干涉测量(Differential InSAR, D-InSAR)技术是在合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术基础上发展起来的^[1],它把雷达复数影像数据的相位信息看成信息源,可以从覆盖所研究区域雷达影像中提取含有地形和形变信息的 InSAR 干涉条纹图,从而可以获取研究区域目标地物的微小形变信息。根据 D-InSAR 数据处理方式的不同^[2-3],D-InSAR 形变测量可以分为双轨法 D-InSAR 形变测量、三轨法 D-InSAR 形变测量和四轨法 D-InSAR 形变测量。其中双轨法 D-InSAR 形变测量需要外部数字高程模型(DEM)进行模拟干涉图差分干涉处理;三轨法 D-InSAR 形变测量不需要外部 DEM,但是数据处理中的相位解缠结果质量高低对数据处理最终结果影响较大;而四轨法 D-InSAR 形变测量数据处理虽然不需要外部 DEM,但是数据处理中需要较多的雷达影像,并且对雷达影像质量要求较高,加之数据处理过程比较复杂,从而导致四轨法 D-InSAR 形变测量成功应用实例不是很多^[4]。

在四轨法 D-InSAR 监测地面形变中,其监测结果的精度会受到许多因素的影响,其中卫星轨道误差、地形因素、时间去相关、空间去相关以及大气对

流层和电离层延迟等是影响精度的常见误差因素,而卫星轨道误差是主要误差因素^[5]。对于四轨法 D-InSAR 形变测量,干涉处理生成形变前的 DEM 含有地形信息,其精度是影响四轨法 D-InSAR 形变测量精度另一个重要误差因素。此外获取雷达影像的卫星因其传感器不同,会引起卫星轨道和雷达频率等参数的不同,这些误差来源对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响也是值得注意的。因此本文拟从定量方面分析影响四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度的误差因素。首先,从相位测量误差和四轨法 D-InSAR 形变测量精度的定量关系式上建立影响四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度的误差模型,从而了解这些误差对四轨法 D-InSAR 数据处理结果的影响与哪些卫星参数有关;接着分析讨论这些误差因素的来源以及其对四轨法 D-InSAR 形变测量精度影响的基本情况,进而揭示出这些误差对四轨法 D-InSAR 数据处理结果的影响规律。

1 四轨法 D-InSAR 基本原理及数据处理流程

四轨法 D-InSAR 是在双轨法 D-InSAR 和三轨法 D-InSAR 基础上发展起来^[8],兼顾了后两种 D-InSAR 技术的优点,但是四轨法 D-InSAR 也有其

自身的特点。四轨法 D-InSAR 顾名思义,需要四幅雷达影像进行干涉处理获取研究区域地表形变信息。这四幅雷达影像有三幅是在地形发生变化前获取的,只有一幅是在地形形变后获取的。首先,把地形形变前获取的两幅雷达影像进行干涉处理生成仅含有地形信息的干涉图像,然后进行去平地效应、滤波、相位解缠等相关处理而得到地表发生形变前的 DEM;接着,把地表发生形变前获取的其他两幅雷达影像和地表形变发生后获取的雷达影像进行 InSAR 数据干涉处理,生成含有地形和形变信息的 InSAR 干涉图像,将其与所生成的 DEM 数据进行差分干涉处理去除地形信息,从而获取地面形变信息。不需要所研究区域的 DEM 数据和生成的 DEM 分辨率及精度比较高,并且最终形变监测精度能得到保证是四轨法 D-InSAR 形变测量的优点,而数据处理过程比较复杂和影响因素较多是其缺点。图 1 给出四轨法 D-InSAR 数据处理流程。下面简单介绍四轨法 D-InSAR 数据处理中的几个关键步骤。

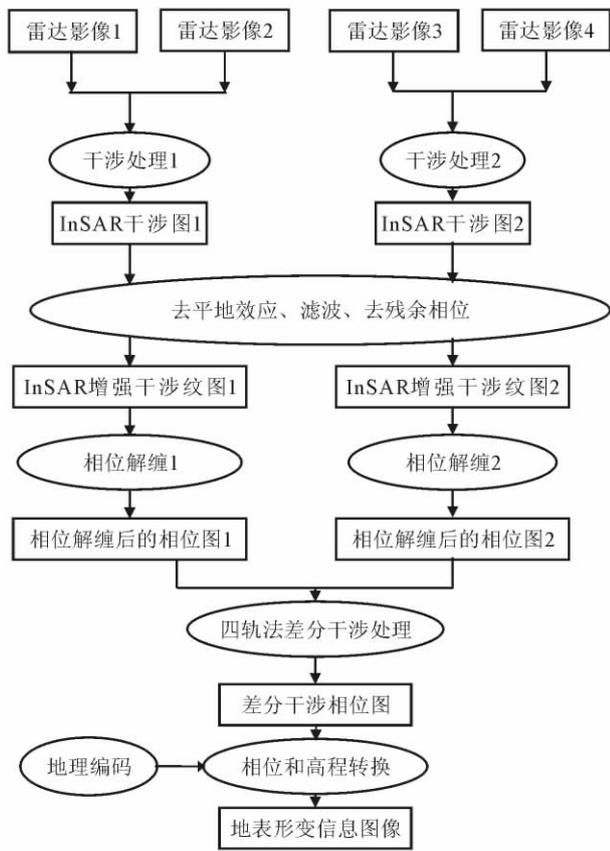


图 1 四轨法 D-InSAR 数据处理流程图

Fig. 1 The flow chart of four-pass D-InSAR data processing.

(1) 选择合适的雷达影像对。选择雷达影像时,要考虑传感器类型、时间和空间基线以及成像时的大气状况等因素。

(2) 雷达影像对的配准。两幅雷达影像配准时,干涉图像会出现干涉条纹,而干涉条纹的变化包含着形变或地形信息。如果两幅雷达影像没有精确配准,则 InSAR 干涉图干涉条纹会模糊不清,或干涉图不出现干涉条纹。

(3) 去除平地效应,滤波和去除残余相位。用四轨法 D-InSAR 进行地形测绘,需要通过去平地效应去除干涉纹图的地形相位信息;干涉纹图需要进行滤波处理去除这些噪声的影响;如果干涉纹图包含残余相位信息,会对相位解缠造成一定的影响,所以进行差分干涉处理前要去掉残余相位信息。

(4) 相位解缠。InSAR 干涉纹图的相位差是以相位的缠绕形式^[9]存在的,并且缠绕相位的取值范围在 $[-\pi, \pi]$ 之间,因此必须通过相位解缠才可以获取 InSAR 干涉图真实的相位差,其结果好坏直接影响最终数据产品质量。

(5) 地理编码。将雷达影像数据和高程数据从雷达影像成像时的坐标系转换为某一种通用参考坐标系的过程。通过此过程才能生成与地形图匹配的数字图形图,供用户使用。

2 四轨法 D-InSAR 形变测量误差模型及分析

通过去平地效应方法^[10],获取四轨法 D-InSAR 形变测量的定量关系式:

$$\Delta\phi = \frac{\lambda}{4\pi} \left(\phi'_{\text{flat}} - \frac{B'_{\perp}}{B_{\perp}} \phi_{\text{flat}} \right) \quad (1)$$

式中, $\Delta\phi$ 代表地表沿视线向的形变量; ϕ'_{flat} 代表 InSAR 干涉图去除平地效应后包含形变和地形信息的干涉相位, ϕ_{flat} 代表 InSAR 干涉图去平地效应后仅仅含有地形信息的干涉相位; B'_{\perp} 和 B_{\perp} 分别代表生成形变干涉图和地形干涉图雷达影像对的有效基线。

假设 B'_{\perp} 和 B_{\perp} 带来的误差非常小,可以忽略不计,此时对式(1)求全微分得

$$d\Delta\phi = \frac{\lambda}{4\pi} \left(d\phi'_{\text{flat}} - \frac{B'_{\perp}}{B_{\perp}} d\phi_{\text{flat}} \right) = \frac{\lambda}{4\pi} \left[1 - \frac{B'_{\perp}}{B_{\perp}} \right] \cdot [d\phi'_{\text{flat}} d\phi_{\text{flat}}]^T \quad (2)$$

四轨法 D-InSAR 形变测量需要四幅独立获取的雷达影像。如果在地表发生形变前独立获取的三幅雷达影像分别是 L_0, L_1, L_2 , 雷达影像 L_3 是地表

发生形变后获取的,并且这四幅独立获取的雷达影像相位分别为 $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$, 其相位中误差分别为 $\delta_0, \delta_1, \delta_2, \delta_3$ 。如果雷达影像 L_0 和雷达影像 L_1 进行 InSAR 干涉处理生成地形干涉图, 雷达影像 L_2 和雷达影像 L_3 进行 InSAR 干涉处理生成形变干涉图, 那么, 形变干涉图和地形干涉图的干涉相位可以

$$d\varphi = \begin{bmatrix} d\varphi'_{\text{flat}} \\ d\varphi_{\text{flat}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\varphi_2 - d\varphi_3 \\ d\varphi_0 - d\varphi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot [d\varphi_0 \quad d\varphi_1 \quad d\varphi_2 \quad d\varphi_3]^T \quad (4)$$

由式(4)可以推出四轨法 D-InSAR 测量相位的协方差矩阵:

$$D_{\varphi\varphi} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \delta_0^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \delta_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \delta_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \delta_3^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \delta_0^2 + \delta_1^2 & 0 \\ 0 & \delta_2^2 + \delta_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

如果四轨法 D-InSAR 形变测量所使用的四幅雷达影像的相位中误差相同, 并且由这四幅雷达影像进行 InSAR 数据干涉和差分处理生成的形变干涉图和地形干涉图的相位中误差也相同, 那么这些 InSAR 干涉纹图的干涉相位中误差均为四轨法 D-InSAR 形变测量所使用的单幅雷达影像相位中误差的 $\sqrt{2}$ 倍^[11]。若形变干涉图和地形干涉图的干涉相位记作 δ_φ , 可以得出

$$\delta_0 = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \frac{1}{\sqrt{2}}\delta_\varphi \quad (6)$$

把式(6)代入式(5), 可得

$$D_{\varphi\varphi} = \begin{bmatrix} \delta_\varphi^2 & 0 \\ 0 & \delta_\varphi^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(2)和协方差传播定理, 可以得到

$$\delta_{\Delta\varphi}^2 = \frac{\lambda}{4\pi} \left[1 - \frac{B'_\perp}{B_\perp} \right] \cdot D_{\varphi\varphi} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \left[1 - \frac{B'_\perp}{B_\perp} \right]^T \quad (8)$$

把式(7)代入式(8), 可得

$$\delta_{\Delta\varphi} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_\varphi \quad (9)$$

并且, 基线长度误差、基线倾斜角误差、斜距误差、卫星高度误差、地形因素误差和相位测量误差有如下定量关系式^[12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \sin \theta \delta_{B_x} \\ \delta_\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \cos \theta \delta_{B_y} \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\delta_\varphi = \frac{4\pi B_\perp}{\lambda} \delta_\alpha \quad (11)$$

$$\delta_\varphi = -\frac{4\pi B_\perp \cos(\theta - \alpha)}{\lambda \rho \cot \theta} \delta_\rho = -\frac{4\pi B_\perp}{\lambda \rho \cot \theta} \delta_\rho \quad (12)$$

表示为

$$\left. \begin{array}{l} \varphi'_{\text{flat}} = \varphi_2 - \varphi_3 \\ \varphi_{\text{flat}} = \varphi_0 - \varphi_1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

对式(3)求全微分, 可得

$$\delta_\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_\perp}{\rho \sin \theta} \delta_{B_x} \quad (13)$$

$$\delta_\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_\perp}{\rho \sin \theta} \delta_h \quad (14)$$

把式(10)、(11)、(12)、(13)和(14)代入式(9), 可以得出基线长度误差、基线倾斜角误差、斜距误差、卫星高度误差、地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量精度的定量关系式:

$$\left. \begin{array}{l} \delta_{\Delta\varphi} = -\sin \theta \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_{B_x} \\ \delta_{\Delta\varphi} = \cos \theta \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_{B_y} \end{array} \right\} \quad (15)$$

$$\delta_{\Delta\varphi} = B_\perp \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_\alpha \quad (16)$$

$$\delta_{\Delta\varphi} = -\frac{B_\perp}{\rho \cot \theta} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_\rho \quad (17)$$

$$\delta_{\Delta\varphi} = \frac{B_\perp}{\rho \sin \theta} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_H \quad (18)$$

$$\delta_{\Delta\varphi} = -\frac{B_\perp}{\rho \sin \theta} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{B'_\perp}{B_\perp} \right)^2} \delta_h \quad (19)$$

式(15)~式(19)中, ρ 是卫星主传感器到地面点的距离即斜距; θ 为入射角即卫星视角; B_x 和 B_y 是水平基线和垂直基线; h 是地面高程。

从式(9)、式(15)、式(16)、式(17)、式(18)和式(19)可以看出四轨法 D-InSAR 形变测量精度受到相位测量误差、基线长度误差、基线倾斜角误差、斜距误差、卫星高度误差和地形因素误差的影响。

系统噪声、斑点噪声、像元失配准、多视数、时间去相关和基线去相关等因素是产生相位测量误差的

主要来源,它们对相干雷达(SAR)获取影像的每一个像元影响比较大,从而引起相位测量误差对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度的影响。其中,热噪声在星载 SAR 系统中是不可避免的,其对测量精度总会造成一定影响;斑点噪声和衰落噪声或多或少的会影响四轨法 D-InSAR 干涉图中的每一个像元,这种影响可以通过多视平均法来减少或削弱其影响,从而产生了多视数对测量精度的影响;四轨法 D-InSAR 干涉图中的相位是同一目标像元之间相位差的反应,如果两个像元不能准确配准或配准出现错误,干涉图中的散射体成分会引起相位误差,进而会造成像元配准情况对形变测量精度的影响。从式(9)可以看出,相位测量误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响受到基线比 $\Omega = \frac{B'_\perp}{B_\perp}$ 影响,并且和

基线比 $\Omega = \frac{B'_\perp}{B_\perp}$ 成正相关的关系。

基线是通过两种不同卫星轨道生成的,从而导致基线误差具有系统性,因此基线长度误差也具有系统性。这种系统性误差可以使用一定的数据处理方法或在成像带内设置一些精确的地面控制点作为参考基准的方式加以消除或者减弱。从式(15)可以看出,四轨法 D-InSAR 形变测量精度和基线长度误差的关系受到卫星视角 θ 影响以及制约。

高空中运行的星载 SAR 卫星会因为卫星姿态变化和基线长度的不定性而对 SAR 卫星形成多种不确定性的影响,从而会引起基线倾斜角出现一定的不确定性,会引起雷达干涉像对的有效基线发生不确定性变化,从而导致基线倾斜角误差对四轨法 D-InSAR 形变测量精度的影响。从式(16)可以看出,基线倾斜角误差对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度受到地形干涉像对有效基线 B_\perp 制约。

大气的对流层及电离层对星载 SAR 卫星电波的延时影响、采样时钟的抖动以及 SAR 卫星定时系统的不确定性等因素决定了斜距 ρ 存在不确定性,这种不确定性会造成 InSAR 干涉图的干涉相位信息出现不确定性,因而导致斜距误差对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度造成一定的影响。从式(17)可以看出,斜距误差对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度影响与卫星视角 θ 和地形干涉对有效基线 B_\perp 有关。

卫星高度是指空中卫星距地球表面径向距离,该距离因其他因素的影响也存在不确定性,其对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度造成一定的影响。

从式(18)可以看到,卫星高度误差对四轨法 D-InSAR 形变测量精度的影响会与卫星卫星视角 θ 、地形干涉对有效基线 B_\perp 和斜距大小 ρ 有关。

四轨法 D-InSAR 形变测量首先需要获得地表发生形变前的地表信息,然后再进行四轨法差分干涉处理来获取所研究区域地表的形变信息。所研究区域的地面有平坦程度、高低起伏和植被覆盖等的不确定性变化决定了地形因素存在不确定性,会造成相干雷达接收的目标地物反射信号出现不确定性,从而引起相干雷达的成像不能有效包含目标地物形变信息,因此地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度造成一定的影响。从式(19)可以看出,地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量影响会受到卫星视角 θ 、斜距大小 ρ 和地形干涉对有效基线 B_\perp 制约。

3 结语

综合推导和分析了基线长度误差、基线倾斜角误差、斜距误差、卫星高度误差和地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响,可以得出:

(1) 水平基线误差对四轨法 D-InSAR 形变测量影响随着卫星视角 θ 增大而增加;垂直基线误差对四轨法 D-InSAR 形变测量精度的影响随着卫星视角 θ 增大而较少。因此选择卫星视角 θ 较小的星载 SAR 系统获取的雷达影像进行差分干涉处理,可以减少水平基线误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响,但同时可以增加垂直基线误差的影响。

(2) 基线倾斜角误差对四轨法 D-InSAR 形变测量影响和地形干涉对有效基线 B_\perp 成正相关关系,即随着地形干涉对有效基线 B_\perp 增加基线倾斜角误差对形变测量影响也相应增加。

(3) 斜距误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响随着卫星视角 θ 增大而增大,随着地形干涉对有效基线 B_\perp 增加而增大。即斜距误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响与卫星视角 θ 和地形干涉对有效基线 B_\perp 成正相关关系。因而选择卫星视角 θ 较小的星载 SAR 系统获取的雷达影像和有效基线 B_\perp 较短的地形干涉对进行差分干涉处理,可以减少斜距误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响。

(4) 卫星高度误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响随着卫星视角 θ 增大而减少,随着地形干涉对有效基线 B_\perp 增加而增大。从而选择卫星视角 θ 较大的星载 SAR 系统获取的雷达影像和有效基线 B_\perp 较短的地形干涉对进行差分干涉处理,可以

减少斜距误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响。

(5) 地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响随着卫星视角 θ 增大而减少,随着地形干涉对有效基线 B_{\perp} 增加而增大。因此选择卫星视角 θ 较大的星载 SAR 系统获取的雷达影像和有效基线 B_{\perp} 较短的地形干涉对进行四轨法差分干涉处理,可以减少地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响。

(6) 从基线长度误差、基线倾斜角误差、斜距误差、卫星高度误差和地形因素误差对四轨法 D-InSAR 形变测量影响的定量关系式,可以看出这些误差对四轨法 D-InSAR 形变测量的影响与基线比 $\Omega = \frac{B'_{\perp}}{B_{\perp}}$ 的大小成正相关关系。所以选择较长有效基线 B_{\perp} 地形干涉对和较短有效基线 B_{\perp} 形变干涉对进行四轨法差分干涉处理,可以减少这些误差对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度的影响。同时,形变干涉对有效基线 B_{\perp} 和地形干涉对有效基线 B_{\perp} 与卫星视角 θ 有关,而卫星视角 θ 的变化决定了卫星观测区范围的不确定性变化,从而引起卫星的不同观测区范围对四轨法 D-InSAR 形变测量结果精度的影响。

[参考文献]

- [1] 赵俊娟,李成范,尹京苑,等.干涉雷达人工反射器技术[J].西北地震学报,2011,33(4):403-407.
ZHAO Jun-juan, LI Cheng-fan, YIN Jing-yuan, et al. The Artificial Corner Reflector Technique in Interferometer Synthetic Aperture Radar[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 403-407.
- [2] 许文斌,李志伟,丁晓利,等.利用 InSAR 基线技术估计洛杉矶地区的地表时序形变和含水层参数[J].地球物理学报,2012,55(2):452-461.
XU Wen-bin, LI Zhi-wei, DING Xiao-li, et al. Application of Small Baseline Subsets D-InSAR Technology to Estimate the Time Series Land Deformation and Aquifer Storage Coefficients of Los Angeles Area[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 452-461.
- [3] 刘兴旺,袁道阳.兰州庄浪河阶地差分 GPS 测量与构造变形分析[J].西北地震学报,2012,34(4):393-397,404.
LIU Xing-wang, YUAN Dao-yang. Analysis of Tectonic Deformation on Zhuanglang River Terraces in Lanzhou Based on the Differential GPS Surveying[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(4): 393-397, 404.
- [4] 易辉伟,朱建军,李健,等. InSAR 矿区形变监测的边缘保持—Goldstein 组合滤波方法[J].中国有色金属学报,2012,22(11):3185-3192.
YI Hui-wei, ZHU Jian-jun, LI Jian, et al. An Edge Preservation—Goldstein Filter for InSAR Interferograms Used in Monitoring Deformation of Mining Area[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(11): 3185-3192.
- [5] 沈强,乔学军,金银龙,等. ALOS PALSAR 雷达影像 InSAR 数据处理中的基线和地形误差分析[J].大地测量与地球动力学,2012,32(2):1-6.
SHEN Qiang, QIAO Xue-jun, JIN Yin-long, et al. Error Analysis of Baseline and Terrain in InSAR Data Processing Using ALOS PALSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(2): 1-6.
- [6] 李杰,王晓强,王琪,等.2008 年于田 7.3 级地震前西昆仑地形变的 GPS 初步研究[J].西北地震学报,2012,34(3):256-263.
LI Jie, WANG Xiao-qiang, WANG Qi, et al. Crustal Deformation in West Kunlun Tectonic Zone from GPS Measurements before the Yutian Ms 7.3 Earthquake in 2008[J]. Northwestern Seismological Journal, 2012, 34(3): 256-263.
- [7] 陶秋香,刘国林,刘伟科. L 和 C 波段雷达干涉数据矿区地面沉降监测能力分析[J].地球物理学报,2012,55(11):3681-3689.
TAO Qiu-xiang, LIU Guo-lin, LIU Wei-ke. Analysis of Capabilities of L and C-band SAR Data to Monitor Mining-induced Subsidence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3681-3689.
- [8] 陈文凯,何少林,张苏平,等.汶川地震甘肃省文县地震地质灾害遥感分析[J].西北地震学报,2011,33(4):363-369.
CHEN Wen-kai, HE Shao-lin, ZHANG Su-ping, et al. Analysis on the Geo-hazards Triggered by Wenchuan Earthquake in Wenxian County, Gansu Province, Based on Remote Sensing Information[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(4): 363-369.
- [9] 刘国林,闫满.顾及模型误差的卡尔曼滤波相位解缠[J].测绘科学,2012,37(2):170-172.
LIU Guo-lin, YAN Man. Kalman Filter Phase Unwrapping Algorithm Based on Error Factors[J]. Science of Surveying and Mapping, 2012, 37(2): 170-172.
- [10] 程三友,刘少峰,申旭辉.差分干涉雷达测量在地面沉降中的应用研究[J].东华理工学院学报,2004,27(4):355-360.
CHENG San-you, LIU Shao-feng, SHEN Xu-hui. Application Study of Differential Interferometry Synthetic Aperture Radar on Surface Subsidence[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(4): 355-360.
- [11] 余景波,刘国林,曹振坦,等.大气延迟误差对 InSAR 数据处理影响的定量分析[J].空间科学学报,2012,32(5):720-729.
YU Jing-bo, LIU Guo-lin, CAO Zhen-tan, et al. Quantitative Analysis of Effect of Atmospheric Delay Error on InSAR Data Processing[J]. Chinese Journal of Space Science, 2012, 32(5): 720-729.
- [12] 余景波.基于 D-InSAR 的矿区地表沉降监测与分析[D].青岛:山东科技大学,2011:30-53.
YU Jing-bo. Subsidence Monitoring and Analysis of Mining Surface Based on Differential InSAR[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011: 30-53.