

引文格式:罗天文,李斐,潘斌,等.利用车载双天线InSAR系统监测公路边坡形变[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(3):359-367.DOI:10.13203/j.whugis20200518



Citation: LUO Tianwen, LI Fei, PAN Bin, et al. Highway Slope Deformation Monitoring Based on Vehicle-Borne Dual-Antenna InSAR System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(3): 359-367. DOI: 10.13203/j. whugis20200518

利用车载双天线InSAR系统监测公路边坡形变

罗天文^{1,2} 李斐¹ 潘斌³ 沈光保³ 陈彤²
陈嘉明⁴ 郝卫峰⁵

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉,430079

2 贵州省水利水电勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳,550002

3 武汉大学遥感信息工程学院,湖北 武汉,430079

4 中国科学院空天信息创新研究院数字地球重点实验室,北京,100094

5 武汉大学中国南极测绘研究中心,湖北 武汉,430079

摘要:星载差分合成孔径雷达干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar,DInSAR)技术已经广泛应用于大范围的地表形变监测,但星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)数据获取的地表形变易受大气噪声的影响,且长时间的重访周期会导致像对之间的失相干。为了有效减弱这些影响,提出了利用零空间基线的车载合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)系统监测公路边坡形变的方法。在车载双天线系统采集不同时相的公路边坡SAR数据时,通过轨道控制使得异时相干涉对的空间基线接近零,从而使得利用DInSAR数据进行形变信息提取时可以减少去平地相位的过程,极大地简化了差分干涉处理的流程。以中国湖北省武汉市某区域获取的车载双天线InSAR数据为例,使用所提出的方法对7个布设的角反射器点进行形变精度分析,得到形变值均方根误差为2.206 mm。

关键词:零空间基线;DInSAR;车载;形变监测;公路边坡

中图分类号:P237;P258 文献标识码:A

收稿日期:2020-10-02

DOI:10.13203/j.whugis20200518

文章编号:1671-8860(2023)03-0359-09

Highway Slope Deformation Monitoring Based on Vehicle-Borne Dual-Antenna InSAR System

LUO Tianwen^{1,2} LI Fei¹ PAN Bin³ SHEN Guangbao³ CHEN Tong² CHEN Jiaming⁴
HAO Weifeng⁵

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

2 Guizhou Survey and Design Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guiyang 550002, China

3 School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

4 Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science,
Beijing 100094, China

5 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: Differential interferometric synthetic aperture radar(DInSAR) has been widely used in large-scale surface deformation monitoring. However, the surface deformation obtained from spaceborne synthetic aperture radar(SAR) data is easily affected by atmospheric noise, and the long revisit period leads to the incoherence. In order to effectively reduce these effects, we propose a method to monitor the defor-

基金项目:黔科合重大专项([2017]3005-3);华能澜沧江水电股份有限公司项目(HNKJ18-H24)。

第一作者:罗天文,博士生,主要从事大地测量数据处理和形变监测工作。2015106190005@whu.edu.cn

通讯作者:李斐,博士,教授。fli@whu.edu.cn

mation of highway slope by vehicle-borne InSAR system. **Methods:** Due to the orbit control of the vehicle-borne dual-antenna InSAR system, the spatial baseline of the interferometric pairs is close to zero. Therefore, when the DInSAR data with this system is used to extract the deformation information, it can avoid the flat phase, which greatly simplifies the differential interference processing process. **Results:** A certain area of Wuhan, Hubei Province is chosen as the experimental area. Seven corner reflectors are deployed in the test area to evaluate the accuracy of deformation information extracted using the vehicle-borne dual-antenna InSAR system. The deformation of seven reflectors is calculated by using the proposed method. The root mean square error of deformation between the real value and the calculated value is 2.206 mm. **Conclusions:** A deformation monitoring method of zero space baseline using the vehicle-borne dual-antenna InSAR system is proposed and verified in Wuhan city. The DInSAR method based on zero space baseline can avoid the process of the flat phase. At the same time, our system is small in size, and the design of the trajectory according to the actual needs is flexibly, which is very practical for small-scale highway slope deformation monitoring. Because of the small revisit period, the vehicle-borne InSAR Data will not produce phase error due to atmospheric delay, and the deformation measurement accuracy is high.

Key words: zero-space baseline; DInSAR; vehicle-borne; deformation monitoring; highway slope

差分合成孔径雷达干涉测量(differential interferometric synthetic aperture radar, DInSAR)技术是一种利用雷达回波数据的相位信息获取地面形变信息的主动式遥感技术,具有全天时、全天候对地观测能力。目前,为了满足不同的应用需求,雷达传感器被搭载在不同的成像平台上获取不同尺度的影像数据,包括星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)^[1-3]、机载SAR^[4]、车载SAR^[5-6]和地基SAR^[7-8]等。

星载SAR数据不仅用于获取地震后大范围的地表形变信息^[9],还被用于提取城市区域的地表沉降信息^[10]。但是,星载SAR容易受大气噪声的影响^[11],以及较大的重访周期导致数据失相干严重。不仅如此,由于目前的星载SAR都是重轨干涉模式,空间基线较大。例如,欧洲遥感卫星(European remote sensing satellite, ERS)系列的空间基线能达到几千米,目前使用较多的哨兵一号(Sentinel-1)卫星的空间基线也有几十米。较大的空间基线不仅会导致数据空间失相干,还会增加干涉相位中的干涉条纹,给后期的相位解缠带来困难。为了减小大气噪声的影响,永久散射体合成孔径雷达干涉测量(persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)技术诞生^[10],这种技术通过对长时间序列的多幅SAR影像数据进行分析,尽可能减小大气噪声的影响。同时,雷达影像存在阴影和叠掩区、高坡度地区残余的地形相位会引起解缠误差等问题,都是卫星雷达遥感在滑坡灾害监测应用的挑战,文献[12-13]提出了相应的对策和新思路。

星载SAR由于是南-北向的成像模式,且分

辨率也相对较低,为了满足对小范围区域的观测需求,同时不受到成像方向的限制,机载SAR平台被提出^[14]。同时,车载SAR和地基SAR也被提出并应用于小范围的地表信息提取^[15-16],但是,目前机载SAR、车载SAR数据主要用于数字高程模型(digital elevation model, DEM)的获取,鲜有用于地面形变信息的提取。

随着现代技术及计算方法的不断发展,公路边坡形变监测在观测技术和数据处理方法上都有了新的发展,各种新仪器在新技术的推动下不断被应用。从空间上看,形变监测可以分为地面监测技术、空间监测技术和地面+空间组合观测技术。现有的边坡监测方法中,以地面观测技术为主,主要有传统测量技术、基准线测量方法、测量机器人监测方法、地下观测技术和三维激光扫描技术等。空间监测技术主要为非接触式量测,常用的方法有全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)形变监测技术、摄影测量监测技术和卫星遥感技术。这些监测方法中,不同手段的观测精度不同,以及观测时环境的影响也有所差异(如大气影响),边坡监测的精度水平在毫米级到厘米级。

为了便于快速获取公路边坡的形变信息,本文首先设计并研制了车载双天线合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)系统。灵活的航线和基线设计,使得车载InSAR系统更适应小范围的公路边坡监测。同时,车载SAR数据分辨率高,且不会受大气噪声的影响,能够监测更精细的形变信息且形变测量精度更高。其次,提出了基于零空间基线的车载

双天线 InSAR 系统获取公路边坡形变的方法。利用车载 SAR 成像几何模型,通过零空间基线 DInSAR 处理方法,可减少去平地相位过程,极大简化干涉处理流程,节省时间成本。最后,选取在中国湖北省武汉市某区域观测的车载 SAR 数据对本文提出的方法进行验证。本文旨在为公路边坡形变监测提供一种新的方法,并验证该方法的可行性,为后续车载 SAR 平台用于公路边坡形变监测的产业化提供参考。

1 车载双天线 InSAR 系统

本文研制的车载 InSAR 系统为单航过交轨干涉系统,可有效避免残余运动误差的影响,同时,使用双天线进行一次成像即可得到干涉像对。图 1 展示了车载双天线 InSAR 系统外观。整个车载 InSAR 系统安置在车顶,由框架基座固定,保证系统的稳定运行。

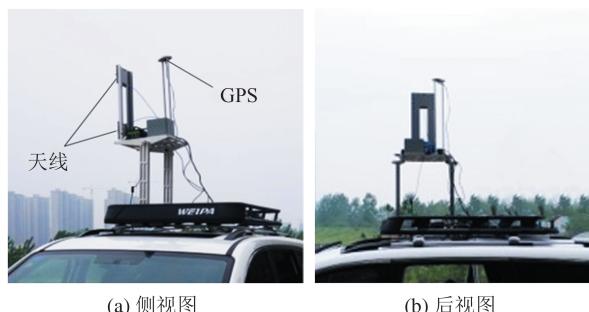


图 1 车载双天线 InSAR 系统外观
Fig.1 Appearance of Vehicle-Borne Dual-Antenna InSAR System

车载 InSAR 系统的主要参数如表 1 所示,雷达波段为 Ku 波段,波长为 2 cm,较短的雷达波长可实现更高的方位向分辨率,从而更精细地观测到地物的微小变化信息。此外,利用车载 InSAR 系统进行数据采集时,高精度的定位定姿系统(position and orientation system, POS)记录的轨迹信息是后续进行空间基线解算的基础,也是利用车载 InSAR 系统得到高精度形变信息的保证。表 2 给出了本文使用的 POS 系统的主要参数。

2 零空间基线 DInSAR 方法

2.1 车载 SAR 干涉测量

图 2 为车载 SAR 成像几何示意图,其中 A_1 、 A_2 为交轨干涉中的两个天线(一发双收), R_1 、 R_2 为天线 A_1 、 A_2 与地面点 P 的距离, B 为空间基线, B_{\perp} 和 B_{\parallel} 为空间基线的垂直分量和水平分量, ϑ 为

表 1 车载双天线 InSAR 系统主要参数

Tab.1 Main Parameters of Vehicle-Borne Dual-Antenna InSAR System

主要参数	参数值
雷达类型	FMCW
波长/cm	2
载频/GHz	15
波段	Ku
线性调频带宽/MHz	50~200
雷达天线波束角/(°)	20
最大工作距离/m	6 000
极化方式	HH、HV、VV、VH
天线尺寸(长,宽)/cm	30, 10
秒冲重复频率/Hz	1 400
天线数量	2

表 2 POS 系统主要参数

Tab.2 Main Parameters of POS

精度指标	实时测量精度	处理后精度
朝向测量精度/(°)	0.02	0.005
高程测量精度/(°)	0.005	0.002
位置测量精度/m	3~5	0.02(水平) 0.05(垂直)
速度测量精度/(m·s ⁻¹)	0.05	0.03

天线下视角, α 为基线倾角。1 号直线和 2 号直线为汽车前行时两侧车轮的轨迹,需提前设计,使得不同时相数据中同一天线间的空间基线为 0, 实现异时相零空间基线。

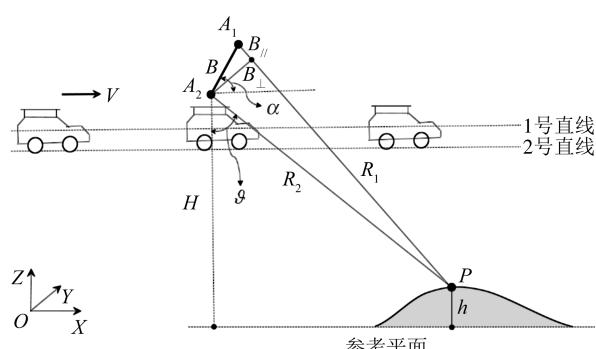


图 2 车载 SAR 成像几何示意图

Fig.2 Diagram of Vehicle-Borne SAR Imaging

由雷达干涉测量原理可知, P 点的干涉相位为^[17]:

$$\varphi = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 - R_2) \quad (1)$$

式中, φ 为干涉相位; λ 为雷达波长。

根据余弦定理:

$$R_1^2 = R_2^2 + B^2 - 2BR_2 \cos(90^\circ - \vartheta + \alpha) \quad (2)$$

设 $R_1 = R_2 + \Delta\rho$, 则式(2)转化为:

$$2R_2\Delta\rho + \Delta\rho^2 = B^2 - 2BR_2\sin(\vartheta - \alpha) \quad (3)$$

因为 $\Delta\rho \ll R_2, B \ll R_2$, 式(3)化简为:

$$\Delta\rho = -B\sin(\vartheta - \alpha) \quad (4)$$

根据式(1)和式(4), 得到 P 点干涉相位为:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} B\sin(\vartheta - \alpha) \quad (5)$$

以上根据车载 SAR 成像几何关系建立了干涉相位 φ 和空间基线 B 、雷达下视角 ϑ 和基线倾角 α 的关系, 下文将对干涉相位 φ 的组成进行分析, 并得到零空间基线 DInSAR 形变。

2.2 零空间基线 DInSAR

车载 InSAR 是单航过交轨干涉模式且观测距离较小, 因此车载 InSAR 中大气噪声影响是可以忽略不计的。车载 SAR 单航过数据构成的干涉对得到的干涉相位 φ 可以分解为平地相位 φ_{flat} 、地形相位 φ_{topo} 、形变值相位 φ_{disp} 和噪声相位 $\varphi_{\text{noise}}^{[18]}$, 即

$$\varphi = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{disp}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (6)$$

因为车载 InSAR 使用单航过交轨干涉模式, 因此在进行数据采集时, 双天线单次获取的两组数据(同时获取)之间地面没形变, 即在式(6)中有:

$$\varphi_{\text{disp}} = 0 \quad (7)$$

差分干涉测量数据需要获取两组干涉对, 一组干涉对的相位包含地形信息, 另一组干涉对的相位包含地形信息和形变信息, 然后作差得到形变信息。本文选取第一组位于下方的雷达天线数据和第二组位于上方的雷达天线数据进行干涉处理。设第一组单航过车载 SAR 数据得到的干涉相位 φ_1 为:

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{flat}} + \varphi_{\text{topo}} + \varphi_{\text{noise}} \quad (8)$$

第二组数据得到干涉相位 φ_2 为:

$$\varphi_2 = \varphi'_{\text{flat}} + \varphi'_{\text{topo}} + \varphi'_{\text{noise}} + \varphi'_{\text{disp}} \quad (9)$$

式中, φ'_{disp} 为形变相位, 是差分干涉技术为了获取地面形变信息而从干涉相位中独立出来的相位。

两次车载 SAR 数据获取过程中需按照设计的轨迹运行, 实现异时相数据间的空间基线接近于零。根据式(5)知道单航过干涉相位与空间基线 B 、雷达下视角 ϑ 和基线倾角 α 相关, 而第二组零空间基线的车载 InSAR 数据和第一组单航过数据构成的空间几何位置完全相同, 即:

$$\begin{cases} B' = B \\ \vartheta' = \vartheta \\ \alpha' = \alpha \end{cases} \quad (10)$$

因此有:

$$\begin{cases} \varphi'_{\text{flat}} = \varphi_{\text{flat}} \\ \varphi'_{\text{topo}} = \varphi_{\text{topo}} \end{cases} \quad (11)$$

又因为两次获取实验数据使用的是同一车载 InSAR 系统, 认为系统产生的噪声相位在两次数据采集过程中是相同的, 即

$$\varphi'_{\text{noise}} = \varphi_{\text{noise}} \quad (12)$$

因此, 差分干涉相位为:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \varphi'_{\text{disp}} \quad (13)$$

最终得到形变量 $\Delta\rho$ 与差分干涉相位的关系为:

$$\Delta\rho = -\frac{\lambda}{4\pi} \varphi'_{\text{disp}} \quad (14)$$

根据以上讨论, 基于零空间基线的车载双天线 InSAR 形变信息提取的主要流程如图 3 所示。

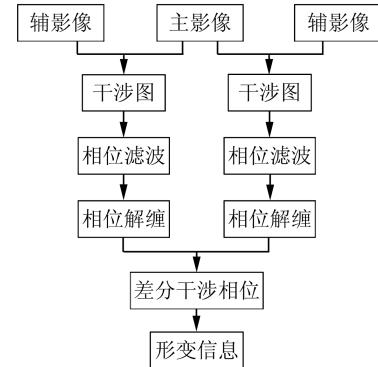


图3 基于零空间基线的车载双天线 InSAR 形变信息提取流程图

Fig.3 Flowchart of Deformation Monitoring for Vehicle-Borne Dual-Antenna InSAR System Based on Zero Space Baseline

3 实验数据获取与解算结果分析

3.1 车载 InSAR 数据采集过程与结果

2018年6月, 选取武汉市某地作为实验区开展车载双天线 InSAR 系统数据采集实验。同时, 为了评估利用车载双天线 InSAR 系统进行形变信息提取的精度, 本文数据采集过程中在实验区布设了 7 个角反射器。在进行一次数据采集后, 为了模拟地表形变, 将角反射器的高度进行调整, 其中部分角反射器向上调整, 部分向下调整, 从而模拟地形的不同变化, 验证本文提出模型的精度。为了计算每个角反射器的入射角, 需要确定每个角反射器的位置。使用全站仪测量每个角反射器的位置, 同时为了方便测量并满足通视条件, 选取了实验区中间较为平坦且没有植被覆盖的区域。

图 4 给出了车载 InSAR 数据采集的实验区位置及角反射器布设位置, 图 4 中标示出本次车载 InSAR 数据采集实验中车载平台的运行轨迹, 轨迹长度约为 500 m。图 4(a)为实验区域车载平台运行轨迹及角反射器布设区域; 图 4(b)为本次

实验布设的角反射器, 棱长为 40 cm 的三面体, 布设时将散射面垂直于入射方向; 图 4(c)为实验区仰视图, 其中高架桥为车载 SAR 平台运行位置; 图 4(d)为使用全站仪进行角反射器位置测量, 用于后期验证形变精度。



图 4 车载 InSAR 数据采集实验区域及角反射器布设

Fig.4 The Area of Vehicle-Borne InSAR Data Acquisition and Layout of Corner Reflector

实验一共采集了 3 组车载 SAR 数据, 图 5 为其中一组数据的某张 SAR 影像。可以看出, 车载 InSAR 系统能够获取高质量的 SAR 数据, 清晰显示了不同地物信息, 裸土和植被在 SAR 影像中呈现了不同的纹理信息。为了显示车载 SAR 数据的聚焦效果, 将布设的角反射器区域进行局部放大, 可以明显看到角反射器在 SAR 影像中呈现十字丝形状, 说明车载 InSAR 系统获取的 SAR 数据具有很好的聚焦效果, 这为后续的干涉处理提供了保证。同时也可以看出, 由于视线遮挡, SAR 影像中存在阴影区域; 另外, 公路两侧的房屋和高架桥因为具有较强的散射特性, 图 5 中左上角和右上角的高架桥和房屋区域在 SAR 影像中明显比其他地物明亮。

车载 InSAR 系统的成像几何参数的精度决定着利用 DInSAR 技术获取形变信息的精度。表 3 给出了本文使用的车载 InSAR 系统的成像几

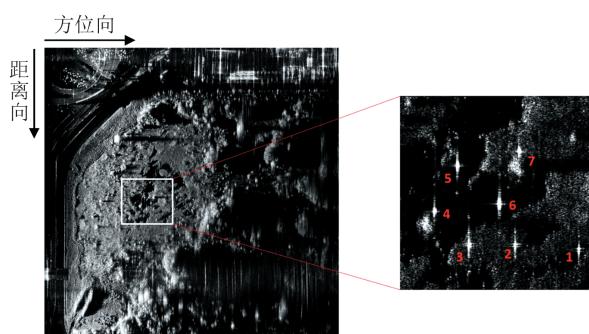


图 5 车载 InSAR 影像及角反射器分布
Fig.5 Image of Vehicle-Borne InSAR System and Corner Reflector Distribution

何参数以及 SAR 数据参数。其中, 空间基线为 0.19 m, 空间基线越长, InSAR 系统对地形高程变化越敏感, 高程测量精度也越高。但是空间基线不能无限增大, 因为随着空间基线的增加, 干涉图中干涉条纹密度增加, 相位解缠变得更加复

杂;不仅如此,空间基线增加到一定大小后,会导致主辅影像数据干涉后,相位不再包含有用的信息,相位将全部变为噪声信息。因此,本文根据车载 InSAR 系统的波长和地面点到雷达天线斜距,设计的最优空间基线为 0.19 m,既能保证 InSAR 系统对地形变化的敏感性,也不会大幅度增加相位解缠的难度。

表 3 车载 InSAR 影像数据的主要参数

Tab.3 Main Parameters of Image Data by Vehicle-Borne InSAR System

成像平台参数		SAR 数据参数	
参数	值	参数	值
空间基线/m	0.19	波长/cm	2
基线倾角/(°)	85	方位向分辨率/m	0.12
平台相对高度/m	20	距离向分辨率/m	0.12
平台运行速度/(m·s ⁻¹)	10	图像尺寸/像素	4 060×4 096

3.2 结果与分析

本文使用两组车载 SAR 数据组合成两组干涉像对,两组数据中选取一张 SAR 影像作为主影像,另外两张车载 SAR 数据分别跟主影像作干

涉,得到两组干涉对。两组数据在采集过程中,对布设在实验区的角反射器进行高度调整来模拟地面形变。使用相干系数配准算法对车载 InSAR 数据进行配准,并对像元进行过采样到亚像素级别,减少因为配准引入的相位误差。经过配准后,将单视复数(single look complex, SLC) SAR 数据中每个像素点进行共轭相乘,得到干涉相位,如图 6 所示。图 6(a)为第一组车载 SAR 数据干涉对的干涉相位图,可以看到干涉相位图中有明显的干涉条纹,并且干涉条纹密度不稠密,避免给相位解缠带来困难。同时,干涉条纹的密集程度也说明在实验设计时根据实验区的斜距和范围设计的空间基线是合理的。残差点的相位误差会给相位解缠和最终的形变计算带来误差,为了减少干涉相位中的残差点,使得残差点不会参与后续的相位解缠,对干涉相位图进行了滤波。本文使用了 Goldstein 滤波方法^[18],图 6(b)为经过相位滤波后的干涉图,经过滤波后干涉相位图的椒盐噪声明显减少,干涉条纹更加清晰;图 6(c)为第二组干涉对的干涉相位图;图 6(d)为图 6(c)经相位滤波后的干涉图。

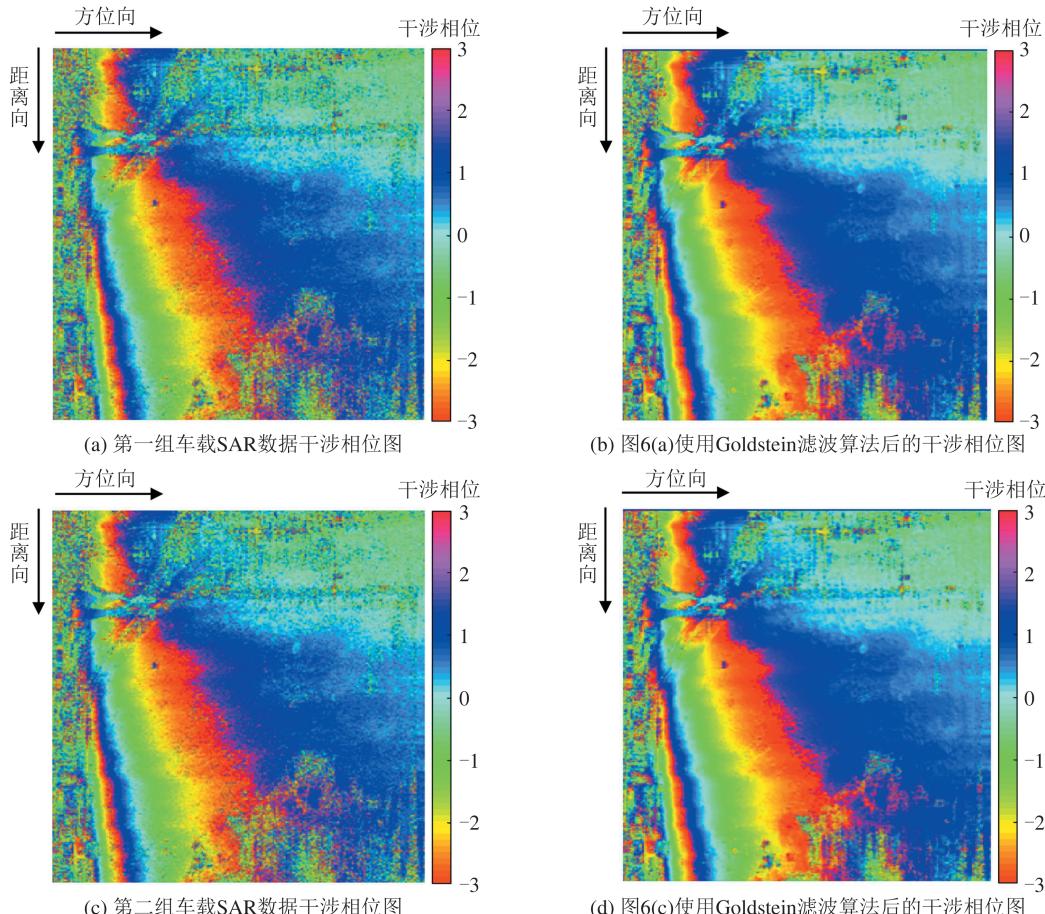


图 6 干涉相位图

Fig.6 Interferometric Phase Images

为了评估车载 InSAR 系统获取的 SAR 影像质量,本文不仅从 SAR 强度图中角反射器的聚焦效果进行分析,还对获取的 SAR 数据相干性保持的质量进行分析。图 7 给出了两组干涉对的相干系数图,可以看出,整个实验区绝大部分相干性

保持良好,只有部分区域相干性较低,主要位于因遮挡产生的阴影区域,以及植被茂密区域和房屋区域。此外,由于本车载 InSAR 系统使用了 Ku 波段雷达,波长较短,穿透能力不强,因此在右下角植被覆盖区域相干性较低。

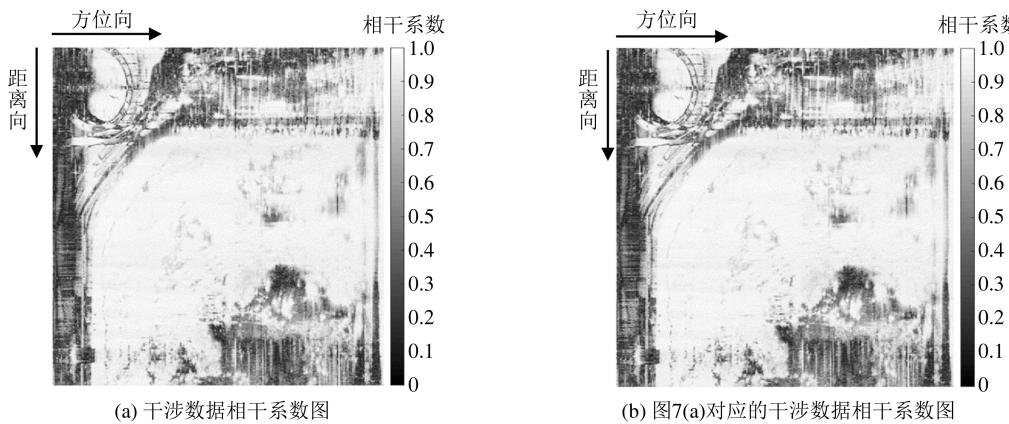


图 7 每组数据中干涉对的相干系数图

Fig.7 Coherence Coefficient Diagram of Interferometric Pairs in a Set of Data

得到干涉相位后,根据§2.2 的分析,利用本文提出的零空间基线车载 DInSAR 方法进行形变信息提取,可以避免进行去平地相位处理,两组干涉对作差即可消除平地相位,直接得到形变相位。但是由于干涉相位中的相位值在 $[-\pi, \pi]$ 范围,存在 $2k\pi$ 的整周模糊度,无法体现真实的斜

距,因此在进行形变计算之前,必须对干涉相位进行解缠。本文使用的解缠算法为最小费用流算法^[19],图 8 是解缠后的相位图,可以看到在干涉图中因为缠绕产生的干涉条纹消失,整个影像区域的相位在空间上实现了连续分布,即相邻的两像素之间的相位差值不超过 π 。

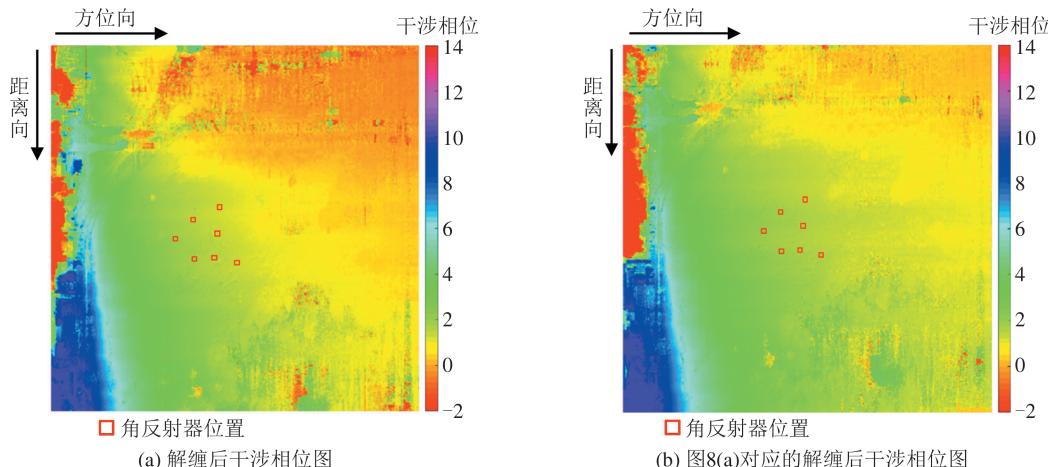


图 8 解缠后的干涉相位图

Fig.8 Interferogram After Unwrapping

得到解缠后的干涉相位后,将异时相干相位值代入式(14)即可得到形变结果。为了评估利用该方法计算得到的形变结果的精度,选取布设在实验区的 7 个角反射器点^[20],并通过比较计算得到的形变值和真实调整的形变值来分析解算的形变精度。角反射器只是进行垂直方向的调整,因此需要将计算得到的视线方向的形变分

解为垂直方向和水平方向,然后将垂直方向的分量和真实调整的角反射器的形变值进行比较。表 4 给出了 7 个角反射器点的真实形变和计算形变,可以看到,1 号点和 5 号点的结果偏差相对较大,在 3~4 mm 左右,其余点形变测量结果偏差较小,在 2 mm 内,均方根误差(root mean square error, RMSE)均为 2.206 mm,即利用零空间基线

车载双天线 InSAR 系统进行形变信息提取的精度能够达到 2.2 mm。1号点和 5号点的真实形变值与计算形变值相差较大,本文认为可能的原因有以下几点:

- 1) 角反射器高度调整本身有误差。
- 2) 使用全站仪测量角反射器的散射中心位置时有偏差。
- 3) 成像效果的原因,角反射器对着雷达的方向不同,成像效果会有差别。

表 4 形变计算结果/mm

Tab.4 Deformation Results/mm

形变量	角反射器						
	1	2	3	4	5	6	7
真实形变	-10.0	-10.0	10.0	-10.0	-10.0	10.0	10.0
计算形变	-13.1	-10.0	11.2	-11.8	-14.3	9.7	8.9

4 结语

本文提出了基于零空间基线车载双天线 InSAR 系统的形变监测方法,并在武汉市某区域进行验证,数据结果表明,使用本文方法获取的形变值精度能够达到 2.2 mm。基于零空间基线的 DInSAR 方法能够避免干涉处理中去平地相位过程,极大简化了车载 InSAR 数据处理步骤。同时,本文使用的车载 InSAR 系统体积小,能够根据实际需要灵活设计轨迹,对于小范围的公路边坡形变监测具有非常好的实用性。重访周期小,车载 InSAR 数据不会因为大气延迟产生相位误差,形变测量精度高。

需要说明的是,本文提出的零空间基线形变监测模型主要针对高速公路等路面比较平坦的区域,连续波动起伏不超过 20 cm,这种情况下对成像的聚焦影响很小。如果道路崎岖不平,无法精确保证轨迹的一致性,需要根据 POS 系统记录的轨迹计算空间基线,并在计算模型中进行改正;同时利用高精度的 POS 系统记录天线的精确姿态,以便进行形变补偿。如果空间基线过大,此工作类似于江河中船载 InSAR 系统监测边坡的工作,笔者团队已经对船载 InSAR 系统相关模型进行推导并进行了实验验证,相关工作见文献[21]。

本文采集数据需按照提前设计的轨迹实现不同时相零空间基线,随着汽车自动驾驶技术的发展,零空间基线的实现途径将更加容易,利用车载 InSAR 系统对公路边坡进行形变监测的应

用将会更加广泛。

参 考 文 献

- [1] Lazecky M, Hlavacova I, Bakon M, et al. Bridge Displacements Monitoring Using Space-Borne X-Band SAR Interferometry [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(1): 205–210.
- [2] Colesanti C, Wasowski J. Investigating Landslides with Space-Borne Synthetic Aperture Radar(SAR) Interferometry [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88 (3/4): 173–199.
- [3] Closson D, Karaki N A, Hansen H, et al. Space-Borne Radar Interferometric Mapping of Precursory Deformations of a Dyke Collapse, Dead Sea Area, Jordan [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(4): 843–849.
- [4] Esposito C, Natale A, Palmese G, et al. On the Capabilities of the Italian Airborne FMCW AXIS InSAR System [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3): 539.
- [5] Frey O, Werner C L, Wegmuller U, et al. A Car-borne SAR and InSAR Experiment [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia, 2013.
- [6] Frey O, Werner C, Hajnsek I, et al. A Car-Borne SAR System for Interferometric Measurements: Development Status and System Enhancements [C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 2018.
- [7] Antonello G, Casagli N, Farina P, et al. Ground-Based SAR Interferometry for Monitoring Mass Movements [J]. *Landslides*, 2004, 1(1): 21–28.
- [8] Tarchi D, Casagli N, Fanti R, et al. Landslide Monitoring by Using Ground-Based SAR Interferometry: An Example of Application to the Tessina Landslide in Italy [J]. *Engineering Geology*, 2003, 68 (1/2): 15–30.
- [9] Simons M. Coseismic Deformation from the 1999 Mw 7.1 Hector Mine, California, Earthquake as Inferred from InSAR and GPS Observations [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92(4): 1390–1402.
- [10] Osmanoğlu B, Dixon T H, Wdowinski S, et al. Mexico City Subsidence Observed with Persistent Scatterer InSAR [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(1): 1–12.
- [11] Agram P S, Simons M. A Noise Model for InSAR Time Series [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(4): 2752–2771.

- [12] Li Zhenhong, Song Chuang, Yu Chen, et al. Application of Satellite Radar Remote Sensing to Landslide Detection and Monitoring: Challenges and Solutions [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 967–979. (李振洪, 宋闯, 余琛, 等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用: 挑战与对策[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 967–979.)
- [13] Ge Daqing, Dai Keren, Guo Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949–956. (葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949–956.)
- [14] Corsini G, Diani M, Lombardini F, et al. Simulated Analysis and Optimization of a Three-Antenna Air-Borne InSAR System for Topographic Mapping [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2518–2529.
- [15] Zhang Lin, Yan Jun. Analysis of Ka-band Vehicle-borne SAR Imaging System [J]. *Science and Technology Innovation Herald*, 2011, 8(24): 27–28. (张琳, 闫军. Ka频段车载SAR成像系统分析[J]. 科技创新导报, 2011, 8(24): 27–28.)
- [16] Li Bingquan, Li Yongsheng, Jiang Wenliang, et al. Research and Application of Slope Dynamic Monitoring Based on Ground-Based Real Aperture Radar [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 1093–1098. (李兵权, 李永生, 姜文亮, 等. 基于地基真实孔径雷达的边坡动态监测研究与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1093–1098.)
- [17] Ferretti A, Monti-Guarnieri A V, Prati C M, et al. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation [M]. New York: ESA Publications, 2007.
- [18] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications [J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25(21): 4035–4038.
- [19] Costantini M. A Novel Phase Unwrapping Method Based on Network Programming [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 813–821.
- [20] Dai Guomeng, Pan Bin, Luo Tianwen, et al. Coordinate Location of Corner Reflector in Vehicle-Mounted SAR Image Based on Scale Space [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(4): 1–5. (戴国梦, 潘斌, 罗天文, 等. 基于尺度空间的角反射器车载SAR影像坐标定位[J]. 测绘通报, 2020(4): 1–5.)
- [21] Luo T W, Li F, Pan B, et al. Deformation Monitoring of Slopes with a Shipborne InSAR System: A Case Study of the Lancang River Gorge [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 5749–5759.