



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113405447 A

(43) 申请公布日 2021.09.17

(21) 申请号 202110540134.2

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2021.05.18

G01B 7/16 (2006.01)

(66) 本国优先权数据

G01S 13/90 (2006.01)

202020837234.2 2020.05.19 CN

G01S 19/14 (2010.01)

G01C 5/00 (2006.01)

(71) 申请人 湖南北斗微芯产业发展有限公司

地址 410000 湖南省长沙市长沙高新开发区岳麓西大道588号芯城科技园2栋2201、2202室

申请人 铁科院(深圳)研究设计院有限公司  
深圳北斗微芯产业发展有限公司

(72) 发明人 杨世忠 甘雨 童绳武

(74) 专利代理机构 广州嘉权专利商标事务有限公司 44205

代理人 肖云

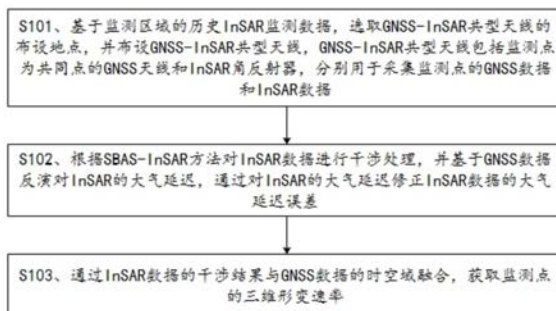
权利要求书2页 说明书14页 附图5页

(54) 发明名称

一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法、装置及设备

(57) 摘要

本发明公开了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法、装置及设备,方法基于历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点并布设GNSS-InSAR共型天线;根据SBAS-InSAR方法对InSAR数据进行干涉处理,并基于GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过对InSAR的大气延迟修正InSAR数据的大气延迟误差;通过InSAR数据的干涉结果与GNSS数据的时空域融合,获取监测点的三维形变速率。本发明利用GNSS反演大气延迟修正InSAR大气误差,融合具有高空间采样率的InSAR数据和具有高时空分辨率的GNSS数据作为监测结果。为轨道交通监测提供了一种成本可控的、具有高三维监测精度以及高时空分辨率的形变监测手段。



1. 一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,包括以下步骤:

基于监测区域的历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,并布设所述GNSS-InSAR共型天线,所述GNSS-InSAR共型天线包括监测点为共同点的GNSS天线和InSAR角反射器,其中,所述GNSS天线用于采集所述监测点的GNSS数据,所述InSAR角反射器用于采集所述监测点的InSAR数据;

根据SBAS-InSAR方法对所述InSAR数据进行干涉处理,并基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过所述对InSAR的大气延迟修正所述InSAR数据的大气延迟误差;

通过所述InSAR数据的干涉结果与所述GNSS数据的时空域融合,获取所述监测点的三维形变速率。

2. 根据权利要求1所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,所述基于监测区域的历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,包括步骤:通过D-InSAR两轨法获取所述监测区域的沉降区域,并通过所述历史监测数据为所述沉降区域划分等级,基于划分的等级选取所述GNSS-InSAR共型天线的布设地点。

3. 根据权利要求1所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,所述根据SBAS-InSAR方法对所述InSAR数据进行干涉处理,并基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过所述对InSAR的大气延迟修正所述InSAR数据的大气延迟误差,包括步骤:

根据所述SBAS-InSAR方法从所述InSAR数据中获取干涉图;

通过相关系数从所述干涉图中选择相干点;

通过LAMBDA相位解缠法对所述相干点相位解缠;

基于相位解缠后的所述相干点,构建包含线性形变速率的干涉线性模型,通过对所述干涉线性模型的奇异值分解,分离所述干涉线性模型的相位;

基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过所述对InSAR的大气延迟分离大气相位;

将进行大气相位分离的所述干涉图中的形变相位转换成形变量。

4. 根据权利要求3所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,所述基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,包括步骤:

从所述GNSS数据中解算出GNSS的对流层延迟;

根据双差分法从所述GNSS的对流层延迟中获取对InSAR的大气延迟。

5. 根据权利要求4所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,所述双差分法为时域间差分的站间时域双插法。

6. 根据权利要求3所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,所述通过所述对InSAR的大气延迟分离大气相位,包括步骤:基于距离反比加权内插法将所述对InSAR的大气延迟内插入至所述相干点中。

7. 根据权利要求1所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,其特征在于,所述GNSS-InSAR共型天线为四系统十四频点GNSS-InSAR角反射器共型天线,所述四系统十四频点GNSS-InSAR角反射器共型天线包括:连接柱、共型结构件、所述GNSS天线和所述InSAR角反射器,所述GNSS天线设置于所述连接柱的顶端,所述InSAR角反射器通过所述共型结构件与所述连接柱连接,所述InSAR角反射器包括四个三角锥形三面角反射器,所述共型结构件与所述连接柱之间垂直连接。

8. 一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测装置,其特征在于,包括:

数据监测单元,用于基于监测区域的历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,并布设所述GNSS-InSAR共型天线,所述GNSS-InSAR共型天线包括监测点为共同点的GNSS天线和InSAR角反射器,其中,所述GNSS天线用于采集所述监测点的GNSS数据,所述InSAR角反射器用于采集所述监测点的InSAR数据;

数据处理单元,用于根据SBAS-InSAR方法对所述InSAR数据进行干涉处理,并基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过所述对InSAR的大气延迟修正所述InSAR数据的大气延迟误差;

数据融合单元,用于通过所述InSAR数据的干涉结果与所述GNSS数据的时空域融合,获取所述监测点的三维形变速率。

9. 一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测设备,其特征在于,包括:至少一条控制处理器和用于与所述至少一条控制处理器通信连接的存储器;所述存储器存储有可被所述至少一条控制处理器执行的指令,所述指令被所述至少一条控制处理器执行,以使所述至少一条控制处理器能够执行权利要求1至7任一项所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法。

10. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质存储有计算机可执行指令,所述计算机可执行指令用于使计算机执行权利要求1至7任一项所述的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法。

## 一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法、装置及设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及GNSS和合成孔径雷达的轨道变形监测技术领域,特别涉及一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法、装置及设备。

### 背景技术

[0002] 地下水抽取、人为施工等因素造成的地基沉降一直是轨道交通的重大安全隐患,需要采用具有较高的空间采样密度、较高的数据测量精度且具有较短的监测周期的监测手段对轨道交通进行形变。同时也需要考虑监测成本。

[0003] 合成孔径雷达干涉测量(Synthetic Aperture Radar Interferometry,简称InSAR)技术与全球导航卫星系统(简称GNSS)在轨道交通形变监测应用方面各有优势和不足。如:利用InSAR技术可以提供大面积、高精度的监测结果,并能以较低的成本有效地确定沉降区域,其原理是利用合成孔径雷达两次观测中所获得的复数据中含有的相位差和空间距离差之间的关系,提取地表的高程变化,但是测量精度受到大气延迟、相干性等因素的影响。在某些情况下不能达到mm级的精度。GNSS技术能够得到准确的若干个固定位置的高时间分辨率、高精度的形变测量数据。但由于GNSS测量观测点位密度较低,重复观测周期长。若要获得较高的测量精度,则需布设高密度的监测点,必然导致监测点建设成本高。

[0004] 申请人在研究中发现:考虑到两种技术的互补性,一方面,InSAR的大面积形变监测结果对于GNSS站的监测位置及密度的布设则具有较好的指导作用;另一方面,GNSS还可以修正大气延迟对InSAR结果的影响,从而提高其成果的精度。因此,如何将InSAR与GNSS两种技术融合起来,实现GNSS技术高时间分辨率和高平面位置精度与InSAR技术高空间分辨率和高程变形精度的有效统一,实现高精度的轨道交通形变监测,是一个亟待解决的问题。

### 发明内容

[0005] 本发明旨在至少解决现有技术中存在的技术问题。为此,本发明提出一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法、装置及设备。融合具有高空间采样率的InSAR数据和具有高时空分辨率的GNSS数据作为监测结果。

[0006] 本发明的第一方面,提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,包括以下步骤:

[0007] 基于监测区域的历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,并布设所述GNSS-InSAR共型天线,所述GNSS-InSAR共型天线包括监测点为共同点的GNSS天线和InSAR角反射器,其中,所述GNSS天线用于采集所述监测点的GNSS数据,所述InSAR角反射器用于采集所述监测点的InSAR数据;

[0008] 根据SBAS-InSAR方法对所述InSAR数据进行干涉处理,并基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过所述对InSAR的大气延迟修正所述InSAR数据的大气延迟误差;

[0009] 通过所述InSAR数据的干涉结果与所述GNSS数据的时空域融合,获取所述监测点的三维形变速率。

[0010] 根据本发明的实施例,至少具有如下技术效果:

[0011] 本方法利用InSAR和GNSS两种技术,突破单一技术应用的局限,基于InSAR区域的历史监测结果,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,合理地安排GNSS站点布控,利用GNSS反演大气延迟矫正InSAR大气误差,有效地解决InSAR监测技术中受到大气层延迟产生的误差,融合具有高空间采样率的InSAR数据和具有高时空分辨率的GNSS数据作为监测结果。为轨道交通监测提供了一种成本可控的、具有高三维监测精度以及高时空分辨率的形变监测手段。

[0012] 本发明的第二方面,提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测装置,包括:

[0013] 数据监测单元,用于基于监测区域的历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,并布设所述GNSS-InSAR共型天线,所述GNSS-InSAR共型天线包括监测点为共同点的GNSS天线和InSAR角反射器,其中,所述GNSS天线用于采集所述监测点的GNSS数据,所述InSAR角反射器用于采集所述监测点的InSAR数据;

[0014] 数据处理单元,用于根据SBAS-InSAR方法对所述InSAR数据进行干涉处理,并基于所述GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过所述对InSAR的大气延迟修正所述InSAR数据的大气延迟误差;

[0015] 数据融合单元,用于通过所述InSAR数据的干涉结果与所述GNSS数据的时空域融合,获取所述监测点的三维形变速率。

[0016] 根据本发明的实施例,至少具有如下技术效果:

[0017] 本装置利用InSAR和GNSS两种技术,突破单一技术应用的局限,基于InSAR区域的历史监测结果,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,合理地安排GNSS站点布控,利用GNSS反演大气延迟矫正InSAR大气误差,有效地解决InSAR监测技术中受到大气层延迟产生的误差,融合具有高空间采样率的InSAR数据和具有高时空分辨率的GNSS数据作为监测结果。为轨道交通监测提供了一种成本可控的、具有高三维监测精度以及高时空分辨率的形变监测手段。

[0018] 本发明的附加方面和优点将在下面的描述中部分给出,部分将从下面的描述中变得明显,或通过本发明的实践了解到。

## 附图说明

[0019] 本发明的上述和/或附加的方面和优点从结合下面附图对实施例的描述中将变得明显和容易理解,其中:

[0020] 图1为本发明第一实施例提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法的流程示意图;

[0021] 图2为本发明第二实施例提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法的流程示意图;

[0022] 图3为本发明第二实施例提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法的流程框架图;

[0023] 图4为本发明第二实施例提供的D-InSAR两轨法的流程框架图;

[0024] 图5为本发明第二实施例提供的GNSS-InSAR共型天线的外形图;

[0025] 图6为本发明第二实施例提供的GNSS反演大气延迟改正InSAR大气延迟误差的流程框架图；

[0026] 图7为本发明第二实施例提供的SBAS-InSAR方法对InSAR数据进行干涉处理的流程框架图。

### 具体实施方式

[0027] 下面详细描述本发明的实施例，所述实施例的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施例是示例性的，仅用于解释本发明，而不能理解为对本发明的限制。

[0028] 申请人研究发现：InSAR技术可以提供大面积、高精度的监测结果，并能以较低的成本有效地确定沉降区域，其原理是利用合成孔径雷达两次观测中所获得的复数据中含有的相位差和空间距离差之间的关系，提取地表的高程变化，然而InSAR技术容易受到大气的影晌导致精度无法达到理论精度。基于小基线集的多时序合成孔径雷达差分干涉测量技术（简称SBAS-InSAR）是D-InSAR技术的延伸，该技术通过事先设定好的时间基线及空间基线的阈值，对SAR影像进行干涉组合，具有较高的时间采样率。应用短基线差分干涉纹图集构成相位回归分析序列，以均值相干系数作为相干目标识别的指标，利用奇异值分解算法逐个分离相位构成，实现每个相干目标形变序列的获取。小基线突出其在时间和视角方面的优越性，降低SAR影像需求，减少高程误差带来的影响的同时，提高运算效率。

[0029] GNSS技术能够得到准确的若干个固定位置的高时间分辨率、高精度的形变测量数据，并且可以提供大气延迟量，因此利用GNSS技术可以有效的改正InSAR大气延迟误差。同时利用InSAR区域监测结果也优化GNSS站点布设方案，降低监测成本。

[0030] 本方案综合利用InSAR和GNSS两种技术，突破单一技术应用的局限，利用InSAR区域监测结果优化GNSS站点布设方案，基于GNSS-InSAR角反射器共型天线实现GNSS和InSAR数据的有效结合，利用GNSS数据解决InSAR技术精度易受大气延迟效应影响的问题，以及实现GNSS技术高时间分辨率和高平面位置精度与InSAR技术高空间分辨率和高程变形精度的有效统一，从而提出一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法。

[0031] 实施例部分：

[0032] 参照图1，本发明的第一实施例，提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法，包括以下步骤：

[0033] 步骤S101、基于监测区域的历史InSAR监测数据，选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点，并布设GNSS-InSAR共型天线，GNSS-InSAR共型天线包括监测点为共同点的GNSS天线和InSAR角反射器，分别用于采集监测点的GNSS数据和InSAR数据。

[0034] 作为一种可选的实施方式，步骤S101中的基于监测区域的历史InSAR监测数据，选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点，是先通过D-InSAR两轨法获取监测区域的沉降区域，再通过历史监测数据为沉降区域划分等级，基于划分的等级选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点。这样能够利用D-InSAR两轨法获取的大面积形变检测结果来对GNSS监测站的位置和密度进行合理指导，综合考虑线路纵向年沉降量和线路横向两侧沉降趋势来对线路进行综合评估，对线路各区域划分影响等级。因为相比于传统水准、GPS、静力水准仪等形变监测方法，D-InSAR具有全天候全天时、高形变灵敏度、区域连续、可历史回溯等特点，通过卫星的

存档历史数据,可以对特定区域的历史沉降信息进行监测并且对未来的沉降区域进行预测。通过收集监测区域的历史SAR数据,D-InSAR技术能够有效地监测到铁路沿线的地表区域沉降范围、沉降量和沉降速率,从而对沉降区域划分影响等级,确定GNSS和InSAR角反射器布设地点。

[0035] 在步骤S101中,布设GNSS-InSAR共型天线,布设的天线点,既要作为控制点,用于GNSS和InSAR数据坐标转化和改正InSAR误差,又要作为监测点,对测区的重点部位进行监测。SBAS-InSAR以时间序列中相位相对稳定的像素点作为研究对象,可以将失相关噪声减小到最小,然而SBAS-InSAR技术需要监测区域具有相位相对稳定的像素点,为了保证在待监测的轨道路线上具备足够的监测点(简称PS)点,需要人为的安装角反射器充当PS点。由于本方案后续需要将InSAR数据和GNSS数据进行融合,而GNSS-InSAR共型天线可以很好的完成融合步骤,因此将角反射器与GNSS天线有效的结合起来,更有利于InSAR数据与GNSS数据的结合。

[0036] 作为一种可选的实施方式,GNSS-InSAR共型天线为四系统十四频点GNSS-InSAR角反射器共型天线,四系统十四频点GNSS-InSAR角反射器共型天线包括:连接柱、共型结构件、GNSS天线和InSAR角反射器,GNSS天线设置于连接柱的顶端,InSAR角反射器通过共型结构件与连接柱连接,InSAR角反射器包括四个三角锥形三面角反射器,可以反射全部入射角度的InSAR信号,保证其反射强度远大于周围物体的反射强度。共型结构件与连接柱之间垂直连接,通过连接柱和共型结构件之间的刚性垂直连接可确保GNSS天线和InSAR角反射器监测的点为共同点。本四系统十四频点GNSS-InSAR角反射器共型天线的效果在于:在通过InSAR测量与GNSS定位测量信息互补,取得更准确的参照值,提高监测精度,进而提高整体差异沉降的监测质量。

[0037] 步骤S102、根据SBAS-InSAR方法对InSAR数据进行干涉处理,并基于GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过对InSAR的大气延迟修正InSAR数据的大气延迟误差。

[0038] 当InSAR发射的电磁波穿过大气层时,由于大气折射率的变化导致信号传播路径上产生额外增量或传播速度的减缓,使得观测相位具有一个附加的延迟量。大气的时空分布差异大,且变化较快,有着很大的不确定性,没有明显的规律特征,因此在同一区域不同时间获取的SAR影像的大气延迟也不尽相同,因此不可避免的对干涉相位图造成影响。为此,在步骤S102中,采用GNSS反演大气延迟改正InSAR大气延迟误差。

[0039] 作为一种可选的实施方式,首先采用基于随机过程的方法获取GNSS的对流层估计,然后采用双差分算法从GNSS观测值中获取对InSAR的大气延迟改正,由于GNSS获取的大气层延迟改正的空间分辨率低于InSAR影像的分辨率,为了获取更广阔区域的大气延迟改正,采用对GNSS获取的大气延迟改正进行加密,然后将加密后的大气延迟改正从InSAR干涉相位图中消除,从而达到改进InSAR大气延迟误差的效果。

[0040] 步骤S103、通过InSAR数据的干涉结果与GNSS数据的时空域融合,获取监测点的三维形变速率。

[0041] 对于轨道交通,需要采用高精度、大范围、近实时的手段来对其进行形变监测。考虑到InSAR技术具有较密的空间采样率以及对垂直形变比较敏感,而GNSS具有较高的空间分辨率且水平方向观测精度更高。根据两者的互补性,将InSAR监测结果与GNSS监测结果进行融合,达到对轨道交通路线的高精度、高时空分辨率的监测。

[0042] 本方法实施例,利用InSAR和GNSS两种技术,突破单一技术应用的局限,基于InSAR区域的历史监测结果,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,合理地安排GNSS站点布控,利用GNSS反演大气延迟矫正InSAR大气误差,有效地解决InSAR监测技术中受到大气层延迟产生的误差,融合具有高空间采样率的InSAR数据和具有高时空分辨率的GNSS数据作为监测结果。为轨道交通监测提供了一种成本可控的、具有高三维监测精度以及高时空分辨率的形变监测手段。

[0043] 参照图2至图7,本发明的第二实施例,提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法,包括以下步骤:

[0044] 步骤S201、两轨法D-InSAR技术计算沉降区域,获取监测区域布点。

[0045] 通过合成孔径雷达在沉降区域的历史存档数据,计算特定区域的历史沉降量,从而预测区域的沉降趋势。对沉降区域划分影响等级,确定GNSS和InSAR角反射器布设地点。具体步骤为:(1)收集沉降区域的历史哨兵-1A(哨兵-1A是指的一颗遥感卫星)数据,选择垂直基线较短的形变对影像;(2)选择参考影像,另一影像与参考影像进行精确配准;(3)利用形变对以及利用高分辨率DEM模拟的地形相位来计算差分干涉图;(4)相位解缠,计算形变量,确定沉降漏斗范围、位置;(5)制作形变解译图,计算形变速率等。(6)对沉降区域划分影响等级;(7)根据特定区域的影响等级制定GNSS-InSAR监测站布设方案。

[0046] 其中,计算不同区段地面沉降区域的公式为:

$$[0047] \quad i = \frac{\Delta h}{d} = \frac{h_2 - h_1}{d} = \frac{(v_2 - v_1)t}{d} \quad (1)$$

[0048] 其中, $v_1$ 、 $v_2$ 分别表示地面两点的沉降速率; $t$ 表示沉降时间; $d$ 表示地面两点间的平距。

[0049] 对于沉降曲率在大于5mm/km的区域进行严格监控,对沉降原因进行分析并加以控制。因此在进行GNSS控制网布设时,先按照InSAR的监测结果进行整体规划,然后进行逐级控制和局部布点。GNSS监测站位置布设可相对灵活,根据InSAR监测结果,在沉降较为严重区域的轨道路线旁间隔2km灵活布设。同时在主要下沉区域设置24小时连续观测的GNSS固定站(CGPS)。

[0050] 步骤S202、布设GNSS-InSAR共型天线。

[0051] 按照步骤S201设计的方案布设GNSS-InSAR共型天线。布设的天线点,既要作为控制点,用于GNSS和InSAR数据坐标转化和改正InSAR误差,又要作为监测点,对测区的重点部位进行监测。

[0052] 这里提供一种四系统十四频点GNSS-InSAR角反射器共型天线,包括地基、连接柱、共型结构件、GNSS天线和InSAR角反射器。其结构为:地基主要用于固定连接柱,连接柱顶端放置GNSS接收天线,用于接收GNSS信号。InSAR角反射器通过共型结构件与连接柱相连接。InSAR角反射器整体包括四个三角锥形三面角反射器,利用铝材料制作而成,可以反射全部入射角度的InSAR信号,保证其反射强度远大于周围物体的反射强度。通过连接柱和共型结构件之间的刚性垂直连接可确保GNSS天线和InSAR角反射器监测的点为共同点。其效果在于在通过InSAR测量与GNSS定位测量信息互补,取得更准确的参照值,提高监测精度,进而提高整体差异沉降的监测质量。

[0053] 安装时,在地基内打好电池坑,在电池坑内放置充电电池,与电池坑相连的有供排



水的排水管和走线用的穿线管,其余区域用混凝土封死。电池坑的地面上设置有所述排水管防止电池受水浸没。电池坑的侧壁上开设有穿线管用于走线。将太阳能电池板向阳设置,为充电电池充电。GNSS天线按照时间分辨率接收定位信息,进行相应的存储,通过数据线连接电脑将数据导出。

[0054] 步骤S203、采集、解算GNSS信号,收集SAR图像。

[0055] 因为要用GNSS数据改正InSAR数据的大气延迟误差,以及需要将两者进行数据融合,因此采集GNSS信号要与SAR图像获取的时间同步。GNSS信息的采集时间段最好能在SAR图像获取时向前或向后顺延10分钟左右。对GNSS信号进行解算,求得监测点的位置信息以及平面位移和垂直沉降信息。

[0056] 步骤S204、建立InSAR与GNSS的坐标转换关系。

[0057] 为了将InSAR数据和GNSS采集到的数据进行融合,有必要将它们的数据统一到同一参考坐标系下。利用事先布置好的GNSS-InSAR共型天线可以很好的完成这一步骤。搜索InSAR图像上的共型天线形成的强反射点,并获取它的GNSS测定的地面坐标。假设特征点目标的影像坐标为 $(I_{row}, I_{col})$ ,其地面坐标为 $(G_{lat}, G_{lon})$ 。在统一投影关系下,两套坐标系统的变换可表达为:

$$[0058] \quad [(G_{lat} \quad G_{lon}) = [I_{row} \quad I_{col} \quad 1] \begin{bmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0059] 其中, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 是转换矩阵的6个元素。根据等式可知,至少需要三个特征点的坐标才能求出6个参数。当有更多的特征点参数时可以采用最小二乘平差来求得6个参数。最后,利用转换矩阵可以将GNSS求得的大气延迟改正等数据转换为InSAR影像坐标下的数据。

[0060] 步骤S205、利用GNSS数据反演大气延迟。

[0061] 利用GNSS获取对流层延迟,连续GNSS网在实时监测地表变形的同时,还可以解算出对流层的延迟量。GNSS测量天顶总延迟原理是利用GNSS相位观测资料,把观测点的天顶电离层延迟和对流层延迟作为参数在平差中进行解算。双频GNSS的伪距观测方程为:

$$[0062] \quad L_{1j} = \rho_1 - d_{trop} - d_{ion}(f_1) + \epsilon \quad (3)$$

$$[0063] \quad L_{2j} = \rho_2 - d_{trop} - d_{ion}(f_2) + \epsilon \quad (4)$$

[0064] 式中, $\epsilon$ 为其他偏差和残差项; $d_{trop}$ 为对流层延迟; $d_{ion}(f_k)$ 为频率 $f_k$ 的电离层延迟。

[0065] 由于对流层,特别是其中的湿分量在时间和空间的不确定性,标准大气模型很难精确的描述在GNSS点上某一观测时段的实际气象状况。在讨论实际对流层天顶延迟时,通常是将对流层的干、湿延迟结合起来,把标准模型算出的天顶延迟和残余天顶延迟作为参数代入到GNSS相位观测的伪距观测方程中,与其他的参数一起进行解算。通常,未知的天顶残余延迟在每点、每时段进行估算。在每个点的某一段时间内,可近似的认为大气天顶残余延迟是不变的,为一个常数。对流层延迟可表示为:

$$[0066] \quad \Delta D_{trop} = \rho_w m_w(E) + \rho_d m_d(E) \quad (5)$$

[0067] 式中, $\rho_w$ 、 $\rho_d$ 分别为对流层的湿延迟、干延迟分量,是根据对流层的湿延迟、干延迟分量的模型估计出的值, $m_w(E)$ 、 $m_d(E)$ 分别为与传播路径高度角E有关的湿延迟分量、干延迟

分量的投影函数。

[0068] InSAR获取地面沉降变形信息是通过InSAR干涉图进行差分处理得到的。因此，只有SAR影像上两个点之间和两幅SAR影像之间的相对大气层延迟才会使由InSAR获取的变形信息发生扭曲。同时，相位差以及地面变形总是相对于影像上面的某个固定点的。因此，站点之间和时域之间的双差分算法可用于从GNSS观测值中获取对InSAR的大气层延迟改正。

[0069] 假设有两个站点A和B和两个时间j(主SLC影像)和k(副SLC影像)，它们的单差分为：

$$[0070] \quad D_{AB}^j = D_B^j - D_A^j \quad (6)$$

$$[0071] \quad D_{AB}^k = D_B^k - D_A^k \quad (7)$$

[0072] 通过对这两个单差分进行差分可以得到双差分：

$$[0073] \quad D_{AB}^{jk} = D_{AB}^k - D_{AB}^j = (D_B^k - D_A^k) - (D_B^j - D_A^j) = (D_B^k - D_B^j) - (D_A^k - D_A^j) \quad (8)$$

[0074] 有两种可能的方法进行双差分：一是先进行站点间差分，然后进行时域间差分的站间时域双插法(BSBE)；二是先进行时域间差分，然后在进行站点间差分的时域站间双插法(BEBS)。考虑到BSBE差分能内生生成一副但差分延迟改正产品，该产品只与SLC影像有关，只要SLC影像形成InSAR对，BS就能自由地形成下一步的BE差分组合，因此本方法实施例采用应用更加广泛的BSBE法。

[0075] 步骤S206、利用SBAS-InSAR技术对InSAR图像进行处理，获取小基线集，生成差分干涉图。

[0076] 将所有在监测期间获得的SAR数据组合成若干个集合，使得集合内SAR图像的基线距小，集合间的SAR图像基线距大。对每个小集合的地表形变时间序列，利用最小二乘法得到。假设有按时间序列 $t_0 \cdots t_i \cdots t_N$ 获取N+1幅单视复数SAR影像，首先设定垂直基线阈值，然后将垂直基线小于这一阈值的SAR影像归为一组，共分L组，然后将它们以合适的主图像进行配准，每一幅影像至少可以与其他N幅影像中的一幅组成干涉像对，组成短基线子集，所以一短基线子集由2幅或以上影像组成，对每组内的影像进行差分干涉处理，最终L组影像得到M幅差分干涉图，假设N为奇数，则差分干涉图的个数可以表示为：

$$[0077] \quad \frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N+1}{2} N \quad (9)$$

[0078] 以 $t_0$ 时刻为初始时刻，某一像元x处在时刻 $t_i$  ( $i=0, 1, \cdots, N$ )相对于 $t_0$ 的视线向累积形变量 $d(t_i, x)$ 为待求量。分别用 $t_A$ 和 $t_B$ 时刻( $t_B$ 晚于 $t_A$ )获取的两幅SAR影像生成第k ( $k=1, \cdots, M$ )幅差分干涉图，观测量为数据处理获取的差分干涉相 $\Delta\varphi(t_k, x)$  ( $k=1, \cdots, M$ )。则差分干涉图中x处的相位可用如下方程表示：

$$[0079] \quad \Delta\varphi(t_k, x) = \phi(t_B, x) - \phi(t_A, x) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x) - d(t_A, x)] \quad (10)$$

[0080] 式中， $\lambda$ 为卫星发射的电磁波波长， $d(t_A, x)$ 和 $d(t_B, x)$ 分别为相对参考时间 $t_0$ 的LOS方向的累计形变， $\phi(t_A, x)$ 和 $\phi(t_B, x)$ 分别为 $d(t_A, x)$ 和 $d(t_B, x)$ 引起的形变相位。可以利用如下线性模型估计N幅图像的形变为：

$$[0081] \quad a\Phi = \Delta\Phi \quad (11)$$

[0082] 式中,  $\Phi [N \times 1]$  为目标点  $N$  个时刻 SAR 图像上的未知形变相位组成的矩阵;  $\Delta \Phi [M \times 1]$  为  $M$  幅差分干涉图上的相位值组成的矩阵; 系数矩阵  $A [M \times N]$  每行对应一幅干涉图, 每列对应一个时刻上的 SAR 图像, 主图像所在列为 +1, 辅图像为 -1, 其余为 0。如果所有数据都属于一个小基线子集时, 即  $L=1$ , 有  $M \geq N$ ,  $A$  是一个  $N$  阶矩阵, 当  $M=N$  时, 方程组有固定解; 当  $M > N$  时, 方程组是超定解的, 通常, 它的解是可以求得的, 用最小二乘作为条件约束, 用矩阵形式可以表示出  $\varphi$  的估计值  $\hat{\varphi}$  如下:

$$[0083] \quad \Phi = (A^T A)^{-1} A^T \Delta \Phi \quad (12)$$

[0084] 但是实际情况下可用的数据集通常是分散在几个不同的子集矩阵中, 所以此时的  $A^T A$  就成为了一个降秩 (即奇异矩阵) 矩阵。若假设数据来自  $L$  个不同的小基线子集, 则  $A$  的秩为  $N-L+1$ , 这时方程组的解是无限多的, 这就需要用矩阵的奇异值分解 (SVD) 方法求出最小范数意义上的最小二乘解。

[0085] 步骤 S207、利用相关系数选择相干点。

[0086] 除了事先布设好的 GNSS-InSAR 共型天线可充当 PS 点外, 对于监测地区的后向散射信号稳定、短时间间隔内失相干现象很小的点也可充当为相干点, 称为缓慢失相干滤波相位像素点。本方法实施例通过相关系数来选择相干点。

[0087] 在实际测量过程中, 由于每次干涉成像的像素都不在同一个空间位置, 因此通常将像素周边窗口  $N$  内的整体干涉系数来代替该点理论值, 整体的干涉系数  $|\hat{\gamma}|$  表达式为:

$$[0088] \quad |\hat{\gamma}| = \frac{|\sum_{n=1}^N y_1^{(n)} y_2^{*(n)}|}{\sqrt{\sum_{n=1}^N |y_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^N |y_2^{(n)}|^2}} \quad (13)$$

[0089] 由于 SABS-InSAR 算法中利用多个影像构成干涉相对, 因此需要兼顾目标在每个干涉图中的稳定性和所有干涉图系列的稳定性, 当像元的差分干涉图中相干系数同时满足以下两个等式时, 便被选择为相干像元:

$$[0090] \quad \begin{cases} \gamma_i(x) \geq \gamma_T^1 \\ \hat{\gamma}(x) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \gamma_i(x) \geq \gamma_T^2 \end{cases} \quad (14)$$

[0091] 式中,  $\gamma_i(x)$  为第  $i$  幅差分干涉图中  $x$  处的相干系数;  $\hat{\gamma}(x)$  为所有  $M$  幅差分干涉图中  $x$  处的平均相干系数;  $\gamma_T^1$  和  $\gamma_T^2$  分别为对应的阈值。

[0092] 步骤 S208、采用 LAMBDA 相位解缠算法进行相干点相位解缠。

[0093] 由于 SBAS-InSAR 的干涉图中只保留了部分相干像元, 这些点在空间位置的分布上是离散的, 使得某些相邻相干像元间的相位差绝对值不能满足小于  $\pi$  的条件, 阻断了相位解缠的积分路径, 这样就需要将这些离散点联结起来, 使其构成一个完整的网络, 再进行相位解缠处理。本方法实施例采用现有的 LAMBDA 相位解缠算法进行离散的相干点相位解缠。

[0094] 根据 PS 点的选取原则可以选出  $N$  个 PS 点, 利用一定的布网原则对这  $N$  个 PS 点进行布网就形成了 PS 网格。每两个相连的 PS 点就形成了一个 PS 点对, 这两个 PS 点的之间连线称为基线。则对于任意的一堆 PS 点的  $i$  和  $j$ , 都会对应有一个时间序列上的相位观测值:  $\phi_i^m$  和  $\phi_j^m$ , 其中  $\phi_i^m$  和  $\phi_j^m$  分别是第  $m$  幅干涉图上  $i$  和  $j$  点的相位, 于是可建立干涉模型:

$$[0095] \quad \phi_i^m = -2\pi * k_i^m + \beta_i^m * \Delta H_i^m - \frac{4*\pi}{\lambda} v_i * T^m + \varepsilon_i^m \quad (15)$$

$$[0096] \quad \phi_j^m = -2\pi * k_j^m + \beta_j^m * \Delta H_j^m - \frac{4*\pi}{\lambda} v_j * T^m + \varepsilon_j^m \quad (16)$$

[0097] 其中,k是相位整周模糊度;B是相位高程转换系数,ΔH是高程改正数;v是该PS点上的沉降速率;λ是雷达卫星所发射的微波波长;T是两幅SAR影像的时间间隔;ε则是随机误差,包括了大气延迟、噪声等因素引起的误差,在解缠模型中暂且将其作为残余相位省略。则i点相对与j点的相位差可表示为:

$$[0098] \quad \Delta\phi_{i,j}^m = -2\pi * \Delta k_{i,j}^m + \beta_{i,j}^m * \Delta H_{i,j} - \frac{4*\pi*T^m}{\lambda} \Delta v_{i,j} \quad (17)$$

[0099] 上式中:

$$[0100] \quad \Delta\phi_{i,j}^m = \phi_i^m - \phi_j^m, \Delta k_{i,j}^m = k_i^m - k_j^m, \Delta v_{i,j} = v_i - v_j, \Delta H_{i,j} = \Delta H_i^m - \Delta H_j^m,$$

[0101] 分别表示第m幅干涉图中第i点相对与第j点的干涉相位差、相位整周模糊度差、沉降速率差以及高程改正数差。

[0102] 将(17)式写出矩阵形式:

$$[0103] \quad E \begin{Bmatrix} \Delta\phi_{i,j}^1 \\ \Delta\phi_{i,j}^2 \\ \Delta\phi_{i,j}^3 \\ \vdots \\ \Delta\phi_{i,j}^m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -2\pi & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -2\pi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta k_{i,j}^1 \\ \Delta k_{i,j}^1 \\ \Delta k_{i,j}^1 \\ \vdots \\ \Delta k_{i,j}^1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{i,j}^1 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^1 \\ \beta_{i,j}^2 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^2 \\ \beta_{i,j}^3 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^3 \\ \vdots & \vdots \\ \beta_{i,j}^4 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta H_{i,j} \\ \Delta v_{i,j} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

[0104] 令

$$[0105] \quad \begin{bmatrix} -2\pi & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & -2\pi \end{bmatrix} = A_1, \quad \begin{bmatrix} \beta_{i,j}^1 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^1 \\ \beta_{i,j}^2 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^2 \\ \beta_{i,j}^3 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^3 \\ \vdots & \vdots \\ \beta_{i,j}^4 & -\frac{4\pi}{\lambda} T^4 \end{bmatrix} = B_1$$

[0106] 式(18)可以进一步简写为:

$$[0107] \quad y_1 = A_1 * a + B_1 * b \quad (19)$$

[0108] 由于(18)式中,整周相位模糊度、高程修正和沉降速率都是待求量;一共有m个方程和m+2个未知数,显然方程秩亏。因此需要加入一个伪观测值 $y_2 = A_2 * a + B_2 * b$ ,与(19)一起构成一个新的干涉模型:

$$[0109] \quad y = A * a + B * b \quad (20)$$

[0110] 其中: $y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix}$ ;  $A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$ ;  $B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$ ;  $y_2$ 是 $2 \times 1$ 的伪观测向量; $A_2$ 是 $2 \times m$ 的零矩阵; $B_2$ 是 $2 \times 2$ 的单位矩阵。

[0111] 根据最小二乘原理,可以计算出:

$$[0112] \quad \hat{X} = \begin{pmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{pmatrix} = (C^T Q_y^{-1} C)^{-1} C^T Q_y^{-1} y \quad (21)$$

[0113] 其中, $C = [AB]$ ;  $Q_y$ 是观测值和伪观测值的方差协方差矩阵。由此求得的 $\hat{a}$ 是相位整

周模糊度的浮点解。之后利用此浮点解作为已知数据,利用基于最小二乘的模糊度去相关方法搜索得到相位整周模糊度的固定解 $\check{a}$ 。

[0114] 得到固定解 $\check{a}$ 后,则解缠相位 $\check{y}_1$ 可以表示为:

$$[0115] \quad \check{y}_1 = y_1 - A_1 \check{a} \quad (22)$$

[0116] 此时,解缠后的相位就又可以表示为:

$$[0117] \quad E\{\check{y}_1\} = B_1 b \quad (23)$$

[0118] 再次利用最小二乘原理可得:

$$[0119] \quad \check{b} = (B_1^T Q_{y_1}^{-1} B_1)^{-1} B_1^T Q_{y_1}^{-1} \check{y}_1 \quad (24)$$

[0120] 其中, $Q_{y_1}$ 表示观测值的方差协方差阵。

[0121] 步骤S209、奇异值分解。

[0122] 奇异值分解是SBAS反演的关键理论算法,首先在相干点上建立相应的模型,然后在线性模型基础上构建方程组,利用矩阵的奇异值分解方法在最小范数下给出最小二乘解。所以通过求得矩阵A的广义逆来给出方程组A的最小二乘解,通过SVD分解,可以将矩阵A分解成以下格式:

$$[0123] \quad A = USV^T \quad (25)$$

[0124] 式中,U为 $M \times M$ 的正交矩阵,由 $AA^T$ 的特征向量 $u_i$ 组成; $V$ 为 $N \times N$ 的正交矩阵,由 $A^T A$ 的特征向量 $v_i$ 组成; $S$ 为一个 $M \times N$ 的对角矩阵,对角线元素是 $AA^T$ 的特征值 $\lambda_i$ 。一般 $M > N$ ,假设A的秩为R,则 $AA^T$ 的前R个特征值非0,而后 $M-R$ 个特征值为0。定义A的伪逆矩阵为 $A^+$ ,则有:

$$[0125] \quad A^+ = \sum_{i=1}^R \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} v_i u_i \quad (26)$$

[0126] 则最小范数意义上的最小二乘相位估计为 $\hat{\phi} = A^+ \delta \phi$ 。

[0127] 利用相位求得平均相位速度,即:

$$[0128] \quad V^T = [v_1, \dots, v_{N-1}] = \left[ \frac{\phi_2 - \phi_1}{t_2 - t_1}, \dots, \frac{\phi_N - \phi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (27)$$

[0129] 代替相位得:

$$[0130] \quad \sum (t_{k+1} - t_k) v_k = \Delta \phi_j \quad (28)$$

[0131] 同时考虑到高程误差 $\varepsilon$ 的相位贡献,得到一个新的矩阵方程,即:

$$[0132] \quad Dv + C \cdot \varepsilon = \Delta \Phi \quad (29)$$

[0133] 式中,D是一个 $M \times (N-1)$ 矩阵。对第j行,位于主辅图像获取时刻之间的列,有 $D(j, k) = t_k - t_{k-1}$ ,其它 $D(j, k) = 0$ 。 $C[M \times 1]$ 是与基线距相关的系数矩阵。此时,将SVD分解应用于矩阵D,就可以得到速度矢量v的最小范数解,并可得到高程误差 $\varepsilon$ 。

[0134] 步骤S210、基于GNSS大气延迟反演分离干涉图中的大气相位。

[0135] SBAS-InSAR中原有将大气相位分离的方法,在求得各相干像元的低频地表形变和DEM高程误差后,将其从M幅差分干涉图中去除,得到残余相位,其中包括大气延迟相位、非线性形变相位和失相干噪声。其中大气延迟在时间上是不相关的,而在空间上却具有强相关性,因此在时间序列上表现为高频特性,而在空间分布上表现为低频特性。首先从残余相位中时间序列上的高通滤波,其结果主要包含了大气相位和失相关噪声。在高通滤波的基

基础上,联合所有相干像元在同一差分干涉图中进行空间域上的低通滤波,滤除失相关噪声,剩余相位即是大气相位。

[0136] 除此之外,本方法实施例还采用了GNSS反演的大气层延迟来改正InSAR差分干涉图大气延迟误差。采用基于距离反比加权内插法(IDW)将GNSS站点反演的大气层延迟内插至SBAS-InSAR处理中选择的相干点。IDW是一种确定性插值方法,它基于如下模型:每个数据点都有局部影响,这个影响随着数据点和内插点之间距离的增加而减弱,且在一定的范围以外,可以忽略不计,这个影响是以该数据点为中心对称,在任一点处的内插值是各数据点影响之和。为预计未测点的值,IDW将利用未测点附近的已测点的值。距离未测点较近的观测值比距离未测点较远的观测值对未测点有更多的影响。这样,IDW假定每个观测点有一个随距离减小的局部影响。距离预计点近的点的权比距离预计点远的点的权大。

[0137] GNSS获取的大气层延迟的距离反比加权内插法的总公式为:

$$[0138] \quad \widehat{D}(\lambda_0, \varphi_0) = \sum_{i=1}^N w_i D(\lambda_i \varphi_i) \quad (30)$$

[0139] 式中, $\widehat{D}(\lambda_0, \varphi_0)$ 是坐标为东 $\lambda_0$ 、北 $\varphi_0$ 点的内插大气层延迟。 $N$ 表示用于内插的预计点周围的GNSS站点的数目; $w_i$ 表示和GNSS获取的延迟有关的权重;IDW的权重对内插位置随距离而减小; $D(\lambda_i, \varphi_i)$ 表示在位置东 $\lambda_0$ 、北 $\varphi_0$ 处的GNSS延迟改正。权重由下式给出:

$$[0140] \quad w_i = \frac{d_{i0}^{-p}}{\sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}} \text{ 以及 } \sum_{i=1}^N w_i = 1 \quad (31)$$

[0141] 随着距离的增大,权重以 $P$ 次方减小。 $d_{i0}$ 表示预计点和GNSS站点的距离。幂参数 $P$ 影响GNSS值对内插点的权重,即随着GNSS站点与预计点的距离的增加,观测点对预计点的权重以指数形式减小。通过定义一个高次方的参数,可更多地强调距离近的点,生成的曲面将有更多的细节,但不平滑。在本方法实施例中距离的幂参数 $P$ 取值为2。

[0142] 步骤S211、将形变相位转换为形变量。

[0143] 在进行大气相位分离后,干涉图剩余成分为非线性形变相位以及白噪声,为了进一步提高非线性形变的估计精度,本方法实施例采用对剩余相位进行空间域上的低通滤波,滤波后的结果便是非线性形变的估计相位。将形变相位转换为形变量。

$$[0144] \quad \Delta R_d = -\frac{\lambda}{4\pi} \varphi_d \quad (32)$$

[0145] 其中, $\Delta R_d$ 为视线向的形变量, $\varphi_d$ 为形变相位。

[0146] 步骤S212、SBAS-InSAR形变信息地理编码。

[0147] 本方法实施例采用现有的多普勒(R-D)定位模型,将前面处理得到的雷达坐标系下的结果转化到地理坐标系下的过程。

[0148] 步骤S213、InSAR数据与GNSS数据融合。

[0149] 对于布设了GNSS-InSAR的监测点而言,可以直接将GNSS数据和InSAR数据结果进行融合,而对于SBAS-InSAR获取的其他相干点,则需要利用插值法对GNSS数据进行插值,获取相干点对应位置的GNSS三维形变场,再进行融合。

[0150] 首先,建立地平直角坐标系NVE。以某个固定为原点, $N$ 轴指向子午线北方向, $V$ 轴与原点处椭球法线重合, $E$ 轴指向东方向。对于SBAS-InSAR观测时间序列中第 $m$ 幅干涉对中的相干点 $i$ ,根据SAR卫星的投影矢量,将其视线向的一维形变结果转换为建立该点在 $e$ 、 $n$ 、 $v$ 方

向的三维形变 $v_e^i$ 、 $v_n^i$ 、 $v_u^i$ 。

$$[0151] \quad \Delta R_d^{mi} = [t_m S_x^{mi} \quad t_m S_y^{mi} \quad t_m S_z^{mi}] [v_e^i \quad v_n^i \quad v_u^i]^T \quad (33)$$

[0152] 其中 $\Delta R_d^{mi}$ 为第m幅干涉对中的相干点i在视线向的形变量, $t_m$ 代表第m幅干涉对的时间间隔, $[S_x^i \quad S_y^i \quad S_z^i]$ 为InSAR在i点处的单位投影矢量矩阵。

[0153] 对于没有架设共型天线的其他相干点,通过对GNSS获取的三维形变场采用普通的克里金插值法至与SBAS-InSAR相干点同样的位置,则有:

$$[0154] \quad \begin{bmatrix} L_E^{mi} \\ L_N^{mi} \\ L_U^{mi} \end{bmatrix} = t_m \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_e^i \\ v_n^i \\ v_u^i \end{bmatrix} \quad (34)$$

[0155] 其中 $[L_E^i \quad L_N^i \quad L_U^i]^T$ 为GNSS内插得到相干点i处的ENU方向三维形变量。

[0156] 通过最小二乘模型融合InSAR观测量与内插的GNSS观测量来求解相干点的三维形变量。

$$[0157] \quad L_{4n \times 1} = A_{4n \times 3} X_{3 \times 1} \quad (35)$$

[0158]  $L_{4n \times 1} = [L_{LOS}^{1i} \quad \dots \quad L_{LOS}^{ni} \quad L_E^{1i} \quad \dots \quad L_E^{ni} \quad L_N^{1i} \quad \dots \quad L_N^{ni} \quad L_U^{1i} \quad \dots \quad L_U^{ni}]^T$ 为n个InSAR-LOS向的观测量和3n个GNSS内插值组成的观测量, $X_{3 \times 1} = [v_e^i \quad v_n^i \quad v_u^i]$ 为待求的三维形变速率, $A_{4n \times 3}$ 为设计矩阵,具体为:

$$[0159] \quad A_{4n \times 3} = \begin{bmatrix} t_1 S_x^{1i} & \dots & t_n S_x^{ni} & t_1 & \dots & t_m & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ t_1 S_y^{1i} & \dots & t_n S_y^{ni} & 0 & \dots & 0 & t_1 & \dots & t_m & 0 & \dots & 0 \\ t_1 S_z^{1i} & \dots & t_n S_z^{ni} & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & t_1 & \dots & t_m \end{bmatrix}^T \quad (36)$$

[0160] 通过求解式(35),便能计算出所有相干点的三维形变速率。从而获取轨道交通路线上相关的形变信息。

[0161] 本发明提供了一种综合InSAR和GNSS技术的轨道交通形变监测方法,其步骤为:利用D-InSAR两轨法确定GNSS-InSAR共型天线布设地点;架设GNSS-InSAR共型天线;采集、解算GNSS信号,收集SAR图像;建立InSAR图像与GNSS的坐标转换关系;利用GNSS反演大气延迟;利用SBAS-InSAR技术对InSAR图像进行处理,获取小基线集,生成差分干涉图;利用相关系数选择相干点;采用LAMBDA相位解缠算法进行相干点相位解缠;奇异值分解;基于GNSS大气延迟反演分离干涉图中的大气相位;将形变相位转换为形变量;SBAS-InSAR形变信息地理编码;InSAR数据与GNSS数据融合。本发明采用InSAR和GNSS技术进行轨道交通监测,通过D-InSAR的高形变灵敏度、区域连续、可历史回溯等特点制定GNSS-InSAR共型天线布设方案,利用GNSS反演大气延迟矫正InSAR大气误差,融合具有高空间采样率的InSAR数据和具有高时空分辨率的GNSS数据作为监测结果。为轨道交通监测提供了一种成本可控的、具有高三维监测精度以及高时空分辨率的形变监测手段。

[0162] 本发明的第三实施例,提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测装置,包括:数据监测单元、数据处理单元和数据融合单元,其中

[0163] 数据监测单元用于基于监测区域的历史InSAR监测数据,选取GNSS-InSAR共型天线的布设地点,并布设GNSS-InSAR共型天线,GNSS-InSAR共型天线包括监测点为共同点的

GNSS天线和InSAR角反射器,分别用于采集监测点的GNSS数据和InSAR数据;

[0164] 数据处理单元用于根据SBAS-InSAR方法对InSAR数据进行干涉处理,并基于GNSS数据反演对InSAR的大气延迟,通过对InSAR的大气延迟修正InSAR数据的大气延迟误差;

[0165] 数据融合单元用于通过InSAR数据的干涉结果与GNSS数据的时空域融合,获取监测点的三维形变速率。

[0166] 由于本实施例与第一实施例是基于相同的发明构思,因此,第一实施例的相关内容同样适用于本装置实施例,此处不再赘述。

[0167] 本发明的第四实施例,提供了一种综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测设备,该设备可以是任意类型的智能终端,例如手机、平板电脑、个人计算机等。具体地,该设备包括:一个或多个控制处理器和存储器,这里以一个控制处理器为例。控制处理器和存储器可以通过总线或者其他方式连接,这里以通过总线连接为例。

[0168] 存储器作为一种非暂态计算机可读存储介质,可用于存储非暂态软件程序、非暂态性计算机可执行程序以及模块,如本发明实施例中的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测设备对应的程序指令/模块。控制处理器通过运行存储在存储器中的非暂态软件程序、指令以及模块,从而实现上述方法实施例的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法。

[0169] 存储器可以包括存储程序区和存储数据区,其中,存储程序区可存储操作系统、至少一个功能所需的应用程序;存储器可以包括高速随机存取存储器,还可以包括非暂态存储器,例如至少一个磁盘存储器件、闪存器件、或其他非暂态固态存储器件。在一些实施方式中,存储器可选包括相对于控制处理器远程设置的存储器,这些远程存储器可以通过网络连接至该综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测设备。上述网络的实例包括但不限于互联网、企业内部网、局域网、移动通信网及其组合。

[0170] 所述一个或者多个模块存储在所述存储器中,当被所述一个或者多个控制处理器执行时,执行上述实施例中的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法。

[0171] 本发明实施例还提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质存储有计算机可执行指令,该计算机可执行指令被一个或多个控制处理器执行上述实施例中的综合InSAR和GNSS的轨道交通形变监测方法。

[0172] 通过以上的实施方式的描述,本领域技术人员可以清楚地了解到各实施方式可借助软件加通用硬件平台的方式来实现。本领域技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成,程序可存储于计算机可读取存储介质中,该程序在执行时,可包括如上述方法的实施例的流程。其中,所述的存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体(Read Only Memory,ROM)或随机存储记忆体(Random Access Memory,RAM)等。

[0173] 在本说明书的描述中,参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示意性实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包含于本发明的至少一个实施例或示例中。在本说明书中,对上述术语的示意性表述不一定指的是相同的实施例或示例。而且,描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任何的一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。

[0174] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,本领域的普通技术人员可以理解:在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本



发明的范围由权利要求及其等同物限定。

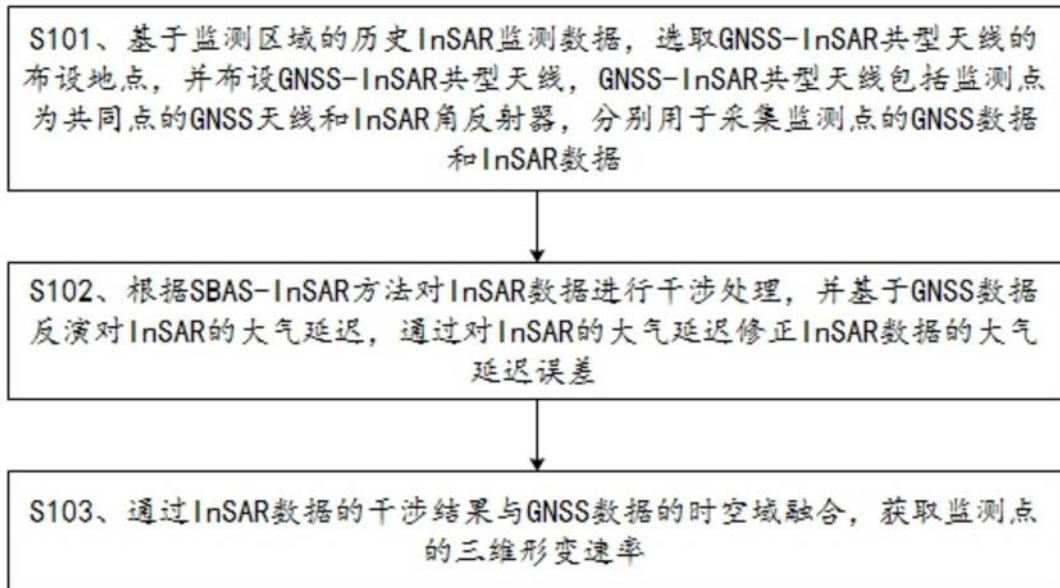


图1

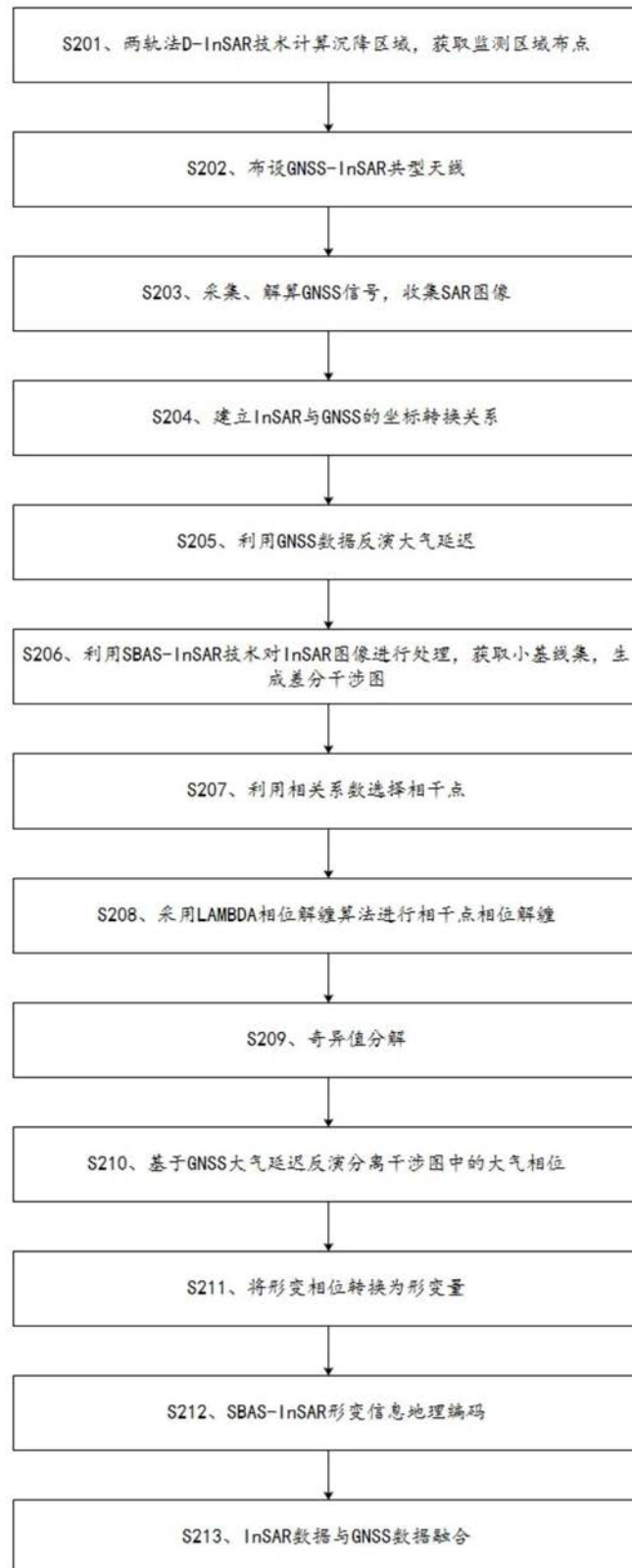


图2

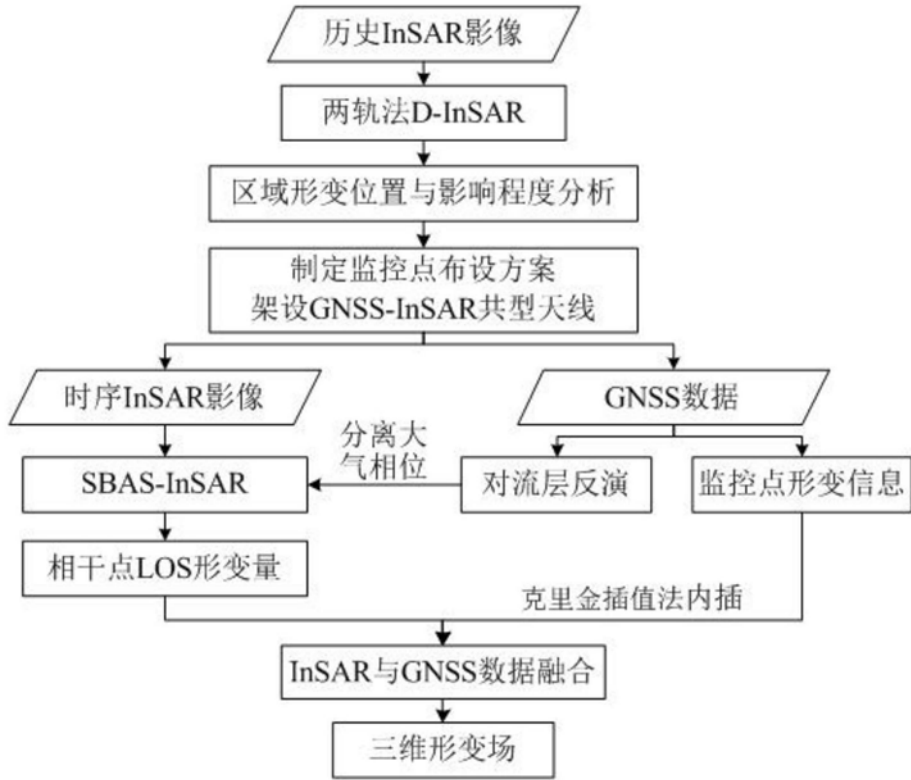


图3



图4

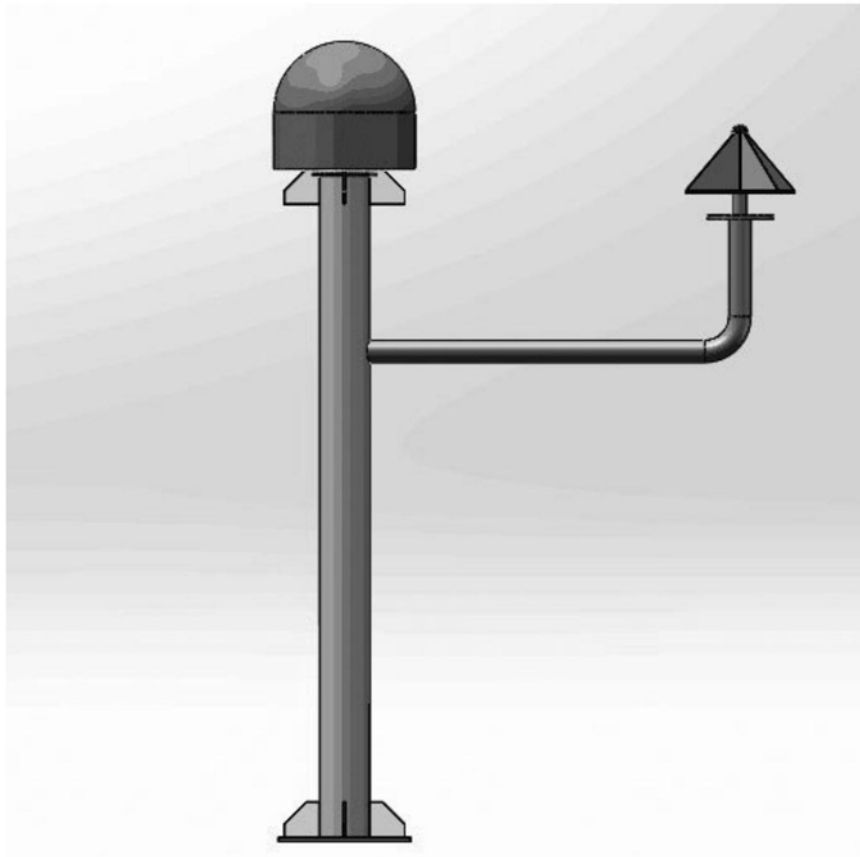


图5

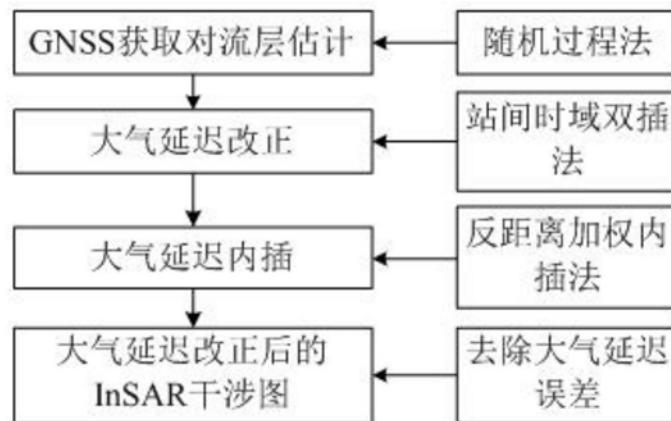


图6

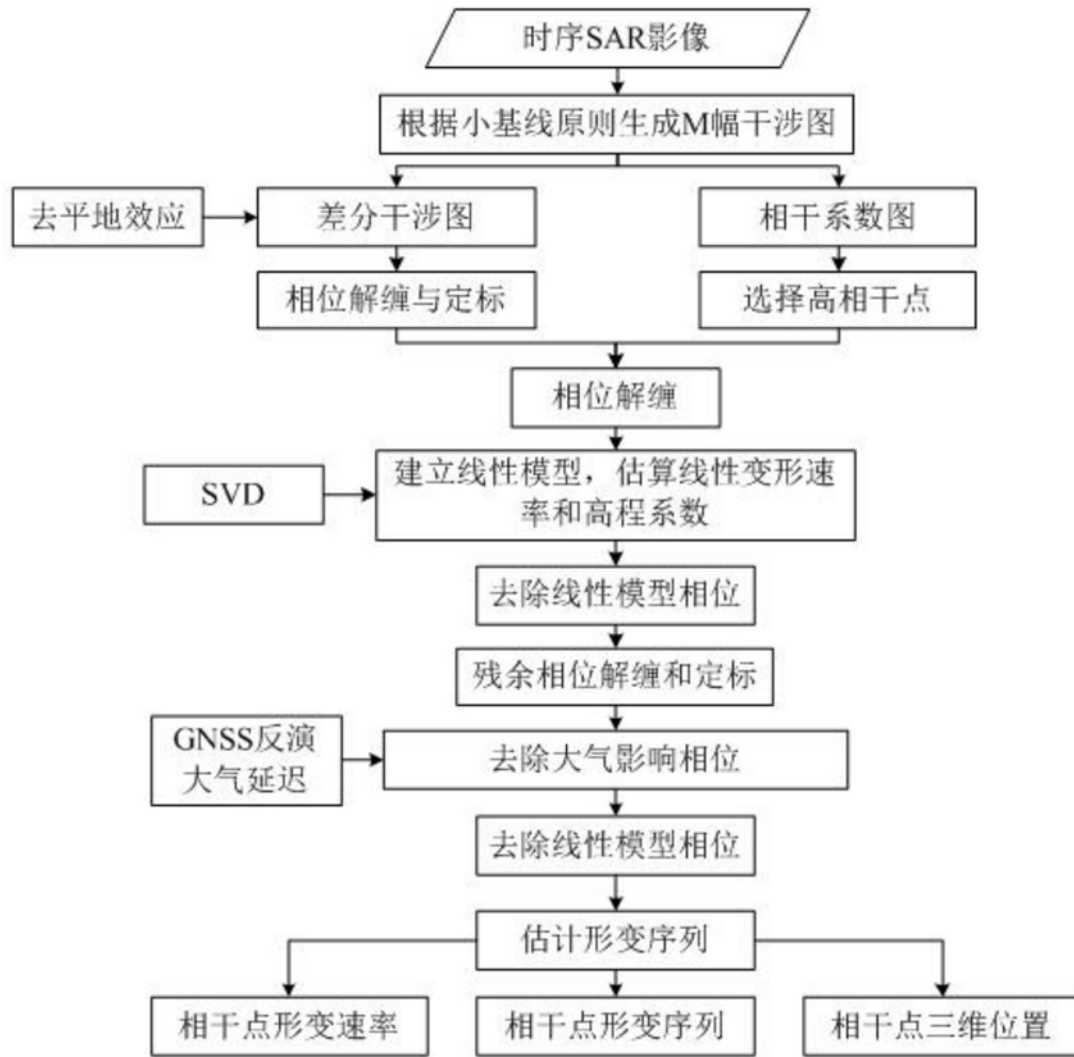


图7