

基于星载 InSAR 的高寒地区公路路基形变监测

罗博仁,余飞,余绍淮

(中交第二公路勘察设计研究院有限公司,湖北 武汉 430056)

摘要:西北高寒高海拔地区地质、气候条件恶劣,季节性冻土等不良地质体分布广泛,严重影响高速公路的使用寿命,威胁行车安全。传统公路形变监测方法效率低、以点带面,形变信息不完整,该文采用星载 InSAR 技术对公路形变进行监测,实现公路走廊带大范围形变信息提取,获取冻土区公路路基形变规律,为公路危险路段定点治理提供基础数据,保障公路科学建设、安全运营管理。

关键词:公路工程;InSAR;季节性冻土;形变监测

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

0 引言

随着中国高速公路建设事业的快速发展,西北高寒高海拔地区高速公路通车里程快速增长。西北地区地质条件十分恶劣,冰川冻土发育,寒冻风化和融冻作用十分普遍,普遍存在软弱地基、季节性冻土、崩滑体等不良地质体,使得该地区公路极易出现路基鼓包、龟裂、波浪等病害,严重影响公路使用质量,增加养护成本,明显缩短使用寿命,威胁行车安全。为此,全面定期了解公路全线路基形变规律与形变量,对公路全线进行易形变区筛查,对于公路的科学精准管养、合理选择病害防治措施、保障运营安全具有十分重要的现实意义。

传统公路路基形变监测主要采用人工巡检、水准测量、土工监测的方法^[1-2],巡检人员定期对重点危险区域进行观察、测量,该方法的缺陷主要表现在:①需要大量的人工外业施测,成本高,工作量大,危险性高;②成果信息不完整,只能以点代面,无法掌握道路全线的形变信息,监测结果受监测点位的数量、分布位置等影响较大;③易受天气、环境的影响,对于高寒高海拔地区,交通条件不便利,工作环境艰苦,恶劣的天气也容易中断形变监测任务的执行。

随着卫星遥感技术的发展,快速、高精度获取大

范围环境形变信息成为可能。利用卫星遥感技术周期性对公路工程全线形变进行普查,获取重点路段、大型构造物的形变信息,可为定点详查提供重要基础信息。

合成孔径雷达干涉测量技术(简称 InSAR),自诞生至今已 30 多年,起初主要应用于生成数字高程模型和制图。由于其主动式测量、全天候全天时、几乎不受天气影响的特点,应用领域扩展到测量地表微小形变,已在地震形变^[3]、火山运动^[4]、冰川漂移^[5]、城市沉降^[6]以及山体滑坡^[7]等研究领域取得了大量成功应用。本文将星载 InSAR 干涉测量技术引入公路路基形变监测中,进行公路全线大范围、周期性的监测,实现重点变形区域的定期定量形变筛查,突破公路监测“以点代面”的技术瓶颈,具有重要的实际意义。

1 InSAR 形变监测原理

近年来,国内外众多学者对时序 InSAR 进行了大量研究,发展出小基线集时序分析法(SBAS)^[8]、角反射器干涉法(CRInSAR)^[9]、斯坦福相位相关性分析法(Stamps)^[10]等一系列理论方法,形成了较为完善的 SAR 多时间序列差分干涉技术。其中 SBAS 方法通过对选择合适的空间基线和时间基线组成差分

收稿日期:2022-01-12

基金项目:湖北省重点研发计划项目(编号:2021BAA185)

作者简介:罗博仁,男,硕士,工程师.E-mail:569850882@qq.com

干涉对,可以很大程度上解决空间基线过长造成的图像失相干问题,能有效削弱大气效应的影响,已成为时序InSAR的主流处理方法,本文拟采用SBAS方法进行数据处理。

SBAS方法的关键步骤为:干涉对的组合、干涉对的相位解缠、高质量相干目标点的选择和形变信息的提取。在实际处理中,形变模型并不能完全描述形变信号,常常有一部分形变信号与大气延迟相位、噪声相位混淆在一起,归于残余相位。通过空间域的低通滤波和时间域的高通滤波,可以分离出非线性形变。最终的形变模型拟合得到的形变和非线性形变的总和,是研究对象的形变信息。

SBAS方法的基本流程如图1所示。

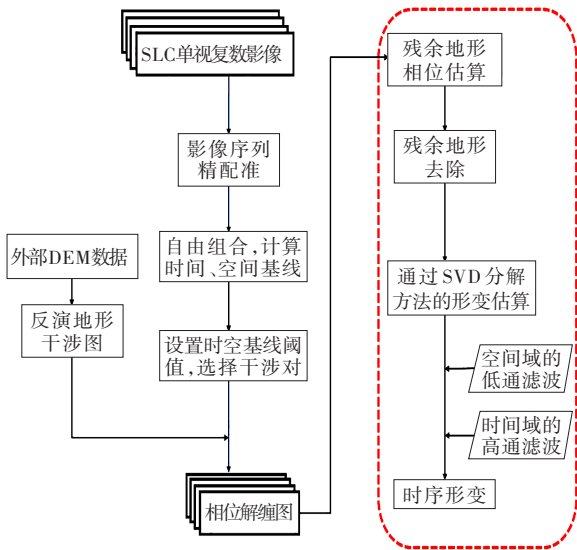


图1 SBAS形变提取技术流程

2 依托工程

青海省某穿越青藏高原多年冻土区的首条高海拔、高寒高速公路,主线全长634.880 km,其中多年冻土路段长227.7 km,占路线总长的35.9%。该高速公

路地处内陆高原腹地,其冬季气候寒冷漫长,多风雪,易成雪灾;夏季气候凉爽短促,雨水充沛,中高山脉常年有霜雪存在,全年有长达7个月的冰冻期。春、夏季随着温度的升高,冻土中的冰融化成水,冻土区的地表下沉;秋、冬季温度降低,冻土中的水结成冰,地表上升。冻土的冻结和融化作用反复交替导致路基鼓胀、沉陷,从而产生不均匀变形。

本文选取K560~K590作为试验路段,该路段地形复杂,山区多,平均海拔在3 800 m以上,工作条件相当恶劣,难以开展野外调查和测量工作。同时线路呈长条带状,若要对整个路段进行形变监测,则需耗费较大的人力、物力,且效率低下、危险性高。而选择SAR雷达干涉对监测大范围区域的形变信息具有得天独厚的优势。试验路段范围见图2。

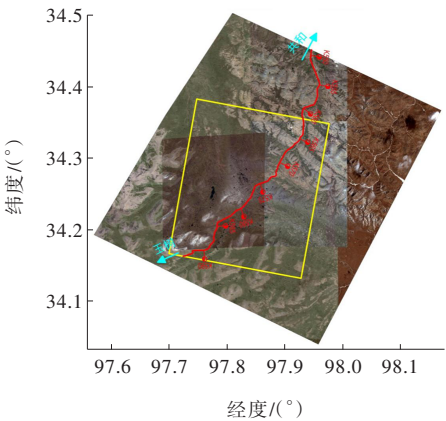


图2 试验路段范围概况

3 数据选择

当前国际上SAR卫星系统较多,主要SAR卫星及相关参数见表1。

在与其他卫星传感器对比的基础上,综合考虑高寒高海拔地区形变监测的特点,该项目主要考虑以下

表1 国际上主要SAR卫星系统及相关参数

卫星SAR系统	发射年份/ 年	轨道高度/ km	(波段/波长)/ cm	侧视角/ (°)	重复周期/ d	地面分辨率/ m	服役截止 时间
RADARSAT-2	2007	798	C/5.60	10~49	24	3~100	至今
TerraSAR-X	2007	514	X/3.10	20~45	11	1~16	至今
TanDEM-X	2010	514	X/3.10	20~45	11	1~16	至今
COSMO-SkyMed	2007—2010	620	X/3.10	20~60	4~16	1~100	至今
Sentinel-1A	2014	630	C/5.55	20~46	12	5~20	至今

3个方面,最终选择采用 TerraSAR-X 图像为数据源。

(1) 对空间分辨率的要求:该项目的研究目标是调查公路走廊带形变区域,路线长、范围大。当采用较低分辨率 SAR 卫星图像时,重点地物将与周边地物混叠在单个像元内难以识别。综合考虑影像空间分辨率以及研究对象的特点,SAR 图像分辨率宜优于 15 m。

(2) 对重访周期的要求:相邻两期影像如果相隔时间太久,一些细微的形变特征将丢失而无法捕捉。时序形变监测宜采用时间分辨率在 15 d 以内数据。

(3) 对 SAR 图像波长的考虑:一般来说,SAR 图像的波长越长,所获取影像的相干性越好,但形变敏感度会降低;波长越短,对形变将更加敏感,探测精度越高,但易受植被影响,该项目研究区植被稀疏。

综上所述,本文最终选择 13 景 TerraSAR-X 图像作为公路形变监测的数据源,数据采集时间见表 2。

表 2 项目数据采集时间(2019 年)

序号	采集时间/ (月-日)	序号	采集时间/ (月-日)	序号	采集时间/ (月-日)
1	05-09	6	07-03	11	09-18
2	05-20	7	07-14	12	10-10
3	05-31	8	07-25	13	11-12
4	06-11	9	08-05		
5	06-22	10	08-27		

4 结果分析

结合 SBAS 方法的形变结果,分别从区域形变分析、纵断面形变分析,对试验区冻土形变进行更加细致的分析与研究。

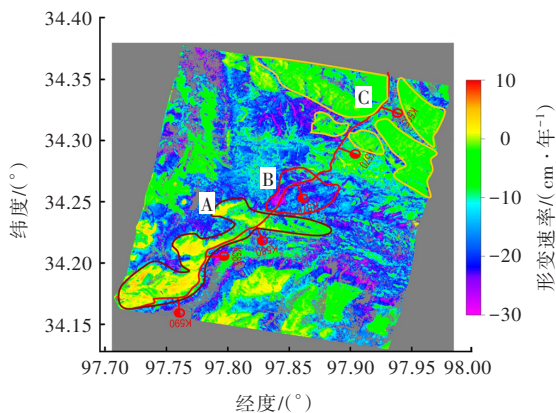
为验证 SABS 方法形变监测精度,于 2019 年 10 月 8 日、2019 年 11 月 4 日与 SAR 卫星数据同步采集了两期水准高程数据,水准高程变化量取 2019 年 11 月 4 日与 2019 年 10 月 8 日水准成果的差值,共得到 223 个形变监测点。将水准高程差与 2019 年 11 月 12 日、2019 年 10 月 10 日干涉对提取的形变量进行对比求差,并对差值进行统计分析。差值的分布区间和个数如表 3 所示。

由表 3 可以发现:SBAS 方法获取的形变与水准测量获取的形变在趋势上近似一致,形变量的最大误差为 1.3 cm,最小误差为 -0.8 cm,平均误差为 0.22 cm,大部分误差在 1 cm 以内,可证明该项目 SBAS 结果是可信的。

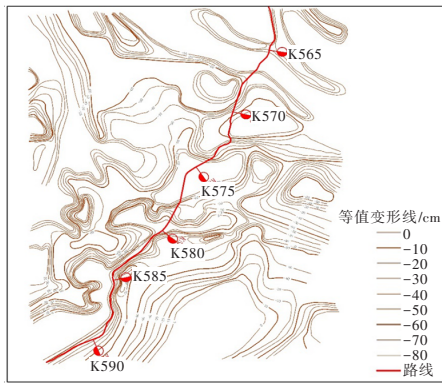
表 3 SBAS 结果与水准结果误差分布

误差区间/cm	个数/个	误差区间/cm	个数/个
$[-1.0, -0.8)$	1	$[0.2, 0.4)$	45
$[-0.8, -0.6)$	3	$[0.4, 0.6)$	39
$[-0.6, -0.4)$	9	$[0.6, 0.8)$	24
$[-0.4, -0.2)$	16	$[0.8, 1.0)$	4
$[-0.2, 0.0)$	32	$[1.0, 1.2)$	5
$[0.0, 0.2)$	43	$[1.2, 1.4)$	2

根据 5—8 月的平均形变速率图,将区域形变划分为 3 个典型的区域 A、B 和 C(图 3)。其中 A 和 C 区的形变较小,为比较稳定的区域,而 B 区的沉降形变较大,桩号 K570~K575 的路线落在该区域,基于变形结果生成变形等值线图见图 3(b)。



(a) 平均形变速率图



(b) 变形等值线图

图 3 平均形变速率图与变形等值线图

对比 A、B 区域的卫星图像(图 4)可以发现:在 A 区域主要存在大面积的山丘地貌,地形比较稳定,而 B 区域存在大量零星水坑,水含量较高,冻土易受温度影响而发生冻胀融沉现象。从形变平均速率图可以看出:A 区形变更加稳定,而 B 区在 5—8 月表现出较大的沉降形变,年平均形变速率最大达 30 cm/年。

由图3(b)可发现:除B区域桩号K575路基探测出较大的沉降变形外,其他段落的路基总体形变比较稳定,且公路路基与周围地表的形变规律有明显差异。通常,路基周围地表出现较大的沉降形变,而路基却比较稳定,这从侧面说明多年冻土区公路路基的处理效果比较明显,可以很好地抵御冻土形变的破坏。

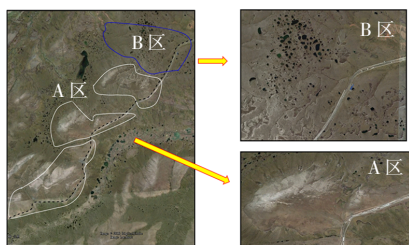


图4 A、B区地形特征对比

将形变速率乘以时间,可以得到该段时间的累积形变量。图5为路基中线、路基中线左偏100 m、路基中线右偏100 m位置所对应的5—8月的累积形变量图。

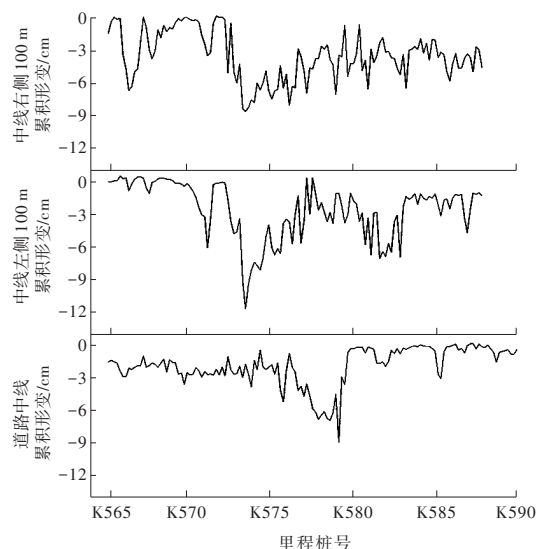


图5 纵断面累积形变图

从图5可以看出:路基中线位置仅在K575~K578处,表现出有较大的沉降形变,累积形变量最大达到9 cm左右。而相对路基中线左偏100 m、右偏100 m后,线路位置上大部分区域表现出3~6 cm的沉降变形。再次说明公路路基与周边地表的形变规律不同,公路路基更加稳定,而周围地表易受冻土形变的影响。

5 结语

多年冻土区道路路基沉降变形主要受多年冻土区地质条件、路基填土高度、填土材料、施工工艺以

及气候、水分等条件的综合影响。传统水准测量方法效率低难以获得大范围变形情况。基于星载InSAR的形变监测方法不受疆界限制,覆盖范围宽广,而且可以直接获取面状区域的形变信息,实现公路路基形变大范围筛查和公路路基形变灾害分级,确定形变灾害严重路段。公路养护部门可针对性地对灾害严重区域采取处治措施,实现冻土区公路路基的精准养护管理,有效避免盲目式的全线养护,大大节约养护成本。

但是基于星载InSAR的形变提取易受到数据质量、地形、地貌、数据处理人员经验水平等因素影响,可能会存在部分区域形变数据可靠性不高的情况。因此基于星载InSAR的形变提取更适合于大范围形变筛查,筛选出变形大的关键路段。可结合GNSS测量技术对关键路段重要工点进行连续监测。

参考文献:

- [1] 赵斌,刘望亭,杨永雄,等.客运专线路基及轨道变形监测方法的探讨[J].铁道技术监督,2008,36(2):17-20.
- [2] 赵洪勇,刘建坤,崔江余.高速铁路路基沉降监测方法的认知与评价[J].路基工程,2001(6):15-17.
- [3] 孙建宝,梁芳,沈正康,等.汶川M_s8.0地震InSAR形变观测及初步分析[J].地震地质,2008,30(3):789-795.
- [4] 韩宇飞,宋小刚,单新建,等.D-InSAR技术在长白山天池火山形变监测中的误差分析与应用[J].地球物理学报,2010,53(7):1571-1579.
- [5] 程晓,李小文,邵芸,等.南极格罗夫山地区冰川运动规律DINSAR遥感研究[J].科学通报,2006,51(17):2060-2067.
- [6] 张诗玉,李陶,夏耶.基于InSAR技术的城市地面沉降灾害监测研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(8):850-853,858.
- [7] 谢谟文,王增福,胡嫚,等.高山峡谷区D-InSAR滑坡监测数据特征分析[J].测绘通报,2012(4):18-21,40.
- [8] 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(11):2375-2383.
- [9] FAN J H, ZHAO H L, TU P F, et al. CRInSAR for landslide deformation monitoring: A case in threegorge area[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, HI, 2010: 3956-3959.
- [10] HOOPER A J. Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation[D]. Stanford, CA, USA: Stanford University, 2006.