

# 基于升降轨 SAR 数据的连续箱梁桥精细变形

魏恋欢, 王啸天, 敖萌, 李鑫  
(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 针对桥梁精细变形监测问题, 提出一种考虑由温度引起的桥梁变形(简称温度变形)的升降轨合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据融合方法. 首先, 以连续箱梁桥为研究对象, 分别使用升降轨 SAR 数据集, 基于小基线子集干涉测量法(small baseline subsets interferometric SAR, SBAS-InSAR)提取视线向(line-of-sight, LOS)变形; 然后, 利用最小二乘法构建温度变形模型, 分离周期性温度变形与长期性趋势变形; 最后, 结合桥梁结构特征, 基于时空插值和奇异值分解方法实现升降轨数据融合, 提取温度变形、纵桥向(即桥梁延伸方向)及垂直向趋势变形, 分析桥梁变形机制及变形成因. 结果表明, 该方法可提取精确的桥梁温度变形及三维变形, 为桥梁健康监测提供可靠的方法支撑.

**关键词:** 小基线子集; 连续箱梁桥; 温度变形建模; 数据融合; 三维变形

中图分类号: TP 722.6; P 228 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)03-0391-10

## Detailed Deformation of Continuous Box Girder Bridge Based on Ascending and Descending SAR Data

WEI Lian-huan, WANG Xiao-tian, AO Meng, LI Xin

(School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: AO Meng, E-mail: aomeng@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** An approach was presented for detailed deformation monitoring of bridges, by fusing ascending and descending synthetic aperture radar (SAR) data while considering deformation caused by temperature change (named as thermal deformation). Firstly, taking a continuous box girder bridge as an example, the ascending and descending SAR datasets are analyzed based on small baseline subsets interferometric SAR (SBAS-InSAR) to extract line-of-sight (LOS) deformation. Then, thermal deformation model of the bridge is established based on least squares method to separate the periodic thermal deformation and long-term trending deformation. Finally, by combining the structural characteristics of the bridge, fusion of the ascending and descending data based on space-time interpolation and singular value decomposition is conducted, to extract the thermal deformation, the vertical and longitudinal trending deformation, and the deformation mechanism and causative factors of the bridge is analyzed. The results demonstrate that the proposed approach can extract accurate thermal deformation and three-dimensional deformation of the bridge, providing reliable methodological support for bridge health monitoring.

**Key words:** small baseline subsets; continuous box girder bridge; thermal deformation modeling; data fusion; three-dimensional deformation

桥梁是当今最重要的交通基础设施之一<sup>[1]</sup>. 桥梁运营时间及环境荷载的增加, 会导致桥梁结构老化、破坏, 并产生不均匀变形现象, 这些问题

将直接影响桥梁的健康及安全性<sup>[2]</sup>. 因此, 选用一种科学、高效的技术手段监测桥梁变形, 对预防桥梁垮塌造成的公众伤亡和财产损失、确保交通

收稿日期: 2022-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42071453); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N2201020); 辽宁省地质灾害风险普查项目(2022020700179); 中欧合作龙计划五期项目(ID.58029).

作者简介: 魏恋欢(1986-), 女, 辽宁沈阳人, 东北大学副教授, 博士生导师.

基础设施安全具有重要的意义。

传统的桥梁变形监测手段主要包括精密水准仪、激光干涉仪、加速度计、全站仪、全球定位系统监测等,存在耗时耗力、经济成本高、受观测环境影响严重、各测点之间无法同步观测等不足,难以有效地开展桥梁变形监测工作<sup>[3-4]</sup>。在合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)遥感领域,时间序列合成孔径雷达干涉测量(time series interferometric SAR, TS-InSAR)是一种主动式卫星对地观测技术,可以快速获取大范围的高精度地表变形信息,凭借其周期性、低成本、全天候、全天候等优势,近年来被广泛应用于地表沉降、滑坡、火山、城市建/构筑物、交通路网等变形监测领域<sup>[5-8]</sup>。21世纪以来,TS-InSAR理论与方法不断发展,根据干涉组合方式不同,大致可分为两类:一类是基于公共主影像的方法,以永久散射体干涉测量(permanent scatterers interferometric SAR, PS-InSAR)为代表;另一类是基于多主影像策略的方法,以小基线子集干涉测量法(small baseline subsets interferometric SAR, SBAS-InSAR)为代表<sup>[9]</sup>。近10余年来,随着星载SAR数据数量及质量不断提高,将高分辨率SAR数据(如德国TerraSAR-X/TanDEM-X和意大利COSMO-SkyMed)与TS-InSAR技术相结合,能够以更高的监测点密度和变形灵敏度提取构筑物不同部位的变形信息,精度可达到毫米级,在桥梁精细变形监测领域中的应用潜力逐步显现<sup>[9-10]</sup>。

国内外学者已利用TS-InSAR技术开展了桥梁变形监测探索,但仍存在一些局限性。部分研究仅基于单轨SAR数据集提取了桥梁沿雷达卫星视线向(line-of-sight, LOS)的一维变形,没有进一步开展温度引起的桥梁变形(简称温度变形)及三维变形分析<sup>[10-15]</sup>。部分研究使用分辨率和变形灵敏度都较低的C波段和L波段SAR数据开展了桥梁变形监测,无法获取准确的温度变形和桥梁各部位精细变形参数<sup>[16-20]</sup>。还有一部分研究虽然估算并分离了桥梁线性变形和季节性变形,

但并未结合桥梁结构特征,深入研究桥梁温度变形和趋势变形的方向、大小等规律特性<sup>[21-22]</sup>。

大型桥梁属于超静定的、结构复杂的构筑物,其变形会受到季节性热胀冷缩、车辆荷载、振动等多重因素的综合影响。因此,利用TS-InSAR技术开展桥梁变形研究时,必须要融合多轨高分辨率SAR数据集,将变形参数与桥梁结构特征相结合,实现对桥梁三维变形信息的提取及分析。针对上述问题,本文提出一种顾及温度变形的升降轨SAR数据融合方法,在对升降轨SAR数据分别开展TS-InSAR处理的基础上,通过构建桥梁温度变形模型,实现温度变形与桥梁结构趋势变形的分离,并结合桥梁结构特征,分别对温度变形和趋势变形进行升降轨融合,达到提取桥梁精细三维变形的目标。基于本文提出的方法,以连续箱梁桥为例开展了桥梁三维变形研究,成功提取了桥梁的温度变形、垂直向变形及纵桥向变形,并通过对比材料的热膨胀系数,验证了结果的可靠性。

## 1 研究区及数据集

### 1.1 新立堡桥

新立堡桥位于沈阳市沈河区新立堡街南延长线上,于2012年正式投入运行,是沈阳市东部地区跨越浑河的重要交通枢纽。新立堡桥为5跨大跨径预应力混凝土变截面连续箱梁桥,总长790 m。桥梁整体结构如图1所示。其中,主桥长度为370 m,主桥的5跨跨径依次为47, 80, 116(主跨), 80和47 m。主桥采用挂篮悬臂浇筑施工工艺,主跨东南侧支座为固定支座(即9号桥墩处),其余支座为活动支座。整座大桥共有36个桥墩支撑桥面,桥梁桥面宽40 m,由两条宽5 m的人、非机动车混行道和30 m的双向机动车道组成。两侧引桥均为长210 m的预应力混凝土连续箱梁桥,各采用了3×35 m=105 m的两联跨径。主桥与引桥相连处设置了伸缩缝。连续箱梁桥结构体系以其强抗震能力、高稳定性、行车平顺、较少的伸缩缝、较好的结构刚度等优势应用广泛。

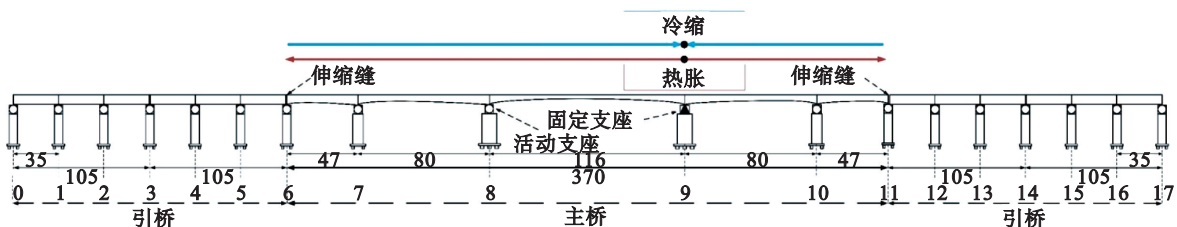


图1 新立堡桥结构图(单位:m)

Fig. 1 Structural drawing of the Xinlipu bridge (unit:m)

### 1.2 数据集

本文收集了2015~2017年间获取的30个升轨TerraSAR-X影像和29个降轨COSMO-SkyMed影像.表1为两组数据集的详细参数,图2为其覆盖范围图.为了分析桥梁变形与温度变化之间的

关系,本文收集了沈阳市2015至2017年间的日平均气温数据,其中最高日平均气温为25.1℃,最低日平均气温为-16.4℃,最大温差为41.5℃.本文使用的气温数据来自中国地面气候资料数据集(V3.0).

表1 SAR数据集详细参数  
Table 1 Detailed parameters of the SAR datasets

传感器名称	轨道方向	航向角/(°)	成像模式	分辨率/m	入射角/(°)	影像数量	覆盖时段
TerraSAR-X	升轨	~348.7	条带模式	3×3	~23.98	30	20150825—20170606
COSMO-SkyMed	降轨	~11.0	条带模式	3×3	~23.5	29	20150327—20170402

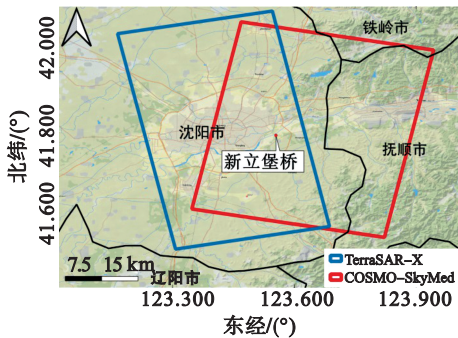


图2 TerraSAR-X和COSMO-SkyMed数据集覆盖范围  
Fig. 2 Spatial coverage of the TerraSAR-X and COSMO-SkyMed datasets

## 2 研究方法

本文提出一种顾及温度变形的升降轨时序SAR融合桥梁变形监测方法,主要流程如图3所示,包括3个关键步骤.首先,利用升降轨高分辨率时序SAR数据,基于SBAS-InSAR技术获取桥梁LOS向的变形参数.其次,使用最小二乘法线性拟合方法构建桥梁温度变形模型,提取连续箱梁桥结构变形点的温度影响因子,讨论不同结构点位由温度引起的桥梁变形机制,实现桥梁温度变形和结构趋势变形的分离.最后,结合连续箱梁桥结构特征,基于时空插值及奇异值分解方法,分别对温度变形及结构趋势变形进行升降轨融合,解算桥梁纵桥向(即桥梁延伸方向)、垂直向精细变形,并对桥梁变形特征进行分析解译.

### 2.1 SBAS-InSAR方法

2002年Berardino等<sup>[9]</sup>提出了SBAS-InSAR方法,通过设置较短的时空基线阈值形成多个小基线子集,再采用少量长时空基线差分干涉图实现各子集的连接.该方法首先根据幅度和相位统计特性提取分布式目标像元,进行地形误差校正、基线精化、三维相位解缠.然后,基于最小范数准则,利用奇异值分解(singular value decomposition,

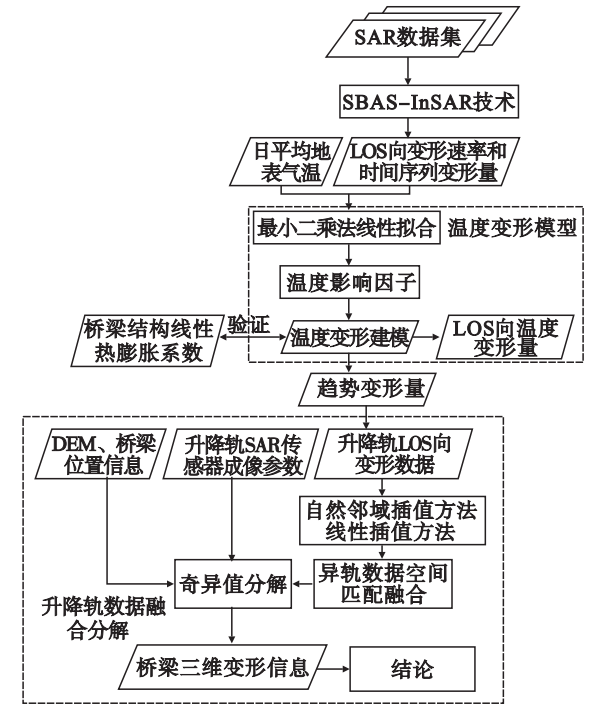


图3 研究方法基本流程图  
Fig. 3 Flow chart of the research method

SVD)方法获得包含大气和变形信号的时序变形信息.最后,采用时空滤波方法消除大气效应的影响,提取目标像元的LOS向变形信息.相比PS-InSAR技术,SBAS-InSAR技术可以充分利用所有时空基线较短的高质量差分干涉图,其时间采样率和空间点密度都得以增加,能够更好地克服地形残差和时空去相干效应的影响,在桥梁精细变形分析中的潜力更大<sup>[9,23]</sup>.因此,本文选取了相对更稳健的SBAS-InSAR方法进行桥梁的变形参数提取.

### 2.2 桥梁温度变形模型构建

温度的变化会导致连续箱梁桥结构出现温度作用,其中一种形式是均匀温度作用,它会导致桥梁结构出现沿纵桥向均匀分布的位移,但不会引起结构内力.另外一种形式是梯度温度作

用,不均匀的太阳辐射使桥梁沿垂直向、横桥向出现非线性的温度梯度,并产生相应的结构次应力,影响桥梁的结构稳定性.相比均匀温度作用,梯度温度作用在量级大小、方向上对桥梁变形影响都较小<sup>[24]</sup>.同时,由于时序 SAR 数据的时空分辨率有限(时间分辨率为数天、空间分辨率为 3 m),难以准确获取箱梁的梯度温度作用.因此,本文在进行桥梁温度变形建模时,仅需考虑桥梁均匀温度作用的影响.考虑到 SAR 数据的时间分辨率,本文的温度变形模型构建的是桥梁时序变形量与 SAR 成像时刻桥梁结构温度之间的关系模型.依据公路桥涵设计通用规范(JTG D60—2015)中的规定,新立堡桥的混凝土桥面板钢桥结构温度与气温之间的转换关系为

$$t_e = \begin{cases} 28.23 + \frac{t-20}{1.44}, & 20^\circ\text{C} < t < 45^\circ\text{C}; \\ t, & -2^\circ\text{C} < t \leq 20^\circ\text{C}; \\ -0.12 + \frac{t}{1.21}, & -50^\circ\text{C} < t \leq -2^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t_e$ 为桥梁的有效结构温度( $^\circ\text{C}$ ); $t$ 为气温,这里用日平均气温代替.

结合 SAR 数据采集日期的桥梁结构温度,本文使用最小二乘法进行线性回归分析,提取由温度变化引起的桥梁 LOS 向变形.随温度变化的线性变形模型可以表示为

$$\Delta d = k(t_{e,i} - t_{e,1}) + b, \quad (2)$$

简写为

$$y = kx + b. \quad (3)$$

其中,

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2 - \frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N x_i)^2}, \quad (4)$$

$$b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i - k \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (5)$$

式中: $t_{e,i}$ 和 $t_{e,1}$ 分别为卫星第 $i$ 次和第 1 次观测时的桥梁结构温度; $\Delta d$ 为两次观测间隔内由温度引起的结构变形量; $k$ 为某监测点的 LOS 向温度影响因子,表示温度每变化 $1^\circ\text{C}$ 时所引起的桥梁结构变形量; $b$ 为常数; $x_i$ 为首次观测至第 $i$ 次观测的时间间隔内桥梁的结构温度变化, $y_i$ 为此段时间间隔内监测到的桥梁变形.基于这一模型,假设不发生温度变形(即 $\Delta d=0$ ),已知第一个影像采集时的结构温度 $t_{e,1}$ ,可以计算出桥梁结构不发生变形时( $a$ 时刻)的温度 $t_{e,a}$ :

$$t_{e,a} = \frac{-b}{k} + t_{e,1}. \quad (6)$$

线性热膨胀系数是可以量化固体材料热膨胀程度的物理量,指在温度每升高 $1^\circ\text{C}$ 时单位长度物体的长度相对变化量,单位为 $^\circ\text{C}^{-1}$ .基于桥梁的温度变形,可根据如下公式计算桥梁结构的线性热膨胀系数 $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Delta d}{L(t_{e,i} - t_{e,1})}. \quad (7)$$

其中, $L$ 为原始长度.将用温度变形估计出的线性热膨胀系数与桥梁结构材料的热膨胀系数进行对比,可以验证温度变形估计结果的可靠性.

在 TS-InSAR 提取的桥梁变形监测结果中,每个监测点的总变形量都是由长期性的桥梁结构趋势变形和周期性的温度变形共同组成,将两种变形同时引入模型可得

$$d = k(t_{e,i} - t_{e,1}) + b + d_0. \quad (8)$$

其中, $d_0$ 为桥梁结构的长期性趋势变形.桥梁的总变形量已通过 SBAS-InSAR 解算出来,计算出桥梁的温度变形后,将其从总变形量中分离,即可得到桥梁结构的 LOS 向趋势变形.

### 2.3 桥梁三维变形提取

新立堡桥为连续箱梁桥,根据桥梁结构特征,其三维变形主要包括纵桥向、横桥向及垂直向变形三部分.其中,横桥向由于受到桥梁支座的约束作用,一般变形较小,可以忽略其影响.已有研究证实,温度引起的变形传播方向高度依赖于桥梁结构的几何形状,通常沿桥梁结构几何形状中最长边的方向传播,不同形状结构温度变形传播方向差异较大<sup>[18,20,22]</sup>.新立堡桥的 SAR 影像观测几何如图 4 所示,温度引起的变形主要沿纵桥向传播.剔除温度变形后的长期性结构趋势变形主要包括垂直向变形和纵桥向变形.因此,本文重点研究基于升降轨融合的桥梁纵桥向温度变形、纵桥向趋势变形及垂直向趋势变形提取方法.



图 4 新立堡桥的 SAR 成像几何

Fig. 4 SAR imaging geometry of the Xinlipu bridge

2.3.1 基于升降轨融合的纵桥向温度变形提取  
基于 SBAS-InSAR 技术获取的温度变形是

沿LOS向的,因此需要根据SAR成像几何及桥梁结构特征,将其转换为纵桥向温度变形.本文使用的 TerraSAR-X 数据为升轨数据, COSMO-SkyMed 数据为降轨数据,两组数据的LOS向成像角度差异很大(如表1所示).其中,升轨 TerraSAR-X 数据的LOS向温度变形与纵桥向变形之间的关系如下:

$$d_{\text{tsx-los}}^{\text{tem}} = d_{\text{tsx-lon}}^{\text{tem}} \cos(\pi/2 - \beta + (2\pi - \alpha_{\text{tsx}})) \cos(\pi/2 - \theta_{\text{tsx}}). \quad (9)$$

降轨 COSMO-SkyMed 的LOS向温度变形与纵桥向温度变形之间的关系如下:

$$d_{\text{csk-los}}^{\text{tem}} = d_{\text{csk-lon}}^{\text{tem}} \cos(\pi/2 + \beta + \alpha_{\text{csk}}) \cos(\pi/2 - \theta_{\text{csk}}). \quad (10)$$

式中:  $d_{\text{tsx-los}}^{\text{tem}}$  和  $d_{\text{csk-los}}^{\text{tem}}$  分别表示升轨和降轨数据的LOS向温度变形;  $d_{\text{tsx-lon}}^{\text{tem}}$  和  $d_{\text{csk-lon}}^{\text{tem}}$  分别表示升轨和降轨数据提取的纵桥向温度变形;  $\beta$  为桥梁延伸方向与正北方向的夹角;  $\alpha_{\text{tsx}}$  和  $\alpha_{\text{csk}}$  分别为 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 卫星的飞行方位角;  $\theta_{\text{tsx}}$  和  $\theta_{\text{csk}}$  分别为 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 卫星的入射角.

通过上述升降轨融合方法,可提取精确的纵桥向温度变形.本文将建模得出的温度变形以两种方式进行验证:①结合桥梁结构力学,定性验证温度模型是否符合实际情况;②定量验证温度模型所估计出的桥梁结构点的线性热膨胀系数与材料的物理属性是否相符.

### 2.3.2 基于升降轨融合的桥梁结构趋势变形提取

考虑到SAR传感器的侧视成像特征,剔除温度变形后的LOS向变形量  $d_{\text{los}}$  可视为桥梁结构纵桥向变形和垂直向变形在LOS向投影的矢量和,如图4所示.为了根据升、降轨LOS向结构变形提取纵桥向及垂直向结构变形,需利用公共时段的变形监测数据,进行升、降轨融合.考虑到升降轨数据的视角差异,两组变形监测点大多来源于桥梁结构的不同部位,难以通过查找同名点目标的方式进行融合<sup>[25]</sup>.针对该问题,本文采用了自然邻域插值法将剔除温度后的两组LOS向结构变形在空间域插值到统一格网上.自然邻域法通过找到距查询点最近的输入样本子集,根据不同区域的大小按比例对样本子集用不同的权重进行插值.这种插值方法具有一定的局部性优势,只把查询点附近的样本子集纳入了赋权范围,将查询点的插值结果控制在样本区间内,一般不会生成超出原有样本区间的结果.此外,由于升降轨SAR数据的采集时间不同,两组变形监测结果在时间域也不统一,需要对公共时段内的变形数

据进行时间域插值.本文以 TerraSAR-X 数据集的时间为基准,使用线性插值方法对 COSMO-SkyMed 数据提取的LOS向结构变形进行了时间域插值.

根据图4所示的成像几何,纵桥向和垂直向变形与两组LOS向变形之间的转换关系可表示为

$$d_{\text{los}} = \begin{bmatrix} d_{\text{los}}^{\text{tsx}} \\ d_{\text{los}}^{\text{csk}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{tsx}} & \cos(\pi/2 - \beta + (2\pi - \alpha_{\text{tsx}})) \cos(\pi/2 - \theta_{\text{tsx}}) \\ \cos \theta_{\text{csk}} & \cos(\pi/2 + \beta + \alpha_{\text{csk}}) \cos(\pi/2 - \theta_{\text{csk}}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{\text{ver}} \\ d_{\text{lon}} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

式中:  $d_{\text{los}}^{\text{tsx}}$  和  $d_{\text{los}}^{\text{csk}}$  分别代表 TerraSAR-X 和 COSMO-SkyMed 的LOS向结构变形;  $d_{\text{ver}}$  和  $d_{\text{lon}}$  分别代表桥梁结构的垂直向变形和纵桥向变形.

为了简化公式,引入  $G$ ,

$$G = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{tsx}} & \cos(\pi/2 - \beta + (2\pi - \alpha_{\text{tsx}})) \cos(\pi/2 - \theta_{\text{tsx}}) \\ \cos \theta_{\text{csk}} & \cos(\pi/2 + \beta + \alpha_{\text{csk}}) \cos(\pi/2 - \theta_{\text{csk}}) \end{bmatrix}. \quad (12)$$

将式(12)代入式(11),可简写为

$$\begin{bmatrix} d_{\text{los}}^{\text{tsx}} \\ d_{\text{los}}^{\text{csk}} \end{bmatrix} = G \begin{bmatrix} d_{\text{ver}} \\ d_{\text{lon}} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

本文使用SVD方法来求解桥梁结构纵桥向趋势变形和垂直向趋势变形.奇异值分解作为一种重要的矩阵分解方法,能够在很大程度上抑制噪声,解决线性求逆问题.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 新立堡桥LOS向变形速率

本文基于SBAS-InSAR方法,分别处理了30个升轨 TerraSAR-X 影像和29个降轨 COSMO-SkyMed 影像,获取了新立堡桥2015年至2017年间的变形速率及时序变形量.两组数据提取的LOS向变形速率如图5所示,其中负值表示目标朝远离雷达卫星的方向运动,正值表示目标朝靠近雷达卫星的方向运动.对比两组监测结果可知,二者存在一定相似性.从监测点的分布情况来看,桥墩、边跨处提取的监测点较密集,主跨、活动支座和伸缩缝周围提取的监测点较少.从变形速率的量级来看,两组数据得到的大多数桥梁监测点的平均变形速率在-10至10 mm/a之间,引桥及固定支座附近的桥面呈现较高的稳定性,主桥的主跨跨中、主桥和引桥衔接处(即伸缩缝附近)的变形速率相对较大.得益于 TerraSAR-X 数据更高的信噪比和相干性, TerraSAR-X 结果

中监测点的数量及密度都略高于 COSMO-SkyMed 结果. 然而, 仅依靠桥梁的 LOS 向平均变

形速率结果, 难以准确解译桥梁的具体变形过程及变形状态.

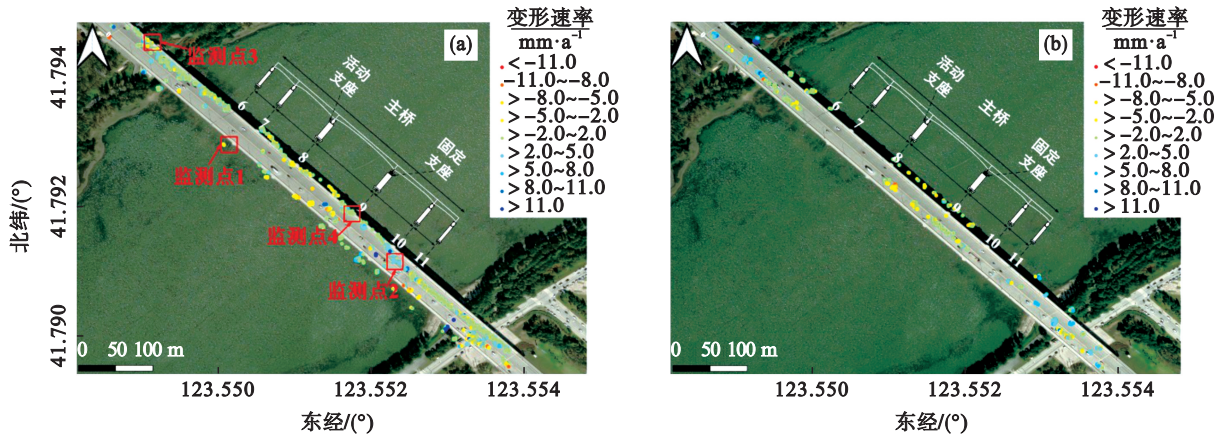


图5 新立堡桥 LOS 向变形速率图

Fig. 5 LOS deformation velocities of the Xinlipu bridge

(a)—升轨 TerraSAR-X 结果; (b)—降轨 COSMO-SkyMed 结果.

### 3.2 桥梁温度变形建模

为了分析连续箱梁桥结构不同部位监测点的时序变形与温度之间的关系, 在图 5a 中选择 4 个关键监测点, 其中, 监测点 1, 2 位于主桥桥面两端的伸缩缝附近; 监测点 3 位于同样是连续箱梁桥, 但有更多桥墩支撑的引桥上; 监测点 4 位于新立堡桥 9 号桥墩附近, 即固定支座附近. 本文绘制

了图 5a 中 4 个关键监测点的时序变形曲线, 如图 6 所示. 其中, 蓝色曲线表示 TerraSAR-X 的 LOS 向时序变形量, 红色曲线表示数据采集时的温度. 在进行桥梁关键点选取时, 本文综合考虑了桥梁结构特征及监测点目标的分布情况. 首先, 基于监测点的空间分布情况和相干性特征, 选取平均相干性和点密度都较高的监测点作为关键

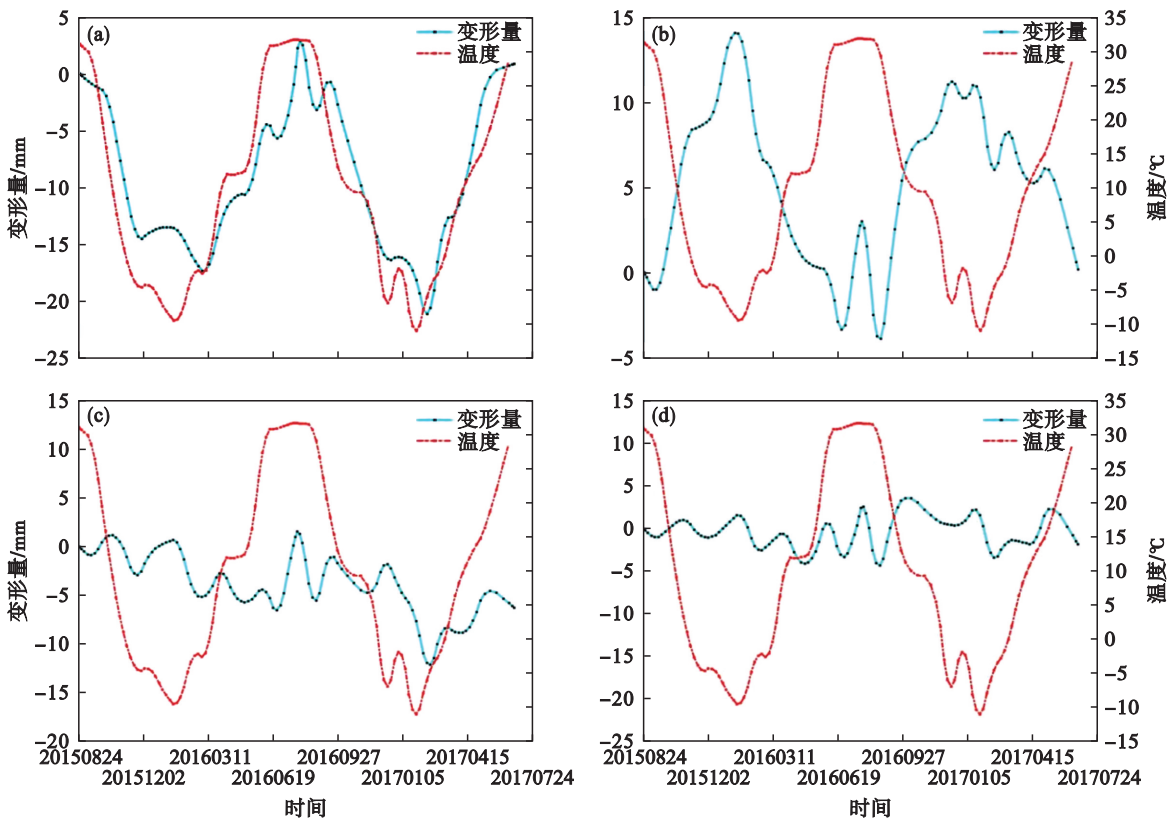


图6 新立堡桥关键点变形时间序列和温度变化曲线

Fig. 6 Time-series displacements and temperature change of several key points on the Xinlipu bridge

(a)—监测点 1; (b)—监测点 2; (c)—监测点 3; (d)—监测点 4.

点.然后,基于连续箱梁桥结构特征,选择结构变形较大和主要承重构件所在位置作为关键点.这里选取了桥梁固定支座处、连续梁两端伸缩缝附近处.最后,为了对比主桥与引桥的变形差异,选择了一个位于引桥上的监测点.本文根据桥梁监测点目标时序变形与温度之间的相关性不同,将它们分为正相关、负相关与不相关三类.

图 6a 的时序变形与温度变化表现为明显的正相关特征,这类点目标的时序变形由温度变形主导,表现出明显的周期性变化特征,观测周期内最大相对变形达到 25 mm 左右,但从长时间序列上看,这类点目标的累计变形量不大.图 6b 的时序变形也是由温度变形主导,呈周期性变化且长期累计变形不大.与图 6a 不同的是,时序变形与温度变化表现为明显的负相关特征.桥梁结构同时存在时序变形与温度正相关和负相关的点,主要是由于新立堡桥为连续箱梁桥(如图 1 所示),主桥主跨的一侧为固定支座(9号桥墩处),固定支座两侧的桥面以固定支座为中心向相反方向运动.当温度升高时,桥梁结构受热后以固定支座为基准发生膨胀延长,且由温度引起的变形量随着与固定支座之间的距离增加而增加.

第三类点目标的时序变形包括以线性变形主导和随机振动两种情况,都与温度不相关.图 6c 所示的是线性变形主导的点目标,其时序变形与温度变化之间未呈现明显的相关性及周期性.该类点目标一般位于桥墩附近,由于受到桥墩的约束作用,其周期性的温度变形不明显,但存在较小的长期线性变形.该类点目标的长期变形与桥墩基础持力层的缓慢变形相关,也受到周围地

表缓慢沉降的影响.图 6d 所示的点目标主要位于主桥固定支座附近,其时间序列变形没有明显的线性趋势或周期性趋势,主要表现为在零点位置附近小幅随机波动.产生小幅随机波动有两个原因:一方面是由于这类点目标受到瞬时交通荷载、风荷载、水流等随机环境效应影响;另一方面是由于时序 InSAR 结果中可能存在一定的残余噪声所导致的.但从其他监测点目标的时序变形规律及后续分析结果来看,残余噪声对桥梁变形监测结果的影响较小.

在建立桥梁点目标温度变形模型之后,本文进一步提取了桥梁监测点的 LOS 向温度影响因子(如图 7 所示),其中正值表明该点的变形与温度变化呈正相关性,时序变形规律与图 6a 相似;负值表明该点的变形与温度变化呈负相关性,时序变形规律与图 6b 相似;温度影响因子数值越接近零,表示时序变形与温度的相关性较小,时序变形规律与图 6c 或图 6d 相似.从图 7a 可知,桥梁不同部位对温度的敏感程度差异较大.主桥的温度变形从主跨东南侧的固定支座处向两端逐渐增大,且固定支座两端的温度变形速率符号相反.引桥的温度变形量级较小,这是由于引桥的桥墩密度更高且距离河岸更近,受到的约束和支撑更多.主桥与引桥的温度变形呈现相互独立性,主要是由于二者衔接处设置了伸缩缝结构,其具有适应因环境温度升降、河滩地基不均匀沉降、结构混凝土收缩徐变以及其他外力影响的作用.此外,由于升轨和降轨传感器成像视角的差异,两组结果的 LOS 向不同,故 TerraSAR-X 与 COSMO-SkyMed 数据集提取的 LOS 向温度变形速率结果不完全一致.

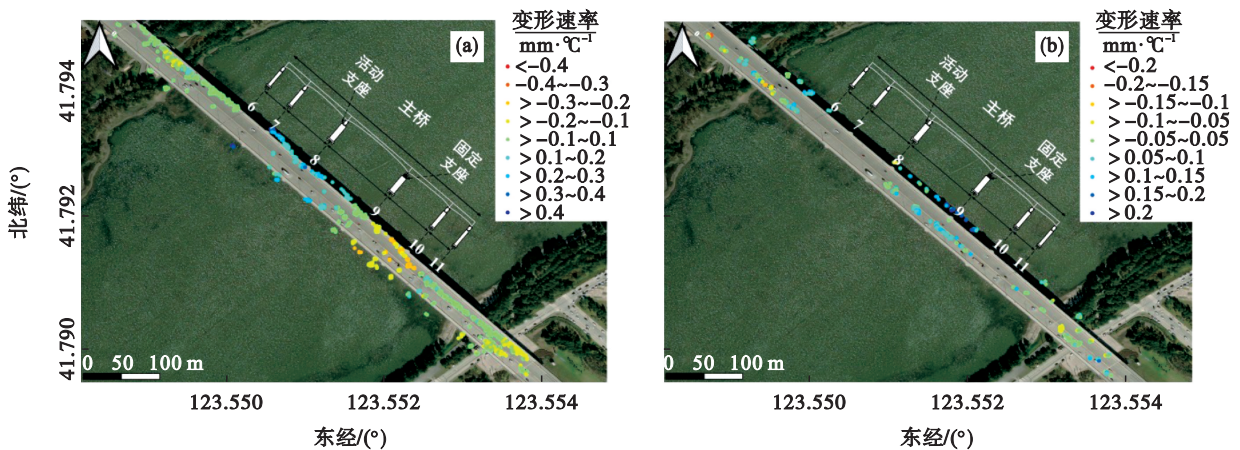


图 7 新立堡桥 LOS 向温度影响因子

Fig. 7 Temperature influence factors in LOS direction of the Xinlipu bridge  
(a)—TerraSAR-X 结果; (b)—COSMO-SkyMed 结果.

本文将温度变形从 LOS 向总体变形中去除后,获得了桥梁的 LOS 向结构趋势变形,如图 8 所示.主桥的主跨跨中部位(8 号和 9 号桥墩之间)有明显的结构趋势变形,这是由于主跨两端桥墩间隔达 116 m,跨中部位缺少桥墩支撑,发生

了明显的下挠变形.去除温度变形后,主桥的变形量明显减小,而两侧引桥的变形量变化不大,表明主桥同时存在周期性的温度变形和长期性的结构变形.引桥由于受到更多桥墩支撑约束,温度变形和结构变形都较小.

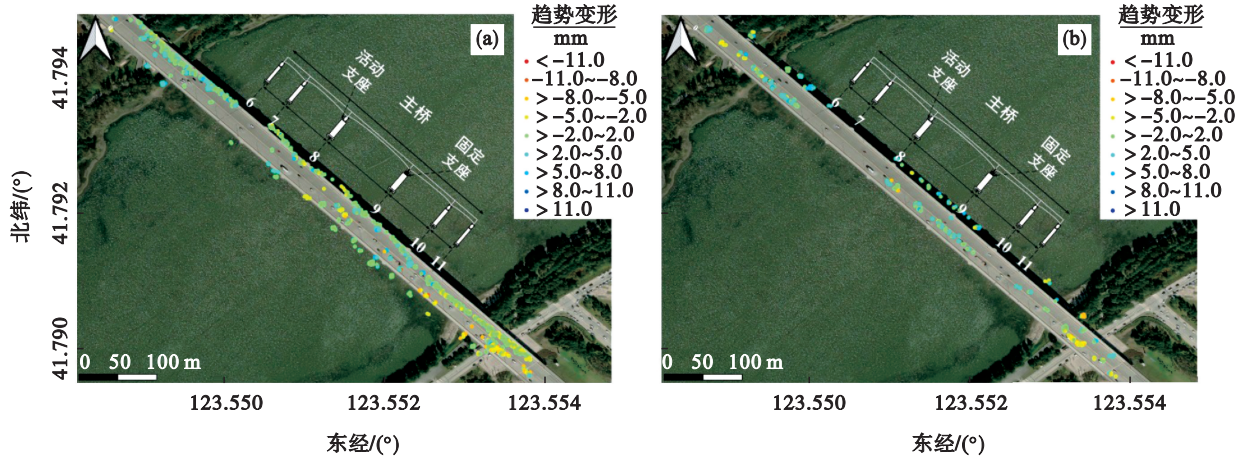


图 8 去除温度变形后新立堡桥 LOS 向趋势变形

Fig. 8 LOS trending deformation of the Xinlipu bridge after removal of thermal deformation  
(a)—TerraSAR-X LOS 向趋势变形; (b)—COSMO-SkyMed LOS 向趋势变形.

### 3.3 桥梁三维精细变形提取

本文基于 SAR 传感器成像几何参数和新立堡桥的结构信息,进行升降轨融合后得出纵桥向温度变形速率在 $-1.6$ 到 $1.6 \text{ mm}/^\circ\text{C}$ 之间分布,如图 9 所示.主桥的主跨东南侧固定支座附近的纵桥向温度变形速率接近于 0,且以固定支座为分界,一侧呈红色、一侧呈蓝色,离固定支座越远处,温度变形速率绝对值越大.在桥梁西北部主桥和引桥交会处(距离固定支座 196 m 的 6 号桥墩处),温度变形速率达到最大值,超过了 $1.6 \text{ mm}/^\circ\text{C}$ ,依据式(7)估算得出这段桥梁结构的材料线性热膨胀系数为 $8.16 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ;在桥梁的东南部主桥和引桥交会处(距离固定支座 127 m

的 11 号桥墩处),温度变形速率达到最低值,超过了 $-1.2 \text{ mm}/^\circ\text{C}$ ,依据式(7)估算得出此段桥梁结构的材料线性热膨胀系数为 $9.45 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ .依据两侧的温度变形参数提取的桥梁结构线性热膨胀系数较接近,均在混凝土结构材料物理属性的合理范围内( $8 \times 10^{-6} \sim 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )<sup>[11]</sup>,验证了本文提取的温度变形结果的可靠性.

温度变形结果表明,连续箱梁桥固定支座附近的桥面结构由于受到约束作用,几乎不会发生明显的温度变形;主桥和引桥间的伸缩缝结构对桥面温度变形的传播有较好的适应作用,为温度热应力导致的桥面纵桥向变形提供了一定空间.因此,新立堡桥主桥的温度变形特征是以固定支座为原点,温度变形速率沿桥面延伸方向向相反两侧不断增大,直至伸缩缝位置终止.

依据本文提出的方法,将去除温度变形后的升、降轨 LOS 向趋势变形进行融合分解,得到了新立堡桥的垂直向、纵桥向变形场,结果如图 10 所示.垂直向变形场结果以向上为正,纵桥向变形场结果以朝东南方向(即图中右下方)为正.

由图 10a 的垂直向变形场结果可知,在时间跨度为 20 个月的监测时段内,主桥中间三跨的跨中区域(即 7 号、8 号、9 号、10 号桥墩间)均发生了 5 mm 左右的下挠变形,其中位于 8 号和 9 号桥墩之间的主跨跨中处下挠现象最明显.资料显示,主跨的跨度长达 116 m,两个次跨的跨度为 80 m,

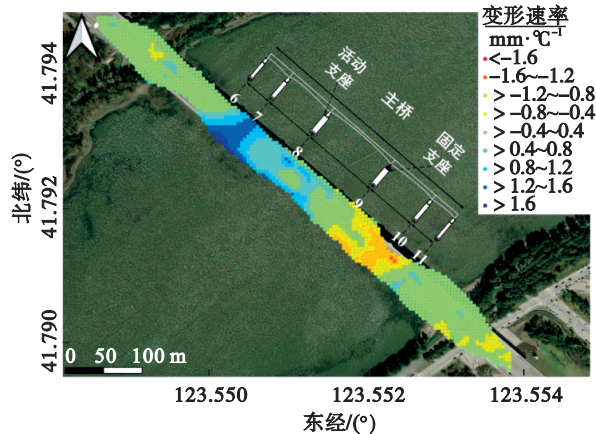


图 9 新立堡桥纵桥向温度变形场

Fig. 9 Longitudinal thermal deformation field of Xinlipu bridge

较长的桥面缺少有效的桥墩支撑,更加容易产生下挠变形.研究表明,下挠产生的原因较多,有混凝土收缩徐变、预应力损失、施工质量问题、荷载(包括恒载、活载等)长期效应等.在传统混凝土徐变分析中,通常只考虑了恒载作用,而对汽车活载基本不考虑.但随着桥梁运营时间不断增长,交通荷载对大跨径桥梁的长期徐变影响也较大,且随着运输需求的提高,车辆超载现象逐渐增多,其对桥梁跨中挠度的影响也较大.当桥梁出现过度下挠时,可能会导致桥梁的强度和稳定性受到影响,甚至桥梁结构受损,增加桥梁发生事故的风险.新立堡桥建成于2012年,本文监测时段为2015—2017年,即于建成后3~5年开展监

测.依据《城市桥梁检测与评定技术规范》<sup>[26]</sup> 5.4节中表5.4.1-1挠度限制规定:钢筋混凝土与预应力混凝土桥的梁桥主梁跨中挠度限制为 $L/600$ ( $L$ 为计算跨径),计算规定所限制的新立堡桥主跨最大竖向挠度为19.3 cm,本文在将近两年的观测时长内所监测获取的新立堡桥垂直向变形量在规范的允许范围内.由图10b可知,在8号、9号桥墩间主跨的近9号桥墩侧西北方向的主跨桥面发生了向西北方向的10 mm左右的位移,7号和8号桥墩间近7号桥墩侧的次跨桥面出现了15 mm左右的位移.桥梁纵桥向变形场中的同一位置也发生了垂直向变形,表明桥梁垂直向和纵桥向变形场的变形特征相互关联.

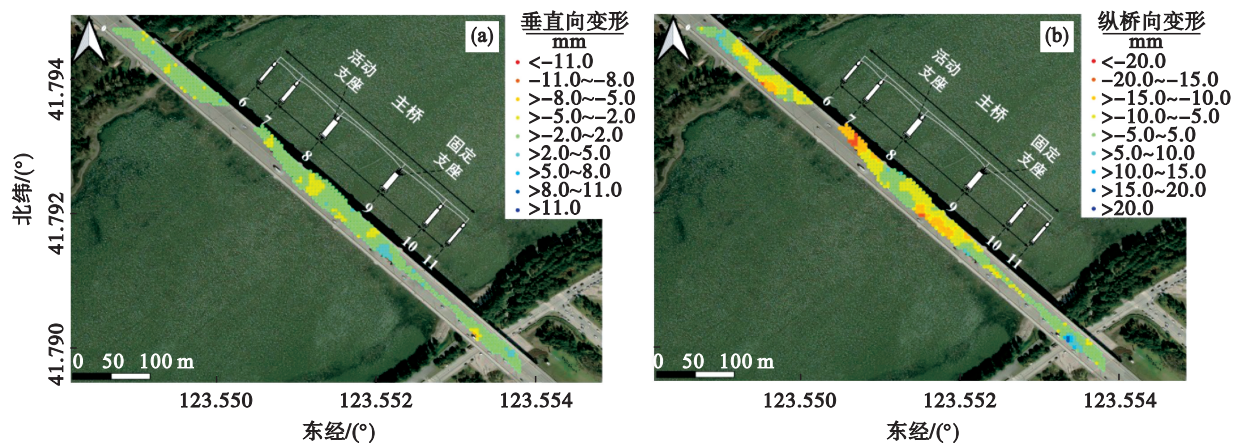


图10 新立堡桥垂直向和纵桥向累计变形量

Fig. 10 Accumulative deformation of the Xinlipu bridge in vertical direction and longitudinal direction  
(a)—垂直向; (b)—纵桥向.

## 4 结 论

1) 利用最小二乘法构建桥梁温度变形模型、提取桥梁监测点的温度影响因子,可以实现桥梁温度变形与结构趋势变形分离,获取更加精确的时序变形参数.

2) 连续箱梁桥的变形与其结构特征紧密相关,同时受到温度变形及长期性结构趋势变形的影响,主桥的温度变形与引桥相比更为明显.伸缩缝结构对桥面温度变形的传播有较好的适应作用,为温度热应力导致的桥面纵桥向变形提供了一定空间.

3) 利用升降轨时序SAR监测数据融合方法,可以获取桥梁垂直向、纵桥向精细变形信息,弥补了单一轨道时序InSAR监测的不足.未来的研究可以采用更长时间序列、更多轨道的数据,结合桥梁结构力学开展有限元建模分析,为桥梁健康状况评估提供新的方法支撑.

## 参考文献:

- [1] 周婕,邱军,许辉,等.国内桥梁运营阶段坍塌事故案例分析[J].市政设施管理,2021(1):55-58.  
(Zhou Jie, Qiu Jun, Xu Hui, et al. Analysis of collapse accidents in domestic bridge operation stage [J]. *Management of Municipal Facilities*, 2021(1):55-58.)
- [2] 李文云,田龙飞.变形监测技术在桥梁监测中的应用[J].工程技术研究,2019,4(13):67-68.  
(Li Wen-yun, Tian Long-fei. Application of deformation monitoring technology in bridge monitoring [J]. *Engineering and Technology Research*, 2019, 4(13):67-68.)
- [3] La H M, Lim R S, Basily B B, et al. Mechatronic systems design for an autonomous robotic system for high-efficiency bridge deck inspection and evaluation [J]. *IEEE-ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(6):1655-1664.
- [4] Pelagia G, Maria M. Application of classical land surveying measurement methods for determining the vertical displacement of railway bridges [J]. *Civil and Environmental Engineering Reports*, 2017, 27(4):169-183.
- [5] 廖明生,王茹,杨梦诗,等.城市目标动态监测中的时序InSAR分析方法及应用[J].雷达学报,2020,9(3):409-424.  
(Liao Ming-sheng, Wang Ru, Yang Meng-shi, et al. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban

- dynamic monitoring [J]. *Journal of Radars*, 2020, 9 (3) : 409-424.)
- [ 6 ] Hanssen R F. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, 6: 253-260.
- [ 7 ] Castellazzi P, Garfias J, Martel R, et al. InSAR to support sustainable urbanization over compacting aquifers: the case of Toluca Valley, Mexico [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, 63: 33-44.
- [ 8 ] Chang L, Hanssen R F. Detection of cavity migration and sinkhole risk using radar interferometric time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 147(5) : 56-64.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, et al. The thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5) : 864-868.
- [ 11 ] Fornaro G, Reale D, Verde S. Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4) : 677-681.
- [ 12 ] Qin X Q, Zhang L, Yang M S, et al. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 216(8) : 71-90.
- [ 13 ] Wang R J, Zhang J M, Liu X L. A most-unfavorable-condition method for bridge-damage detection and analysis using PSP-InSAR [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(1) : 1-19.
- [ 14 ] Lanari R, Reale D, Bonano M, et al. Comment on "pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: the Morandi bridge, Genoa, Italy" [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12 (24) : 1-16.
- [ 15 ] 朱茂, 沈体雁, 吕凤华, 等. 青岛胶州湾跨海大桥 InSAR 形变数据分解和信息提取 [J]. *遥感学报*, 2020, 24(7) : 883-893.  
(Zhu Mao, Shen Ti-yan, Lyu Feng-hua, et al. InSAR deformation data decomposition and information analysis of Jiaozhou bay bridge, Qingdao [J]. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 2020, 24(7) : 883-893.)
- [ 16 ] Cusson D, Rossi C, Ozkan I F. Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(1) : 189-204.
- [ 17 ] Xiong S T, Wang C S, Qin X Q, et al. Time-series analysis on persistent scatter - interferometric synthetic aperture radar (PS-InSAR) derived displacements of the Hong Kong - Zhuhai - Macao bridge (HZMB) from Sentinel-1A observations [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4) : 1-18.
- [ 18 ] Markogiannaki O, Chen F, Parcharidis I, et al. Monitoring of a landmark bridge using SAR interferometry coupled with engineering data and forensics [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2022, 43(1) : 95-119.
- [ 19 ] Crosetto M, Monserrat O, Iglesias R, et al. Persistent scatterer interferometry: potential, limits and initial C-and X-band comparison [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2010, 76(9) : 1061-1069.
- [ 20 ] Huang Q H, Monserrat O, Crosetto M, et al. Displacement monitoring and health evaluation of two bridges using Sentinel-1 SAR images [J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(11) : 1-18.
- [ 21 ] Lazecky M, Hlavacova I, Bakon M, et al. Bridge displacement 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.
- [ 22 ] Selvakumaran S, Rossi C, Marinoni A, et al. Combined InSAR and terrestrial structural monitoring of bridges [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(10) : 7141-7153.
- [ 23 ] 魏恋欢, 封秋月, 毛亚纯, 等. 基于多轨道 SBAS 方法的露天矿高陡边坡形变监测 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(10) : 1445-1451.  
(Wei Lian-huan, Feng Qiu-yue, Mao Ya-chun, et al. Deformation monitoring of high steep slope in open-pit mine with multi-orbit SBAS [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2020, 41(10) : 1445-1451.)
- [ 24 ] 中交公路规划设计院. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015: 63-65.  
(Ministry of Transport of China - Highway Planning and Design Institute. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015: 63-65.)
- [ 25 ] 敖萌, 张路, 廖明生, 等. 基于方差分量估计的多源 InSAR 数据自适应融合形变测量 [J]. *地球物理学报*, 2020, 63 (8) : 2901-2911.  
(Ao Meng, Zhang Lu, Liao Ming-sheng, et al. Deformation monitoring with adaptive integration of multi-source InSAR data based on variance component estimation [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 2020, 63 (8) : 2901-2911.)
- [ 26 ] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市桥梁检测与评定技术规范: CJJ/T 233—2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for test and evaluation of city bridges: CJJ/T 233—2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.)