

学校代号 10532
分类号 TU446.3

学 号 S200100143
密 级 公开



湖南大学
HUNAN UNIVERSITY

硕士学位论文

基于合成孔径雷达干涉测量的大跨桥梁长期变形监测研究

学位申请人姓名 危俊杰
培 养 单 位 土木工程学院
导师姓名及职称 周云教授
学 科 专 业 土木工程
研 究 方 向 结构健康监测
论文提交日期 2023年5月18日

学校代号：10532

学 号：S200100143

密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

基于合成孔径雷达干涉测量的大跨桥梁长期变形监测研究

国家自然科学基金（52278306）

湖南省重点研发计划（2022SK2096）

湖南省交通运输厅科技进步与创新项目（201912）

学位申请人姓名：危俊杰

导师姓名及职称：周云教授

培 养 单 位：土木工程学院

专 业 名 称：土木工程

论文提交日期：2023年5月18日

论文答辩日期：2023年5月20日

答辩委员会主席：易伟建教授

**Research on long-term deformation monitoring of long-span
bridges based on synthetic aperture radar interferometry**

by

WEI Junjie

B.E. (China University of Mining and Technology)2020

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor ZHOU Yun

May, 2023

湖南大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密，在____年解密后适用本授权书。
- 2、不保密.

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘 要

近年来,我国的桥梁规模和增速都在逐年上涨,现有桥梁总数已经逾越百万座以上,是名副其实的桥梁建设大国。与此同时,我国目前服役超过20年的桥梁已经超过75%,四五类危桥数量超过数万座。桥梁结构特别是大跨桥梁由于性能退化引发的倒塌事故,会对人民生命财产造成巨大损失,并伴随有严重的社会影响。因此,需要对大跨桥梁展开长期结构监测,保障其在服役期限内的安全运营。变形是结构健康监测的重要内容,通过变形测量能够有效地评估结构性能和结构状态。面对我国大跨桥梁群体量大面广的分布特点,常用的变形测量手段无法在兼顾经济性的同时实现全覆盖地长期监测。为了实现低成本、轻量化、可持续地对大跨桥梁群体进行长期监测,本文提出了利用合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)测量技术对大跨桥梁长期变形监测方法。本文的主要研究内容如下:

(1) 基于现有的InSAR技术理论,结合桥梁结构几何与变形的信息,提出一种改进的桥梁永久散射体干涉测量(Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, PS-InSAR)方法。具体包括:通过结合桥梁的变形特性与卫星的观测几何,判断选取影像对目标桥梁变形监测的适用性;分析桥梁的复杂散射特征,采取多重阈值识别尽可能多的包含桥梁真实变形信息的PS点,并根据PS点与真实桥梁几何高度的误差去除异常PS点;根据桥梁的结构信息选取合适的差分相位干涉模型、参数取值范围以及参考点,进行精确的参数估计;根据卫星影像拍摄时刻桥梁温度场的分布特性,选取实时大气温度作为温度参数的输入。

(2) 基于改进的桥梁PS-InSAR方法的大跨桥梁长期变形监测试验。选取国内某知名高速铁路钢桁架拱桥为研究对象,通过文献调研获取其几何与结构变形信息。采用改进的桥梁PS-InSAR方法处理中精度Sentinel-1和高精度Cosmo SkyMed卫星影像数据。在PS点选取中,结合桥梁的复杂散射特征,利用多重阈值法选取包含桥梁真实变形的PS点。对高精度影像数据,借助桥梁几何外形去除高程异常点。通过将影像裁剪至只包含研究桥梁的尺寸,使得在干涉处理过程中,可以利用桥梁的结构信息确定干涉相位的参数及其准确的参数估计范围、选取合适的参考点、判断估计结果优劣。有效地提高包含桥梁变形信息PS点的相干性,使得桥梁变形监测结果更加可靠。

(3) 基于有限元模型InSAR的测量变形三维分解与验证。建立研究桥梁的有限元模型,由于温度是研究桥梁长期变形的主要影响因素,因此施加变化的均匀温度场模拟研究桥梁的长期变形。根据有限元获取的真实三维变形关系和卫星几何观测方程对视线向(Line of Sight, LOS)变形进行三维分解,得到支座长期纵

向变形。将其与有限元模拟的支座纵向变形进行比较，得到Sentinel-1和Cosmo SkyMed获取支座纵向变形误差分别在 $[-20,10]$ mm和 $[-10,10]$ mm，有效地验证InSAR测量变形的准确性。并建立InSAR支座纵向变形与温度的线性相关模型，与结构健康监测系统实测值对比，相对误差在 $[-10\%,10\%]$ ，有效地验证InSAR测量变形的真实可靠性。

关键词：合成孔径雷达干涉测量；结构健康监测；PS-InSAR；桥梁变形测量；有限元；LOS 向变形分解

Abstract

In recent years, the scale and growth rate of bridges in China are increasing year by year. The total number of existing bridges has exceeded more than one million, which is a veritable bridge construction country. At the same time, more than 75 % of the bridges in China have been in service for more than 20 years, and the number of dangerous bridges of four or five categories has exceeded tens of thousands. Major accidents caused by performance degradation of bridge structures, especially long-span bridges, will cause huge losses to people's lives and property. Therefore, it is necessary to carry out long-term structural monitoring of long-span bridges. Deformation is an important part of structural health monitoring. Deformation measurement can effectively evaluate structural performance and structural state. In the face of the distribution characteristics of large-span bridges in China, the commonly used deformation measurement methods cannot achieve long-term monitoring of full coverage while taking into account the economy. In order to achieve low-cost, lightweight and sustainable long-term monitoring of long-span bridge groups, this paper proposes a long-term deformation monitoring method for long-span bridges using synthetic aperture radar interferometry (InSAR) measurement technology. The main research contents of this paper are as follows:

(1) Based on the existing InSAR technology theory and the knowledge of bridge structure engineering, an improved Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar (PS-InSAR) method is proposed. Specifically, it includes: judging the applicability of the selected image to the deformation monitoring of the target bridge by combining the deformation characteristics of the bridge and the observation geometry of the satellite; the complex scattering characteristics of the bridge are analyzed, and the PS points containing the real deformation information of the bridge are identified as many as possible by using multiple thresholds. The abnormal PS points are removed according to the error between the PS points and the geometric height of the real bridge. According to the information of the bridge structure, the appropriate differential phase interference model, parameter range and reference point are selected for accurate parameter estimation. According to the distribution characteristics of bridge temperature field at the time of satellite image shooting, the real-time atmospheric temperature is selected as the input of temperature parameters.

(2) Long-term deformation monitoring test of long-span bridges based on improved bridge PS-InSAR method. A well-known high-speed railway steel truss arch bridge in China was selected as the research object, and its geometric and structural deformation information was obtained through literature research. The improved bridge PS-InSAR method is used to process medium-precision Sentinel-1 and high-precision Cosmo SkyMed satellite image data. In the selection of PS points, combined with the complex scattering characteristics of the bridge, the PS points containing the real deformation of the bridge are selected by using the multiple threshold method. For high-precision image data, height anomaly points are removed with the help of bridge geometry. By cutting the image to include only the size of the research bridge, in the process of interference processing, the structural information of the bridge can be used to determine the parameters of the interference phase and its accurate parameter estimation range, select the appropriate reference point, and judge the estimation results. The coherence of PS points containing bridge deformation information is effectively improved, which makes the bridge deformation monitoring results more reliable.

(3) Three-dimensional decomposition and verification of measured deformation based on finite element model InSAR. The finite element model of the bridge is established. Since the temperature is the main factor affecting the long-term deformation of the bridge, the uniform temperature field is applied to simulate the long-term deformation of the bridge. According to the real three-dimensional deformation relationship obtained by the finite element method and the satellite geometric observation equation, the three-dimensional decomposition of the LOS (Line of Sight) deformation is carried out to obtain the long-term longitudinal deformation of the bearing. Compared with the longitudinal deformation of the support simulated by the finite element method, the longitudinal deformation errors of the support obtained by Sentinel-1 and Cosmo SkyMed are $[-20,10]$ mm and $[-10,10]$ mm, respectively, which effectively verifies the accuracy of InSAR measurement deformation. The linear correlation model of longitudinal deformation and temperature of InSAR bearing is established. Compared with the measured values of structural health monitoring system, the relative error is $[-10\%, 10\%]$, which effectively verifies the real reliability of InSAR measurement deformation.

Key Words: InSAR; Structural health monitoring; PS-InSAR; Bridge deformation measurement; Finite element; LOS deformation decomposition

目 录

学位论文原创性声明	I
摘要	II
Abstract	IV
目录	VI
插图索引	VIII
附表索引	XI
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景及选题意义	1
1.2 InSAR 技术研究进展	4
1.2.1 星载 InSAR 系统的发展	4
1.2.2 基于星载 InSAR 技术的变形测量发展	6
1.3 时序 InSAR 技术在桥梁变形监测应用研究现状	9
1.3.1 基于 InSAR 技术的桥梁倒塌原因历史追溯	9
1.3.2 基于 InSAR 技术进行桥梁变形观测的可行性	10
1.3.3 基于 InSAR 技术进行桥梁变形观测的影响因素	11
1.4 本文研究内容	15
第 2 章 InSAR 变形识别基本原理	17
2.1 引言	17
2.2 星载 InSAR 基本理论	17
2.2.1 InSAR 干涉几何原理	17
2.2.2 D-InSAR 变形测量技术	19
2.2.3 PS-InSAR 变形测量技术	21
2.3 改进的桥梁 PS-InSAR 方法	22
2.3.1 影像选取	23
2.3.2 PS 点选取	24
2.3.3 干涉相位参数模型建立和参数估计	27
2.3.4 桥梁温度选取	30
2.4 本章小结	31
第 3 章 研究桥梁和影像数据概况	33
3.1 引言	33
3.2 研究桥梁概况	33
3.2.1 桥梁几何结构特征	34

3.2.2 桥梁变形特征	35
3.3 研究数据概况	38
3.3.1 SAR 卫星概况	38
3.3.2 SAR 影像数据适用性.....	39
3.3.3 SAR 影像数据概况.....	40
3.4 本章小结	44
第 4 章 基于 PS-InSAR 技术的大跨桥梁变形监测试验	45
4.1 引言	45
4.2 改进桥梁 PS-InSAR 技术流程	45
4.3 S1A 数据处理	46
4.3.1 影像前处理.....	46
4.3.2 大气相位估计	52
4.3.3 形变求解.....	59
4.4 CSK 数据处理.....	63
4.4.1 影像前处理.....	63
4.4.2 大气相位估计	66
4.4.3 形变求解.....	70
4.5 本章小结	73
第 5 章 基于有限元的大跨桥梁 InSAR 变形分解与验证	75
5.1 引言	75
5.2 有限元模型建立与校核	75
5.2.1 有限元模型建立	75
5.2.2 有限元模型校核	76
5.3 InSAR 变形分解与对比	77
5.3.1 基于有限元模型的 InSAR 变形分解	77
5.3.2 基于有限元模型的支座纵向变形对比	80
5.4 本章小结	88
结论与展望	89
参考文献	91
致谢	102
附录 A（攻读学位期间所发表的学术论文）	104

插图索引

图 1.1 近五年我国公路桥梁规模变化	1
图 1.2 桥梁垮塌案例	2
图 1.3 InSAR 系统	4
图 1.4 基于时序 InSAR 技术的大跨桥梁监测实例	9
图 2.1 杨氏双缝干涉实验示意图	17
图 2.2 InSAR 干涉几何	18
图 2.3 D-InSAR 技术流程图	20
图 2.4 PS-InSAR 技术流程图	22
图 2.5 卫星几何观测图	23
图 2.6 桥梁简化变形模型	24
图 2.7 桥梁复杂散射特性	26
图 2.8 桥梁散射信号分布	27
图 2.9 桥梁 PS 点选取	27
图 2.10 SAR 卫星影像拍摄时间与国内地方时间关系	31
图 3.1 研究桥梁外观图	33
图 3.2 主桥纵向几何尺寸	34
图 3.3 主桥横向几何尺寸	34
图 3.4 桥墩示意图	35
图 3.5 #10 支座长期形变时序	35
图 3.6 #10 支座长期纵向变形分量	36
图 3.7 #10 支座的纵向变形及温度变化曲线	36
图 3.8 #10 支座的纵向变形和温度线性拟合	37
图 3.9 不同位置构件温度和大气温度日变化曲线	37
图 3.10 桥梁支座纵向变形空间分布图	37
图 3.11 卫星变形观测几何	39
图 4.1 S1A 影像干涉组合模式	47
图 4.2 SAR 影像序列参数分布	47
图 4.3 SAR 影像裁剪	48
图 4.4 强度影像计算结果	49
图 4.5 DEM 转换	50
图 4.6 二次裁剪结果	50
图 4.7 差分干涉图	51

图 4.8 时序相干系数图	52
图 4.9 PS 点初选和连线	53
图 4.10 PS 点连接网络基线相关性	55
图 4.11 经验选取参数获得基线相干性分布	55
图 4.12 设置连接阈值 PS 点连接网络基线相关性	56
图 4.13 参数初步估计结果	57
图 4.14 部分干涉对大气相位估计图	59
图 4.15 去除大气相位后相干性计算结果	59
图 4.16 粗选 PS 点分布	60
图 4.17 粗选 PS 时序相干性分布	60
图 4.18 精选 PS 点分布	60
图 4.19 最终参数估计结果	61
图 4.20 PS 点地理编码	62
图 4.21 CSK 影像组合	63
图 4.22 CSK 影像裁剪	64
图 4.23 CSK 影像计算结果	64
图 4.24 CSK 干涉图	65
图 4.25 CSK 时序相干系数图	66
图 4.26 CSK 数据 PS 点初选和连线	66
图 4.27 PS 点连接网络基线相关性	67
图 4.28 优化后 PS 网络基线相关性分布	67
图 4.29 参数初步估计结果	68
图 4.30 部分干涉对大气相位估计	69
图 4.31 去除大气相位后相干性计算结果	70
图 4.32 PS 点选取	71
图 4.33 最终参数估计结果	72
图 4.34 PS 点三维分布	72
图 4.35 PS 点地理编码	73
图 5.1 有限元模型	75
图 5.2 前四阶振型	77
图 5.3 PS 点定位	78
图 5.4 支座 LOS 向变形和温度的时间序列	79
图 5.5 支座纵向变形空间分布	80
图 5.6 S1A 数据支座纵向变形对比	83
图 5.7 CSK 数据纵向变形对比	84

图 5.8 S1A 数据支座纵向变形 InSAR 测量值和有限元模拟值相关性....	85
图 5.9 CSK 数据支座纵向变形 InSAR 测量值和有限元模拟值相关性 ...	85
图 5.10 支座纵向变形误差分布图.....	86
图 5.11 支座纵向变形与温度的相关性	87

附表索引

表 1.1 常用桥梁变形测量方法	3
表 1.2 国内外主要星载 SAR 系统参数	6
表 1.3 参数时序 InSAR 方法识别结果	8
表 1.4 不同方法比较	14
表 2.1 桥梁温度与大气温度关系	31
表 3.1 S1A 卫星相关参数	38
表 3.2 CSK 卫星相关参数	38
表 3.3 桥梁三维变形测量敏感度系数	40
表 3.4 S1A 影像序列相关参数	41
表 3.5 CSK 影像序列相关参数	43
表 5.1 有限元模型材料参数表	76
表 5.2 桥梁模态对比	76
表 5.3 斜率对比	77
表 5.4 S1A 数据中 LOS 变形三维分量占比	79
表 5.5 CSK 数据中 LOS 变形三维分量占比	79
表 5.6 InSAR 支座纵向变形与温度的相关模型	87
表 5.7 支座纵向变形与温度的线性相关模型的斜率对比	87

第1章 绪 论

1.1 研究背景及选题意义

改革开放以来，我国城镇化进程不断加快，经济高速增长。大规模交通基础设施的建设是我国近年来经济腾飞的重要基础。桥梁作为连接城市交通运输网络的枢纽，扼制了公路和铁路的咽喉，在国民的经济和生活中起着至关重要的作用。近年来我国发布的交通运输行业发展统计公报^[1]显示，2017-2021 五年间，公路桥梁和大桥规模和增速逐年上升。截止 2021 年末全国公路桥梁 96.11 万座、总里程 7380.21 万延米。其中大桥数量达到 13.45 万座，里程达到 3715.89 万延米，超过公路桥梁总里程一半。加上铁路桥梁，我国桥梁规模总量已经逾越百万座，是名副其实的桥梁大国。

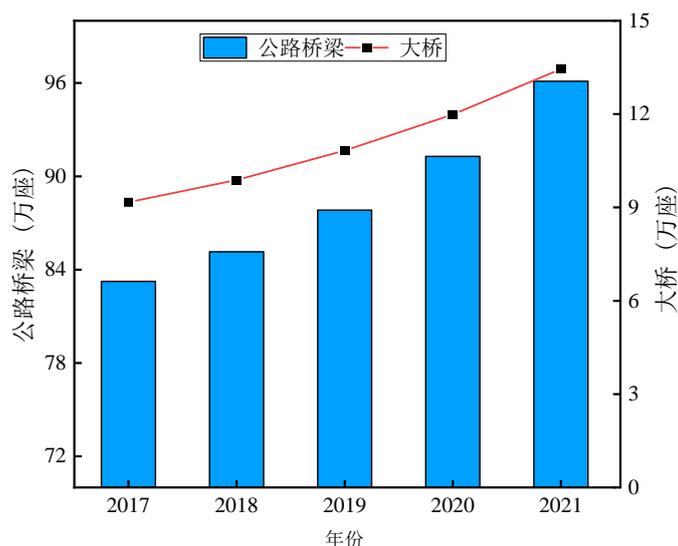


图 1.1 近五年我国公路桥梁规模变化

与此同时，我国目前服役超过 20 年的桥梁已经超过 75%。十三五期间，交通部每年投入大量资金实施公路危旧桥梁改造工程。但据不完全数据统计，截止到 2018 年，我国四、五类危桥数量仍旧超过 5.6 万座^[2]。在桥梁结构的建造和服役期间，由于设计施工不合理存在的初始结构缺陷、日益加重的交通运输和超载造成的结构损害、环境侵蚀导致的材料老化、撞击以及自然灾害引起桥梁倒塌事故频发，造成巨额的经济损失和惨痛的人员伤亡等重大社会和经济影响^[3,4]。例如：2013 年 2 月 1 日，河南义昌大桥由于装载爆炸品的火车爆炸引起倒塌，造成 10 人死亡，11 人受伤；2019 年 10 月 1 日，中国台湾南方澳跨海大桥由于吊杆钢绞线腐蚀断裂发生倒塌，造成 3 人死亡，12 人受伤；2019 年 10 月 10 日，浙江无锡

某高速桥梁由于机动车超载发生桥面垮塌，造成 3 人死亡，2 人受伤。2020 年 11 月 1 日，天津南环临港铁路桥梁由于检修时违规操作导致垮塌，造成 8 人死亡，6 人受伤；2021 年江苏老黄埭桥由于河道冲刷导致桥台前墙基础整体滑移引起坍塌，造成 2 人死亡，3 人受伤。海外国家也面临着相同的问题。2018 年 8 月 14 日，意大利热那亚市莫兰蒂大桥由于拉索长期受到环境腐蚀破坏引起桥面垮塌，造成 43 人死亡；2022 年 10 月 30 日，印度古吉拉邦特的莫尔比拉索桥由于多人上桥导致桥面负载超过其承载能力引起倒塌，造成 141 人死亡。



a) 中国台湾南方澳跨海大桥

b) 意大利莫兰蒂大桥

图 1.2 桥梁垮塌案例

由上述事故起因分析可知，桥梁倒塌是由结构损伤导致的。工程结构的损伤通常分为突然损伤和累积损伤。突然损伤由突发事件引发，如天灾（地震，台风等自然灾害）和人祸（事故，爆炸等人为原因），使损伤突然到达一定值；而累积损伤则具有缓慢积累的性质，如环境劣化导致的材料老化和疲劳等，到达一定程度就会引起破坏，影响结构安全和使用^[5]。突然损伤发生的位置和时间比较容易确定，可以采取对应的措施进行检查和修复，能有效减小损失和降低危害；而累积损伤的缓慢积累的特性，使得损伤发生的时间和空间充满不确定性，一旦发生这类损伤，往往会造成严重的后果。对于使用寿命几十年甚至过百年的桥梁结构而言，这类损伤是其服役期间的重大安全隐患。因此，需要长期对桥梁的结构进行监测，评估其结构安全性能，对发生损伤且存在隐患的桥梁进行维护加固，使桥梁结构能够在其服役期间内安全运营，进而使人民的生命财产安全得到有效保障。

变形监测是桥梁结构健康监测的重要组成部分，根据结构变形可以反映桥梁结构受力行为与安全状态，从而对桥梁的整体状态进行评估，为业主制定桥梁结构管理养护决策提供支持。表 1.1 给出了常用变形测量方法的对比。

传统的桥梁变形监测手段是指现场监测，该方法主要是借助全站仪或水准仪定期进行人工检查来获取结构性能，旨在发现和规避结构存在的风险，为结构养护、维修和加固提供依据。但这种方法存在一定的局限性：成本高；定期开展带来的成本很高，包括人工、出行、中断交通的运行和桥梁营收成本。效率低；对

于大跨桥梁需要反复进行仪器架设并移动测量，工作效率低。误差大；结果取决于现场环境因素、工作人员专业水平和经验高低，难以保证可靠性^[6]。

表 1.1 常用桥梁变形测量方法

测量方式	水准测量	SHM	GPS	机器视觉	InSAR
目标特征	点	点	点	面	面
空间覆盖	小	较小	小	较小	大
精度	mm	mm	mm	mm	mm
周期	长	短	短	短	较长
作业条件	天气影响	全天候	全天候	天气影响	全天候
成本	高	高	较高	低	低

依托于传感技术和无线传输技术的桥梁结构健康监测系统通常采用拉绳式位移传感器、线性可变差压传感器、磁致伸缩位移传感器等仪器进行变形监测。能够实时对桥梁结构进行监测，诊断可能发生结构损伤或灾难的条件和环境因素，评估结构性能退化的征兆和趋势^[7]。但也存在一定的不足之处：分布式测量无法反映桥梁全部性能变化；大跨度桥梁一般会选取结构关键位置（如支座、跨中，等分点等位置）安装传感器。虽然很大程度能反映结构性能变化，但是对于可能损伤部位不能达到精准定位。而且传感器的使用寿命远小于桥梁服役寿命，并且容易受到外界环境影响发生损坏，一方面会导致测量结果精度下降，导致不能正确地判断桥梁性能变化；另一方面，长期监测带来的仪器购买、安装、运维的成本会成倍增加。量大面广是我国桥梁分布的一大特点。现阶段我国公路大桥数量接近 12 万座，沿着长江、黄河水系的沿线的城市四散分布。其中真正安装结构健康监测（**Structural health monitoring, SHM**）系统的大桥却凤毛麟角，即使安装运维结构健康监测系统的成本远小于桥梁建设成本，但是面对基数如此巨大、分布如此离散的大桥，实现全覆盖的 **SHM** 带来的人工、设备成本依旧难以负担。

基于机器视觉的结构识别技术能够实现远距离、非接触、高精度的桥梁监测^[8]。但是由于相机自身振动、温度、热浪、光线等环境因素的影响可能会导致测量出现较大误差^[9]。而且该技术常用于实时的动态测量，不适用于长期变形观测。

基于全球定位系统（**Global positioning system, GPS**）的变形测量系统能够实现非接触、较高采样频率、远距离的测量^[10]。但是其测量需要安装 **GPS** 信号接收器获取形变信息，对大跨桥梁只能实现点状分布测量。并且信号仪器比较昂贵，无法实现大跨桥梁群体的全面覆盖监测。

基于星载的合成孔径雷达干涉测量是一种新兴的变形测量技术，其广泛应用于大范围地标变形监测。其变形测量原理是通过卫星在不同时间对地面同一位置进行拍摄生成雷达影像，然后通过图像配准、干涉滤波、相位解缠等步骤得到影

像区域的变形。该方法监测变形不受外界环境的限制，能在全天时、全天候条件下获取地表信息^[11]。

近年来随着高分辨率卫星发生升空，SAR 影像的空间分辨率最高可达到 1m，形变测量精度达到 mm 级，不少学者通过试验研究证明了其对大跨桥梁变形监测的可行性和精度；其次卫星每次观测范围可达上千平方公里，能够对我国量大面广的大跨桥梁群体进行监测；而且只需要通过购买少量雷达图像数据，然后利用计算机进行数据处理即可获得桥梁结构变形；相较于其他方法，真正意义上实现能够对桥梁实现非接触式、轻量化、低成本、大范围覆盖、可持续性的长期监测。

综上所述，面对我国量大面广的大跨桥梁群体急需结构健康监测的问题，研究基于合成孔径雷达干涉测量大跨桥梁变形方法具有重要意义。

1.2 InSAR 技术研究进展

合成孔径雷达差分干涉测量技术是集合成孔径雷达技术和差分干涉测量技术于一体。根据雷达搭载成像平台的不同，将 InSAR 系统分为地基、机载和星载三类^[12-13]，如图 1.3 所示。其中地基 InSAR 测量变形周期短，精度高，适用于小区域范围动态测量^[14]。机载 InSAR 常用于地貌绘制和高精度 DEM 模型的测量^[15]。星载 InSAR 适用于大范围内的地表形变测量。相对于前两种 InSAR 系统，星载 InSAR 在大范围的长期变形监测中具有经济性的优势。因此本文选取星载 InSAR 来进行大跨桥梁的长期变形监测。



a) 地基 InSAR

b) 机载 InSAR

c) 星载 InSAR

图 1.3 InSAR 系统

1.2.1 星载 InSAR 系统的发展

1978年6月，美国国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射了世界首颗搭载L波段SAR传感器的卫星SEASAT，标志着SAR技术成功迈入太空对地观测时代。此后，NASA于1981年、1984年和1994年相继发射了Sir-A、Sir-B和Sir-C/X-SAR卫星。成功地探测发现了位于撒哈拉沙漠中的地下古河道，在国际学术界引起了广泛的关注^[16-17]

1991年7月和1995年4月，欧空局(European Space Agency, ESA)相继发射了搭载C波段SAR传感器的姊妹卫星ERS-1和ERS-1卫星。这两颗卫星可以

获得空间分辨率 30m 和观测带宽 100km 的 SAR 影像，实现了高分辨率大范围的地表测绘功能^[18]。2002 年 ESA 发射了 ENVISAT 卫星，该卫星继承了 ERS-1/2 的波束模式和成像模式，具有多极化、可变入射角、大幅宽等新的特性^[19]。2014 年和 2016 年，ESA 又发射两颗搭载 C 波段 SAR 传感器的 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 姊妹卫星。这两颗卫星具有四种成像模式，其中干涉宽幅模式的单幅影像成像幅宽可达 250km，在大范围地表形变连续观测中具有较好的时效性和可靠性^[20]。

1992 年 2 月，日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 发射了搭载 L 波段 SAR 传感器的 JERS-1 卫星。2006 年和 2014 年，JAXA 相继发射了搭载 L 波段 PLANSAR 的 ALOS-1 和 ALOS-2 卫星。ALOS-1 卫星最高分辨率可达 10m，ALOS-2 可选分辨率为 1-100m^[21,22]。

1995 年 11 月，加拿大宇航局 (Canada Space Administration, CSA) 发射了搭载 L 波段 SAR 传感器的 RASARSAT-1 卫星，首次开创了可变视角的 ScanSAR 工作模式，在 500km 幅宽的条件下，能够 3 天覆盖美国和其他北半球地区一次，5 天覆盖全球一次^[23]。2007 年发射的 RASARSAT-2 卫星，实现了全极化成像，高分辨率成像和移动目标探测等技术革新^[24]。

2007 年 6 月，意大利国防部与航天局合作发射了搭载 X 波段 SAR 传感器的 Cosmo-SkyMed-1 卫星，然后于 2007 年、2008 年和 2010 年相继发射了 Cosmo-SkyMed-2/3/4 号卫星，构成了 Cosmo-SkyMed 星座项目 (包括 4 颗 SAR 卫星)。Cosmo-SkyMed 星座最多能够在一天内实现对一个区域的 8 次成像，有效提高监测的时效性^[25-26]。

2007 年 6 月，德国宇航中心 (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) 发射了搭载 X 波段 SAR 传感器的 TerraSAR-X 卫星，其空间分辨率较之前的卫星明显提高。2010 年发射的 TanDEM-X 卫星与 TerraSAR-X 卫星构成姊妹卫星，采用螺旋轨道星座形式紧密编队飞行，主要应用于全球高精度的 DEM 获取^[27]。

2008 年 9 月，中国发射了环境一号 (HJ-1C) SAR 卫星，具有空间分辨率 5m 和 20m 两种成像模式，与两颗光学卫星一起形成高时空分辨率和高光谱分辨率的对地观测遥感系统，为国内自然灾害和环境污染的发生、发展与演变过程提供可靠信息^[28]。2016 年，我国发射了首颗 1 米分辨率的 C 波段多极化 SAR 卫星高分三号 (Gaofen-3) 卫星，具有高分辨率、运行寿命长 (8 年) 和多成像模式 (12 种) 等特点，主要技术指标达到或超过国际同类卫星水平^[29]。

纵观国内外星载 SAR 系统的发展，目前呈现出工作模式多样化，影像分辨率精细化，极化方式的全面化，重访周期精简化以及空间布局层次化等特点。表 1.2 按照卫星发射时间顺序，给出了上述主要卫星的基本参数信息^[30]。随着未来研究的深入和技术的进步，星载 InSAR 系统将在高分辨率宽幅成像、多基地、轻小型

化、智能化等多方面取得突破。进而不断拓展星载 SAR 的观测维度，实现更多维度地表信息获取^[31]。

表 1.2 国内外主要星载 SAR 系统参数^[31]

卫星	国家	发射时间	波段	极化方式	分辨率 (m)	重访周期 (天)
SEASAT	美国	1978	L	HH	25	-
SIR-A	美国	1984	L	HH	40	-
ERS-1	欧空局	1991	C	VV	25	35
JERS-1	日本	1992	L	HH	18	44
ERS-2	欧空局	1995	C	VV	25	35
RADARSAT-1	加拿大	1995	C	HH	10/30/100	24
ENVISAT-1	欧空局	2002	C	VV/HH	20	35
ALOS	日本	2006	L	VV/HH	7/14/100	46
Cosmo-SkyMed	意大利	2007	X	全极化	1/3/15	1-16
TerraSAR-X	德国	2007	X	VV/HH	1/3/16	11
RADARSAT-2	加拿大	2007	C	全极化	3/100	1-24
TanDEM-X	德国	2010	X	VV/HH	1/3/16	11
HJ-1C	中国	2008	S	VV	3/5/20/100	31
Sentinel-1	欧空局	2014	C	VV/HH	5/20	6
ALOS-2	日本	2014	L	VV/HH	1/3/6/10/100	14
Gaofen-3	中国	2016	C	VV/HH	1/5/10/25/500	29

1.2.2 基于星载 InSAR 技术的变形测量发展

星载 InSAR 技术通过 SAR 卫星对地表发射微波并接收回波信号，以复数的形式将地表信息储存在 SAR 影像中。对 SAR 影像采取差分干涉处理得到包含形变信息的相位，再根据卫星观测几何求解得到地表形变。由于其全天时、全天候、全球覆盖且不受外界环境干扰的特性，广泛应用于滑坡^[32]、地震^[33]、矿区沉降^[34]、火山^[35]、城市地表沉降^[36]以及城市地铁^[37]和公路沿线沉降^[38]等形变监测任务中。

InSAR 技术起源于上世纪 70 年代，主要用于地形测绘领域进行地表高程信息探测^[39]。随着对相位信息的深入分析，研究人员发现，引入外部数字高程模型 (Digital elevation model, DEM) 数据可以分离包含地表微小形变的干涉相位，通过变形相位的提取可以实现地表形变的监测。1989 年，Garbriel 等^[40]提出了合成孔径雷达差分干涉 (Difference-InSAR, D-InSAR) 技术，并利用该技术实现了美国加州某峡谷地表膨胀和收缩的观测，形变精度可以达到厘米级，首次验证了 D-InSAR 技术在地表形变监测的可行性。然而真正推动 D-InSAR 技术的发展是 1992 年 Massonnet 等^[41]在 Nature 上发表的文章，利用 D-InSAR 技术对美国加州

地区地震发生前后的 SAR 影像进行数据处理,将得到的地震前后变形结果与传统地表测量手段对比,两者吻合良好,在学术界掀起轩然大波,引发了学者们对 InSAR 技术研究的热情。但随着 D-InSAR 技术研究的不断深入,学者们发现该技术存在一定的局限性。

1992, Zebker 等^[42]通过试验发现,用于差分干涉的两幅图像的空间基线(即两次拍摄时卫星空间位置的距离)和时间基线(即两次拍摄的时间差)过长,会导致干涉结果出现较大的误差,即基线失相关。其中空间基线过长会导致回波信号出现完全失相关,干涉信息无法提取。而时间基线过长会引入附加相位,从而导致误差的产生。

1997, Zebker 等^[43]通过试验发现,空间基线在一定范围内时,大气中 20%的相对湿度变化会导致 10-14cm 的误差,即大气延迟。这是由于微波信号在穿过大气层时,非均匀大气介质会使得雷达的传播路径可能产生弯曲,从而导致相位延迟。

由于 D-InSAR 技术的局限性,即时间失相关、空间失相关和大气延迟的影响,学者们在 D-InSAR 的基础上进一步提出了时间序列合成孔径雷达干涉(Time series-InSAR, TS-InSAR)技术。

TS-InSAR 技术最早是在 1998 年由 Sandwell 等^[44]提出,通过将相干性较好的干涉图得到的结果相叠,实现了合成孔径雷达干涉叠加(Stacking-InSAR)技术,得到了较为准确的长时间序列地表形变信息。时序 InSAR 技术的基本原理是筛选多幅 SAR 影像中的相位和幅值稳定的点目标,该类点目标不受时空基线失相干的影响。通过相位解缠分离出点目标形变相位,进而获取对应的形变信息^[45]。基于这一原理,发展出了许多种时序 InSAR 方法。通常可以根据主影像数量、后向散射体选择方式、相位解缠的方法等分类,根据主影像数量分类如下:

一类是单主影像时序 InSAR,其中代表是 Ferretti 等^[46]在 2001 年提出的永久散射体干涉(Persistent scatterers interferometry, PSI)测量,该方法选取一幅时空基线最优的影像为主影像干涉配准,重点关注干涉图中在长时间序列都能保持相干性较好的点,通过对这些点目标求解得到较为精确的变形结果,并在 Ancona 地区的滑坡监测中得到了证明。随后相继发展了相干点目标分析法^[47](Interferometric point target analysis, IPTA)、时空解缠网络法^[48](Spatio-temporal unwrapping network, STUN)、斯坦福永久散射体方法^[49](Stanford method for persistent scatterer, StaMPS)、永久散射体对^[50](Persistent scatterer pairs, PSP)、SqueeSAR^[51]等方法。IPTA 方法通过分析点目标的时间和空间特征,使得时序变形精确度得到提高。STUN 方法引入函数模型和随机模型对变形规律和控制参数的权值进行建模,在此基础上,利用带权的最小二乘估计进行最优参数选取和形变提取;StaMPS 方法基于相位特征识别 PS 点,并且在时间和空间上进行三维相

位解缠，有效地提高了选取 PS 点的密度和变形解算的准确度，可以在无需先验形变模型的基础上提取形变。PSP 方法基于大气相位和轨道误差的空间相关性，以相邻 PS 点对为单位进行求解，不需要对数据进行预校准，有效提高了计算效率。SqueeSAR 方法是在选取原始 PS 点的基础上，新增同质滤波处理后相干性较好地 DS 点，两者联合进行求解，能够有效应对 PS 点较少的问题。

另一类是多主影像时序 TS-InSAR，其中代表是 Berardino 等^[52]在 2002 年提出了小基线集（Small baseline subset, SBAS）干涉测量技术。该方法通过空间基线阈值法选取多幅主影像，选取空间基线较短的影像对进行干涉处理，能够有效地降低时间失相干和地形对相位的影响，在 Campi Flegrei 火山以及意大利的 Naples 城市的地表形变监测中成功地得到了验证。基于小基线对的理念，相继发展了相干目标法^[53]（Coherent target, CT）、临时相干点法（Temporarily coherent point InSAR, TCP-InSAR）^[54]等方法。CT 方法基于像素的相干性选取 PS 点目标，在时间和空间域交替滤波来对干涉相位中的大气相位和非线性变形相位进行求解，对影像数量和基线长度具有很强的实用性，在大数据集的短基线干涉中得到结果更精确。TCP-InSAR 方法通过粗差检测器识别并去除具有相位模糊的弧段，并假设弧段间 DEM 和大气效应对相位影像较小，利用参考点约束的最小二乘模型估计形变速率，在仿真数据中实现了无需相位解缠的变形估计。

表1.3 参数时序 InSAR 方法识别结果^[55]

TS-InSAR	主影像数量	初选点方法	形变模型	相位解缠方法
InSAR Stacking	多主影像	空间相干系数	空间相关形变，线性形变	二维（最小二乘）
PSI	单主影像	幅值离差	线性形变	二维（平差集成）
SBAS	多主影像	空间相干系数	空间相关形变，线性形变	二维（MCF）
CT	多主影像	空间相干系数	线性+非线性形变	二维（平差集成）
IPTA	单主影像	幅值离差	线性形变	二维（分块分级构网）
STUN	单主影像	幅值离差+信噪比	线性+非线性形变	二维（基于概率模型）
StaMPS	单主影像	幅值离差	空间相关形变，线性形变	二维（整体最小二乘+MCF）
PSP	单主影像	幅值离差	线性形变	二维（临近点逐步扩展）
SqueeSAR	单主影像	幅值离差+同质滤波	线性形变	二维（平差集成）

时序 InSAR 技术的出现，有效地解决了失相干和大气延迟的问题，使 InSAR 变形测量的精度得到保证。同时，X 波段卫星相继发射升空，SAR 影像分辨率达到了米级。而且相关学者利用人工角反射器辅助进行试验，其测量精度甚至能达到亚毫米级^[56-57]。从而使 InSAR 技术的长期形变监测的目标由大范围的整体形变转变到城市大型基础设施成为可能。

1.3 时序 InSAR 技术在桥梁变形监测应用研究现状

桥梁作为连接公路和铁路交通网络的重要枢纽，是城市大型基础设施的重要组成部分。由于其服役时间较长，为避免外界因素的影响导致性能发生退化，致使桥梁垮塌引起重大事故，需要对桥梁展开长期监测。不同于其他桥梁变形监测手段，时间序列 InSAR 技术能够全天时、全天候进行观测，不受桥梁外部环境影 响，并且能够实现非接触、低成本、高测点密度、可溯源性、可持续性的桥梁群体观测。因此一些学者开始尝试利用时间序列 InSAR 技术进行桥梁变形观测。

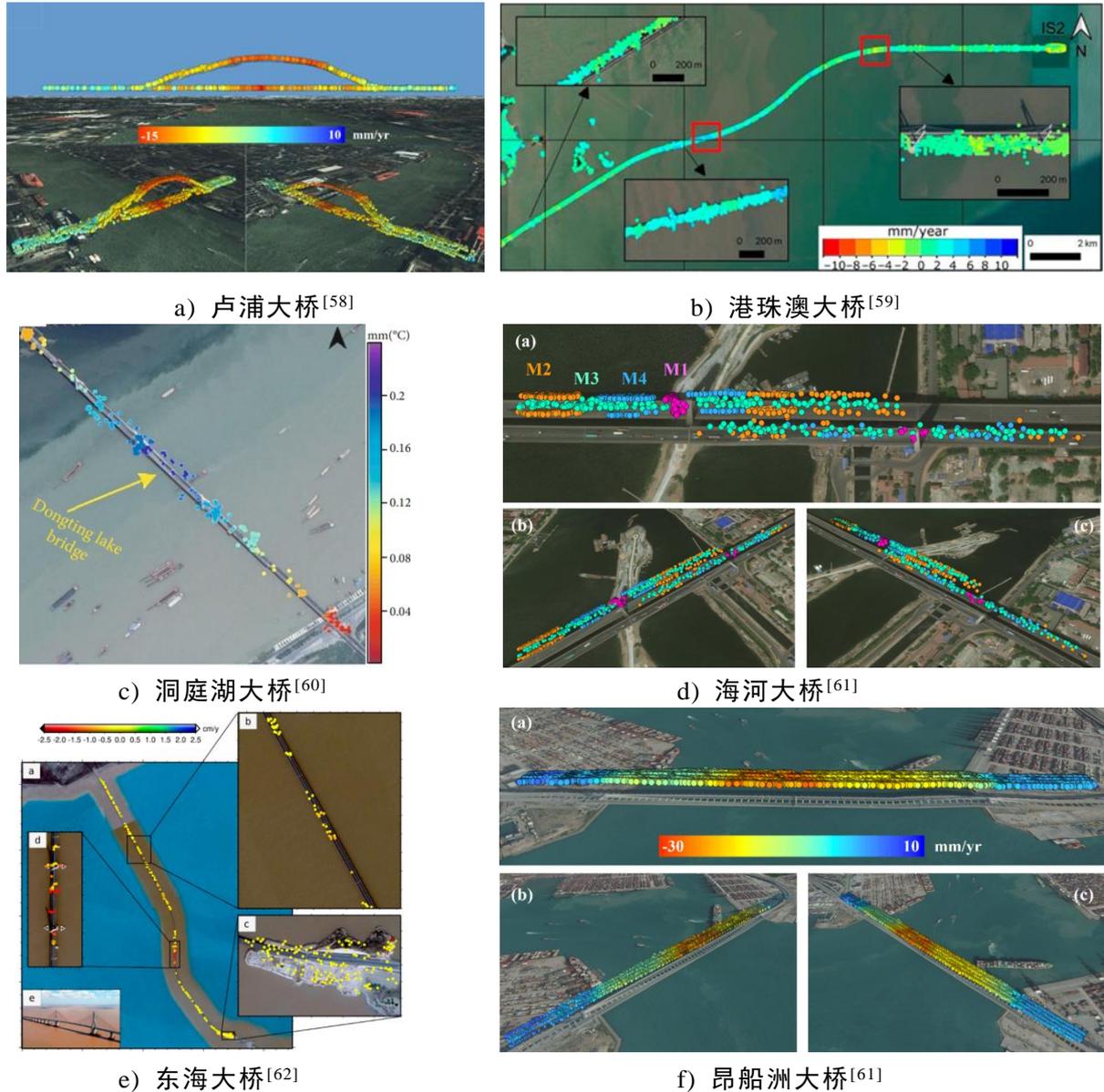


图 1.4 基于时序 InSAR 技术的大跨桥梁监测实例

1.3.1 基于 InSAR 技术的桥梁倒塌原因历史追溯

常规监测手段受到成本的制约，无法获取大范围的桥梁群体长期监测数据。因此对于大部分的由于累积损伤导致的桥梁倒塌都难以预测。在桥梁倒塌后再对

桥梁进行检测分析，由于缺乏桥梁正常服役的历史基线数据，因此难以追溯事故原因。但是利用时序 InSAR 技术对桥梁事故前的历史影像数据处理，能够获取桥梁倒塌前结构性能变化信息，实现桥梁倒塌原因的历史追溯。并且还能通过该项技术了解现有桥梁的历史结构性能，评估桥梁安全状况，有效地预防由于累积损伤导致的桥梁倒塌。

2013 年，Sousa 等^[63]采用了结合 SBAS 和 PS-InSAR 的方法处理 1995-2001 年间 52 幅 ERS-1/2 影像数据，发现葡萄牙北部某桥梁事故发生前 5.5 年里，倒塌桥段发生显著、稳定的持续运动，LOS 向变形速率最大达到 20mm/年。证实了时序 InSAR 技术用于桥梁倒塌预警的可能性。

2018 年，Selvakumaran 等^[64]采用 SBAS 方法处理 2014-2015 年的 48 幅 TerraSAR-X 影像数据，发现英国 Tadcaster 桥梁破坏前桥梁坍塌区域发生了明显移动，是明显的破坏前兆。提出可以使用 InSAR 监测作为有冲刷风险桥梁早期预警手段。

2019 年，Milillo 等^[65]采取 MT-InSAR 方法处理了 2009-2018 年间 134 幅 COSMO-SkyMed 影像和 136 幅 Sentinel-1A 影像数据，得到意大利莫兰蒂大桥的相对变形图。Sentinel-1A 数据结果表明，自 2015 年以来，倒塌桥墩两侧的桥面板相对变形呈现增大的趋势，COSMO-SkyMed 数据结果表明，2017-2018 间该桥面板上存在几个测点变形幅度增大。该方法得到结果达到毫米级，有助于预防变形对基础设施造成的危害。

2021 年，陈艳青等^[66]采取 SBAS 方法处理了 2018-2019 年间 9 幅 Sentinel-1A 影像数据，发现广东河源东江大桥在倒塌前没有出现异常形变，结合当时气象资料，推断桥梁垮塌原因是上游水库泄洪导致的冲击倒塌。

上述国内外学者利用不同的时序 InSAR 方法对目标桥梁的历史影像进行数据处理，通过对历史形变时序的溯源，能够辅助进行事故原因分析，并且也证明了该技术用于桥梁安全性能预警的可能性。

1.3.2 基于 InSAR 技术进行桥梁变形观测的可行性

时序 InSAR 技术虽然能够实现地表微小形变的观测，但是为验证其具备桥梁变形观测的能力，相关学者做了许多研究。

2011 年，Monserrat 等^[67]在对利用 PSI 处理 TerraSAR-X 高精影像数据来进行巴塞罗那城市变形监测时发现，干涉相位受成像物体的热膨胀影响很大，计算得到某高速路桥的热膨胀系数估计值为 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，与钢筋混凝土桥梁热膨胀系数一致。

2012 年，张宁宁等^[68]结合 PSI 和人工角反射器干涉测量对苏通大桥基础沉降进行观测，并利用地质信息和结构信息建立有限元模型模拟桥梁支座沉降情况，

得到结果相对误差为 4.64%，验证了 InSAR 观测结果的可靠性。

2017 年，黄其欢等^[69]利用 PSI 技术测量得到京沪高铁南京大胜关大桥的 1723 个 PS 点位移时序，并将得到的 LOS 向变形转化为桥梁纵向变形，发现得到的纵向变形与温度具有高度相关性。与基于传感器监测数据建立的支座温度变形模型比较，两者吻合较好。

2017 年，刘星等^[70]依据大气相位的时间特性，利用卡尔曼滤波获取大气相位，进而优化 PSI 相位解缠过程，提高了计算效率和准确度，并应用到温榆河两座桥的沉降观测中，发现得到结果与水准测量变化趋势一致。

2018 年，江剑锋等^[71]利用 PSI 技术测量得到安庆长江大桥 138 个 PS 点变形数据，忽略其他随机效应的影响，发现桥梁的变形主要由热膨胀引起。基于 InSAR 测量结果计算得到的桥梁热膨胀系数为 $10.65 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，与材料实际值基本一致。

2019 年，Hoppe 等^[72]采用 SqueeSAR 算法处理了升轨和降轨 TerraSAR-X 影像数据，得到了弗吉尼亚州两座后张拉预应力桥梁毫米级精度的变形时间序列。结果表明桥梁后张拉段并未发生永久性变形，证明了实施基于卫星的桥梁性能监测的可行性。

2019 年，Jung 等^[73]利用多时相 InSAR 技术监测了金大亭大桥和武英大桥，通过将 COSMO-SkyMed 数据和 Sentinel-1A 数据得到的计算结果相互验证，发现了水平热膨胀和长期竖向挠曲分别是水平和竖向变形的成分，验证了时序 InSAR 技术在桥梁长期挠度监测方面的潜力。

2021 年，Bao 等^[60]利用 PSI 技术对洞庭湖周边区域进行了长期时空变形监测，利用考虑热膨胀和季节环境因素的模型来模拟变形的时变特征，得到了该区域的时序变形和热膨胀参数，其中洞庭湖大桥的平均膨胀系数为 $11.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，与桥梁预应力混凝土材料对应的物理参数表现出良好的一致性。

上述学者通过将有限元模型模拟桥墩沉降、结构健康监测温度变形模型、桥梁实际材料热膨胀物理参数、水准测量结果以及非同源数据测量变形，与利用 InSAR 测量结果得到的相应参数表现出良好的一致性。有力地验证了时序 InSAR 技术测量桥梁变形的能力，同时表明该技术在桥梁长期结构健康监测上的可行性。

1.3.3 基于 InSAR 技术进行桥梁变形观测的影响因素

虽然 InSAR 在桥梁变形监测上存在很多优势，但是在实际应用中仍旧发现存在一些因素会造成测量精度的下降，从而使得该项技术的适用性受到制约。

1. SAR 影像的选取

由于 SAR 卫星侧视成像的机理，干涉测量得到的地表变形是实际空间三维变形在 LOS 的投影。相关研究表明^[74]，当地面目标发生南北向变形时，引起 LOS 向变形变化最小，对应干涉测量得到的误差较大。

2014年, SOUSA 等^[75]在对比利用不同方法进行桥梁变形监测时, 发现监测精度受到数据处理时使用的影像数量和卫星飞行的方向的影响。

2015年, Lazecky 等^[76]利用 PS-InSAR 技术对三座不同桥梁进行变形监测, 发现变形结果的精度受到桥梁走向和卫星飞行方向夹角的影响, 当两者平行时, 得到的监测结果精度较低。

对桥梁而言, 其横向变形通常较小。当大跨桥梁变形主要是在纵向, 如果桥梁走向与卫星飞行方向一致, 对应纵向变形与 LOS 变形垂直, 从而得到结果较差。因此, 在选取进行桥梁变形观测的影像数据时, 需先确定桥梁的走向与拍摄影像卫星的轨道是否满足一定要求。

2. 点目标的选取与定位

时序 InSAR 技术通过选取 SAR 影像中桥梁位置处的相干性较好的像素点进行变形测量。而对于不同材料和结构类型的桥梁, 其对应的后向散射特性不一致, 对于相干性较差的桥梁, 能够获取的测点数量很少, 从而导致相邻测点间变形相位突变。此外, 由于部分桥梁外表高差较大, 从而使得选取的测点中存在相邻点高程相位突变。无论是形变相位还是高程相位突变, 都会引起进行相位解缠时相位连续性假设不满足的情况, 导致不能获取全桥准确的变形。

2016年, 潘军等^[77]利用蒙特卡洛模拟发现随机系统温度比随机车流对关键点变形的影响大得多, 能够达到厘米级。因此采用 PSI 技术测量安装人工角反射器的洞庭湖大桥关键点变形, 结合蒙特卡洛-有限元模拟不同时段随机系统温度对关键点变形的影响, 精确地剔除随机系统温度对 SAR 监测变形结果的影响。

2018年, Qin 等^[78]提出改进的斜拉桥多时相 InSAR 方法, 结合 PS-InSAR 和 SBAS 技术干涉处理时点目标选取策略, 最大限度地提高可用信号的空间密度和精度, 有效提高了变形估计的鲁棒性。将该方法用于天津海河大桥和香港昂船洲大桥的实验中, 通过不同数据的交叉验证证明了该方法的有效性。

2019年, Ma 等^[79]通过利用持续散射体和分布散射体联合检测来提高测点密度, 并根据桥梁结构和变形特征来确定不同类型点对应的桥梁构件。CSK 数据测量结果表明, 在定性分析假设下, 线性变形速率能够达到亚毫米级精度。

2019年, Selvakumaran 等^[80]通过在滑铁卢大桥布设人工角反射器来解决混凝土桥梁测点较少的问题, 应用 PSI 技术测得结果表明 InSAR 能够较好地反映桥梁变形随温度的季节性变化。同时利用自动全站仪对人工测点位置进行位移观测, 两者呈现一定的相关性, 但仍有一些差距, 需进一步量化两者的关系。

对于相干性较差的情况, 一部分学者通过采取结合 PS 点和 DS 点的选点策略, 有效的实现了测点加密, 从而实现了更加精确的测量。人工角反射器由于其强散射特性, 在 SAR 影像中很容易辨别。并且其真实的地理空间信息已知, 对应变形求解更容易。

2017年, Qin等^[58]分析了高分辨率影像中桥梁的后向散射机理, 结合桥梁结构几何特征, 筛选出候选点目标中的非桥梁反射信号, 避免相位解缠时产生的误差, 并在变形模型中引入温度参数, 实现了上海卢浦大桥的变形测量。

2017年, Zhao等^[81]为解决没有DSM模型情况下, 桥梁高差过大引起相位缠绕严重的问题。利用长短基线迭代法求解PS点的高程, 将其用于LLL算法进行的高程和变形的二维相位解缠中。在卢浦大桥中对该算法进行了验证, PS点的高程估计与官方模型数据误差在1m内, 并且得到的变形特征为渐进式对称, 与设计桥梁一致。

2019年, 段伟等^[82]提出了构建约束三角网络进行残差点分块, 利用二分图最优权匹配进行桥梁线状区域相位解缠。通过限制PS点的连线的欧式距离, 能够较好地避免连线两端PS点存在较大的相位突变。将该方法应用于洞庭湖大桥, 得到的解缠精度明显优于稀疏网络最小费用流算法。

对于相邻测点存在较大高差的情况, 学者们通过获取点目标较准确的高程来明确相邻点高程差, 或者通过限制可能存在较大高差的相邻点目标连线, 来避免高程相位突变引起的误差在相位解缠过程中的传递。

3. 干涉相位模型的参数估计

常规的时序InSAR技术的干涉相位模型中通常由线性项、残差以及非线性变形组成。然而由于桥梁本身存在相对于地面较高的结构, 并且变形时序往往呈现非线性特征。因此采用常规的干涉相位模型会导致不能得到桥梁的真实变形。

2013年, Fornaro等^[83]发现随着SAR影像分辨率的提高, 其变形测量的灵敏度也会相应提高。因此在对桥梁进行变形监测的试验中, 提出了引入热膨胀参数的拓展多维成像方法, 实现了桥梁热膨胀系数的准确估计, 验证了利用该技术获得温度变形的可行性。

2016年, Poreh等^[84]在对通过PSI技术对意大利坎帕尼亚铁路变形测量中发现, 其中一座铁路桥梁的PS点变形时序呈现明显的周期性季节变化, 并且与影像采集的当地温度变化趋势接近。

2016年, Lazecky等^[85]在利用PSI技术处理高分辨影像来获取桥梁变形时, 提出线性变形趋势, 相对地面的高差和热膨胀是干涉相位的主要影响因素, 并且在正常情况下热膨胀的影响会跟另外两个相当甚至超过一个量级。

学者们在进行InSAR监测时, 发现非线性变形主要是由温度引起, 并且不能忽略去除DEM高程后的高程残差, 因此相关学者提出了在干涉相位模型中引入热参数和高程进行参数估计, 从而获得更加准确的变形。

2018年, Daniel等^[86]利用PSI技术对加拿大北海峡大桥进行观测, 在对利用高度, 环境温度和时间对变形数据进行回归分析时表现出最佳相干性, 利用有限元模型模拟得到桥梁的热位移系数, 与InSAR求解结果吻合较好。

2020年,朱茂等^[87]将利用PS-InSAR技术获取青海胶州湾大桥的形变时序,将得到的PS点的数据分别用线性、线性周期以及线性温度建模,发现线性周期模型拟合最佳,但是由于温度取值为当天大气平均温度,因此存在一定局限性。

上述学者的研究表明,在桥梁InSAR变形求解时,由于桥梁本身可能存在高耸结构,相较于地面高差较大,去除DEM后的高程残差不可忽略。此外,引起大跨桥梁非线性变形的主要因素是温度,并且远大于线性变形。因此需在传统的干涉相位模型中引入新的参数,即高程残差以及热膨胀系数,通过对参数的准确估计,得到更加真实准确的变形观测值。

4. LOS向变形的三维分解

利用时序InSAR技术获取地表目标的变形并非目标真实的空间变形,而是真实三维变形在LOS向的投影。由于LOS向变形与真实三维变形的关系式方程中存在三个未知数,分别对应空间三个方向的真实变形。如果没有三维变形之间的关系,单个雷达传感器数据无法对LOS向变形进行三维分解。

常用的InSAR三维变形测量方法是在获取LOS向变形的基础上,联合外部测量数据^[88]、多孔径雷达干涉测量^[89]、像素追踪法^[90]或多卫星平台数据^[88]进行求解。外部测量数据通常是指GPS和水准测量数据,存在外业工程难以回避以及空间分辨率有限的劣势。多孔径雷达干涉测量会牺牲影像分辨率,导致变形测量精度降低。像素追踪法本身存在测量精度较低的问题。多卫星平台数据由于成像时间不一致,所以只能获取变形速率的三维分量。表1.4给出了常用方法的比较。

表 1.4 不同方法比较

技术方法	GPS/水准测量+InSAR	多卫星平台 InSAR	InSAR+POT	InSAR+MAI
分辨率	无损	有损	无损	损失一半
视线向精度	高	高	较低	较高
方位向精度	高	底	较高	高
垂直向精度	高	高	较高	高

在桥梁InSAR三维变形测量上,一些学者也展开了相关研究。

2017年,Huang等^[91]假设桥梁的变形主要是纵向变形,忽略桥梁其他方向的真实变形,利用单源Sentinel数据对南京大胜关长江大桥进行变形监测,三维分解得到的支座纵向变形与实际桥梁变形特征符合较好。

2018年,Qin等^[92]通过融合TerraSAR-X、Cosmo-SkyMed以及Sentinel-1共三个卫星平台数据对卢浦大桥和昂船洲大桥进行变形监测。通过联立三个LOS向变形和真实三维变形的方程,实现桥梁的真实三维变形速率的解算。

2019年,Million等^[65]融合Cosmo-SkyMed升降轨和Sentinel-1数据对Morandi大桥进行变形监测。根据卫星测量几何关系,结合马尔科夫链蒙特卡罗方法进行三维变形迭代求解,降低了不同平台数据时间不一致所产生的误差。

通过融合多平台数据或者忽略次要变形，能够实现 LOS 向变形的三维分解。但是多平台数据的影像拍摄时间不一致，其对应的 LOS 向变形也不是同一时刻的真实三维变形构成，因此可能求解的真实三维变形会存在误差。当次要变形在 LOS 向变形中的占比很大时，忽略次要变形求得真实变形也会存在较大误差。

1.4 本文研究内容

本文的选题基于国家自然科学基金项目——《基于星载 InSAR 变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》的研究内容。本文基于该项目所提出的结合遥感卫星和大数据平台的大跨度桥梁监测框架，开展了基于 InSAR 的大跨桥梁长期变形监测研究。本文计划通过该项研究工作，实现低成本、轻量化、非接触式以及可持续的大跨桥梁长期变形监测，主要包括以下研究内容：

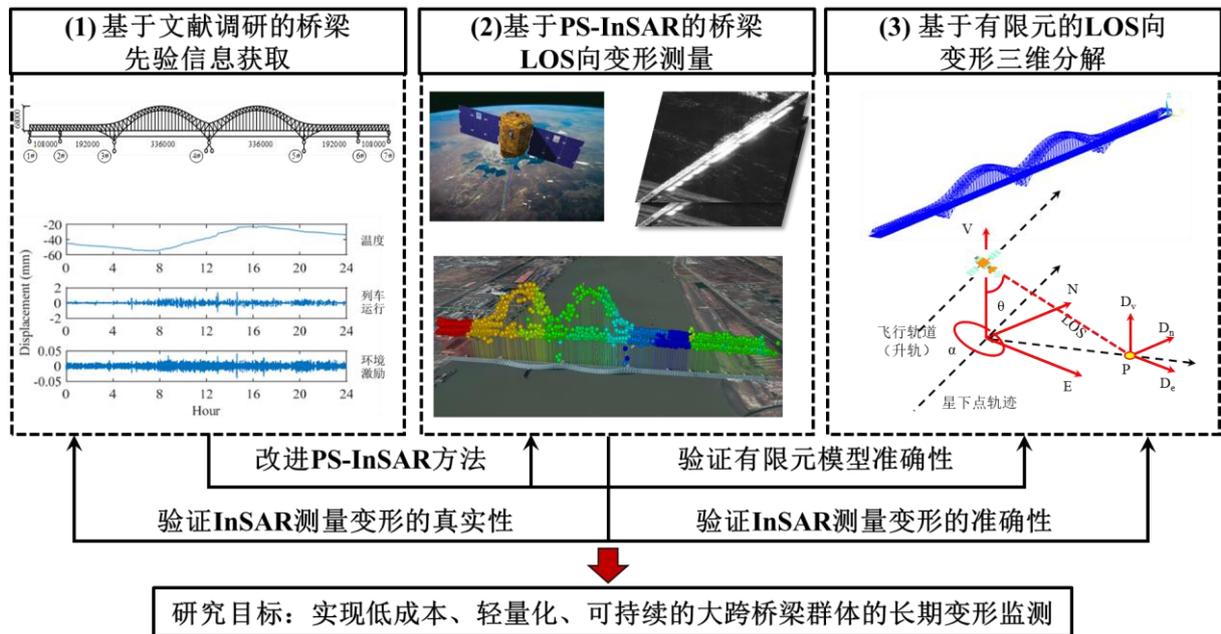


图 1.5 研究技术路线

(1) 基于现有的 InSAR 技术理论，融合桥梁结构工程知识，提出一种改进的桥梁 PS-InSAR 方法。具体包括：通过结合桥梁的变形特性与卫星的观测几何，判断选取影像对目标桥梁变形监测的适用性；分析桥梁的复杂散射特征，采取多重阈值识别尽可能多的包含桥梁真实变形信息的 PS 点，并根据 PS 点与真实桥梁几何高度的误差去除异常 PS 点；根据桥梁的结构信息选取合适的差分相位干涉模型，进行精确的参数估计；根据卫星影像拍摄时刻桥梁温度场的分布特性，选取实时大气温度作为温度参数的输入。

(2) 基于改进的桥梁 PS-InSAR 方法的大跨桥梁长期变形监测试验。选取国内某知名高速铁路钢桁架拱桥为研究对象，通过文献调研获取其几何与结构变形信息。采用改进的桥梁 PS-InSAR 方法处理中精度 Sentinel-1 和高精度 Cosmo SkyMed 卫星影像数据。在干涉处理过程中，利用桥梁的结构几何与变形信息确定

干涉相位的参数及其准确的参数估计范围、选取合适的参考点、判断估计结果优劣。有效地提高包含桥梁变形信息 PS 点的相干性，使得桥梁变形监测结果更具可靠性。

(3) 基于有限元模型 InSAR 的测量变形三维分解与验证。建立研究桥梁的有限元模型，由于温度是研究桥梁长期变形的主要影响因素，因此施加变化的均匀温度场模拟研究桥梁的长期变形。根据有限元获取的真实三维变形关系和卫星几何观测方程对 LOS 向变形进行三维分解，得到支座长期纵向变形。将其与有限元模拟的支座纵向变形进行比较，验证 InSAR 测量变形的准确性。并建立 InSAR 支座纵向变形与温度的线性相关模型，与文献中 SHM 实测值对比，验证 InSAR 测量变形的真实可靠性。

第2章 InSAR 变形识别基本原理

2.1 引言

本章旨在提出一种改进的桥梁 PS-InSAR 方法，通过结合桥梁结构几何与变形信息，对 PS-InSAR 的相关处理流程进行优化，实现桥梁变形时间序列的准确求解。首先介绍干涉测量的基本原理，根据 InSAR 干涉几何介绍了 InSAR 技术测量变形的的基础。然后对 D-InSAR 和 PS-InSAR 技术流程分别进行介绍，重点介绍了 D-InSAR 处理过程中的一些关键步骤，并对比 D-InSAR 和 PS-InSAR 技术的各自优势，验证 PS-InSAR 技术更适用于桥梁长期变形观测。最后，对现有 PS-InSAR 技术监测桥梁形变的相关处理流程进行改进，在 PS-InSAR 技术的影像选取、PS 点选取、干涉模型建立与参数估计以及桥梁温度的选取中融入桥梁结构的几何与变形信息，提出了一种更加准确且适用于桥梁变形观测的 PS-InSAR 方法。

2.2 星载 InSAR 基本理论

2.2.1 InSAR 干涉几何原理

InSAR 技术源于 Thomas Young 的“杨氏双缝干涉实验”。如图 2.1 所示，点光源发射的光波经过两个狭缝，通过不同的传播距离后光波的相位不一致。在白板上的同一位置会产生波的增强或减弱，形成明暗交替的条纹，即干涉条纹。这种现象实际上是两个光波存在相位差异，而经过两个狭缝光波的传播距离与对应的相位差成正比，如式(2.1)所示：

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (d_{M_2N} - d_{M_1N}) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.1)$$

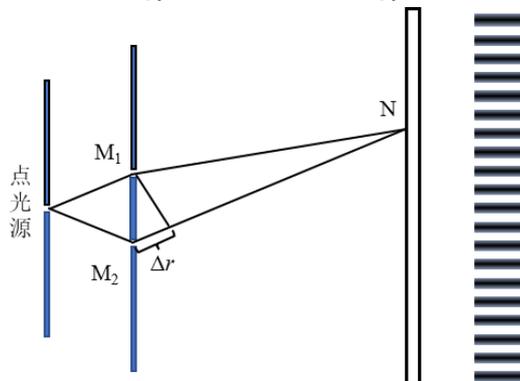


图 2.1 杨氏双缝干涉实验示意图

雷达卫星主动发射和接收与地物相互作用的电磁波信号，将包含地物散射信息的回波信号以复数的形式储存在 SAR 影像中，复数信息中不仅包含地面目标的辐射强度，还含有与斜距（雷达到地表目标距离）有关的相位^[93]。图 2.2 表示卫

星在轻微偏差轨道上对地面同一目标两次成像的几何示意图，一定时间间隔内具有轻微轨道偏离的雷达卫星获取的两幅 SAR 影像形成一个干涉对（一幅为主影像，一幅为副影像），其中两个不同位置的 SAR 卫星就如图 2.1 中对应的双缝，因此对干涉对中同一像素点进行差分处理，即可获得包含该像素对应目标的高程或形变信息。

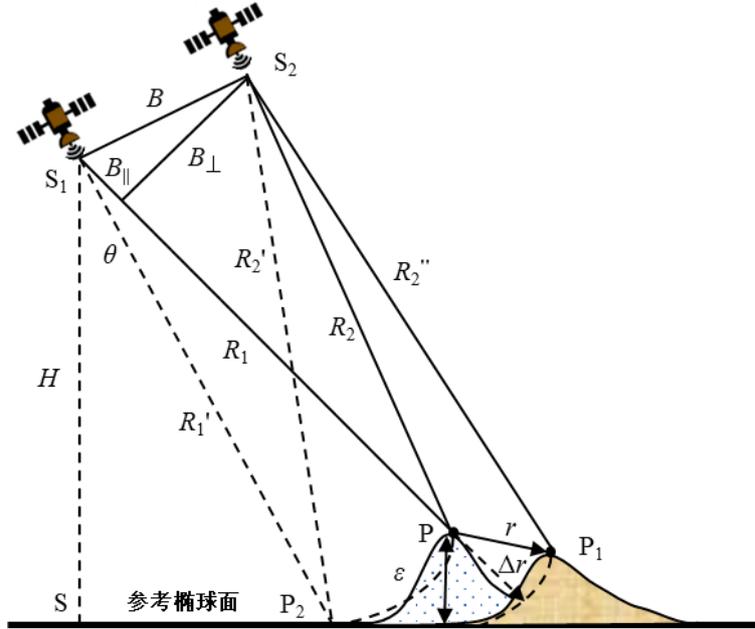


图 2.2 InSAR 干涉几何

图 2.2 中 S_1, S_2 是两次雷达传感器分别向地面目标 P 发射并接受信号的位置， S 是卫星观测位置在地面的投影。 R_1 和 R_2 分别表示 S_1 和 S_2 位置成像时目标点 P 到卫星的斜距， P_1 为 P 点发生变形后的位置， P_2 为 P 点在参考椭球面（大地标高为零的面）的投影。 R_1' 和 R_2' 分别为 S_1 到参考椭球面的距离， R_2'' 为 S_2 到变形后位置 P_1 的距离。 B 为干涉空间基线即两次成像时卫星的空间距离， B_{\parallel} 和 B_{\perp} 分别表示空间基线在沿着雷达观测的视线向和垂直于视线向的投影长度。 θ 为卫星观测的侧视角， r 为 P 点到 P_1 点的变形， ϵ 为 P 点与参考椭球平面的高程差， Δr 为 r 在卫星视线向的投影。如果两次卫星观测是同时进行，即地表散射特性没有改变。由式(2.1)可得，目标 P 对应回波信号的相位差即干涉相位与斜距差的关系如式 2-2 所示。

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (d_{S_2 P_2} - d_{S_1 P_1}) = \frac{4\pi}{\lambda} (R_2 - R_1) \quad (2.2)$$

式中 λ 为卫星发射雷达波的波长。

根据干涉几何图像可知，斜距差受到目标点的空间位置（选取的参考面，目标点相较于参考面的位置）影响。而且两次干涉并非同时进行，在两次观测期间目标可能发生变形，并且大气状况的变化也会产生大气延迟。因此斜距差是由参

考椭球面，地形起伏，大气效应和地表形变等因素共同贡献所产生^[94]。其表达式如式(2.3)所示：

$$\varphi = \varphi_{\text{ref}} + \varphi_{\text{top}} + \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{nosie}} \quad (2.3)$$

φ_{ref} 为参考椭球相位，是由于两次观测时雷达相对目标的空间位置不同，对应目标在参考椭球面投影的位置不同所引起干涉相位，其与 B_{\parallel} 成正比，如式(2.4)所示：

$$\varphi_{\text{ref}} = \frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} \quad (2.4)$$

φ_{top} 为地形相位，是由于目标不在参考椭球面而在地球表面，与参考椭球面存在 ε 的高程差所引起干涉相位，其与 B_{\perp} 成正比，如式(2.5)所示：

$$\varphi_{\text{top}} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \varepsilon}{R_1 \sin \theta} \quad (2.5)$$

φ_{def} 为形变相位，是由于两次观测期间目标发生了变形 r 所引起干涉相位，SAR 侧视成像的原理导致形变相位与真实变形 r 在视线向的投影 Δr 成正比，如式(2.6)所示：

$$\varphi_{\text{def}} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r \quad (2.6)$$

由上式可知，当地表目标发生变形并且方向与视线向不垂直时，在干涉相位中能够探测到该变形信号的存在。并且测量的灵敏度与对应雷达的信号波段波长有关。波长越短，精度越高。 φ_{atm} 为大气相位，是由于两次成像期间大气状况发生变化引起的干涉相位。 φ_{nosie} 是噪声相位，是由于多普勒频移和系统热噪声引起的干涉相位。

2.2.2 D-InSAR 变形测量技术

通过对 InSAR 干涉相位的分析可知，干涉相位由参考椭球相位、地形相位、形变相位、大气相位以及噪音构成。在实际的干涉相位中，前三者是干涉相位的主要组成部分。因此 D-InSAR 技术就是通过去除干涉相位中的参考椭球相位和地形相位，分离出形变相位，从而获取目标形变信息，大气相位一般被忽略或者利用外部数据去除^[40]。技术流程如图 2.3 所示：

经典的 D-InSAR 处理方法包括两轨+外部 DEM 法、三轨法以及四轨法。两轨法利用外部 DEM 反演地形条纹去除地形相位，后面两者都是通过引入地形影像对干涉处理生成 DEM，进而去除地形相位。地形影像对对时间基线要求比较严格，因为如果主副影像的时间间隔过长，对应影像区域产生变形可能性越大，从而不能确保干涉相位中没有形变分量。三轨法与四轨法的区别在于形变影像对与地形

影像对的干涉主影像是否一致。

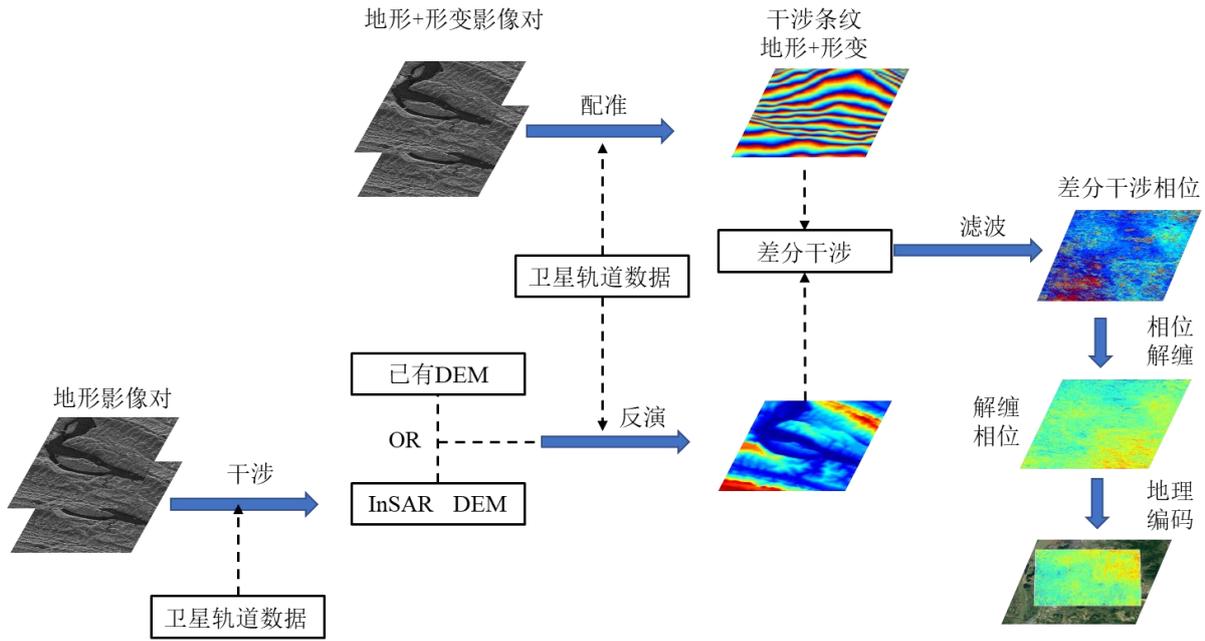


图 2.3 D-InSAR 技术流程图

D-InSAR 变形测量的关键技术包括影像配准、干涉图滤波以及相位解缠。

1. 影像配准

卫星沿重复轨道获取同一区域 SAR 影像时，受到时空定位以及飞行轨道的影响，同名像点对坐标会发生偏移。影像配准是计算构成干涉对的两幅 SAR 影像同名点的坐标映射关系，将副影像按照映射关系采样为与主影像相同的像素网格，使同名点对应于同一分辨单元^[95]。影像配准的方法可以分为三类：基于灰度的配准方法、基于特征的配准方法及基于深度学习的配准方法。

2. 干涉滤波

干涉相位受 SAR 系统固有斑点噪声和时空失相关等因素的干扰，表现为干涉条纹不连续和周期性不明显，严重影响后续相位解缠精度。相位滤波利用滤波削弱噪声，提高相位的连续性，分为前置滤波和后置滤波。

前置滤波是针对原始的单视复数影像进行距离向滤波和方位向滤波。干涉成像时 SAR 传感器的入射角不同导致距离向回波信号产生频谱位移，重叠部分包含了相位信息，距离向滤波是对非重叠部分（噪声）进行带通滤波^[96]。方位向上，雷达视角以及轨道差异引起 SAR 影像多普勒频移，带来干涉噪声。方位向滤波是按成像时的固定多普勒中心频率标准值或按成像后的平均多普勒中心频率进行复数影像滤波，消除非重叠的频率分量^[97]。后置滤波针对由于基线失相关、噪声以及数据处理误差导致干涉图信噪比较低的情况，根据干涉相位的形态特征滤除噪声，在干涉相位滤波中起主导作用，主要分为空间阈值滤波、局部统计自适应滤

波、形态学滤波和多尺度滤波。

3. 相位解缠

差分干涉图中记录的相位是周期缠绕于 $[-\pi, \pi]$ 区间的相位主值，与真实相位间存在 $2k\pi$ （ k 为整数）的差异。基于 Nyquist 采样定理，假设缠绕相位连续，即相邻缠绕相位差值在 $[-\pi, \pi]$ 以内，然后恢复差分干涉图中相位主值缠绕于 $[-\pi, \pi]$ 的整周相位模糊度个数，获取地表目标的真实变形量的过程成为相位解缠^[98]。相位解缠方法可以分为基于路径跟踪的相位解缠算法^[99]、基于最小范数的相位解缠算法^[100]、网络流算法^[101]、基于卡尔曼滤波的相位解缠算法^[102]以及基于深度学习的相位解缠算法^[103]。

D-InSAR 技术是对 SAR 影像全局求解，精确求解地表形变对差分干涉图信噪比要求较高。如果形成干涉图的影像对时间基线或空间基线较长，或者成像间隔期间的大气效应无法准确估计去除。那么地表形变探测的精度和可靠度都会明显降低，其中大气延迟更是可能造成形变探测结果完全失真^[104]。在 InSAR 数据处理过程中，相关学者发现 SAR 影像中存在一些像素点在较大的时空基线上对应的相干性依旧很强，这些像素点对应的是人工目标（房屋建筑、堤坝桥梁等地表构筑物），从 SAR 影像中筛选出这些强相关像素进行相位建模和形变解算，能够有效避免基线过长的影响，从而使得形变探测的精准度和可靠度^[105]。正是以此为基础，发展了针对 SAR 影像中部分点目标的进行形变探测的 PS-InSAR 技术。

2.2.3 PS-InSAR 变形测量技术

PS-InSAR 技术的核心思想是：利用同一地区不同时间段所获取的多幅 SAR 影像（即影像时间序列），通过统计分析的方法探测出成像区域内相关性较高的像素点目标（即稳定的永久散射体），然后基于这些永久散射体的干涉相位进行建模分析，从干涉相位中分离出形变和大气相位。具体流程如图 2.4 所示。

与 D-InSAR 技术相比，PS-InSAR 技术具有明显的区别。

（1）数据处理对象选取。PS-InSAR 只从监测区域中具有稳定散射特性的像素点（即 PS 点^[46]）中提取信号，而 DInSAR 对整个监测区域影像上的所有像素点进行的操作。SAR 影像的相干性是变形求解准确的关键，相干性越低，误差越大。甚至会导致无法进行相位解缠，从而无法获取地表目标变形。显然，在部分点上保证高相干性比在整个表面上保持高相干性更容易。

（2）影像基线要求。D-InSAR 对空间基线要求较高，一般需要基线较短的干涉图。同时也对时间基线有限制，特别是在植被覆盖的地区，长时间基线会导致严重的去相关现象^[42]。PS-InSAR 可以利用监测区域内的许多 SAR 图像，对时空

基线的限制比 DInSAR 小得多。

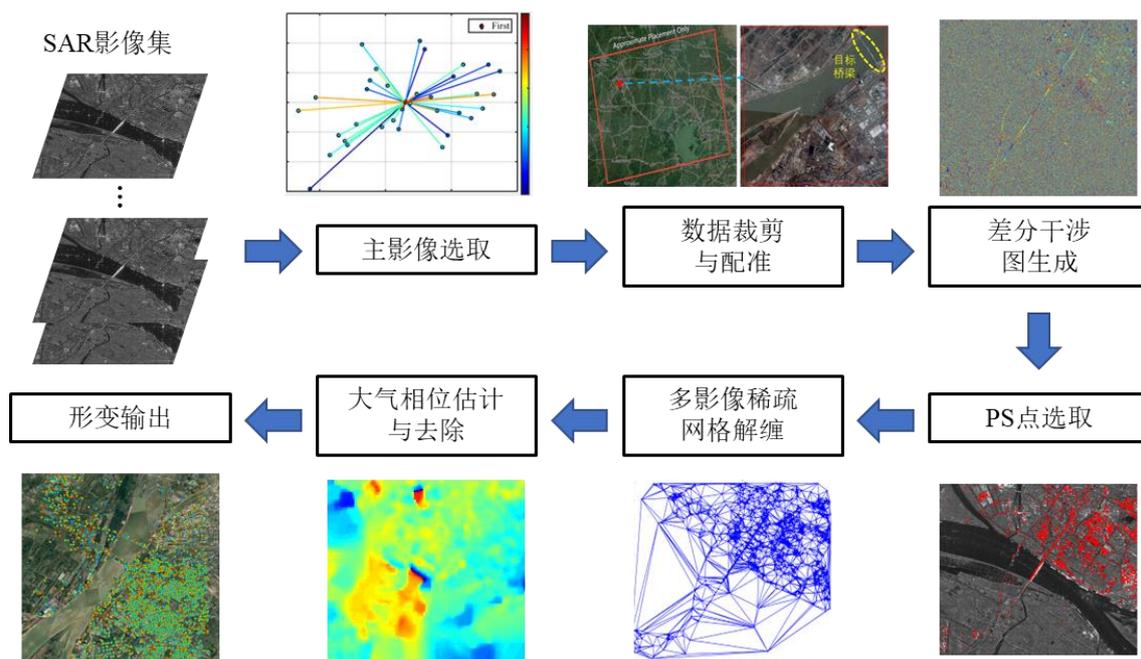


图 2.4 PS-InSAR 技术流程图

(3) 大气相位处理。基于大气传播信号的统计特性，PS-InSAR 技术可以在很大程度上缓解大气传播时延^[106]的影响，并且能够从干涉相位中分离出大气相位。而 D-InSAR 一般无法准确估计大气相位^[107]，通常都是忽略大气效应的影响。因此变形相位中含有大气成分，导致变形不能够准确估计。

(4) DEM 选取要求。PS-InSAR 可以使用粗精度的 DEM 作为参考 DEM，因为在变形求解过程中会对 PS 点高程进行计算，而 DEM 精度对 D-InSAR 处理影响较大，特别是空间基线较长时，需要高精度 DEM 才能保证结果的准确性。

(5) 影像数量要求。D-InSAR 技术对影像数量要求不高，只需要同一地区的两幅影像就能进行 D-InSAR 处理，而 PS-InSAR 需要大量的同一区域在不同时间的 SAR 图像（一般大于 20 幅），因为变形求解的准确性需要数据的冗余量来保证。

相较于 D-InSAR 技术，PS-InSAR 技术的变形测量受到的限制很少，获取得到的变形监测结果精度更高。因此 PS-InSAR 技术在长期缓慢变形监测领域有着广泛应用，比如地下水开采因此的城市地表沉降^[108]、大面积的滑坡^[109]。甚至在工程形变监测，例如高铁或公路沿线沉降^[110,111]。

2.3 改进的桥梁 PS-InSAR 方法

PS-InSAR 方法在长期形变监测具有无可比拟的优势，部分学者在大范围的城

市变形监测中发现可以利用它对城市大型基础设施进行监测，包括高层建筑，桥梁等。桥梁的变形是由其本身结构特征和所受荷载作用共同决定的，因此提出结合桥梁结构几何与变形的信息，对现有桥梁 PS-InSAR 技术提出改进。下文从 PS-InSAR 技术的影像选取、PS 点选取、干涉相位参数模型建立与参数估计以及桥梁温度输入四个方面进行改进，提高 PS-InSAR 技术监测大跨桥梁长期变形的准确性。

2.3.1 影像选取

SAR 卫星侧视成像的方法使得时序 InSAR 技术观测获取的变形是沿 LOS 向的一维变形，即地表目标的实际空间三维变形在视线向的投影。图 2.5a)所示为卫星空间几何观测图，其中 P 点为观测目标，可以得到雷达观测的视线向变形与 P 点的真实空间三维变形的关系如式(2.7)所示：

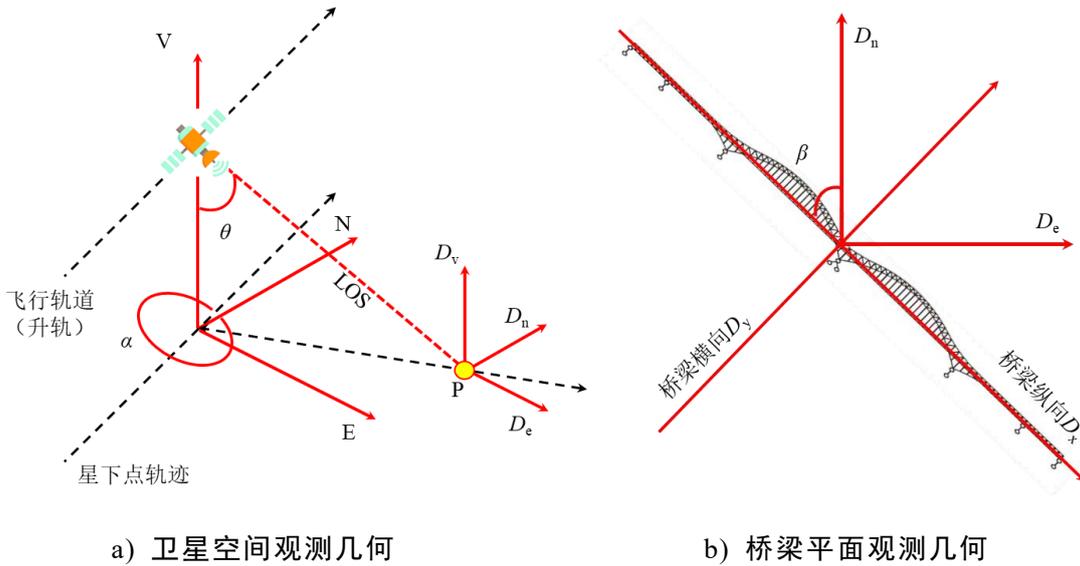


图 2.5 卫星几何观测图

$$D_{LOS} = D_v \cdot \cos \theta + D_n \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha - D_e \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha \quad (2.7)$$

其中 D_v 为竖向变形， D_n 为南北方向变形， D_e 为东西方向变形， θ 为侧视角， α 为航向角。现有 SAR 卫星的运行轨道一般与经线成 10° 左右的夹角，即卫星的航向角约为 350° （升轨）或 190° （降轨），雷达侧视角一般在 $20\sim 45^\circ$ 之间，由式(2.7)计算可得 LOS 观测结果对垂直向、南北向和东西向变形的敏感度区间分别为 $[0.71, 0.94]$ 、 $[0.06, 0.12]$ 和 $[0.34, 0.70]$ 。显然，对于南北向变形的敏感度最低，对应估算精度也是最低。

图 2.5b)为桥梁平面观测几何图，可得桥梁的三维变形和 LOS 变形之间的关系如式(2.8)所示：

$$D_{\text{LOS}} = D_z \cdot \cos \theta - D_x \cdot \sin \theta \cdot \sin(\alpha + \beta) - D_y \cdot \sin \theta \cdot \cos(\alpha + \beta) \quad (2.8)$$

其中 D_x 为纵向变形, D_y 为横向变形, D_z 为竖向变形。

大跨桥梁的变形特征主要受到桥梁支座的影响, 不同支座约束形式的桥梁变形特征也不一致。当桥梁跨间设有伸缩缝时, 对应支座为活动支座, 可将桥梁简化为简支梁。变形如图 2.6a) 所示, 该情况下纵向变形 D_x 为桥梁变形的主要部分。如果桥梁走向为南北向, 甚至是卫星轨迹方向平行, 即 $\alpha + \beta = 180^\circ$, 此时 D_x 敏感度接近于 0, 即 SAR 卫星探测到桥梁的变形误差很大。当桥梁跨间没有伸缩缝时, 对应支座为固定支座, 可将桥梁简化为两端固定梁。变形如图 2.6b) 所示, 该情况下纵向变形 D_y 为桥梁变形的主要部分。此时变形敏感度只与卫星侧视角有关, 桥梁走向对桥梁真实变形探测精度几乎没有影响。

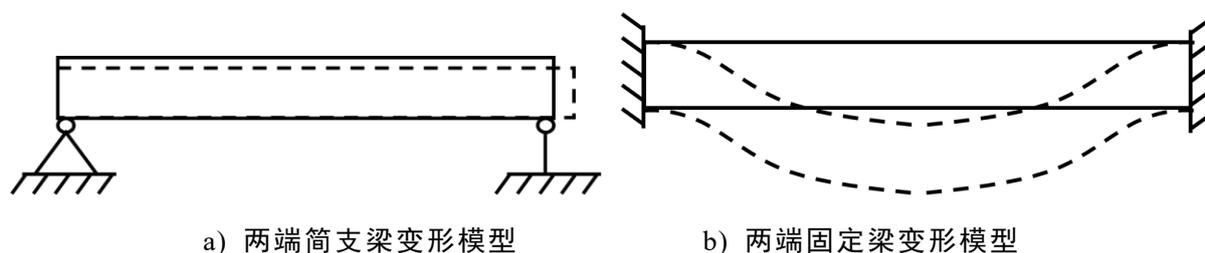


图 2.6 桥梁简化变形模型

因此, 在选取对大跨桥梁长期变形监测的时间序列影像数据时, 首先需要根据桥梁结构方式来判定其变形特征, 确定桥梁结构主要变形方向。进一步评估利用该影像序列观测时, 桥梁走向对变形观测敏感度产生影响的大小, 从而判定选取影像的适用性, 有效避免由于 SAR 卫星成像几何参数引起的变形测量精度下降。

2.3.2 PS 点选取

PS-InSAR 技术的核心是选取 SAR 影像中散射特征长期稳定的像元点集, 即 PS 点集。这类点的干涉相位比较稳定, 相干性不受干涉影像对时空基线长度的影响, 所以表现出的信息具有可靠性, 能够反映地表目标的真实运动状态。常用的 PS 点选取方法有时序相关系数阈值法、相位离差阈值法以及振幅离差阈值法^[112]。

(1) 时序相关系数阈值法认为后向散射特征越稳定, 对应干涉对中的干涉相干性越高, 对应信噪比越高。理论上一般采用相关系数 γ 来对评价干涉相位的噪音程度。如式(2.9)所示:

$$\gamma = \frac{|\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n M(i, j) \cdot S^*(i, j)|}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |M(i, j)|^2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |S^*(i, j)|^2}} \quad (2.9)$$

其中 M 和 S 分别代表主、副影像的复数信息， m 、 n 分别表示计算窗口的大小，绝对值表示数学期望， $*$ 表示复数的共轭算子。

利用该方法采用较低阈值就能过滤掉失相干严重的像元，可以大幅提升计算效率。相关系数采用移动局部窗口计算，窗口尺寸越大，虽然可靠性越高，但是可能会导致孤立 PS 点无法被检测，或者误将真实 PS 点相邻像素判定为 PS 点；窗口尺寸过小，可靠性又难以保证。此外，选取阈值的大小也会导致 PS 点的误判和可靠性降低。最后，由于干涉相位中除了噪音，还存在地形、形变以及大气相位，因此对于某些像素并不能依靠相干系数来反映实际相干性。

(2) 相位离差阈值法认为回波相位在时间序列上的稳定性能够代表目标散射特性的稳定性，而回波相位的稳定性表现为在时间序列上具有一定统计特性，一般采用相位离差 D_v 表示，如式(2.10)：

$$D_v(i, j) = \frac{std[\varphi(i, j)]}{mean[\varphi(i, j)]} \quad (2.10)$$

式中 $\varphi(i, j)$ 表示某个像素点的相位时序， std 表示标准差， $mean$ 表示均值。

相位离差方法计算简单，不会受到相邻像素的影响。但是由于回波相位未去除大气相位、噪声以及失相关相位，难以保证 PS 点可靠性；并且回波相位记录的是缠绕相位的主值（即真实相位去掉 $2k\pi$ ），对应相位在时间序列上是一个随机序列，因此相位离差指数的大小也不一定能真实反应散射特征的稳定性。

(3) 振幅离差阈值法针对相位噪声难以直接获取的问题，提出利用振幅的时序稳定性来对相位噪声进行衡量。这是由于 SAR 影像中信号都是以复数形式储存，对应振幅和相位都与复数的实数和虚数部分有关系，在低信噪比情况下，相位标准差和与振幅标准差存在一个比例关系，即相位标准差等于振幅标准差除以振幅均值，因此可以通过时序振幅离差系数 D_A 来选取出散射特征稳定的 PS 点。如式(2.11)所示：

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A} \quad (2.11)$$

式中 σ_A 表示时序振幅标准差， m_A 表示时序振幅均值。

通过振幅离差阈值来等价衡量相位噪声水平，能够有效避免直接求解相位离差所存在的问题。但是由于相位标准差和振幅离差仅在噪声水平较低的情况下相

等，随着噪声水平的增大，两者偏差越来越大，因此在较阈值情况下选中稳定的 PS 点，忽略部分真实 PS 点，而在较高阈值下又会选择许多非真实 PS 点。

上述常用的 PS 点选取方法都不能很好的权衡 PS 点的数量和质量之间的矛盾，并且没有一个确定的手段来衡量 PS 点的真实有效性。此外大跨桥梁结构比较复杂，而且大多数都横跨水域，再加上雷达侧视成像的影响，对应后向散射特征也比较复杂，如下图 2.7 所示。

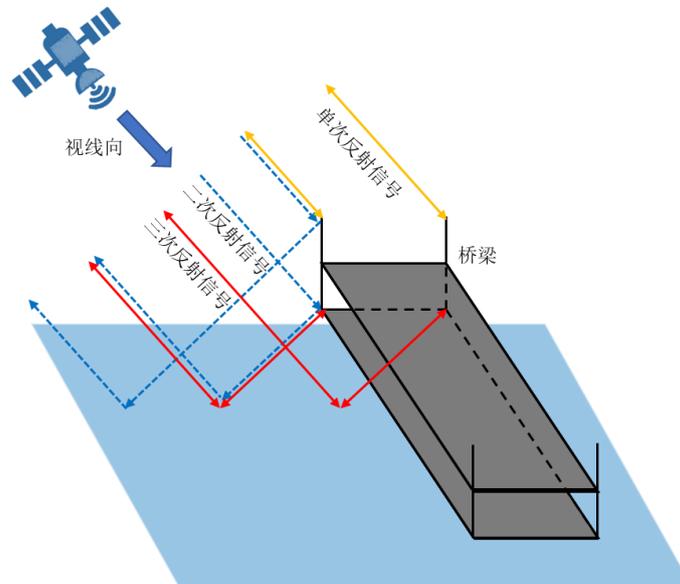


图 2.7 桥梁复杂散射特性

从 SAR 卫星发射出的信号经过桥梁后会出现三种反射信号。第一种是称之为单次反射信号，雷达卫星发射信号射在桥面结构后直接返回。这类信号能够反映桥梁真实形变信息，属于桥梁 SAR 影像解译的有效信号。第二种称为二次反射信号，这类信号从桥梁侧面反射到水中，再返回被接收。第三种称为三次反射信号，经水面反射到桥底，再经桥底反射到水面，最后反射回卫星被接收。显然后面两类信号中并不能反映桥梁真实变形信息，属于需要剔除无效信号^[113]。三种信号在强度影像中的分布如图 2.8 所示。单次反射信号为黄色虚线位置，其位置几乎跟桥梁重合，在强度影像中为中间亮度。二次反射信号为蓝色虚线位置，在强度影像中亮度最高。三次反射信号为红色虚线位置，在强度影像中亮度最为微弱。

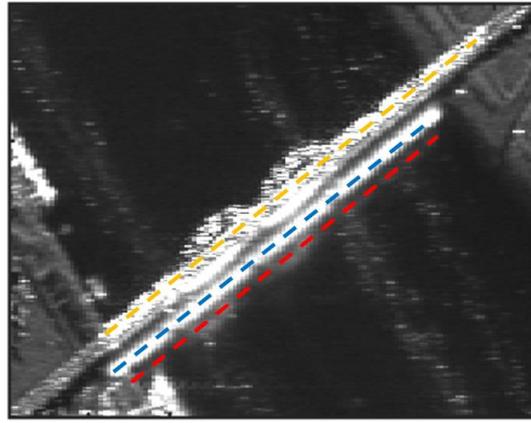


图 2.8 桥梁散射信号分布

对于大跨桥梁的 PS 点选取，既要满足 PS 点数量足够多，保证能够全面的识别全桥的变形特征。又要满足 PS 点质量足够好，保证得到的桥梁变形信息准确。因此本文采用多重阈值的方法选取 PS 点，再根据 SAR 影像中不同散射号的分布剔除掉无效 PS 点，最后再根据桥梁的几何信息来进行异常点的去除，从而使得识别的 PS 点在数量和质量上都有保证。

具体步骤如图 2.9 所示：首先采用适中的振幅离差阈值进行初筛，可以发现虽然候选点数量很多，但是在水体中也分布了许多点。然后根据时序相关系数和相位稳定系数剔除分布在水体中和相干性较差的候选点；随后根据候选点在强度影像中所处区域剔除不能反映桥梁真实变形的多次散射信号，得到精确筛选后的 PS 点。对剩下点采取 PS-InSAR 处理，根据得到结果中 PS 点的高程和桥梁真实几何信息对比，剔除掉高程异常点，最后获得大量能够反映真实桥梁形变特征的 PS 点。

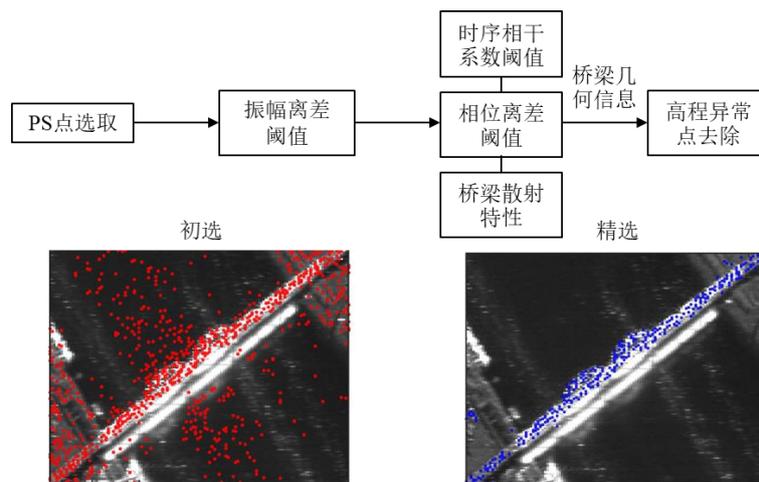


图 2.9 桥梁 PS 点选取

2.3.3 干涉相位参数模型建立和参数估计

不同时刻雷达卫星对地面同一目标发出信号波，接收得到回波信号的相位差

就是干涉相位。由式(2.3)可知，干涉相位中包含参考椭球相位、地形相位、形变相位、大气相位以及噪音相位。其中参考椭球相位通过卫星轨道适量状态和卫星干涉测量几何消除。地形相位通过已有的 DEM 数据和卫星轨道状态适量部分消除，由于 DEM 存在高程误差，所以消除地形相位后还会存在高程残差相位。为了合理的差分干涉相位模型是能够获取目标准确变形的关键。传统 PS-InSAR 技术变形监测模型都是采用线性变形模型，利用卫星精密轨道数据和研究区域的 DEM 模型去除掉地形相位和参考椭球相位。PS 点的差分干涉相位模型包含线性变形、高程残差以及残余相位^[112]，如式(2.12)所示：

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t \cdot v + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B \cdot \varepsilon + \varphi_{res} \quad (2.12)$$

其中： λ 为雷达波长， R 为雷达到地面目标的斜距， θ 为雷达入射角； B 为垂直基线； ε 为 DEM 高程误差； t 为时间基线； v 为沿 LOS 方向的线性形变速率； φ_{res} 为是 PS 点的残余相位，它包括非线性变形、大气相位和噪音。

为了准确估计干涉相位模型中的参数，对 PS 点构成的 denaunlay 三角网络中连线的两个 PS 点进行二次差分干涉，得到二次差分干涉模型表达式如式(2.13)所示。

$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t \Delta v + \frac{4\pi}{\lambda \bar{R} \sin \bar{\theta}} \bar{B} \Delta \varepsilon + \Delta \varphi_{res} \quad (2.13)$$

其中 \bar{R} 、 \bar{B} 、 $\bar{\theta}$ 分别为相邻 PS 对应参数的平均值， Δv 、 $\Delta \varepsilon$ 则表示相邻 PS 点线性变形速率差值和高程残差差值， $\Delta \varphi_{res}$ 表示相邻 PS 点的残余相位差值。

由于大气相位在空间上有较强的相关性，相邻 PS 点的连线长度越短，空间距离就越近，对应大气相位也会越相似。相关研究表明当相邻 PS 点的距离在一定范围（1km）内时，两者大气相位之间测差值很小，甚至可以忽略不计。此外，地表形变也具有较高的空间自相关性，在空间上形变一般呈现出连续性，因此相邻 PS 点之间的非线性变形差值被认为是一个微小量。最后，PS 点本身具有稳定的后向散射特性，不受时间失相关和空间失相关的影响，所以相邻 PS 点的噪声差值也是一个极小量。综上可知残差相位本身是个微小量，因此认为 $|\Delta \varphi_{res}| < \pi$ ^[46,106]。

在 $|\Delta \varphi_{res}| < \pi$ 的情况下， Δv 、 $\Delta \varepsilon$ 的估计就变成了一个优化处理过程。使得如式(2.14)的目标函数最大对应的 Δv 、 $\Delta \varepsilon$ 即为最优解。

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(j\Delta\psi_{obs}^i - \Delta\psi_m^i(\Delta v, \Delta \varepsilon)) \quad (2.14)$$

其中 γ 为模型相干系数， $\Delta\psi_{obs}^i$ 为观测相位差， $\Delta\psi_m^i$ 为拟合值， N 为 PS 点数。通过参数估计获取线性变形相位和高程残差相位，从而求得包含大气相位、

非线性形变相位以及噪音的残余相位。根据噪音在时间和空间上表现出很强的随机性，具有高频特性；非线性形变和大气相位在空间上具有较强的相关性，空间上具有低频特性，但在时间上，非线性形变相对平稳，属于低频信号，而大气相位受到许多因素影响，属于高频信号，利用三者时空上的频率特性能够将非线性形变有效分离，并比较准确的估计大气相位^[43,106]。

通过相位解缠分离大气相位获取准确形变相位的前提是干涉相位的模型和参数估计是否准确。由于大跨桥梁长期缓慢变形主要表现为非线性，并且与温度具有很强的相关性。此外，大跨桥梁结构存在高耸的部位，例如斜拉桥的主塔。与地表的高程之间会存在较大的高程差。因此在利用 InSAR 技术对桥梁变形进行观测时，需要考虑温度以及高程残差对干涉相位的影响，在干涉模型中引入了热膨胀参数和高程误差。得到干涉相位的参数模型如式(2.15) 所示：

$$\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t \cdot v + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B \cdot \varepsilon + \frac{4\pi}{\lambda} T \cdot k + \varphi_{res} \quad (2.15)$$

其中 T 为两幅影像之间温度变化值， k 为热膨胀系数。

对应的相邻 PS 点的二次差分干涉相位模型以及目标函数如式(2.16)和(2.17) 所示：

$$\Delta\psi = \frac{4\pi}{\lambda} t \Delta v + \frac{4\pi}{\lambda R \sin \theta} B \Delta \varepsilon + \frac{4\pi}{\lambda} T \Delta k + \Delta\varphi_{res} \quad (2.16)$$

$$\gamma = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \exp(j\Delta\psi_{obs}^i - \Delta\psi_m^i(\Delta v, \Delta \varepsilon, \Delta k)) \quad (2.17)$$

其中 Δk 为相邻 PS 点的热膨胀参数之差。

参数估计是个优化过程，需要预先给出参数的解空间，即参数选取范围。通过在解空间中寻找 PS 点连接网络基线估计参数的增量 Δv 、 $\Delta \varepsilon$ 、 Δk 的解，使得 γ 取最大值。然后选取一个认为估计参数都为零的 PS 点为参考点，采用区域网最小二乘平差法获取各 PS 点相对于参考点的参数估计值。

基于相干系数的优化问题对预先给出的参数解空间上下限具有很强的依赖性，相关系数最大对应的参数估计值并不一定是全局最优解。传统 InSAR 监测在进行大范围形变监测时，一般根据经验选取一个较大范围进行参数估计，对应解空间边界比较模糊，可能会存在误差。但进行桥梁变形监测时，通过对桥梁的相关文献进行调研，可以获取桥梁的几何与结构变形的信息。然后通过裁剪影像至合适的尺寸大小，从而根据桥梁几何和结构变形信息可以确定合理的参数估计范围，获取准确的参数增量估计值。

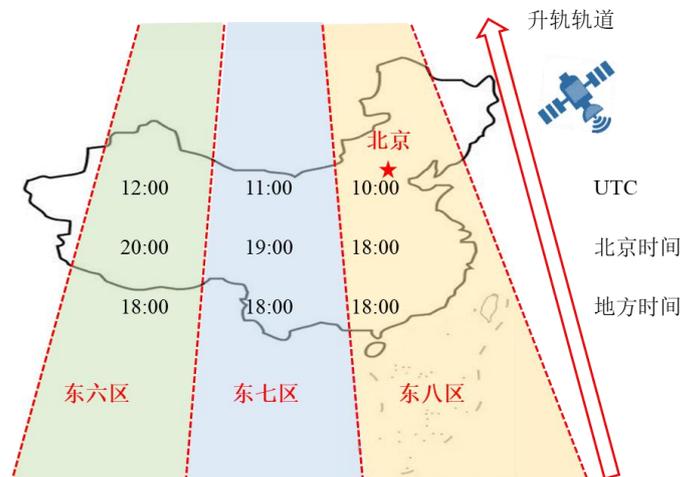
根据桥梁变形特性可以挑选出影像范围内变形较小位置处的 PS 点为参考点，

从而获取相对于参考点的参数估计值和桥梁结构真实值之间的误差最小。并且还可以根据 PS 点参数估计的空间分布特征与桥梁真实几何与结构变形特征的拟合程度来判断参数估计的准确性。

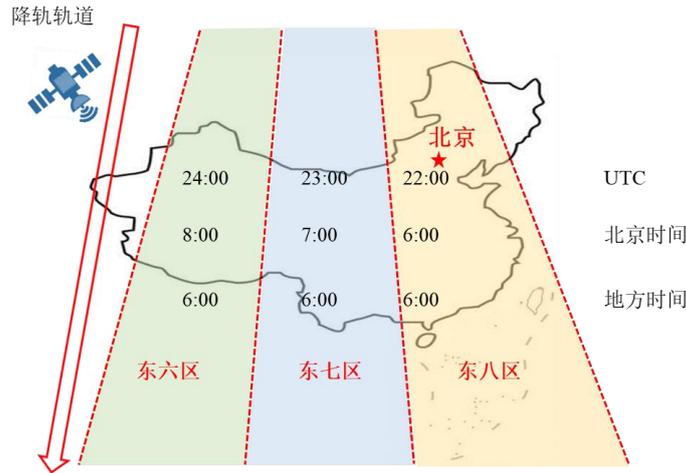
2.3.4 桥梁温度选取

热膨胀参数的准确估计需要有 SAR 影像成像时对应桥梁的温度信息。现阶段的研究都是采用大气平均温度来代替影像中所有 PS 点的温度。但是实际上，每天大气温度的变化波动较大，因此用大气平均气温作为温度代表值可能会产生一定误差。而且桥梁的温度场受到大气温度、太阳辐射、风速、湿度以及材料类型的影响^[114]，其真实分布呈现为非均匀特性。相关文献^[115-116]表明：沿桥梁纵向温度分布可假定均匀，不均匀性主要体现在桥梁横向和竖向。大量实测数据结果表明^[117-118]：下午 13:00~15:00，太阳辐射最强，温度分布不均匀程度最高。在日落和日出之前桥梁温度整体表现较为均匀。

对于本文采用 Sentinel-1 和 Cosmo-SkyMed 卫星数据，其数据拍摄记录的时间均为 UTC 时间（零时区对应时间）。我国的时区分布如图 2.10 所示，明显可以看出我国主要国土分布都位于东六区到东八区之间。从东八区到东六区，升轨数据拍摄时间为 UTC 时间 10 点-12 点，降轨数据拍摄时间为 UTC 时间 22 点-24 点。北京位于东八区，对应北京时间比 UTC 时间早了 8 个小时，因此升轨数据对应北京时间为 18 点-20 点，降轨数据对应北京时间 6 点-8 点。而东六区和东七区的地区时分别比北京时间晚一个和两个小时。所以升轨数据拍摄时的地方时对应都是各地地方时的 18 点左右，此时正值日落前后。而降轨数据拍摄时的地方时对应都是各地地方时的 6 点左右，此时正值日出前后。因此，可假设 SAR 影像拍摄时桥梁都处于均匀温度作用下。



a) 升轨数据



b) 降轨数据

图 2.10 SAR 卫星影像拍摄时间与国内地方时间关系

对于桥梁均匀温度作用的取值，大量学者进行了相关研究。通过对桥梁温度以及对应大气温度的实测数据分析，提出了基于气象参数进行均匀温度作用取值的经验公式，如表 2.1 所示。可以发现桥梁的均匀温度与实时的大气温度存在很强的线性关系，而且斜率近似等于 1。因此可以根据桥梁所在地的气象数据，获取成像时刻的大气温度，以此来模拟 SAR 影像时间序列上温度的变化值，较为准确的获取干涉对之间的温度差，使得干涉相位模型中热参数的估计更加精确，有效提高变形测量精度。

表 2.1 桥梁温度与大气温度关系

文献	温度作用	经验公式	主梁类型	符号说明
Chang ^[119]	均匀温度	$\Delta T_u = 1.03T_a + 0.681$	钢-混凝土组合箱梁	ΔT_u 为均匀温度； T_a 为环境温度； $\Delta T_{u,max}$, $\Delta T_{u,min}$ 为均匀温度最大值、最小值； $\Delta T_{a,max}$, $\Delta T_{a,min}$ 分别为日最高、最低气温； I 为太阳辐射总量。
Lucas ^[120-121]	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max} = T_{a,max} + 0.0017I$	扁平钢箱梁	
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min} = T_{a,min}$		
Abid ^[122]	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max} = 1.1T_{a,max} + 0.17$	混凝土箱梁	
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min} = 1.06T_{a,min} + 6.54$		
欧洲规范 ^[123]	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max} = T_{a,max} + 16$	钢梁	
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min} = T_{a,min} - 3$		
	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max} = T_{a,max} + 4$	钢-混凝土组合梁	
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min} = T_{a,min} + 4$		
	均匀温度最大值	$\Delta T_{u,max} = T_{a,max} + 2$	混凝土梁	
	均匀温度最小值	$\Delta T_{u,min} = T_{a,min} + 8$		

2.4 本章小结

本章介绍了基于 InSAR 技术测量变形的理论，对比了 D-InSAR 和 PS-InSAR

技术的优势，表明了 PS-InSAR 技术对于桥梁长期变形监测的适用性。然后针对现有 PS-InSAR 的不足之处，提出结合桥梁结构知识对于现有的 PS-InSAR 方法进行改进。主要改进如下：

（1）影像选取；结合桥梁走向和 SAR 卫星的测量几何，求解对应的 SAR 影像数据对桥梁真实变形的敏感度系数，根据主要变形敏感度系数的大小来判断选取影像对桥梁变形观测的适用性。

（2）PS 点选取；根据桥梁的复杂散射特征，对反射信号进行分类。结合多重阈值法对 PS 点进行筛选，去除不含桥梁变形的信息 PS 点。并根据桥梁的几何信息去除掉高程异常的 PS 点。

（3）干涉相位模型建立和参数估计；根据桥梁结构信息选取线性变形速率、高程误差以及热膨胀参数建立干涉相位方程，利用该信息确定参数估计的取值范围，选取变形较小的参考点以及判断参数估计的准确性。

（4）桥梁温度选取；根据卫星影像拍摄时间确定桥梁属于均匀温度场，利用桥梁温度和大气温度的线性关系，选取实时大气温度作为热膨胀参数估计时所需的温度信息。

第3章 研究桥梁和影像数据概况

3.1 引言

本章主要介绍了研究桥梁和卫星影像数据的相关信息。首先，通过对研究桥梁展开相关文献的调研，总结桥梁的几何结构外形尺寸参数、结构荷载类型、结构变形的长期变化特征以及主要影响因素，作为桥梁的结构信息辅助优化 SAR 影像数据的处理。然后，对选取进行桥梁变形观测的 Sentinel-1A (S1A)、COSMO-SkyMed (CSK) 卫星影像数据进行介绍。主要介绍了影像成像卫星的相关参数信息，并且结合利用文献调研获取的桥梁主要变形方向与卫星的几何观测参数，判断选取的影像数据是否适用于研究桥梁的变形观测。最后，通过影像成像时间确定桥梁温度与大气温度的关系。从开源气象数据网站上获取距离研究桥梁最近的机场气象温度数据，选取最接近卫星影像拍摄时刻的温度值，作为影像时间序列的温度变化时间序列，以准确的进行桥梁变形观测。

3.2 研究桥梁概况

本次研究桥梁位于我国江苏省南京市，是一座横跨长江的高速铁路桥梁。如图 3.1 所示。该桥梁共有六线铁路轨道，中间四线分别为京沪高速铁路双线和沪汉蓉高速铁路双线，两侧为南京市地铁 3 号线双线。建成时，是世界上跨度最大的高速铁路桥梁，同时也是世界首座六线铁路大桥，并且是世界上设计荷载最大的高速铁路桥梁。具有体量大、跨度大、荷载大、速度高“三大一高”的特点^[124]。

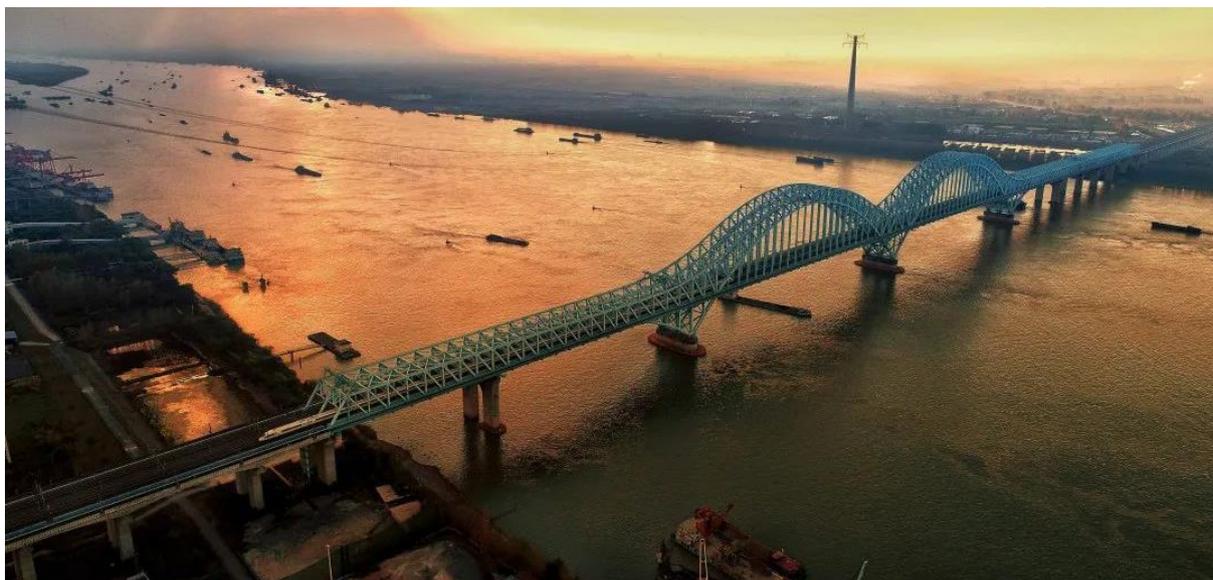


图 3.1 研究桥梁外观图^[125]

本研究所有的桥梁结构与几何变形信息，均通过对研究桥梁目前已经公开发表的中英文文献进行调研获取。

3.2.1 桥梁几何结构特征

研究桥梁主桥为六跨钢拱桥，其纵向几何尺寸如图 3.2 所示。主桥全长为 1272m，跨度布置为 108m+192m+336m+336m+192m+108m。桥梁全高 96.6m，#7 号位置处支座到桥面板底部高为 28.6m，两侧的钢桁架高 16m^[126]。

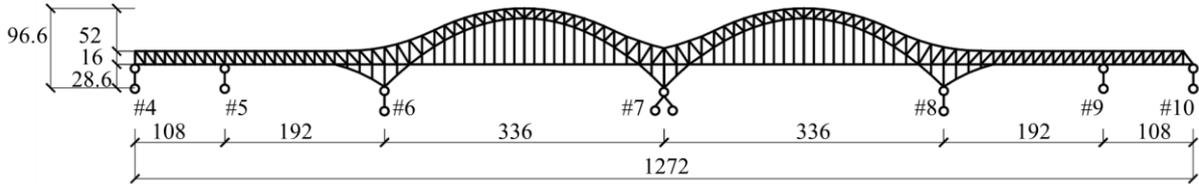


图 3.2 主桥纵向几何尺寸 (m)

桥梁横向几何尺寸如图 3.3 所示。3 根主桁架中心距 15.0m。桥面宽 41.6m，有 6 条轨道，其中包括时速 350km 的高速列车的两条轨道 (G1、G2)，时速 200km 客运的常规列车的两条轨道 (P1、P2)，时速 80 公里的城市地铁列车的两条轨道 (U1、U2)。地铁轨道位于悬臂甲板的两侧，宽度为 5.8m。高铁的高速运行需要保证铁路轨道的平顺性、稳定性以及可靠性，因此对主桥和桥面板要求较高。通过对比对纵、横梁桥面系，正交异性板整体桥面构造进行了比较分析，最终采用正交异性板整体钢桥面^[127]。

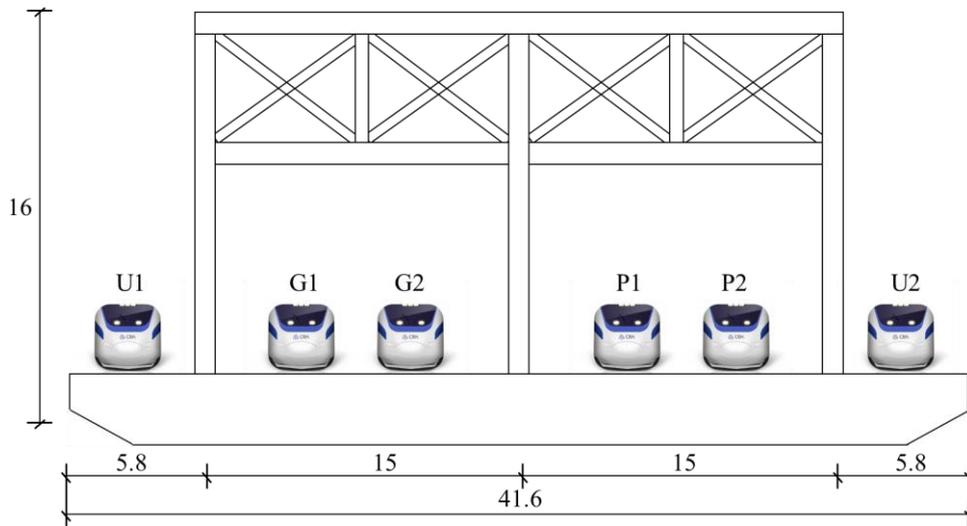


图 3.3 主桥横向几何尺寸 (m)

桥梁支座采用球面钢轴承，图中支座沿着横截面方向由上游、中间以及下游支座组成。在#7 位置，中间支座为在固定铰支座，上下游支座为活动支座，允许横向运动。在其他桥墩上，中间支座允许纵向运动，上下游支座允许纵向和横向运动。桥梁上部结构和支座形式沿桥梁纵向和#7 支座的横向对称。桥梁上部结构反力较大，为了保证基础的承载能力和稳定性，桥梁基础采用群桩深基础，如图

3.4 所示，其中最大桩长达到 99m^[128]。

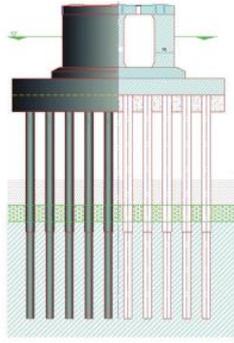


图 3.4 桥墩示意图^[128]

3.2.2 桥梁变形特征

研究对象作为一座高速铁路桥梁，上部结构对应荷载主要有列车运行荷载、温度作用以及风荷载等外界环境激励。结合桥梁结构特征，首先，采用群桩深基础，所以桥梁成桥沉降稳定后，支座竖向变形较小，几乎可以忽略。其次主体采用钢桁架结构、桥面板采用正交异性板整体桥面构造，支座横向产生的变形也较小。最后，支座中间固支，两侧可自由活动，因此支座能够发生纵向变形。综上所述，假定桥梁支座变形主要是纵向变形，横向和竖向变形都较小。

研究桥梁作为具有多项世界之最记录的桥梁，吸引了大量学者进行研究。为深入探究桥梁的结构变形特性，进行了相关文献调研^[129-132]。相关学者等人通过在研究桥梁上安装结构健康监测系统，获取#10 支座长期纵向变形如下图 3.5a)所示，并且根据该监测数据计算得到#10 相对横向变形如图 3.5b)所示。

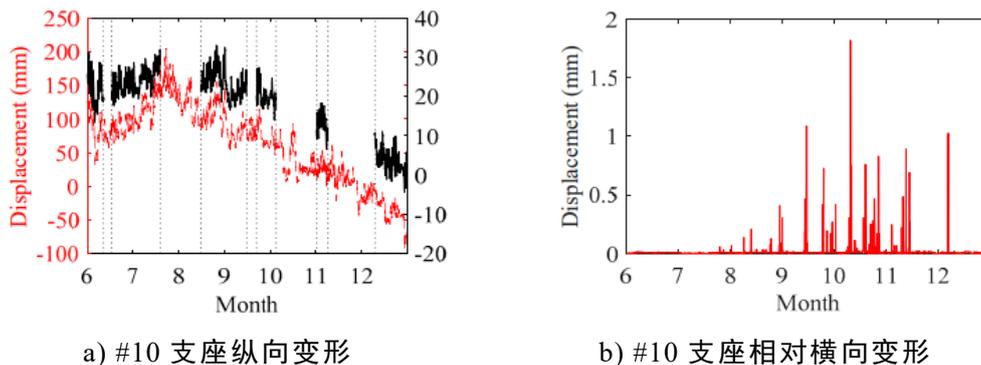


图 3.5 #10 支座长期形变时序^[129]

由于桥梁中间支座均不能在横向移动，因此#10 处支座相对横向变形即为上下游支座的绝对变形。由图 3.5 可知，支座横向变形相对纵向变形几乎可以忽略不计。因此可以假定支座变形主要是桥梁纵向变形。

列车荷载、温度作用以及外界环境激励是引起桥梁发生变形的因素，通过经验小波变换对桥梁支座纵向变形分解，获得得到各因素影响下的变形分量如图 3.6 所示。

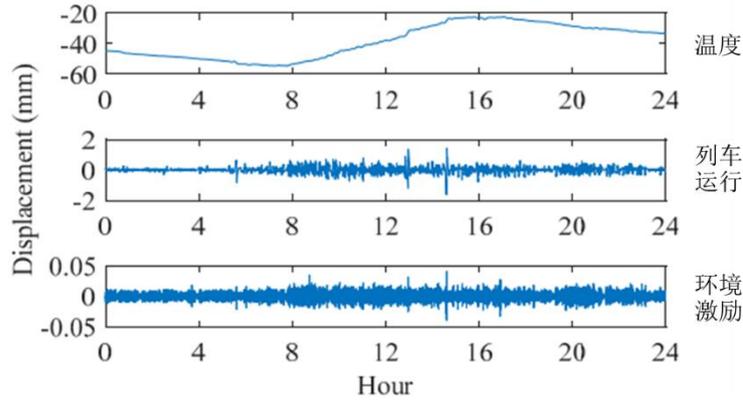
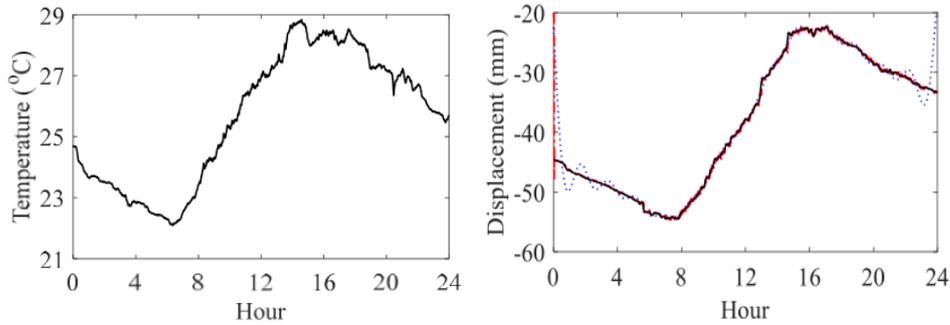


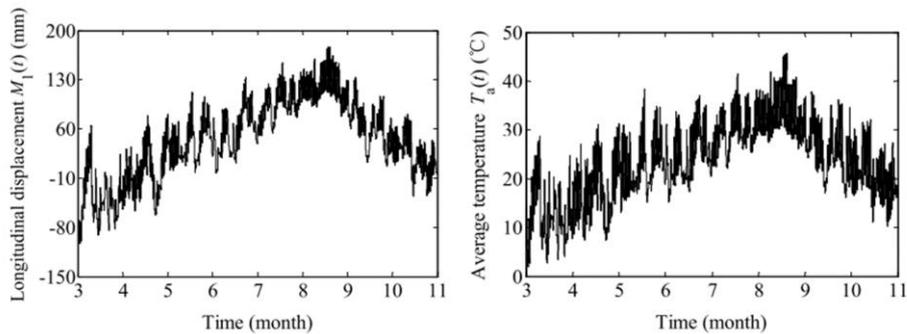
图 3.6 #10 支座长期纵向变形分量^[129]

由图 3.6 易知，相对于温度作用，一天内列车荷载和环境激励产生的变形幅度很小。并且后两者产生的变形属于可恢复的弹性变形，对应的荷载具有日周期性变化性。而温度变化不仅具有日周期性，还具有年周期性变化性。因此由于列车荷载和环境激励产生的支座变形相对于温度作用可以忽略不计，即支座长期纵向变形主要影响因素为温度。

为了进一步探究温度与支座纵向变形的关系，将结构平均温度与支座纵向变形对比如图 3.7 所示。易知支座纵向变形与结构平均温度的日变化均表现出周期性，长期变化表现出季节性，而且两者变化的趋势都呈现出良好的一致性。利用线性回归模型拟合支座纵向变形和结构平均温度如图 3.8 所示，两者的拟合优度达到 0.9537，因此支座纵向变形和结构平均温度具有很强的线性关系。



a) #10 支座纵向变形及温度的日变化曲线^[129]



b) #10 支座纵向变形及温度的长期变化曲线^[130]

图 3.7 #10 支座的纵向变形及温度变化曲线

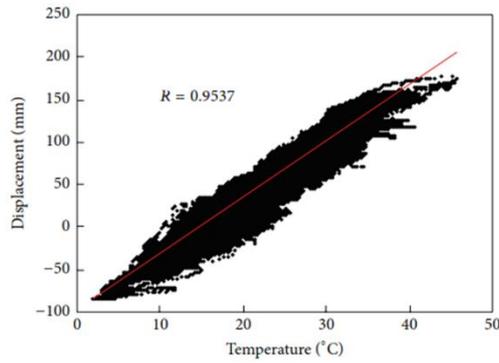


图 3.8 #10 支座的纵向变形和温度线性拟合^[131]

桥梁结构温度空间分布随时间变化会产生不均匀性，桥梁不同位置处构件温度变化与大气温度日变化曲线如图 3.9 所示。由图可知白天温度不同构件温度差异较大，在日出之前（6 点左右）以及日落以后（18 点左右），温度空间分布比较均匀。而且与大气温度的变化一致，两者的差值也近似保持一致。即 18:00-6:00 桥梁温度空间分布均匀，并且其变化幅度与大气温度变化近似一致。因此该时间段内不同日期的结构温度变化值，可以用对应时刻大气温度的变化来表示。

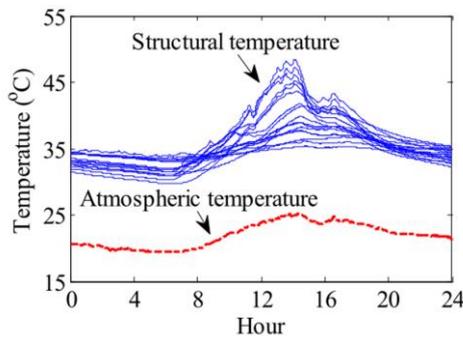
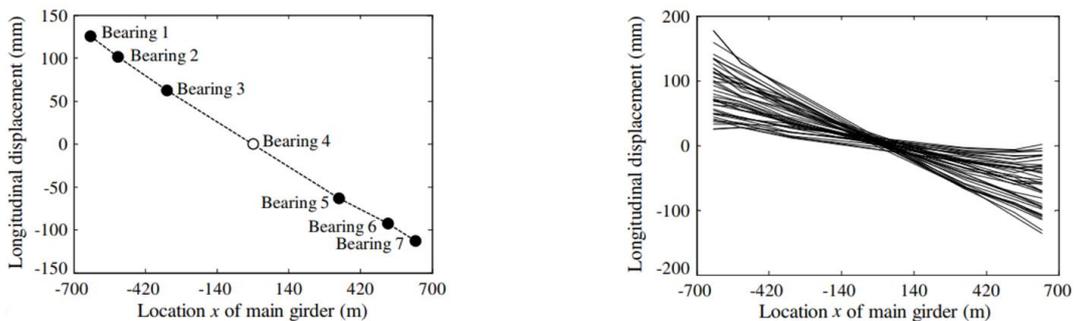


图 3.9 不同位置构件温度和大气温度日变化曲线^[132]

桥梁上部结构和支座形式沿#7 号支座横截面对称，在对称荷载作用下，其变形也会表现出对称性。桥梁长期变形主要为纵向变形，并且与温度线性相关。在日落之后日出之前，桥梁处于均匀温度场作用下，对应支座的纵向变形空间上会呈现出对称性。图 3.10 为 SHM 系统实测支座纵向变形空间分布图，可以看出支座纵向变形具有明显线性对称特征。



a) 某日 19:20 支座纵向变形空间分布

b) 间隔 6 天 19:20 支座纵向变形空间分布

图 3.10 桥梁支座纵向变形空间分布图^[130]

综上所述，研究对象桥梁支座的变形主要是纵向变形，横向和竖向变形几乎可以忽略不计。影响支座纵向变形的主要因素是温度作用，列车荷载和外界环境激励造成的影响很小。支座纵向变形与温度都具有季节性特征，且变化趋势相近，两者有很强的线性相关性。在 18:00-6:00 时间段内，桥梁近似处于均匀温度场作用下，其结构温度变化值可以用大气温度变化来表示。桥梁上部结构和支座形式具有对称性，所以该时间段内桥梁的整体变形也是对称的。

3.3 研究数据概况

3.3.1 SAR 卫星概况

S1A 数据是由欧洲航天局 2016 年 4 月发射的 S1A 卫星拍摄得到，搭载 C 波段的 SAR 传感器，具有多极化和可变入射角的成像特性。其成像模式主要由干涉宽幅模式、波浪模式、条带模式以及超幅宽模式四种。具体相关参数如表 3.1 所示。

表 3.1 S1A 卫星相关参数

轨道形式	轨道高度 (km)	重访周期 (天)	成像模式	入射角 (°)	分辨率 (m×m)	幅宽 (km)	极化
太阳同步卫星	700	12	干涉宽幅	29-46	5×20	250	HH/HV, VH/VV, HH, VV
			波浪式	22-35	5×5	20×20	HH, VV
			条带式	35-38	5×5	80	HH/HV, VH/VV, HH, VV
			超宽幅	20-45	20×40	400	HH/HV, VH/VV, HH, VV

CSK 数据是由意大利国防部和航天局合作，2007 年 6 月发射的军民两用的 CSK 卫星获取，搭载 X 波段的 SAR 传感器，也具备多极化和多入射角的成像特性。其成像模式主要有扫描模式、条带模式以及聚束模式。具体参数如表 3.2 所示。

表 3.2 CSK 卫星相关参数

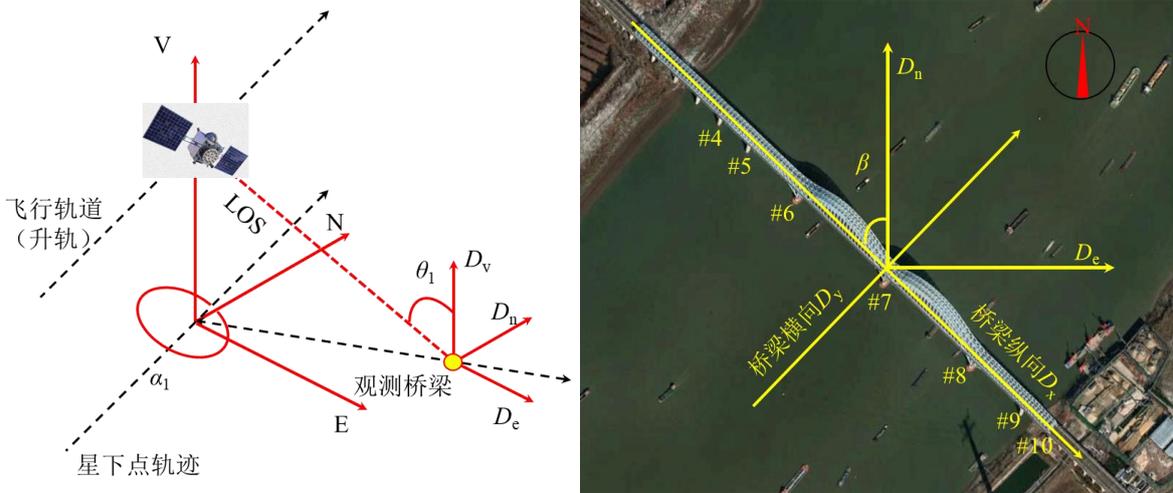
轨道形式	轨道高度 (km)	重访周期 (天)	成像模式	入射角 (°)	分辨率 (m×m)	幅宽 (km)	极化
太阳同步卫星	619	16	条带式		15	30	HH/HV, VH/VV, HH/VV
			扫描式	20-60	30	100	HH, HV, VH, VV
			聚束式		100	200	HH, VV

本次研究分别采用了 2017 年 1 月-2021 年 12 月间 163 景 S1A 干涉宽幅影像

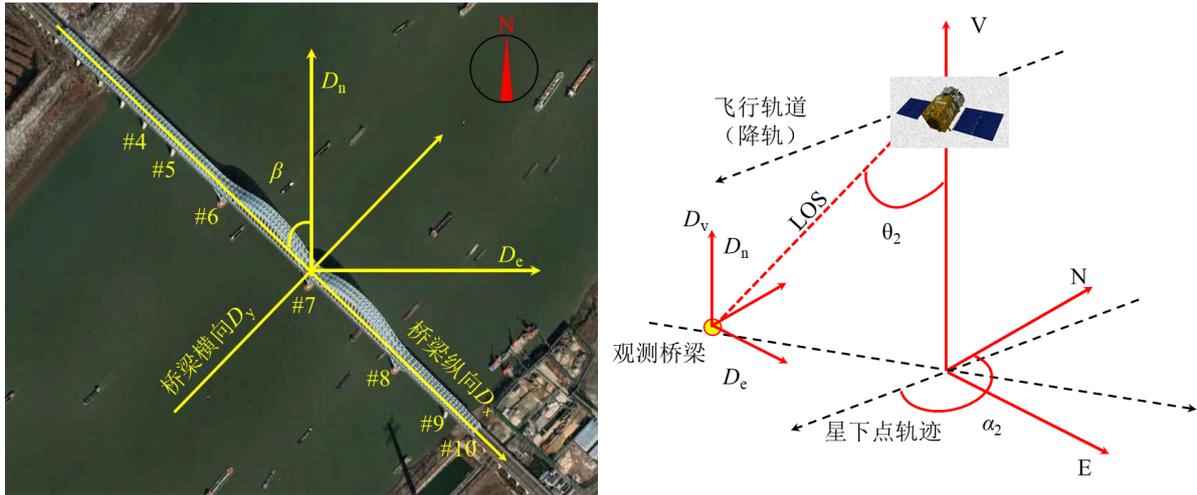
数据，对应飞行轨道为升轨，以及 2016 年 9 月-2019 年 9 月间 35 景 CSK 聚束影像数据，对应飞行轨道为降轨。其中 S1A 数据是 ESA 免费开源数据，从 <https://search.asf.alaska.edu/#/> 网站下载。而 CSK 是商业数据，由北京东方至远科技有限公司提供。

3.3.2 SAR 影像数据适用性

为验证影像数据与研究桥梁的变形观测的匹配度，绘制 S1A 和 CSK 卫星的变形观测几何如图 3.11 所示。



a) S1A 卫星变形观测几何



b) CSK 卫星变形观测几何

图 3.11 卫星变形观测几何

其中 S1A 的入射角 $\theta_1=33.91^\circ$ ，航向角 $\alpha_1=349.26^\circ$ 。CSK 卫星入射角 $\theta_2=33.94^\circ$ ，航向角 $\alpha_2=190.55^\circ$ 。桥梁纵向与正北方向夹角 β 为 45° 。由式 2-9 可得，卫星测量桥梁竖向变形敏感度系数为 $\cos\theta$ ，桥梁纵向变形敏感度系数为 $\sin\theta \cdot \sin(\alpha+\beta)$ ，桥梁横向变形敏感度系数为 $\sin\theta \cdot \cos(\alpha+\beta)$ 。代入两卫星的观测几何参数可得桥梁三

维变形的敏感度系数如表 3.3 所示。

表 3.3 桥梁三维变形测量敏感度系数

卫星	竖向变形敏感度系数	纵向变形敏感度系数	横向变形敏感度系数
S1A	0.830	0.314	0.460
CSK	0.830	0.461	0.316

由前文可知，桥梁主要变形为纵向变形，对应桥梁结构形式可以等效为简支梁。而计算得到两卫星影像数据对桥梁的纵向变形敏感度系数分别为 0.314 和 0.461。因此，本次选取的 SAR 影像数据满足观测要求。

3.3.3 SAR 影像数据概况

由 3.2 可知，研究桥梁的变形主要受到温度影响。在进行 PS-InSAR 处理时，需要在干涉相位模型中引入热膨胀参数进行变形建模。为了更加精确的对桥梁热膨胀参数进行估计，从而求解桥梁结构的真实变形，需要获取桥梁结构准确的温度变化数据。

利用 S1A 和 CSK 数据的头文件可以获取影像的拍摄时间信息。选取的 S1A 影像拍摄时间为 UTC 时间 10:03，UTC 为零时区。研究桥梁所处的南京市属于东八时区，比 UTC 时间早 8 个小时，对应地方时为 18:03。选取的 CSK 影像拍摄时间为 UTC 时间 9:53，对应的地方时为 17:53。两个数据对应的地方时都在 18:00 左右，此时接近日落时刻。

通过前文的文献调研可知，研究桥梁在日落之后以及日出之前，桥梁上不同构件处的温度接近，此时可以假定桥梁处于均匀温度作用下。2.3.4 中处于均匀温度作用下桥梁温度计算经验公式表明，在均匀温度作用下桥梁结构温度与大气温度呈线性关系，且斜率为 1。文献调研结果也表明，该时间段内桥梁结构的温度与大气温度变化幅度相近。因此假设该时间段内桥梁温度与大气温度的差值也不随时间变化。而两个数据的拍摄时间都是日落时刻，所以选取 SAR 影像拍摄时刻的大气温度来代表桥梁温度，能够准确地模拟干涉影像对之间的桥梁温度变化值。

利用气象站数据可以获取桥梁所处区域的大气温度，本次所用气象站数据来自开源气象数据网站 <https://rp5.ru/>。其中南京市的大气温度数据来源包括南京市气象局温度和南京禄口国际机场气象站数据。其中气象局温度数据采样频率为三小时，对应温度数据表示三小时内的平均值。而机场气象站的温度数据采样频率为一小时，对应温度数据为一小时内的温度平均值。因此选取机场气象站 18:00 的温度，作为 SAR 影像的拍摄时刻桥梁的温度代表值，表示 SAR 影像时间序列的温度变化。

根据时空基线最小原则，分别选取出 S1A 和 CSK 影像序列中的主影像。计算出两个影像序列中各影像的时间基线和空间基线信息。最后得到两个影像序列

的基线信息和温度数据如表 3.4 和表 3.5 所示。

表 3.4 S1A 影像序列相关参数

日期	时间基线 (天)	空间基线 (m)	气温 (°C)	日期	时间基线 (天)	空间基线 (m)	气温 (°C)
2017/1/3	30	-864	10	2019/11/1	40	168	20
2017/1/15	4	-852	4	2019/11/13	8	180	18
2017/2/8	-21	-828	2	2019/11/25	-56	192	6
2017/2/20	8	-816	5	2019/12/7	-23	204	8
2017/3/4	-22	-804	17	2019/12/19	23	216	4
2017/3/16	40	-792	12	2019/12/31	17	228	1
2017/3/28	-15	-780	19	2020/1/12	-12	240	5
2017/4/9	65	-768	12	2020/1/24	-18	252	7
2017/4/21	90	-756	20	2020/2/5	-24	264	8
2017/5/3	91	-744	21	2020/2/17	21	276	8
2017/5/15	79	-732	20	2020/2/29	4	288	10
2017/5/27	-24	-720	31	2020/3/12	56	300	15
2017/6/8	27	-708	29	2020/3/24	19	312	18
2017/7/2	21	-684	25	2020/4/5	12	324	15
2017/7/14	21	-672	33	2020/4/17	60	336	19
2017/7/26	4	-660	37	2020/4/29	77	348	27
2017/8/7	-12	-648	34	2020/5/11	1	360	25
2017/8/19	24	-636	28	2020/5/23	26	372	31
2017/8/31	52	-624	20	2020/6/4	-83	384	31
2017/9/12	78	-612	27	2020/6/28	16	408	27
2017/9/24	22	-600	22	2020/7/10	-20	420	28
2017/10/6	-33	-588	18	2020/7/22	8	432	33
2017/10/18	-45	-576	16	2020/8/3	-1	444	35
2017/10/30	65	-564	12	2020/8/15	75	456	35
2017/11/11	19	-552	14	2020/8/27	143	468	30
2017/11/23	50	-540	8	2020/9/20	17	492	25
2017/12/5	-102	-528	4	2020/10/2	-23	504	26
2017/12/17	-84	-516	1	2020/10/14	38	516	20
2017/12/29	-95	-504	10	2020/10/26	36	528	18
2018/1/10	2	-492	2	2020/11/7	63	540	18

(续表)

2018/1/22	44	-480	7	2020/12/1	-79	564	9
2018/2/3	-5	-468	-1	2020/12/13	-44	576	6
2018/2/15	-16	-456	6	2020/12/25	-48	588	8
2018/2/27	0	-444	15	2021/1/6	-26	600	4
2018/3/11	-13	-432	18	2021/1/18	13	612	6
2018/3/23	-23	-420	18	2021/1/30	17	624	14
2018/4/4	-39	-408	12	2021/2/11	-1	636	11
2018/4/16	-3	-396	17	2021/2/23	-19	648	13
2018/4/28	-18	-384	26	2021/3/7	-10	660	8
2018/5/10	94	-372	22	2021/3/19	-18	672	11
2018/5/22	51	-360	19	2021/3/31	-37	684	14
2018/6/3	-3	-348	25	2021/4/12	39	696	17
2018/6/15	-22	-336	29	2021/4/24	8	708	18
2018/6/27	-28	-324	33	2021/5/6	30	720	22
2018/7/9	-14	-312	30	2021/5/18	-29	732	22
2018/7/21	66	-300	34	2021/5/30	-4	744	31
2018/8/2	-49	-288	32	2021/6/11	11	756	31
2018/8/14	-6	-276	33	2021/6/23	-61	768	32
2018/8/26	0	-264	28	2021/7/5	14	780	29
2018/9/7	45	-252	25	2021/7/17	77	792	26
2018/9/19	61	-240	31	2021/7/29	-61	804	29
2018/10/1	47	-228	21	2021/8/10	-46	816	28
2018/10/13	66	-216	20	2021/8/22	-18	828	30
2018/10/25	-70	-204	17	2021/9/3	31	840	28
2018/11/6	-82	-192	14	2021/9/27	88	864	26
2018/11/18	21	-180	9	2021/10/9	8	876	27
2018/11/30	-5	-168	13	2021/10/21	-5	888	15
2018/12/12	-42	-156	2	2021/11/2	-55	900	17
2018/12/24	-18	-144	10	2021/11/14	31	912	12
2019/1/5	-90	-132	4	2021/11/26	68	924	12
2019/1/17	-6	-120	5	2021/12/8	46	936	13
2019/2/10	-1	-96	1	2021/12/20	-33	948	10
2019/2/22	17	-84	5	2022/1/1	-96	960	4

(续表)

2019/3/6	42	-72	13	2022/1/25	8	984	6
2019/3/18	-33	-60	14	2022/2/6	27	996	4
2019/3/30	76	-48	16	2022/3/14	11	1032	18
2019/4/11	19	-36	14	2022/3/26	100	1044	16
2019/4/23	129	-24	23	2022/4/7	-10	1056	24
2019/5/5	-4	-12	24	2022/4/19	43	1068	20
2019/5/17	0	0	26	2022/5/1	10	1080	19
2019/5/29	-8	12	27	2022/5/25	-70	1104	29
2019/6/10	-22	24	28	2022/6/6	161	1116	32
2019/6/22	4	36	27	2022/6/30	-5	1140	29
2019/7/4	-31	48	28	2022/7/24	78	1164	32
2019/7/16	-4	60	29	2022/8/5	144	1176	37
2019/7/28	53	72	36	2022/8/17	91	1188	33
2019/8/9	134	84	32	2022/8/29	1	1200	31
2019/8/21	100	96	31	2022/10/28	66	1260	18
2019/9/2	7	108	22	2022/11/9	-126	1272	18
2019/9/26	68	132	24	2022/11/21	77	1284	17
2019/10/8	53	144	16	2022/12/3	22	1296	5
2019/10/20	29	156	22				

表 3.5 CSK 影像序列相关参数

日期	时间基 线 (d)	空间基 线 (m)	气温 (°C)	日期	时间基 线 (d)	空间基 线 (m)	气温 (°C)
2016/9/4	-138	-592	28	2018/5/17	-13	28	30
2016/11/7	-1462	-528	16	2018/6/22	139	64	20
2016/12/9	84	-496	10	2018/7/8	1035	80	30
2017/2/27	-885	-416	13	2018/8/5	895	108	32
2017/4/16	-553	-368	27	2018/9/10	86	144	24
2017/5/18	-653	-336	28	2018/10/12	-144	176	16
2017/6/3	-715	-320	30	2018/11/13	-754	208	15
2017/7/21	-371	-272	36	2018/12/11	-555	236	3
2017/8/22	974	-240	33	2019/1/12	438	268	4
2017/9/19	223	-212	24	2019/2/13	-177	300	6

(续表)

2017/10/5	370	-196	15	2019/3/5	635	320	10
2017/11/10	559	-160	16	2019/4/18	-266	364	28
2017/12/12	-411	-128	6	2019/5/20	141	396	24
2018/1/13	280	-96	3	2019/6/21	-104	428	28
2018/2/14	-305	-64	15	2019/7/23	636	460	34
2018/3/14	-451	-36	19	2019/8/23	135	491	31
2018/4/3	-115	-16	27	2019/9/25	527	524	25
2018/4/19	0	0	26				

3.4 本章小结

本章通过文献调研总结了研究桥梁的几何结构、荷载、变形特征，根据 SAR 卫星的观测几何获得桥梁三维变形观测的敏感度系数，判断选取影像数据适用于观测桥梁变形。得到结论如下：

(1) 研究桥梁支座的变形主要是纵向变形，横向变形和竖向变形可以忽略不计，根据 SAR 影像数据的卫星观测几何验证选取数据适用于研究桥梁主要变形的观测。

(2) 影响长期纵向变形的主要因素是结构温度，支座长期纵向变形与结构平均温度变化趋势一致，两者具有很强的线性相关关系。支座长期纵向变形在空间上呈现线性对称分布。

(3) 选取影像的成像时间接近日落，研究桥梁处于均匀温度场作用下。且该时刻桥梁温度与大气温度变化趋势和差值一定，符合均匀温度作用下桥梁温度和大气温度的相关经验公式。可以利用 SAR 影像拍摄时刻的大气温度作为影像序列的温度代表值获取桥梁变形。

第4章 基于 PS-InSAR 技术的大跨桥梁变形监测试验

4.1 引言

在 PS-InSAR 数据处理过程中,很少有学者利用桥梁结构自身几何与变形特性来进行优化处理,来提高桥梁结构变形监测的准确性,因此本文提出了结合桥梁结构几何与变形信息的改进 PS-InSAR 方法。本章以南京某高速铁路桥梁为实例,利用提出的改进桥梁 PS-InSAR 方法处理 S1A 和 CSK 影像数据。在 PS 点选取中,结合桥梁的复杂散射特征,利用多重阈值法选取包含桥梁真实变形的 PS 点。通过将影像裁剪至只包含研究桥梁的尺寸,使得在干涉处理过程中,可以利用桥梁结构信息确定干涉相位的参数及其准确的参数估计范围、选取合适的参考点、判断估计结果优劣。有效地提高包含桥梁变形信息 PS 点的相干性,使得桥梁变形监测结果更加可靠。

4.2 改进桥梁 PS-InSAR 技术流程

本次研究采用的是由意大利 SMTech 公司开发的 SAR 影像处理系统-SARProZ^[133]软件进行影像数据处理。区别于传统的 PS-InSAR 方法,本次研究从土木工程的角度出发,将结构工程的知识融入到 PS-InSAR 处理流程中,具体流程如下:

(1) 原始影像数据准备:从开源网站以及合作单位获取 SAR 影像集,利用影像成像卫星的观测几何和桥梁走向计算桥梁的三维变形观测敏感度系数。结合桥梁的变形特征分析数据的适用性。

(2) 主影像选取:基于数据集的时间基线、空间基线以及多普勒质心频率差异选取 SAR 影像序列中的公共主影像。

(3) 裁剪配准:选择包含桥梁的区域,裁剪合适的尺寸范围;对裁剪后的影像进行坐标定位和重采样,采用相干系数法将所有副影像与主影像进行配准。

(4) 差分干涉:借助精密轨道矢量,利用干涉几何关系去除参考相位;通过数据重采样将外部 DEM 与 SAR 影像坐标对应,再辅以精密轨道矢量去除地形相位,得到差分干涉序列图。

(5) PS 点初选:统计影像中各像素振幅的时间序列,计算其标准差和均值并相除得到振幅离差指数,设定较高的振幅离差阈值进行 PS 点的选取。

(6) 干涉相位参数模型的建立:根据研究桥梁的几何结构和变形特征,选取线性变形速率、高程残差以及热膨胀系数建立差分干涉相位模型。

(7) 大气相位估计:对选定的 PS 点连线建立 Delaunay 三角形网络,初步估计

干涉相位模型中的参数。根据大气相位的时空特性将其从残差项中分离，实现大气相位的初步估计。通过设置PS点连线相干性阈值，精确估计大气相位。

(8) PS点精选：选取合适的时序相干系数阈值和相位离差阈值，根据桥梁散射特征对重选PS点进行精确筛选，获取能够反应桥梁真实变形的有效PS点。

(9) 最终形变求解：对精选PS点进行大气相位剔除，并且精确估计对应干涉模型参数，得到桥梁最终PS点时序变形结果。

(10) 地理编码：通过雷达影像坐标系与地理空间坐标系的几何变换关系，得到含有变形时间序列且与桥梁地理空间位置对应的PS点数据。

4.3 S1A 数据处理

4.3.1 影像前处理

1. 主影像选取

本次桥梁长期变形监测采用的是PS-InSAR技术，SAR影像干涉对的组合模式为单一公共主影像组合。其基本理念就是将N-1幅从影像都配准取样到公共主影像空间，逐个与主影像差分干涉形成干涉相位图。进行PS-InSAR处理时，保证干涉相位图质量是能够获取目标真实准确变形的关键。因此，需要合理地选取公共主影像以确保得到干涉对之间相干性最佳，从而获取高质量的干涉相位图。

公共主影像的选取直接关系到干涉对之间的相关性，时间基线、空间基线以及多普勒质心频率差异是影响相干性重要因素。时间基线越长，对应两幅影像时间间隔大；对应观测区域内地物物理和化学特性发生变化的可能性越大，从而引起严重的时间基线失相关。但本次观测目标为桥梁结构，其本身物化特性长期都呈现比较稳定的状态，因此时间基线的长度产生的影响较小。空间基线越长，对应两幅影像观测时雷达卫星的空间距离越大；这会造成雷达对地面目标观测的入射角差异增大，从而引起严重的空间基线失相关。由于目标桥梁结构本身起伏较大，与DEM存在较大高差。空间基线的过长会增大DEM误差的影响，从而降低桥梁变形求解准确性^[42]。因此空间基线长度产生影响较大。多普勒质心频率差异越大，干涉相干性越小。相干性的大小常用相干性系数表示，如式(4.1)所示。

$$\gamma = \sum_{i=1}^{N-1} \gamma_{\text{tem}}^i \cdot \gamma_{\text{geo}}^i \cdot \gamma_{\text{Dc}}^i \quad (4.1)$$

γ_{tem}^i ， γ_{geo}^i ， γ_{Dc}^i 分别代表时间基线，空间基线以及多普勒去相干。 γ 越大，对应相干性越高，干涉相位图质量越高。在选取主影像时，一般依据时空基线最小原则选取。选取 2019/05/17 期影像为公共主影像，得到影像干涉组合如图 4.1 所示。其中红点表示主影像，横坐标表示从影像跟主影像成像的时间间隔，即时间基线；纵坐标表示表示从影像跟主影像成像时空间位置距离，即空间基线。

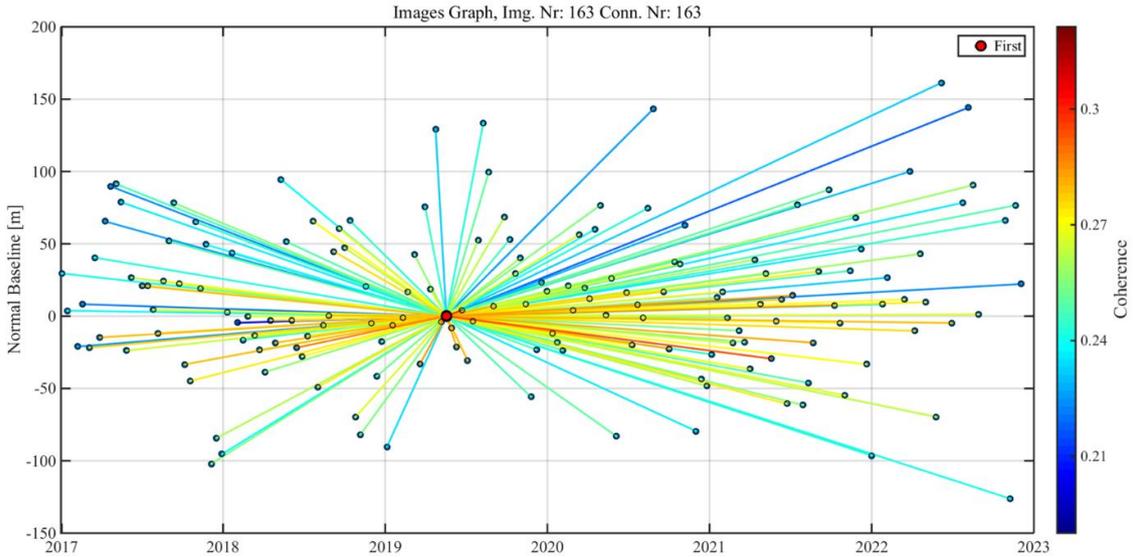
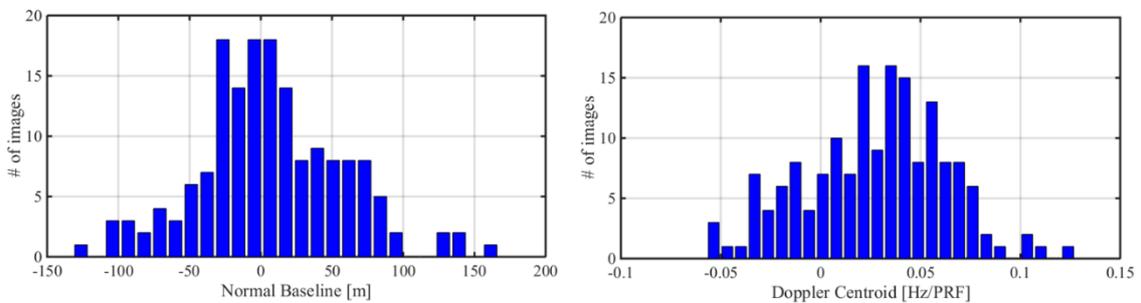


图 4.1 S1A 影像干涉组合模式

在该干涉组合模式下，从影像和公共主影像的空间基线以及多普勒质心频率差异分布如图 4.2 所示。可以看出空间基线和多普勒质心频率差异的分布都呈现中间大，两头小的类似正态分布，而且选取的主影像也靠近影像序列中心。但是空间基线的中间值横坐标为零，而时间基线和多普勒质心频率差异中间值横坐标都距离零有一定的偏移。这是因为空间基线最小的优先级比较高，其对影像的相干性影响最大。



a) 空间基线分布

b) 多普勒质心频率差异分布

图 4.2 SAR 影像序列参数分布

2. 影像裁剪与配准

由于选取的 S1A 影像数据范围比较大，其幅宽达到了 250km。本次研究对象为一座桥梁，其对应的影像范围较小。如果对整幅影像进行 PS-InSAR 处理，一方面会成几何地增大无效计算量，降低数据处理效率。另一方面，由于 S1A 影像分辨率较低，裁剪影像尺寸太小，影像范围内像素点数量会很少。加上目标桥梁为跨河大桥，影像范围内存在大量包含水体的无效像素，会导致后续影像配准时需要的同名点像素不够，造成影响配准失败。因此裁剪边长为 6km，包含目标桥梁的影像进行分析处理，如图 4.3 所示。

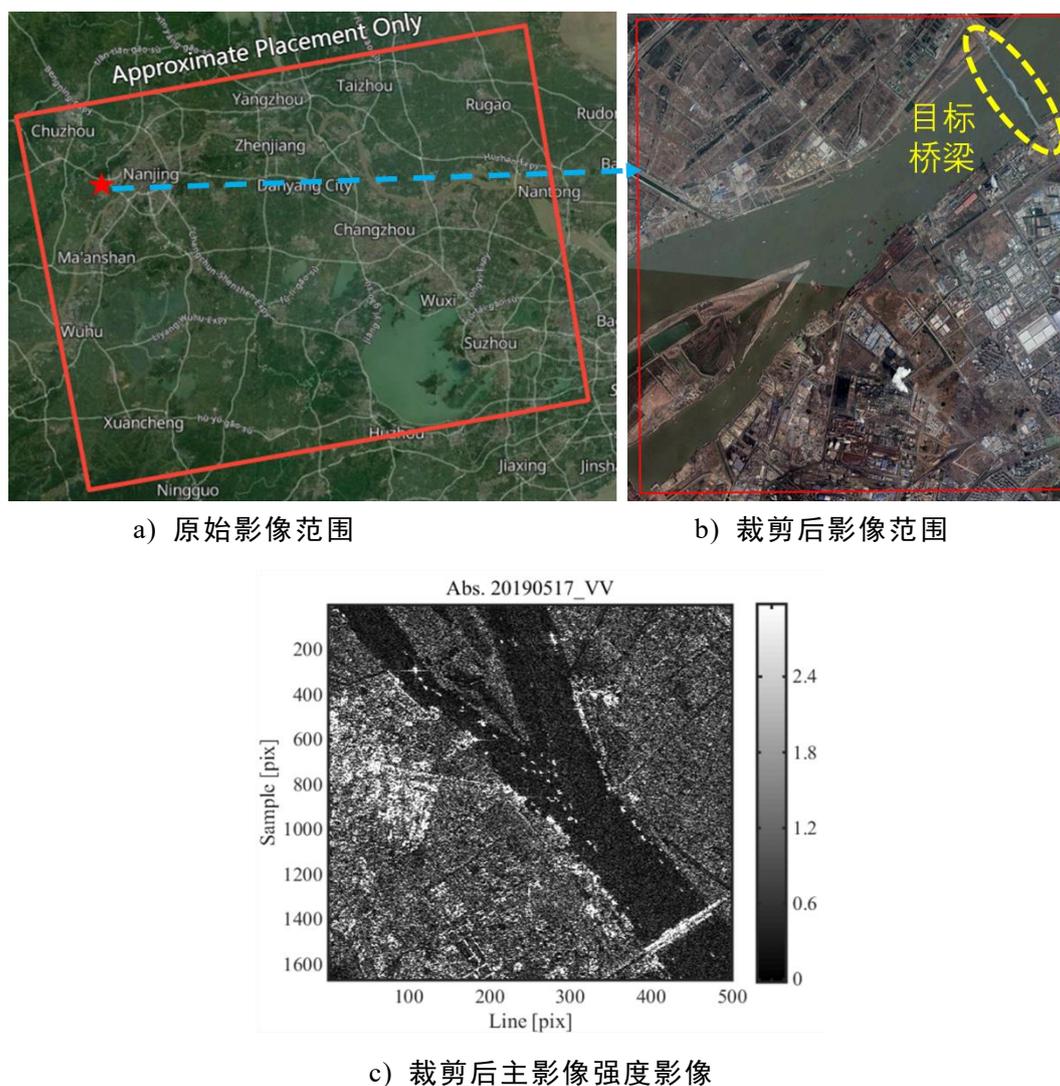


图 4.3 SAR 影像裁剪

由于不同影像的轨道存在一定的误差会导致影像偏移，为了保证影像序列中所有从影像都能够与公共主影像配准，进行从影像裁剪时裁剪的区域一般会比主影像大，确保配准后各影像的尺寸一致。SARProZ 中影像配准方法采用的是相干系数法。选取的 S1A 影像空间基线较小，并且 S1A 数据具有准确的精密轨道文件。因此在进行影像配准时，可按照默认的参数进行配准。当影像配准失败时，可以通过改变搜索窗口尺寸、搜索步长以及误差阈值等参数来保证影像配准成功。

经过影像配准后，不同影像中所有像素点都在同一坐标系下一一对应。通过统计分析各像素点的振幅可以计算出数据集的平均振幅影像，根据式 2-11 可以计算得到影像各像素的时序振幅离差指数，如图 4.4 所示。

图 4.4 中红色虚线圈出的位置为目标桥梁所在位置。由于目标桥梁为钢桁架结构，其材料和结构形式使得在 SAR 影像中具有稳定的散射特性，所以对应像素振幅较大，稳定性高。可以看出目标桥梁在平均振幅影像中呈现高亮颜色，并且具有较高的 ASI 指数（SARProZ 中时序振幅离差系数通过参数 Amp.Stab.Index (ASI) 表示，该参数的值等于 1 减去时序振幅离差系数。所以时序振幅离差系数

越小，该参数的值越大)。同时可以看到图 4.4b) 中 ASI 系数较高的地方主要分布在人工构筑物上，因此通过合理的设置该参数的阈值可用于后续 PS 点的选取。

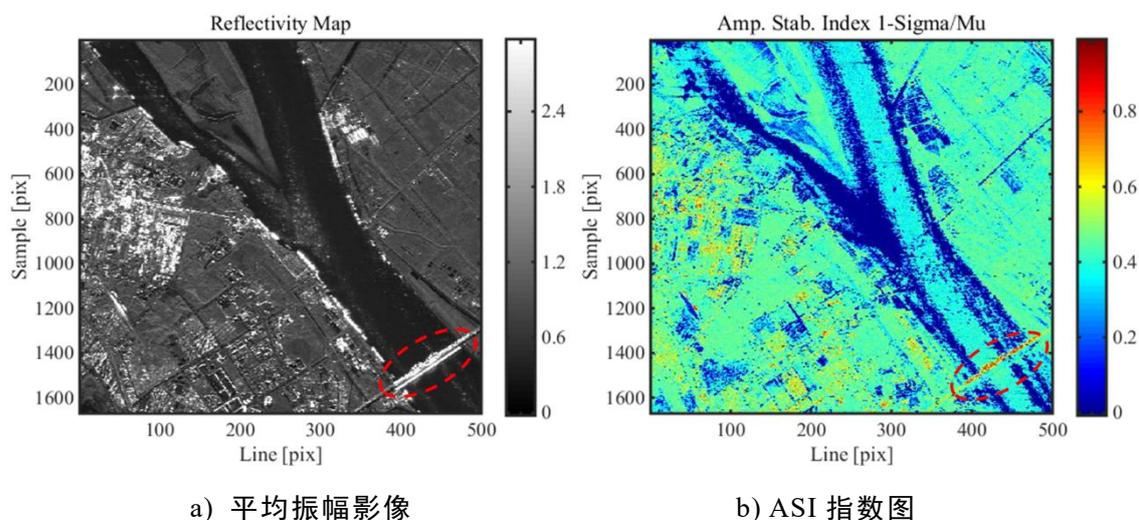


图 4.4 强度影像计算结果

3. 差分干涉处理

影像一次差分干涉主要是去除平地相位和高程相位。而在此过程中都需要使用影像范围内的 DEM 文件。在 SAR 卫星干涉几何中，通常假定地球是一个光滑的椭球体。而实际上地表由于存在山脉和沟壑会出现高低起伏的情况，即地表（不包含地表上的人工构筑物）会跟参考椭球体存在高程差。而 SAR 影像范围内地表跟参考椭球面高程差的空间分布，就是对应应该影像区域的 DEM 文件。进行 PS-InSAR 处理所需要的 DEM 精度不用太高，采用 SRTM30m 精度的 DEM 即可满足要求。本次处理选取的 DEM 文件来源于开源网站 <https://earthexplorer.usgs.gov/>。该数据是由美国太空总署联合美国国防部国家测绘局利用机载雷达测绘得到。采集范围为北纬 60°到南纬 56°之间，覆盖全球大概 80%以上的陆地表面。

通过开源网站下载的 DEM 数据参考坐标系与 SAR 影像的雷达坐标系不一致，需要将覆盖监测区域的 DEM 数据读入并转换为 WGS84 参考坐标系，然后定位影像所在区域内的 DEM 数据，如图 4.5a) 所示。为使 SAR 影像与 DEM 数据中的高程对应，还需要对 SAR 影像的距离向像素与轨道偏移矢量进行校正。由于 S1A 影像数据的轨道精度较高，因此可直接利用精密轨道数据进行校正参考点选取。校正后可进行 DEM 重采样，获取参考坐标系为雷达坐标系的 DEM 数据，如图 4.5b) 所示。

在后续处理中，发现对桥梁进行变形求解时，选取的区域越小，对应得到的结果越精确，具体原因将在后文说明。同时进一步缩小影像尺寸能够有效提高处理效率，因此进行干涉图生成以及后续处理时，对配准后的影像序列进行二次裁剪，同时进行配准之后的步骤，得到结果如图 4.6 所示。

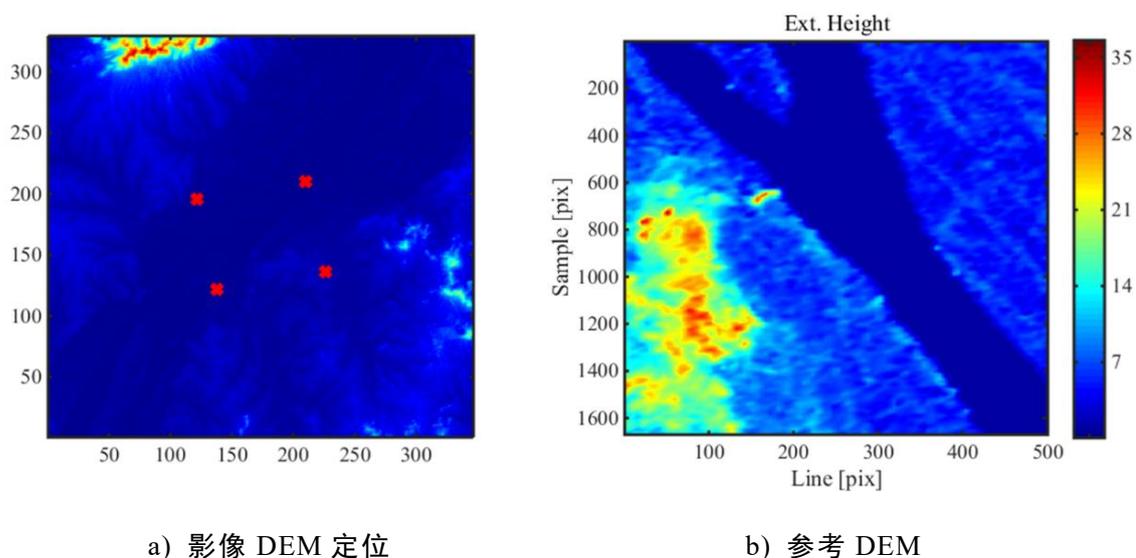


图 4.5 DEM 转换

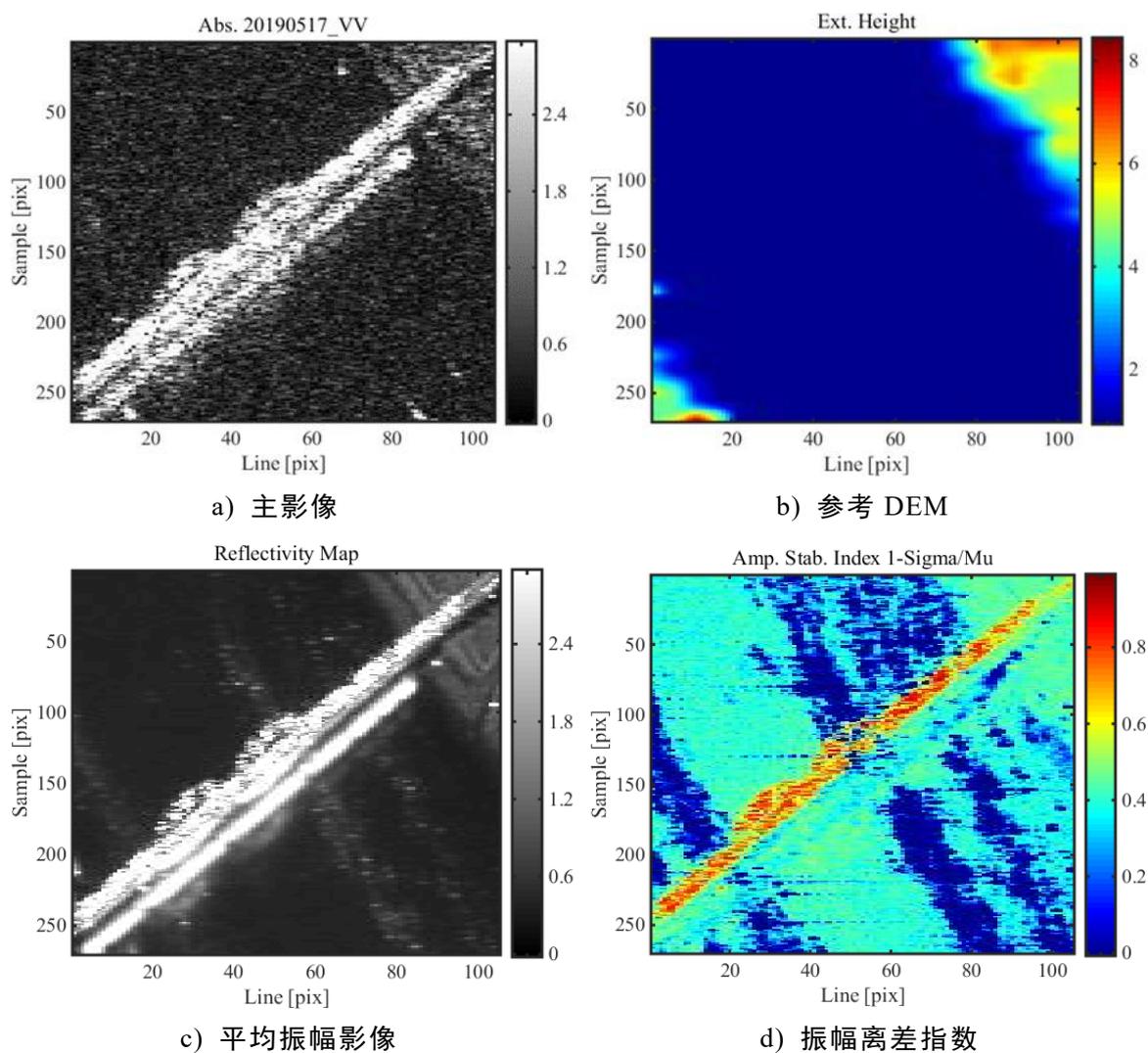


图 4.6 二次裁剪结果

利用参考 DEM 和 S1A 的精密轨道文件，去除干涉相位中的参考椭球相位和地形相位，得到影像序列的部分干涉相位图如图 4.7 所示。

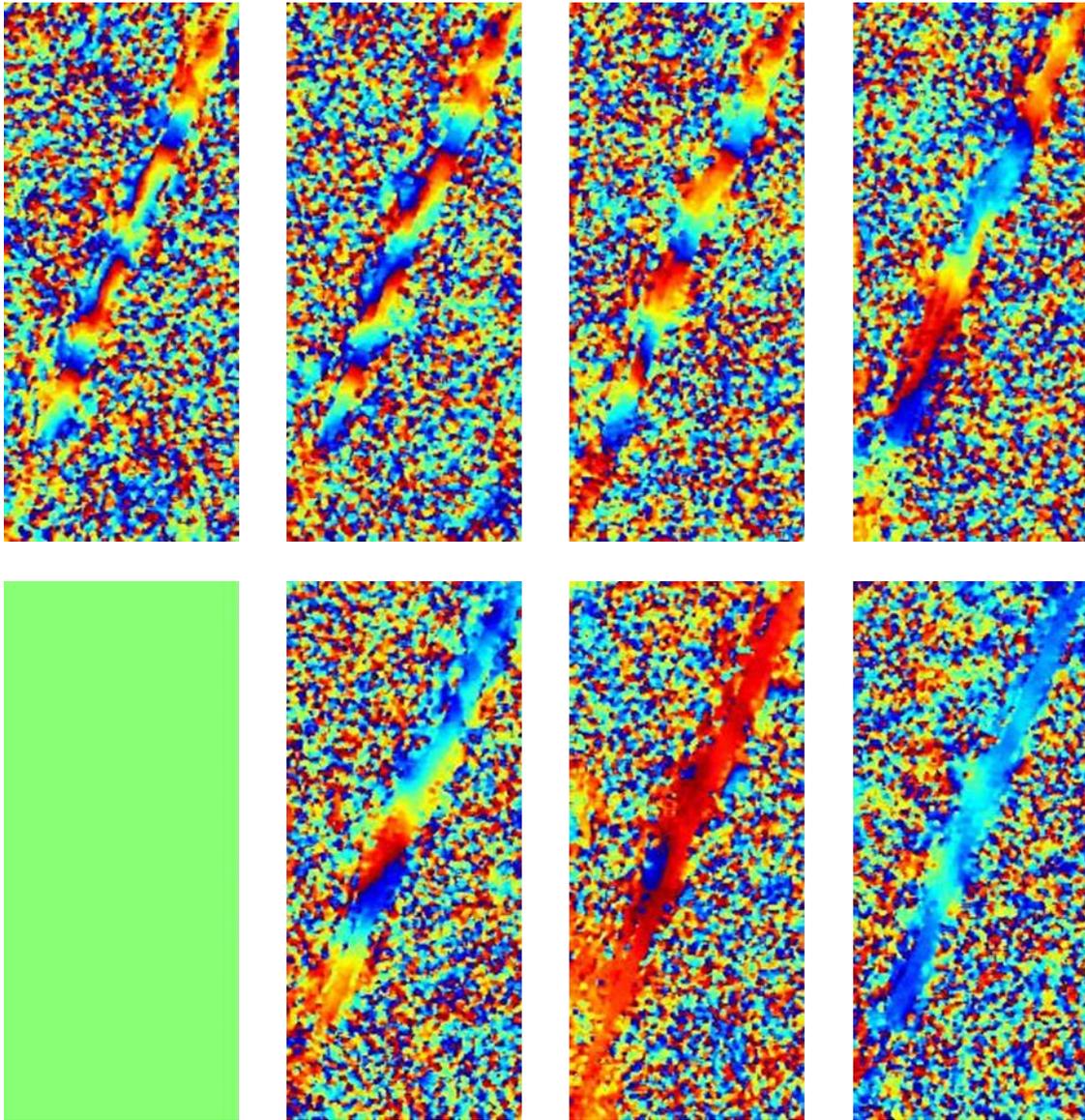


图 4.7 差分干涉图

可以看到图中桥梁位置处几乎没有斑点噪声，且大部分干涉图都呈现连续交替变化的干涉条纹，如前四幅图像所示。少量图像干涉条纹不明显是由于大气延迟造成的大气相位所引起的，如后三幅图像所示。其中有一幅纯色干涉图是主影像自身差分干涉形成，所以干涉相位为零，表现为没有相位梯度。根据式(2.9)，利用生成的差分干涉图可求得影像中各像素的时序相关系数如图 4.8 所示。可以看到目标桥梁位置相干系数较高，有效的证明了桥梁结构的后向散射特性长期保持稳定，几乎不随时间改变。

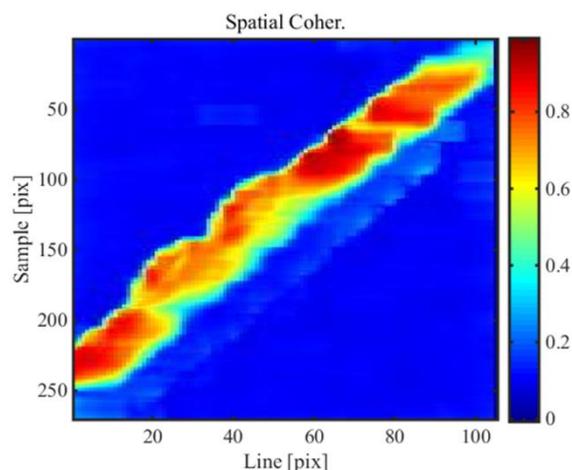


图 4.8 时序相干系数图

4.3.2 大气相位估计

大气相位估计包括PS点初选、干涉相位参数模型建立、参数初步估计以及大气相位分离。建立缠绕干涉相位的参数模型，通过初步估计参数分离出参数模型中的残差项。其中，残差项由大气相位和噪音相位构成，利用两者在时间和空间上的频率特性可以分离出大气相位，实现大气相位的估计。

1. PS点初选

常用的PS点选取方法包括时序相关系数阈值法、相位离差阈值法以及振幅离差阈值法。利用前两种方法选取PS点，即使调整阈值依旧会存在选取无效PS点的情况。而利用振幅离差阈值法选取PS点，当设置较低阈值时，虽然会忽略部分真实PS点，但是选取的都是有效PS点。而大气相位在空间上表现为高度相关，只需要获取合理空间分布密度的可靠PS点大气相位，通过插值即可获取整幅影像的大气相位。因此，通过设置较低的振幅离差阈值选取PS点，同时通过抽稀使得PS点均匀分布。进行参数估计需要进行二次差分干涉，即对相邻PS点的干涉相位再次进行差分。通过对选取的PS点进行连线构建网络，确定进行二次差分的相邻PS点。SARProZ中支持Delaunay、Flowered tree以及Local Redundant方法进行PS点构建连接网络。其中Delaunay方法是通过将离散点集中的点连线生成三角网络，生成的网络满足任意连线都不相交。并且网络中任意三角形的外接圆范围内，除了构成该三角形的顶点外，不存在其他点。利用该方法生成的网络是结构良好，数据结构简单，冗余度小。能够比较准确的对PS点进行参数估计，所以利用该方法对选取的PS点连线构建网络。

S1A数据分辨率比较低，裁剪影像范围内像素有限。设置的振幅离差阈值过低，选取得到的PS点数量太少。在SARProZ中，通过反复调整选点参数设置，比选对应的选点效果。最终设置参数ASI阈值为0.7，抽稀参数DS设置为5（选取半径为5的圆的范围进行抽稀）。选取得到48个PS点，如图4.9a)所示。然后利用Denaunlay

方法对选取的PS点进行连线网络构建，得到PS点网络中共含137条连接基线。如图4.9b)所示。

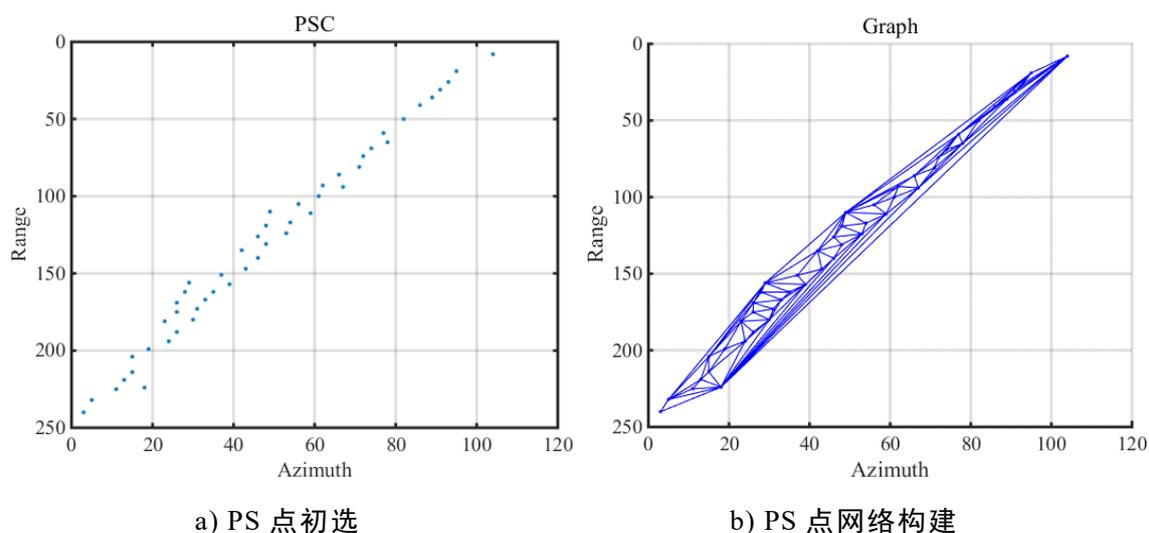


图 4.9 PS 点初选和连线

2. 干涉相位参数模型建立

干涉相位是雷达卫星传感器获取地面同一目标回波信号的相位差。由前文可知，干涉相位包含参考椭球相位、地形相位、形变相位、大气相位以及噪音相位。一次差分干涉相位通过引入卫星轨道数据和外部参考 DEM 消除参考椭球相位和地形相位。剩余相位中除去前两项外还应加上由于 DEM 精度较低引起的高程残差相位。获取地面目标形变的关键就在于建立合适的参数模型对缠绕差分干涉相位进行恢复，然后从中分离出形变相位。

传统 PS-InSAR 认为形变包括线性变形和非线性变形。选用线性变形速率、残差高程对干涉相位建模，非线性变形、大气相位以及噪音通过残差项估计。然而这是建立在变形以线性变形为主，非线性变形较小的情况。当非线性变形较大并占据主导地位时，残差项不能准确估计出非线性变形，从而导致不能获取真实变形。

由第三章可知，研究桥梁主要变形为纵向变形，温度是影响桥梁变形的主要因素。且变形与温度变化趋势一致，两者表现出很强的线性相关特性。本次选取的温度数据在时间上表现出很强的非线性特征，具有明显的季节周期性。可以判定桥梁的变形以非线性变形为主。由于桥梁的非线性变形主要受温度影响，且存在很强的线性关系，可以用线性热膨胀系数来建立两者的关系。所以在干涉相位模型中加入热膨胀系数，并通过引入外部温度数据对该参数进行估计。此外，研究桥梁几何高度起伏较大。由于桥梁横跨于长江之上，所以从参考DEM图中可以看到桥梁位置处高程几乎没有变化，并且数值接近于0。因此桥梁位置处真实高程与DEM存在较大误差，引入的DEM不能消除桥梁位置处PS点的地形相位，需要在干涉相位模型中加入高程误差。综上所述，本次研究选取线性变形速率、高程误

差以及热膨胀系数建立干涉相位模型。

3. 参数初步估计

(1) 参数取值范围确定

本次影像组合中存在部分影像时间和空间基线较长的情况。但是初始候选PS点是通过较高阈值获取，几乎不受时间和空间失相干的影响。对应PS点的噪声较小，PS网络中连线两端PS点的噪声差异较小。大气状态在空间上呈现高度自相关特性，空间相邻PS点的大气相位相近。加上选取的PS点空间分布密度合理，PS网络中连线两端PS点的大气相位差异较小。对构建的PS点三角网络中连接基线两端的PS点进行二次差分干涉，得到结果如式(2.16)所示。其中残余相位差值对应为一个 $[-\pi, \pi)$ 以内的值。寻找(2.16)中线性变形速率、高程误差以及热膨胀系数增量的值，满足残差相位差值在对应范围内，然后计算基线的模型相干系数。在残差相位满足条件的情况下，模型相干系数最大对应得到的参数增量为最佳模型匹配值。最后通过选取某个PS点为参考点，以参考点为基准，采用局域网最小二乘获得干涉相位模型中各参数的估计值。

参数估计的可靠性与模型相干系数直接相关，模型相干系数越大，参数估计的结果越准确。进行 γ 计算时，需要给出参数增量的解空间，因此需要确定参数的取值范围。准确的参数范围能够增大网络中 γ 取值较高的基线数量。

通过对研究桥梁的文献调研，从桥梁的最低处钢拱拱趾到最高处钢拱拱顶处的高差为96.6m。参考DEM中桥梁位置处高程为0，当参考点选取与桥面板等高时，桥梁PS点的高程误差范围在 $[-28.6, 68]$ m。S1A数据为中等精度数据，高程误差估计的离差较大。裁剪计算的影像范围内几乎只有桥梁结构，而且参数估计范围是单边选取，因此参数估计范围的极值只要比桥梁高程误差稍大即可。

研究桥梁的变形以纵向变形为主，横向变形和竖向变形相对较小，可以忽略。温度是影响桥梁纵向变形的主要因素，且温度与变形之间具有很强的线性相关关系。由此可得研究桥梁变形主要受到温度的影响，且两者存在很强线性相关特性。因此，干涉相位中形变相位主要受到影像对应温度变化的影响。而本次处理温度变化呈现周期性变化趋势，变形对应也成周期性变化。在变形监测周期内桥梁的永久线性形变较小，对应线性变形速率也较小。

本次研究裁剪的影像区域内只包含桥梁结构，通过上述桥梁的几何结构与变形的分析，可以精准的选取干涉模型三个参数的取值范围。由于SARProZ中大气相位估计模块参数估计只能单边选取，即范围的上下边界绝对值相等。选取 v 的范围是 $[-5, 5]$ mm/year、 ε 的取值范围为 $[-70, 70]$ m、 k 的取值范围是 $[-0.4, 0.4]$ rad/°C。计算得到的PS点连接网络基线相关性如图4.10所示。

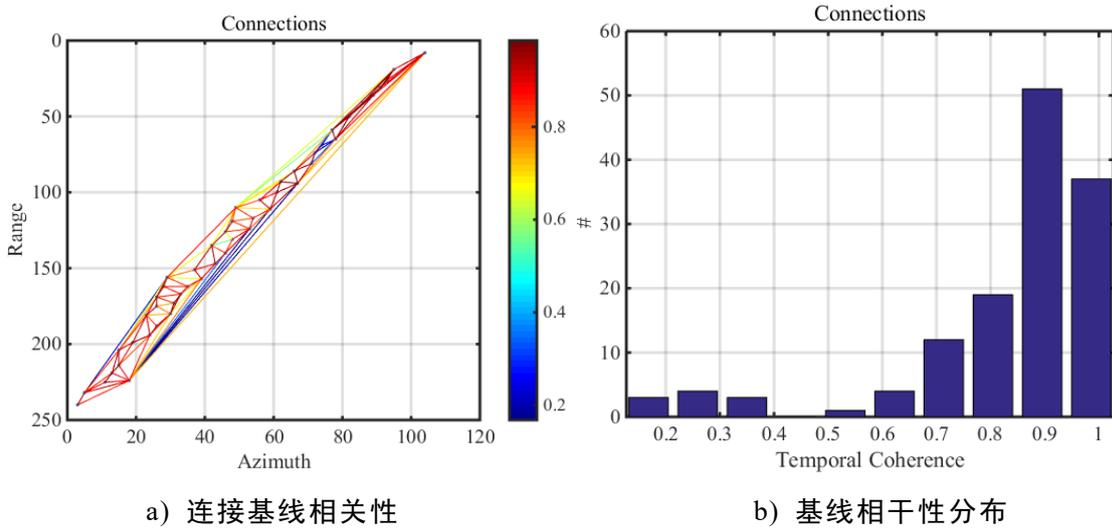


图 4.10 PS 点连接网络基线相关性

为了验证精准的参数取值范围能够增大网络中 γ 取值较高的基线数量，按照经验选取参数取值范围，计算获取基线相干性分布如图 4.11 所示。对比图 4.10b) 可知，超过 0.9 的高相干性连线明显增加。

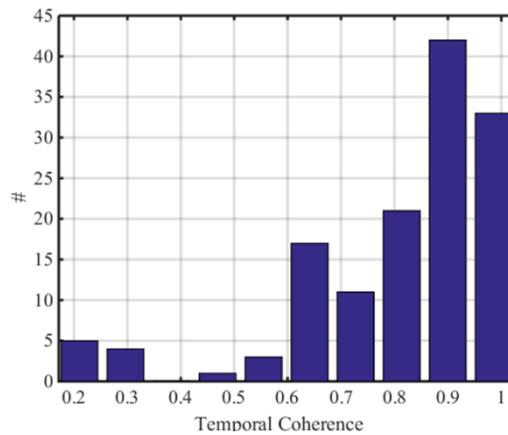


图 4.11 经验选取参数获得基线相干性分布

从图4.10可以看到连接网络的相干性整体较高，超过90%的基线相关性大于0.6。但是连线网络中部分基线相干性较小，这是由于沿着桥梁方向高度起伏较大，当连线两端PS点的高差较大，对应高程残差增量也很大，从而引起严重的失相干。为了优化连接网络，设置网络中连接的相干性阈值，去掉部分相干性较低的连接。设置0.7的连接阈值，重新连接生成网络，计算连接网络的相干性结果如图4.12所示。

对比图4-10可得，优化连接网络后结果明显更加优异。表现在连线的高相干性数量更多，全部连接的相干性都大于0.7。且优化前相干性最低的连接数值为0.2，相关学者表明相干系数大于0.45时，该基线对应的参数估计具有可靠性。

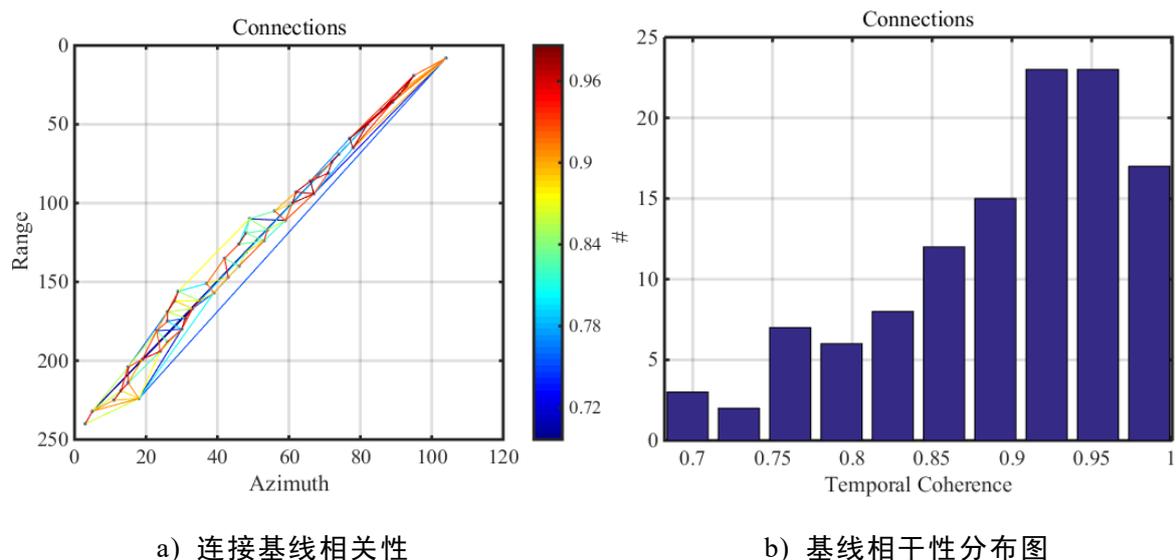


图 4.12 设置连接阈值 PS 点连接网络基线相关性

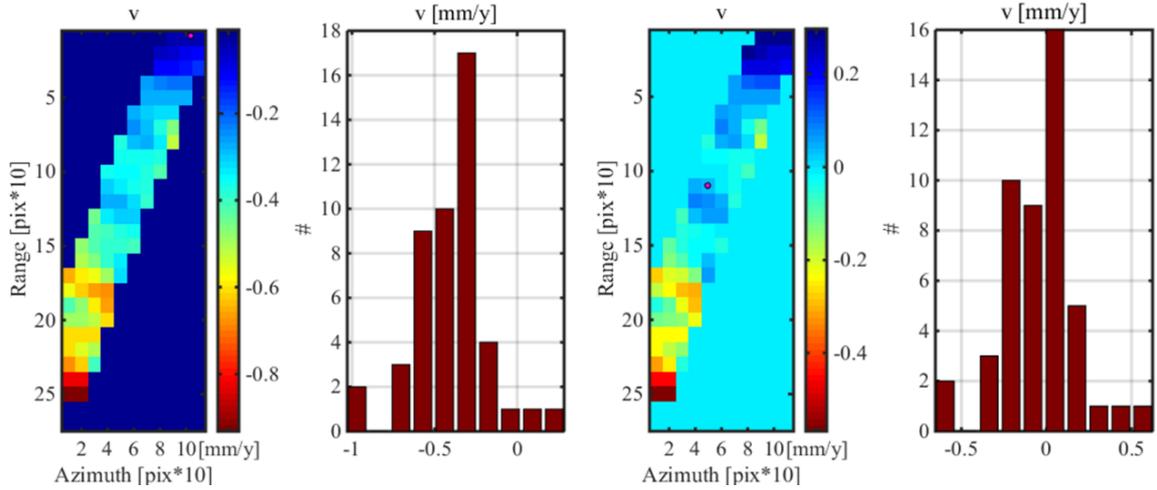
(2) 参考点选取

参数估计通过对基线两端PS点的增量进行估计。通过选取一个PS点为参考点，默认该参考点中待估计参数对应的相位分量为零。然后以参考点为基准，采用局域网最小二乘法获取所有PS点的参数估计结果。

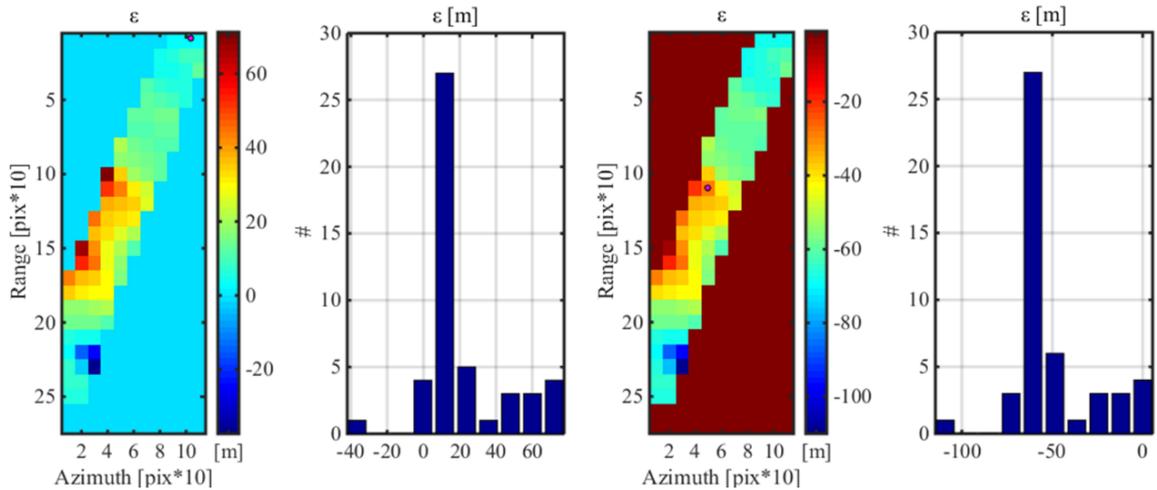
由于PS点的连接网络中参数增量的准确性是参数估计的基础，当连线相干性较差时，参数增量的误差也会增大。误差随着PS点网络传递，导致参数估计结果出现较大累计误差。当影像尺寸较大时，对应的PS点数量增加，PS点连接网络中连线数量增大。出现失相干连接的数量也会增大，当连接桥梁的PS有失相干连接时，误差就会沿着该连接传递，降低参数估计的准确性。同时裁剪影像范围过大，会增加很多无效计算，降低计算效率。当裁剪影像时选取的范围较小，影像范围内只有目标桥梁，通过桥梁几何和结构变形特征的信息，就能比较准确地确定参数估计的范围。因此，本次数据处理时选择裁剪较小的影像。

当选取的参考点本身具有较大变形或者高程误差时，对应获取的参数估计反映的不是目标的真实结果。在SARProZ软件中会自动计算相干性较高且散射特性稳定的强反射点供用户选择（自选），但是给出的候选参考点并未考虑其形变和高程误差的大小。本次选取较小范围的影像，且桥梁的几何和变形信息已知。可以手动选取参考点（手选），同时满足变形和高程误差较小以及相干性较高且散射特性稳定的反射点，使得参数估计结果真实准确。

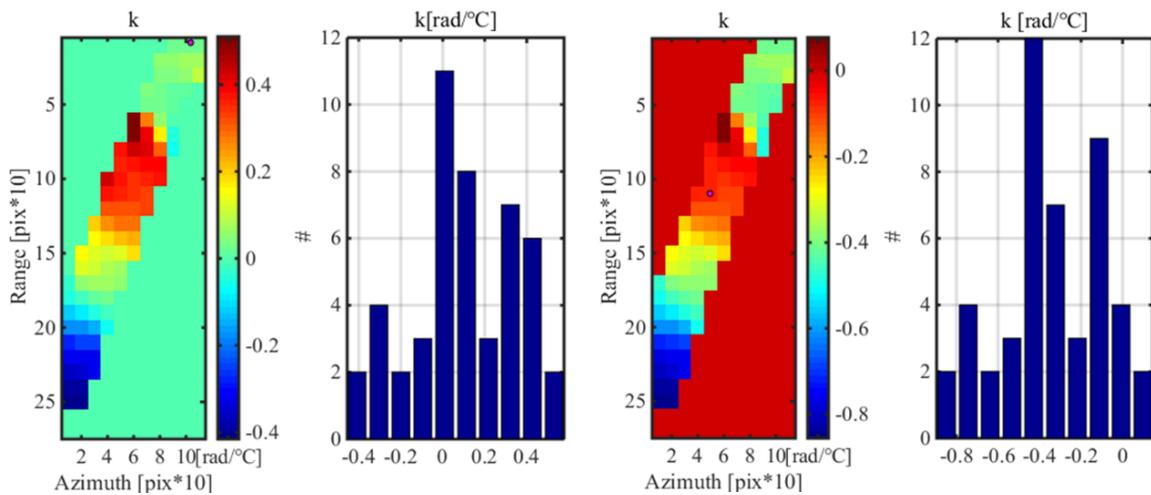
本次研究选取距离出桥位置最近的一个PS点。该点不在桥梁上，变形较小且受温度影响小。同时高度与桥面平齐，对应高程误差较小。以该PS点为参考点得到参数估计结果如图4.13左图所示。为了验证参考点对参数估计结果的影响，选取软件提供的参考点得到参数估计结果如图4.13右图所示。



a) 线性变形速率



b) 高程误差



c) 热膨胀系数

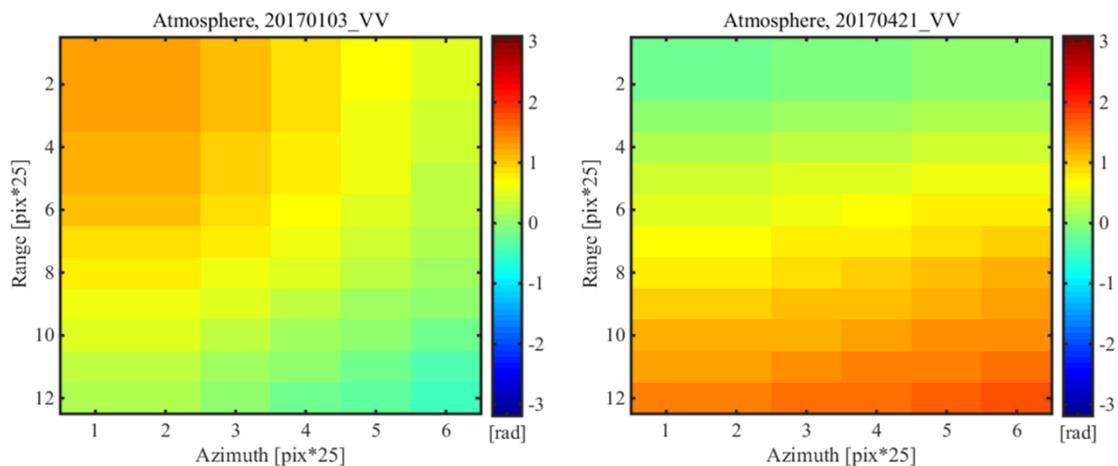
图 4.13 参数初步估计结果

(左边为手选参考点, 右边为系统给定参考点)

从图 4.13a)可以看出, 两种参考点选取方式得到的线性变形速率沿桥梁方向都较小。符合桥梁永久变形较小, 对应线性速率较小的变形特征。从图 4.13b)可以看出, 当参考点选取方式不同时, 高程误差沿着桥梁方向都存在起伏, 并且在中间两跨大于两侧。符合桥梁中间两跨为钢拱桥, 造成沿桥梁方向高度起伏, 且中间两跨高于两侧的几何特征。但是手选参考点对应的参数估计范围与给定的一致, 而自选参考点估计范围差距较大。从图 4.13c)可以看出, 手选点对应的热膨胀系数关于跨中支座对称, 且绝对值由跨中支座向两端增大。符合桥梁支座结构跨中固支两端可活动, 造成温度变形对称且向两端增大的变形特征。而自选点估计结果不具备对称性, 热膨胀系数绝对沿着桥梁方向单调变化。综上所述, 参考点选取方式对线性变形速率估计结果影响较小, 这是由于全桥线性变形速率较小且接近。而参考点选取方式对高程误差和热膨胀参数影响较大, 这是由于桥梁高度起伏和变形变化不一致。此外, 手选参考点得到参数估计结果与桥梁结构的几何和变形特征一致, 有效地验证了参数估计结果的可靠性。

4. 大气相位分离

根据线性变形速率、高程误差以及热膨胀参数的初步估计结果, 利用式(2.15)即可获得各PS点的残余相位。大气估计就是将大气相位从残余相位中分离出来。本次解算的残余相位包括大气相位、噪音相位以及可能存在的非线性变形相位。三个分量在时间和空间域上频谱特性各有差异。其中大气相位和非线性变形相位在空间上表现为高频, 在时间维度上, 前者表现为高频, 后者表现为低频。而噪音相位在时间和空间上都表现为高频特征。因此, 通过信号分离可以从残余相位中分离出PS点大气相位。根据大气相位空间相关特性, 对离散的PS点采用克里金插值法。可以获取整幅影像所有像素的大气相位, 结果如图4.14所示。去除大气相位后, 各像对的干涉相位与解缠相位的分量相干性和各PS点时间相干性分布图如图4.15所示。



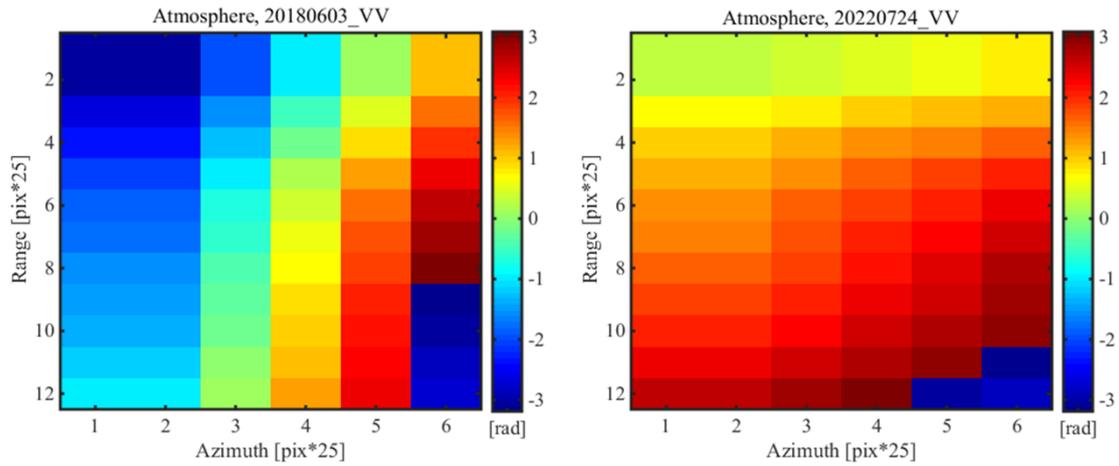
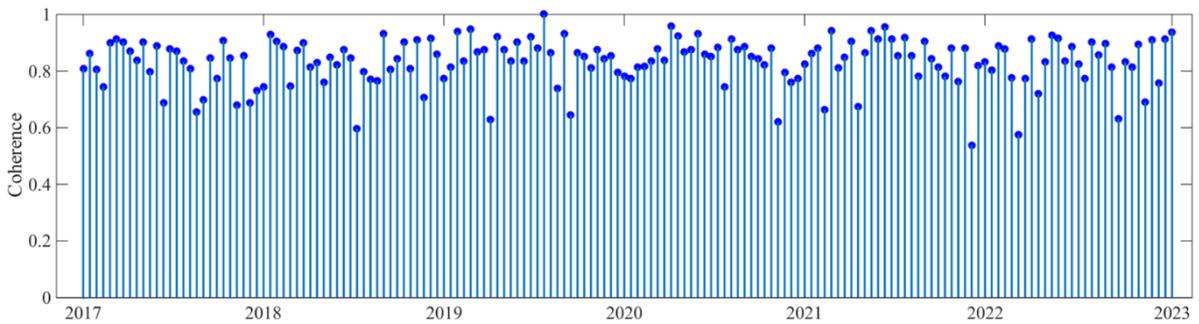
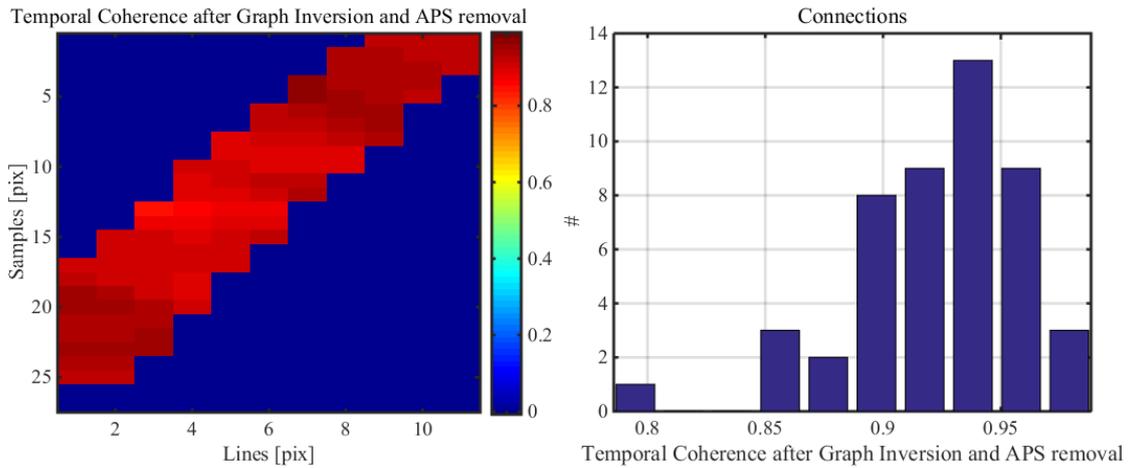


图 4.14 部分干涉对大气相位估计图



a) 各干涉像对的干涉相位与解缠相位的分量相干性



b) 各 PS 点时间相干性分布图

图 4.15 去除大气相位后相干性计算结果

4.3.3 形变求解

形变求解包括PS点精选、参数最终估计以及地理编码。通过采用结合桥梁特性的多重阈值法重新选取PS点，确定合适的参数估计范围，获得精选PS点的参数估计结果，将PS点由雷达坐标系转换至大地坐标系，得到位于桥梁上的PS点的最终时序变形。

1. PS精选

为准确估计大气相位，采用较高的ASI阈值选取PS点。得到的PS点虽然稳定可靠，但数量太少，不能反映桥梁结构整体的变形。为了更加全面的对桥梁整体变形进行准确监测，需要在新增PS点的数量同时保证质量。通过降低ASI阈值，粗选大量PS点。然后根据研究桥梁结构的散射特性，利用时序相干性和空间相干性阈值筛除粗选点中干涉质量较差的点以及不能反映桥梁真实变形的无效PS点。

本次研究设置ASI阈值为0.45粗选PS点，得到PS点分布结果如图4.16所示。利用前面计算得到的大气相位，对选取得到的PS点进行参数估计，得到各PS点的时序相干性如图4.17。

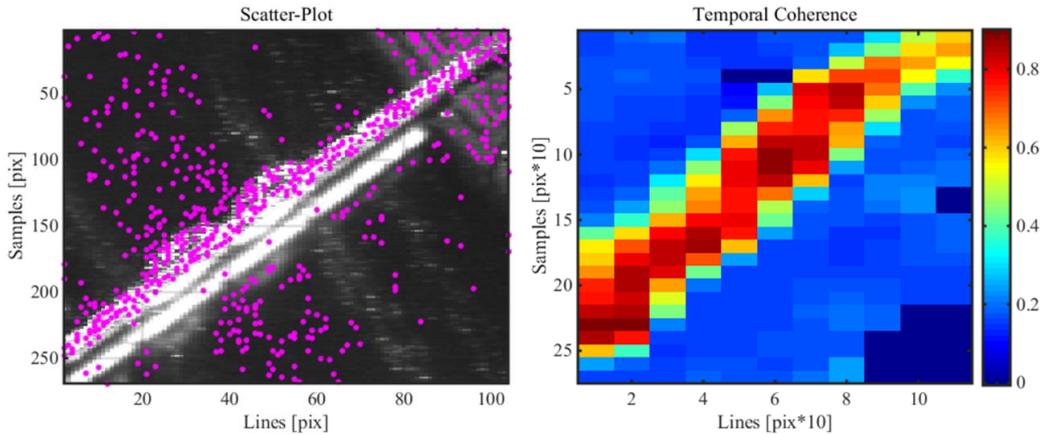


图 4.16 粗选 PS 点分布 图 4.17 粗选 PS 时序相干性分布

采用0.45的ASI阈值选取得到623个PS点。桥梁上PS点数量比较多，但是许多PS点位于水体中，还存在部分多次散射的PS点。这些PS点由于散射特征较差或者属于无效PS点，导致求解得到的时序相干性较差，即存在一定误差。误差沿着连接网络传递至桥梁上的PS点，降低桥梁变形求解的可靠度。设置时序相干性阈值为0.4，空间相干性阈值为0.25，结果如图4-18所示。最终得到精选后的PS点共261个，所有PS点都分布在桥梁以及桥梁沿线上。

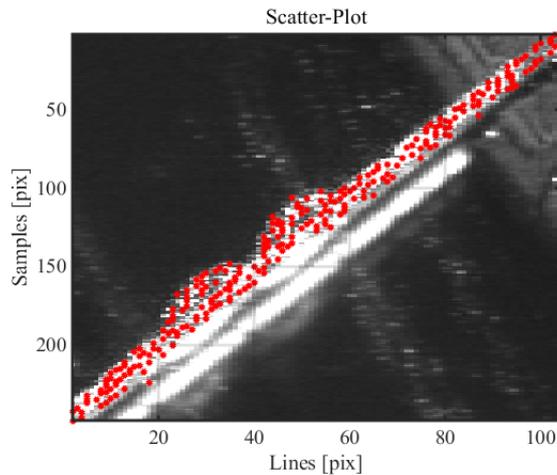
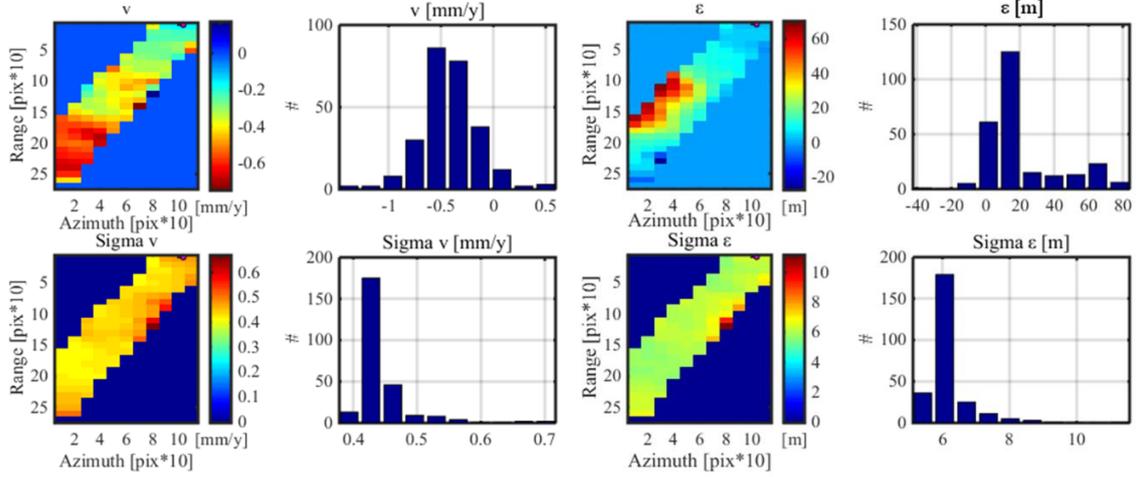


图 4.18 精选 PS 点分布

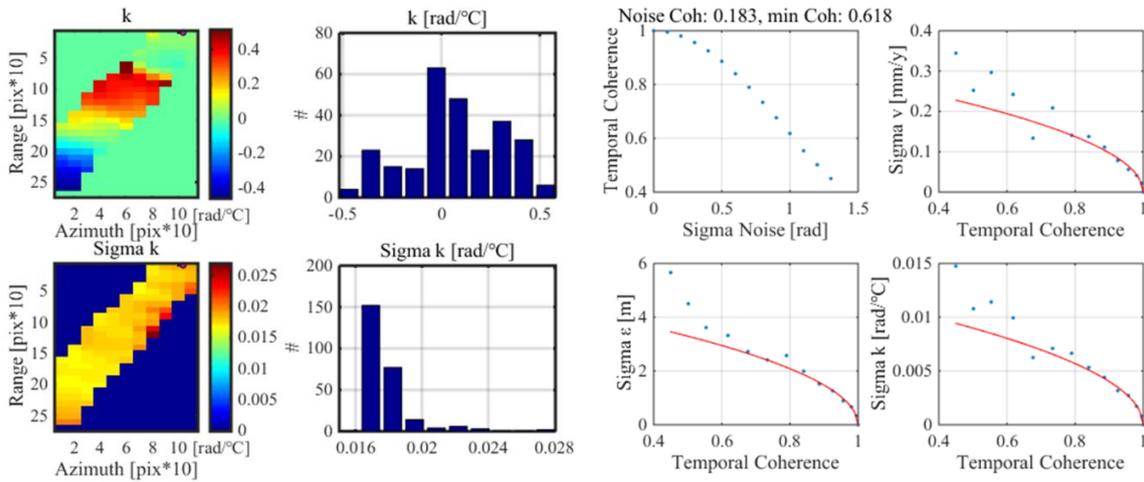
2. 参数最终估计与地理编码

根据参数初步估计得到各参数的上下限,然后选取包括各参数上下限的范围,作为最终变形求解中的参数估计的范围。选取 v 的范围是 $[-1.5,0.5]$ mm/year、 ε 的取值范围为 $[-40,80]$ m、 k 的取值范围是 $[-0.47,0.53]$ rad/°C。然后读取精准估计后的大气相位,对参数进行精确估计,得到参数估计的结果如图4.19所示。



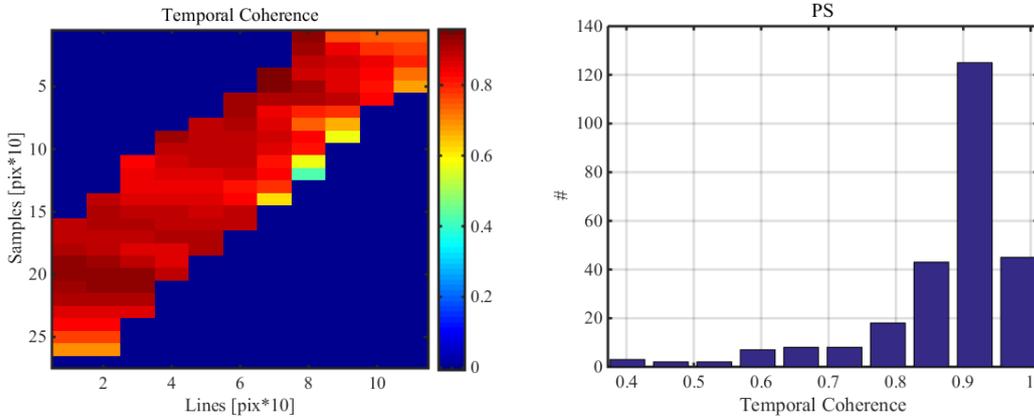
a) 线性变形速率

b) 高程误差



c) 热膨胀系数

d) 误差



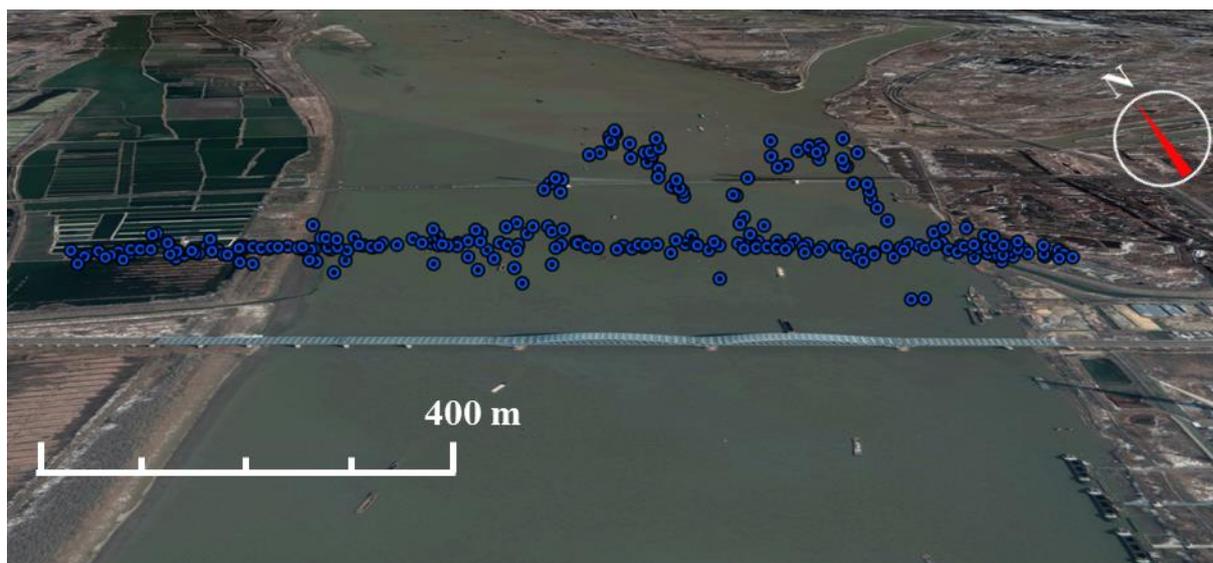
e) PS 点时间相干性分布

f) PS 点时间相干性统计

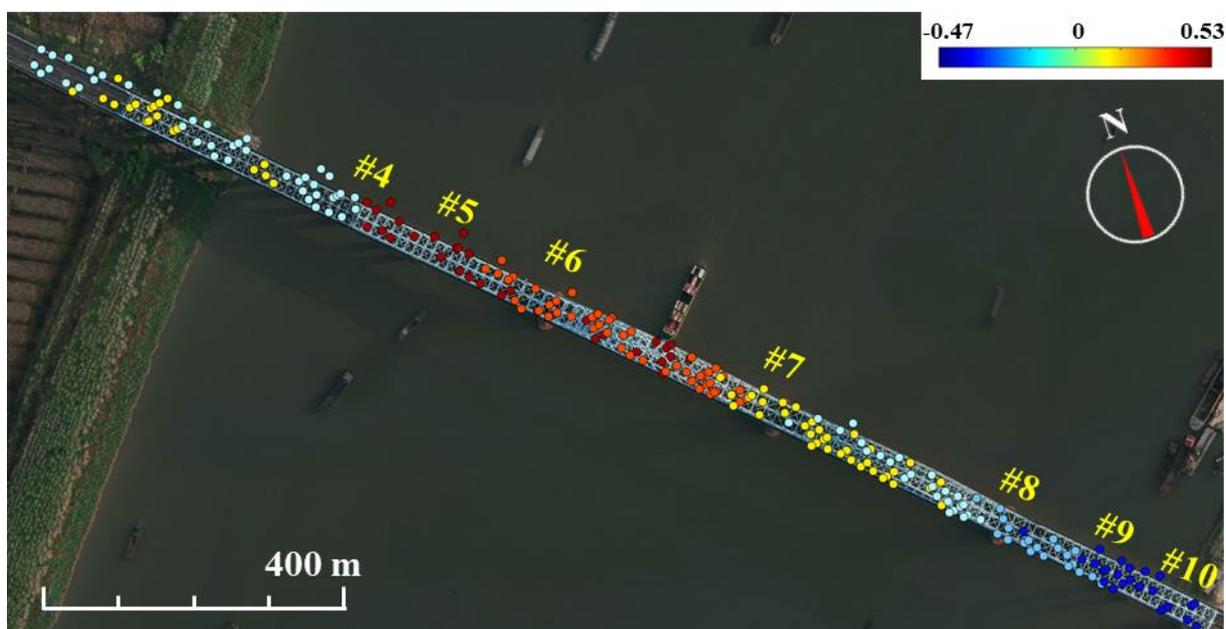
图 4.19 最终参数估计结果

通过图4.19a)、b)、c)可以看出，对应参数估计结果符合研究桥梁几何结构以及变形特征。图4.19d)是估计参数以及噪音的标准差与PS点时序相干性的相关关系，可以看出随着时序相干性的增大，对应标准差都在减小。图4.19e)、f)为PS点时序相关性分布和统计统计图，其中绝大多数PS点都保持极高的时序相干性。

通过将PS点的参考坐标系从雷达坐标系转换为WGS地理坐标系，并在GoogleEarth中三维显示如图4.20a)所示。并且QGIS中二维显示PS点的平面位置，如图4.20b)所示。



a) GoogleEarth 三维展示



b) QGIS 二维展示

图 4.20 PS 点地理编码

从三维显示可以看出，PS点形成的三维图形和研究桥梁的几何外观相近，中间PS点的分布出现类似拱弧的形状。在PS点的二维影像中，各点的颜色表示其热

膨胀系数。可以看出由中间的#7支座向两侧支座，热膨胀系数绝对值逐渐增大，并且呈现对称分布。与桥梁纵向中间固支，两端活动的对称支座分布变形特征一致。基于PS点的高程和变形解算结果与实际结构几何与变形特征十分符合，而是得到的PS点都具备较高的时序相干性。因此，本次基于改进的桥梁PS-InSAR技术，处理S1A数据得到的桥梁PS点时序变形结果具备可靠性。

4.4 CSK 数据处理

本次处理采用聚束模式成像的高精度CSK数据，相对于S1A数据的分辨率较高，同时对应失相干程度更加严重。其数据处理流程与S1A数据相似，但是由于失相干较严重，部分参数设置会有区别。下文将简要讲述CSK数据的处理过程。

4.4.1 影像前处理

采用公共主影像组合模式，基于时空基线最小原则选取20180419期影像为主影像。得到各影像的相干性以及时空基线分布如图4.21所示。相比与S1A数据，CSK影像的空间基线较大，而且影像之间的相干性较差。

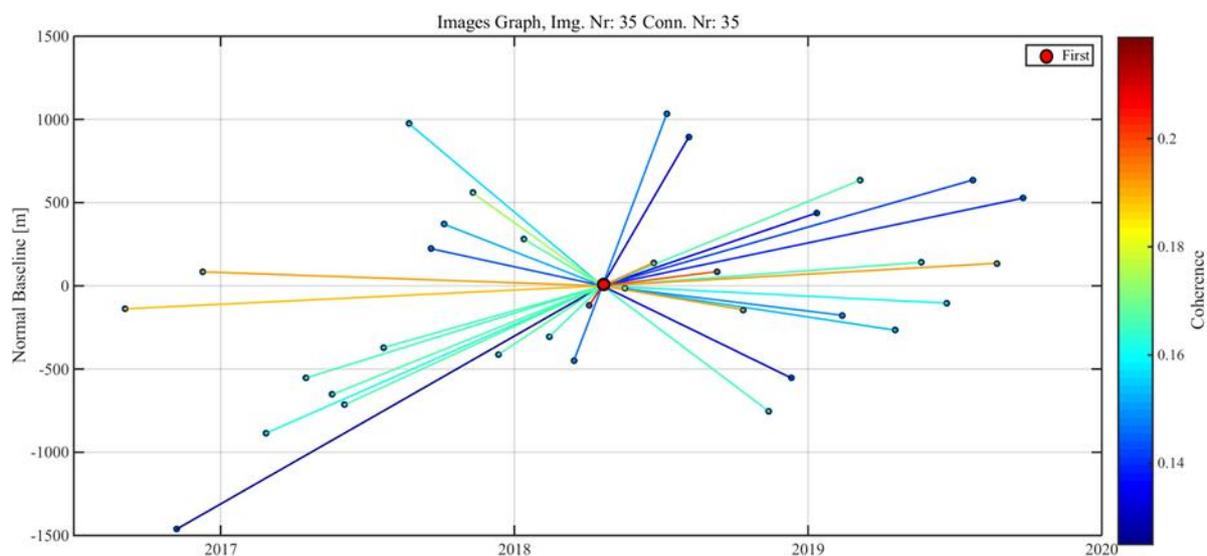


图 4.21 CSK 影像组合

与S1A数据处理相同，为防止非桥梁PS点过多引起误差传递并精确选取参数估计范围，将原始影像裁剪为只包含目标桥梁的尺寸，如图4.22所示。



图 4.22 CSK 影像裁剪

对裁剪后的影像进行配准，计算平均振幅和ASI指数，获取转换为雷达坐标系
的参考DEM，得到结果如图4.23所示。

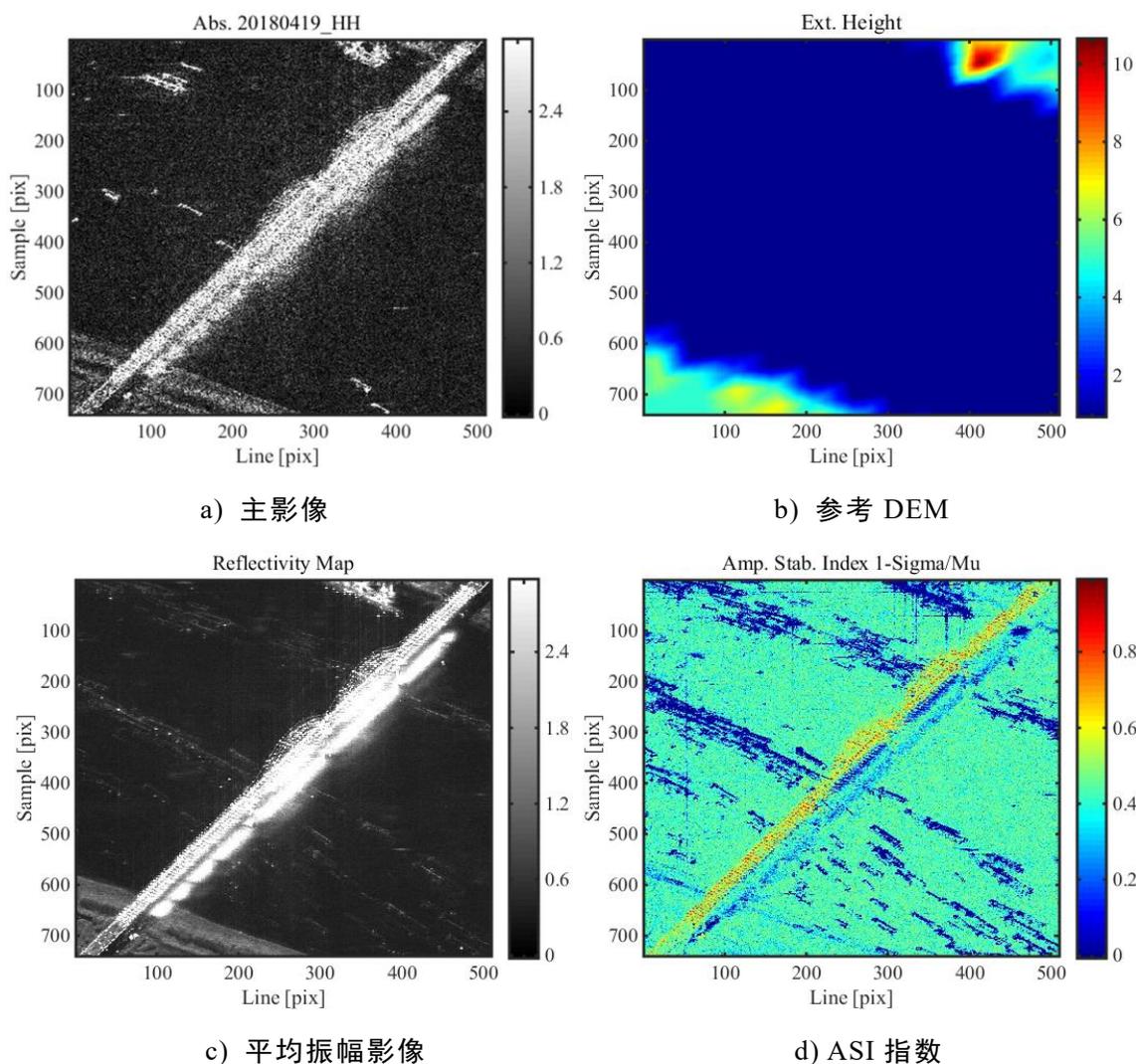


图 4.23 CSK 影像计算结果

由于CSK数据的分辨率比S1A数据高，对比图4.6可以发现，CSK的强度影像

和振幅影像明显比S1A数据更加清晰。从强度影像中能够明显看出跟研究桥梁一致的外表面轮廓。从图4.23d)可以看出,在裁剪影像范围内,桥梁位置处像素的ASI指数明显高于其他位置像素。

对CSK影像序列进行差分干涉,去除地形相位和参考椭球相位后,得到干涉图如下图4.24所示。

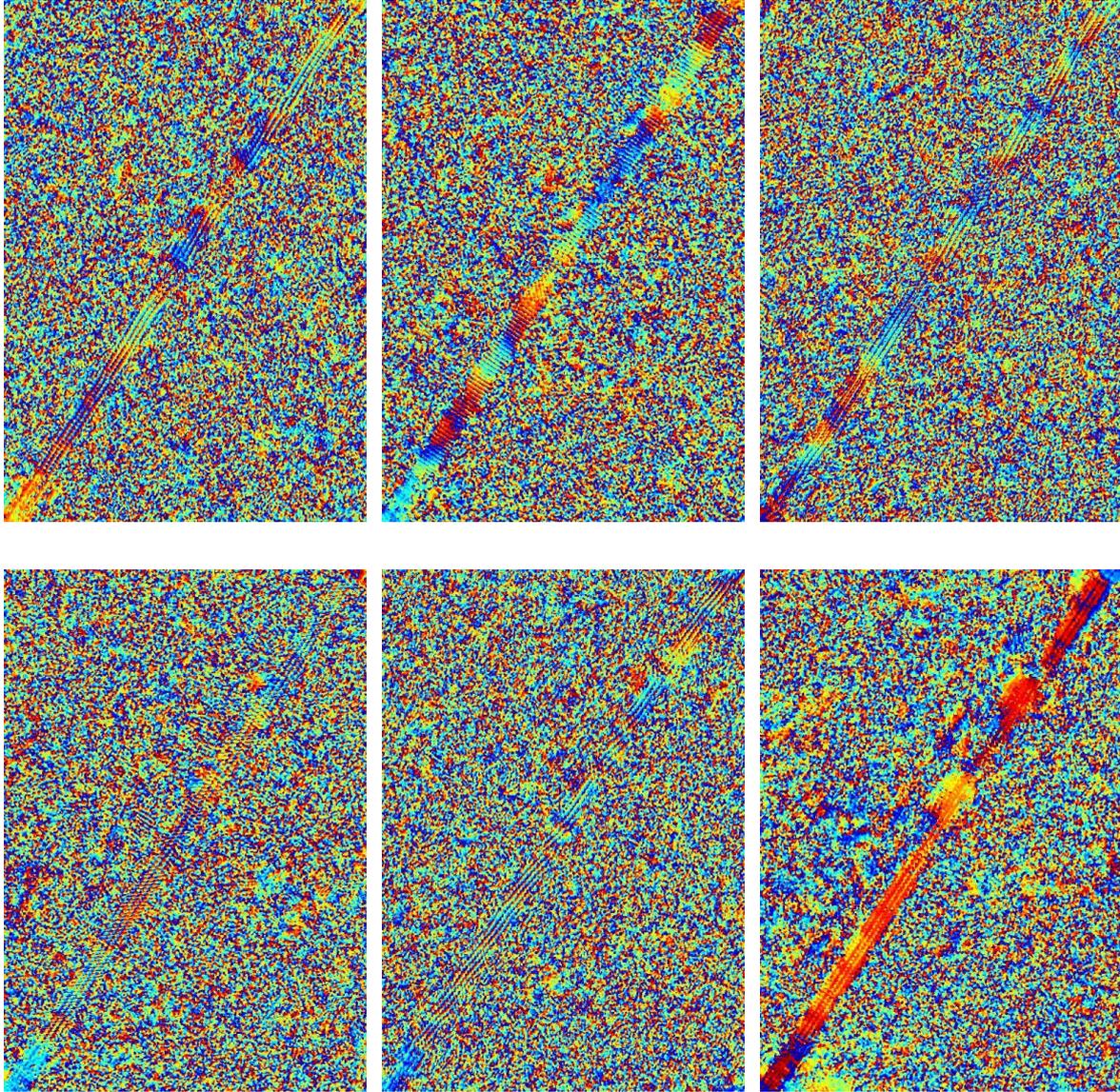


图 4.24 CSK 干涉图

图4.24给出了部分CSK数据的干涉图。大部分干涉图都像前三张图,桥梁位置处呈现变化明显的干涉条纹。少部分如第四、五张图,可以看到变化的干涉条纹,但不是很明显。极少部分如第六张图,桥梁处没有出现交替的干涉条纹。与S1A数据相比,CSK数据的干涉条纹更加密集。这是由于CSK数据波长较短,目标桥梁发生相同的变形时,相位变化更加明显,对应干涉条纹更加密集。

根据式(2.9),利用生成的差分干涉图可求得影像中各像素的时序相关系数如图4.25所示。可以看到目标桥梁位置出像素相干系数相较于其他位置较高。但由

于高精影像测量的精度和分辨率的提高，更容易出现失相干。所以对比图4-8可以看出，CSK数据中桥梁位置处像素时序相干系数较高的比例明显比S1A数据低。

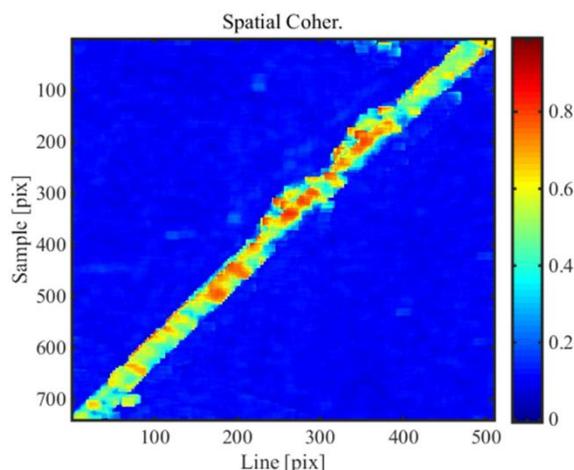


图 4.25 CSK 时序相干系数图

4.4.2 大气相位估计

1. PS点初选

CSK影像分辨率较高，相比于S1A影像同样范围内能够得到更加密集的PS点，且更加容易出现失相干。而进行大气相位去除时需要空间分布合理的高相干性PS点，因此初选PS点需要设置更高的ASI阈值和抽稀参数。本次处理选取ASI阈值为0.8，抽稀参数DS设置为15，选取得到71个PS点。对得到的PS点进行Denaunlay连网，得到201个连接基线。结果如图4.26所示。

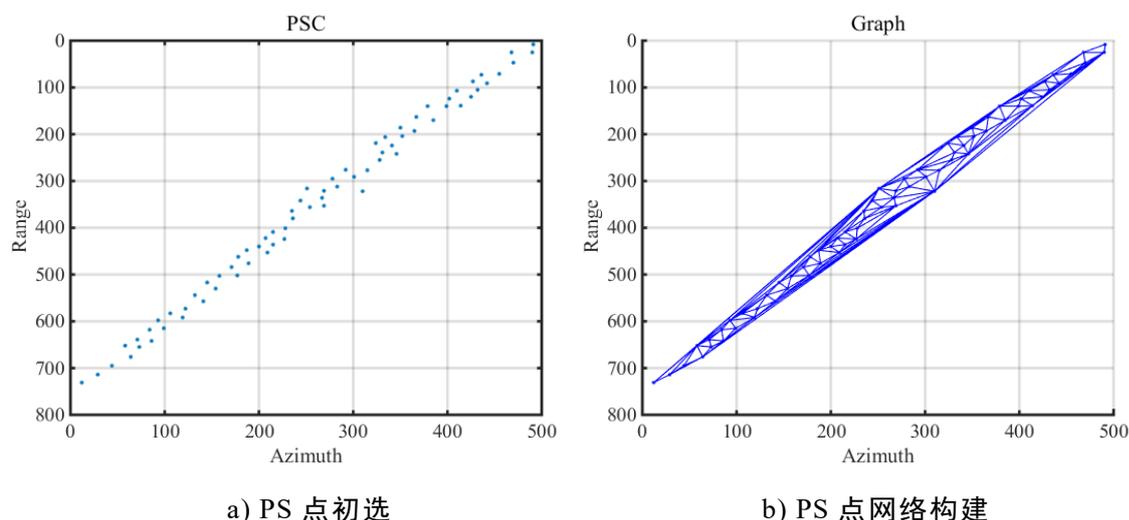


图 4.26 CSK 数据 PS 点初选和连线

2. 参数初步估计

根据前文S1A数据的处理经验，依旧采用线性变形速率、高程误差以及热膨胀系数建立干涉模型。裁剪影像内也只包含目标桥梁，与S1A数据一样，根据桥梁的几何与变形特征确定参数取值范围。S1A数据的波长大概为CSK的两倍，由式

(2.15)可知，单位温度引起的CSK数据相位的变化大概为S1A的两倍。所以CSK数据的 k 的初步估计取值范围比S1A大一倍。最终选取 v 的范围是 $[-5,5]$ mm/year、 ε 的取值范围为 $[-70,70]$ m、 k 的取值范围是 $[-0.8,0.8]$ rad/°C。计算得到的PS点连接网络基线相关性如图4.27所示。与图4.10相比，可以发现CSK低相干连接最小值比S1A数据更大，但是高相干连接的比例较小，且部分较短连接基线存在相关性低的情况。设置0.6的连接阈值，重新连接生成网络，计算连接网络的相干性结果如图4.27所示。优化后的网络高相干性连接数量增加。

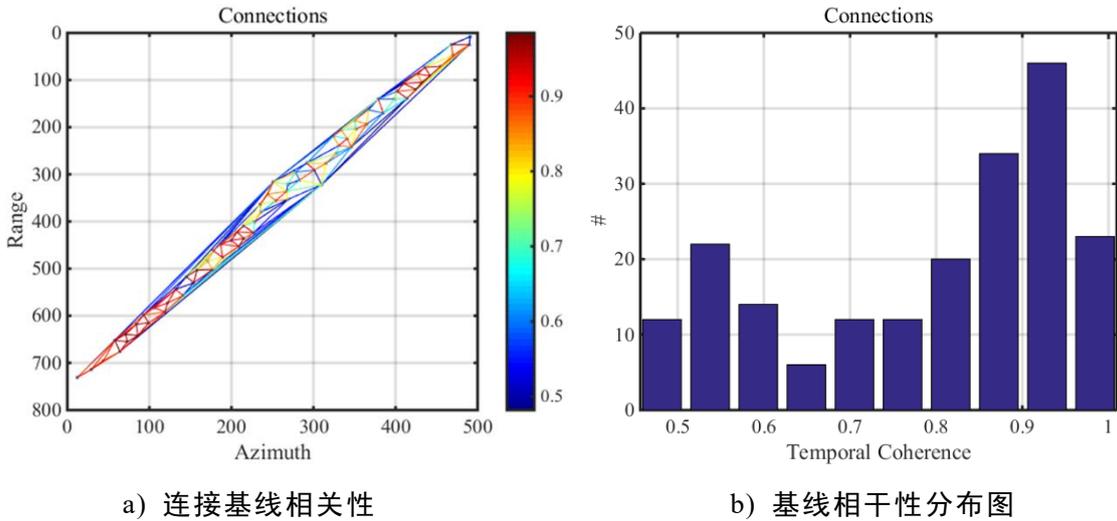


图 4.27 PS 点连接网络基线相关性

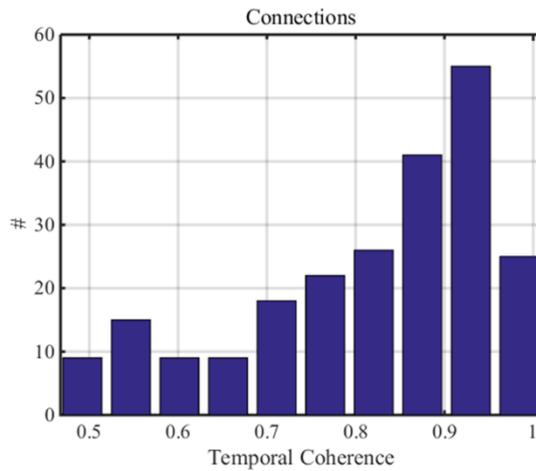
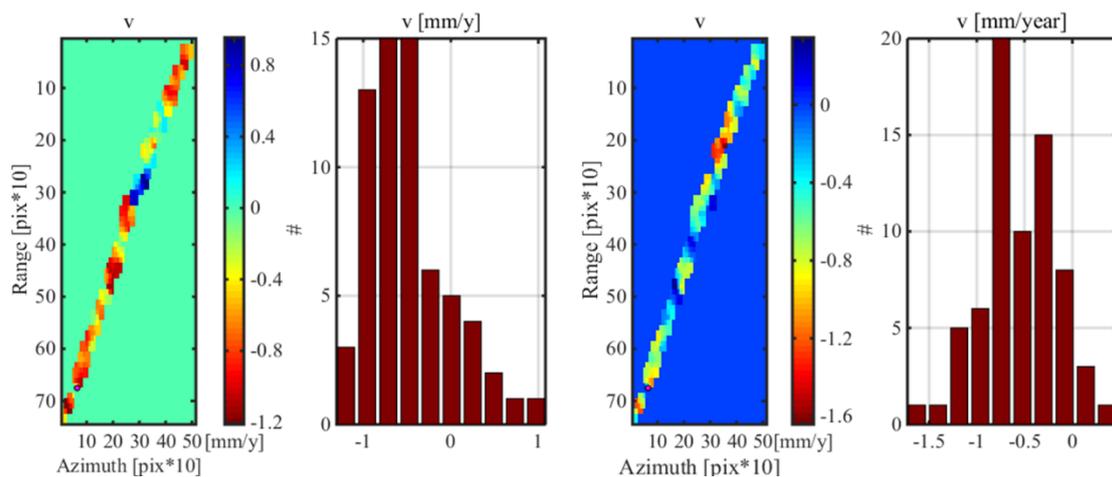
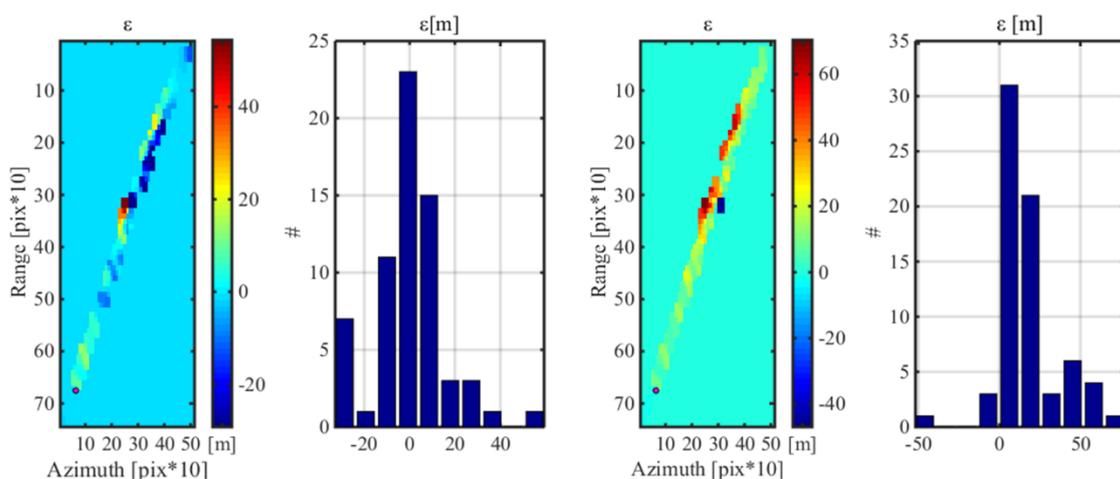


图 4.28 优化后 PS 网络基线相关性分布

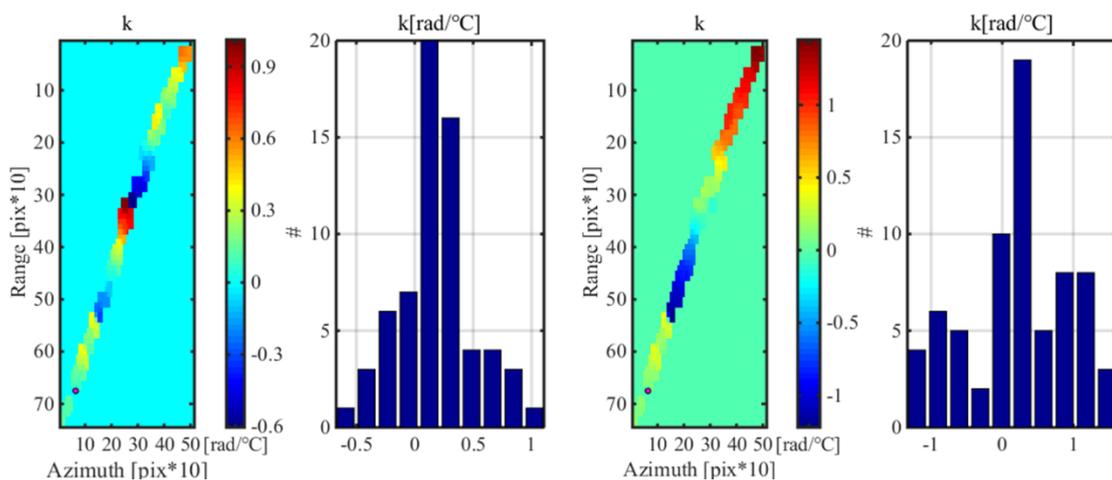
进行PS网络优化时，发现如果设置的连接阈值过高，对应高相干连接数量会增加。但是同时会导致部分低相干连接断开，加上原连接网络中桥梁位置处存在低相干连接，从而可能会导致误差会沿着低相干连接在桥梁上进行传递，从而会导致参数估计出现较大误差。图4.29对比了选取不同阈值进行PS网络优化的参数估计结果。



(a) 线性变形速率



(b) 高程误差



(c) 热膨胀系数

图 4.29 参数初步估计结果

(左边为高阈值优化, 右边为低阈值优化)

从图4.29a)可以看出, 不同阈值优化得到的线性变形速率沿桥梁方向都较小。符合桥梁永久变形较小, 对应线性速率较小的变形特征。从图4.29b)可以看出, 较低阈值对应的高程误差沿着桥梁方向都存在起伏, 并且在跨中位置大于两侧。符

合桥梁中间两跨为钢拱桥，造成沿桥梁方向高度起伏，且中间两跨高于两侧的几何特征。但是高阈值对应的高程误差沿桥梁呈现不规则变化，完全不符合桥梁几何特征。从图4.29c)可以看出，低阈值对应的热膨胀系数沿着跨中对称，且绝对值从跨中向两端增大。符合桥梁结构跨中固支两端可活动，造成温度变形对称且向两端增大的变形特征。而高阈值对应热膨胀系数呈现由中间向两端绝对值减小的变化趋势，不符合桥梁变形特征。综上所述，对高精度影像的PS点网络进行优化时，设置不同连接阈值对线性变形速率估计结果影响较小，而对高程误差和热膨胀参数影响较大。此外，低阈值得到参数估计结果与桥梁结构的几何和变形特征一致，有效地验证了参数估计结果的可靠性。

3. 大气相位分离

根据线性变形速率、高程误差以及热膨胀参数的初步估计结果，利用式(2.15)即可获得各PS点的残余相位，分离得到大气相位如图4.30所示。去除大气相位后，各像对的干涉相位与解缠相位的分量相干性和各PS点时间相干性分布如图4.31所示。

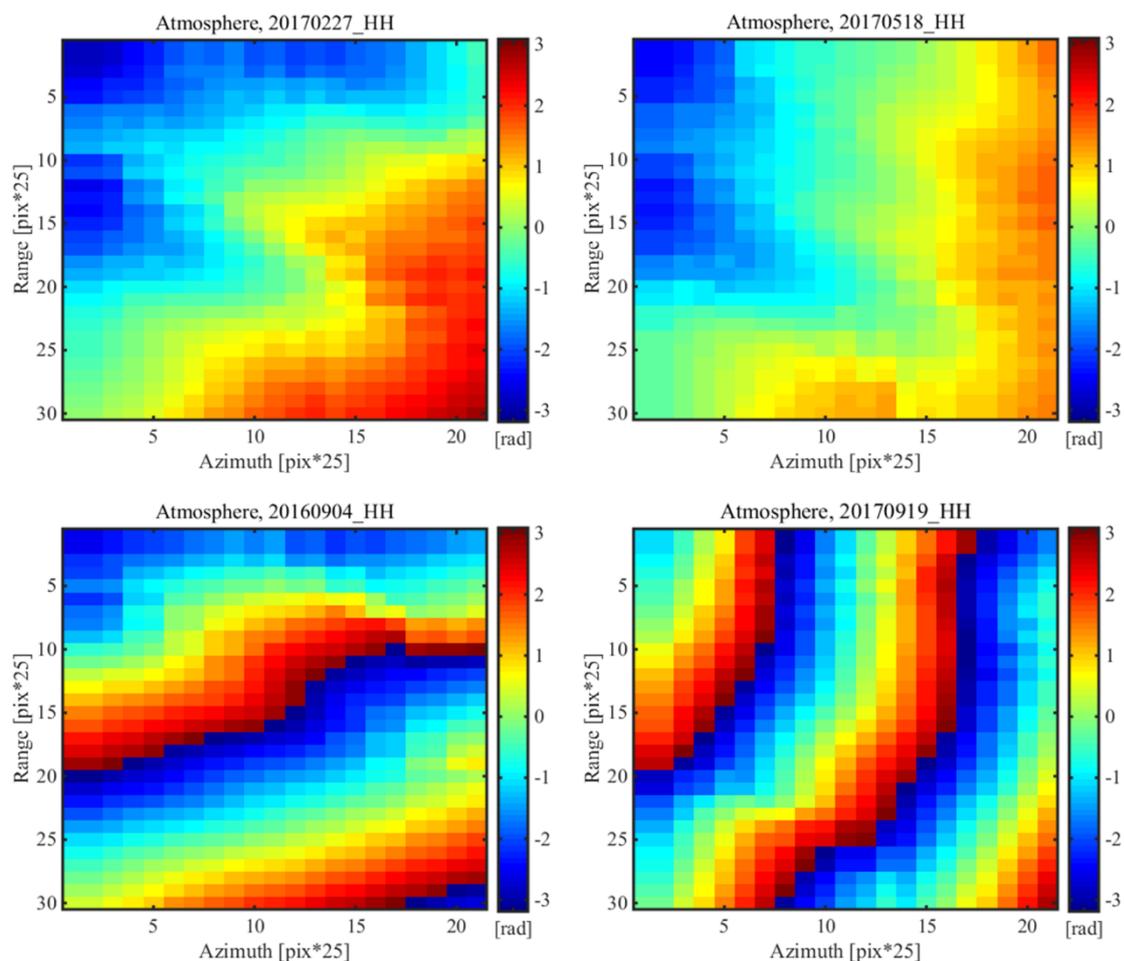
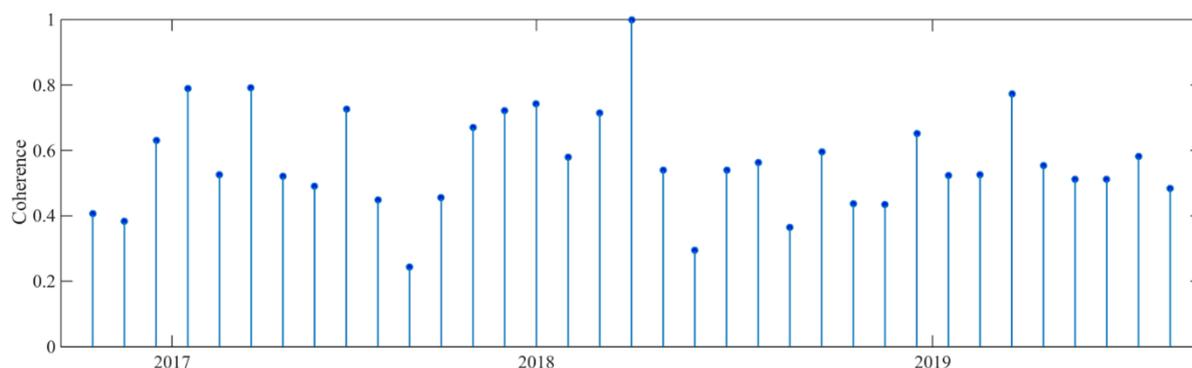
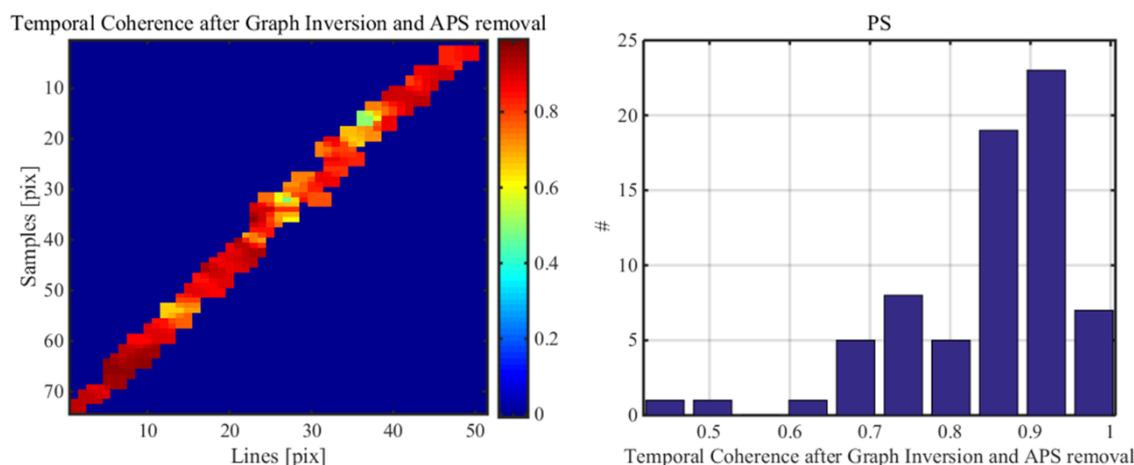


图 4.30 部分干涉对大气相位估计



a) 各干涉像对的干涉相位与解缠相位分量相干性



b) 各 PS 点时间相干性分布

图 4.31 去除大气相位后相干性计算结果

由于高精度影像的波长较短，所以相同大气状态对应的大气相位梯度变化更加明显。与S1A数据相比，CSK数据的大气相位干涉条纹变化更明显。同时由于高精度影像数据处理容易出现失相干，所以大部分干涉对的大气相位如图4.30中后两张图所示，变化比较大，对应此图4.31a)中去除大气效应后干涉对之间的相干性整体偏低。但图4.31b)选取PS点处的像素相干性都较高，在桥梁位置处像相干性很高。代表桥梁位置处参数估计比较准确，对应大气相位估计也比较准确。

4.4.3 形变求解

相比于S1A影像数据，CSK影像分辨率高，对应裁剪影响范围能够得到的PS点多。但容易出现失相干，因此粗选PS点时设置的ASI阈值以及精选PS点设置的时序相干性和空间相干性阈值都要比S1A大一些，以保证获得PS点数量和变形求解的准确性。

本次研究设置ASI阈值为0.55粗选PS点，共获取4404个PS点，如图4.32a)所示。设置时序相干性阈值为0.5，空间相干性阈值为0.33。去除掉分布在水域中以及多次散射的PS点，最终得到精选后的PS点共1550个，结果如图4.32b)所示。

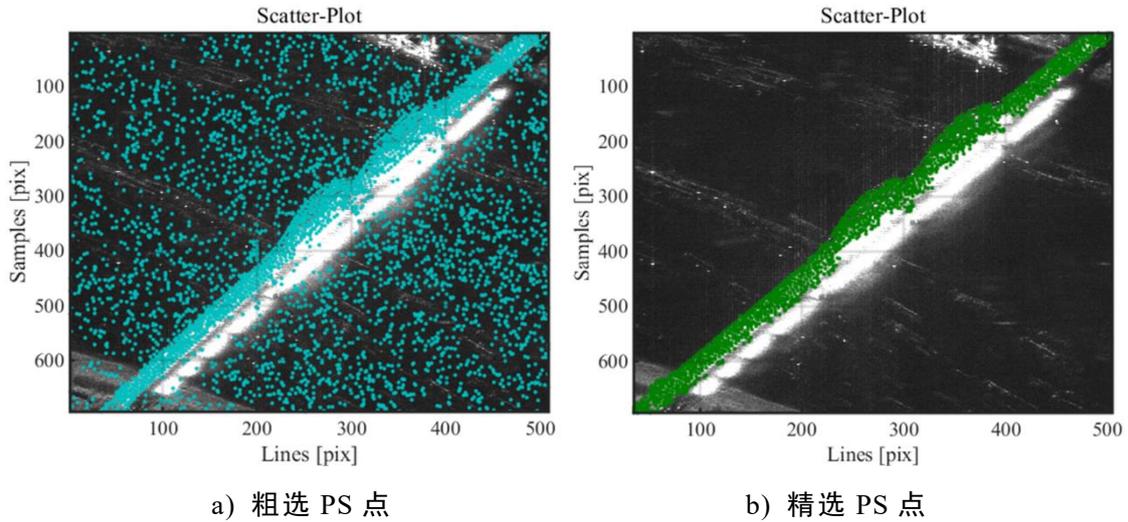
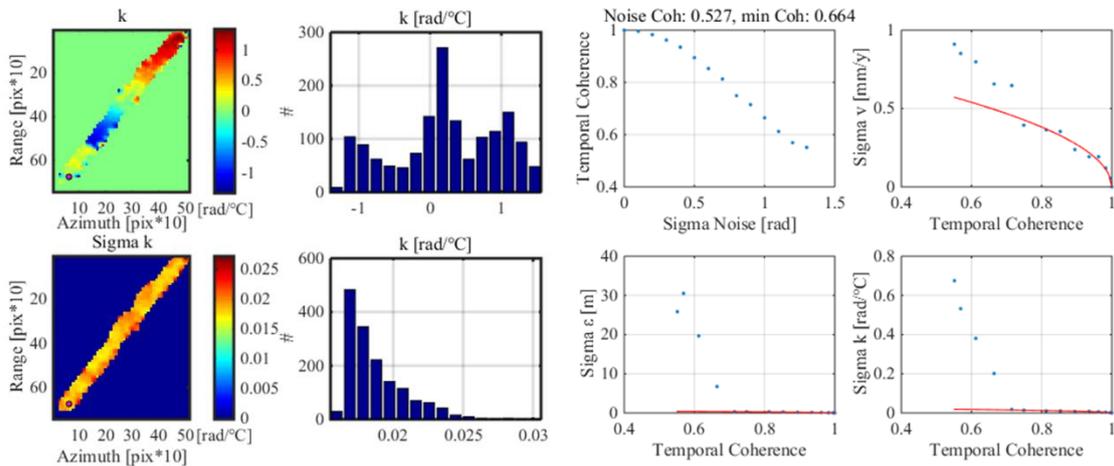
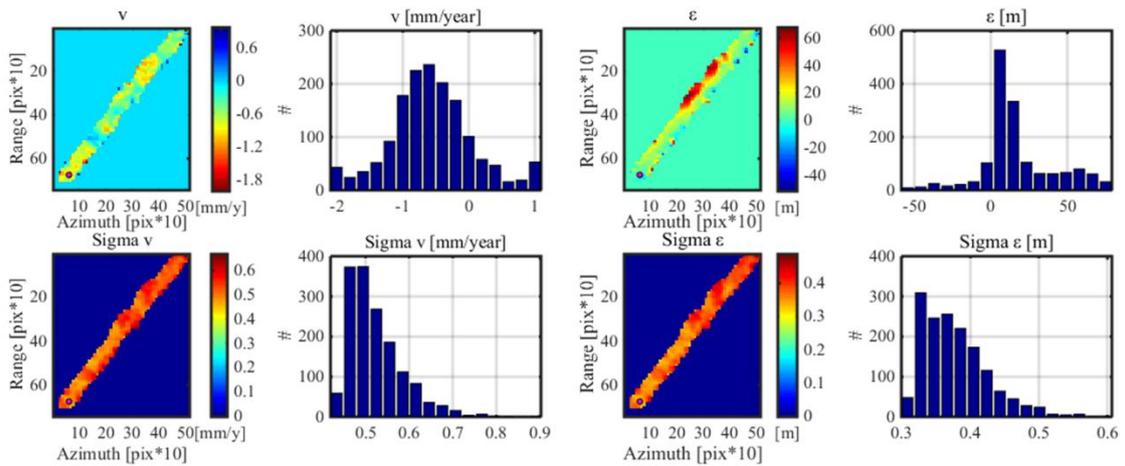


图 4.32 PS 点选取

根据参数初步估计得到各参数的上下限,然后选取包括各参数上下限的范围,作为最终变形求解中的参数估计的范围。选取 v 的范围是 $[-2,1]$ mm/year、 ϵ 的取值范围为 $[-55,75]$ m、 k 的取值范围是 $[-1.31,1.47]$ rad/ $^{\circ}$ C。然后读取精准估计后的大气相位,对参数进行精确估计,得到参数估计的结果如图4.33所示。



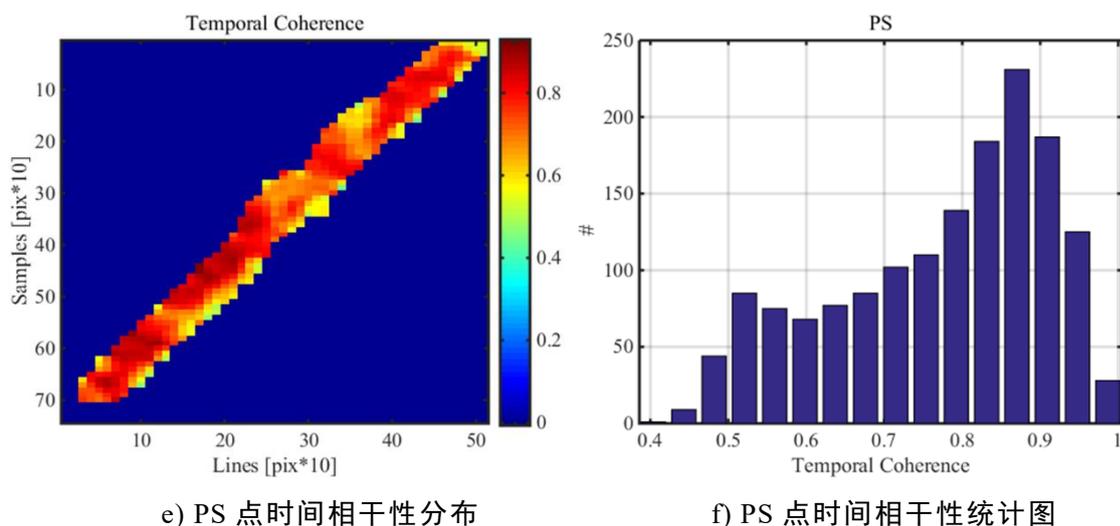


图 4.33 最终参数估计结果

通过图 4.33a)、b)、c)可以看出，对应参数估计结果符合研究桥梁几何结构以及变形特征。图 4.33d)为估计参数以及噪音的标准差与 PS 点时序相干性的相关关系，可以看出随着时序相干性的增大，对应标准差都在减小。图 4.33e)、f)为 PS 点时序相关性分布和统计图，其中大多数 PS 点都保持极高的时序相干性。

利用高精度影像数据能够得到大量包含桥梁变形信息的 PS 点，但是存在部分 PS 点可能并不能反映桥梁的变形信息。对 PS 点进行经纬高的三维展示，如图 4.34 所示。

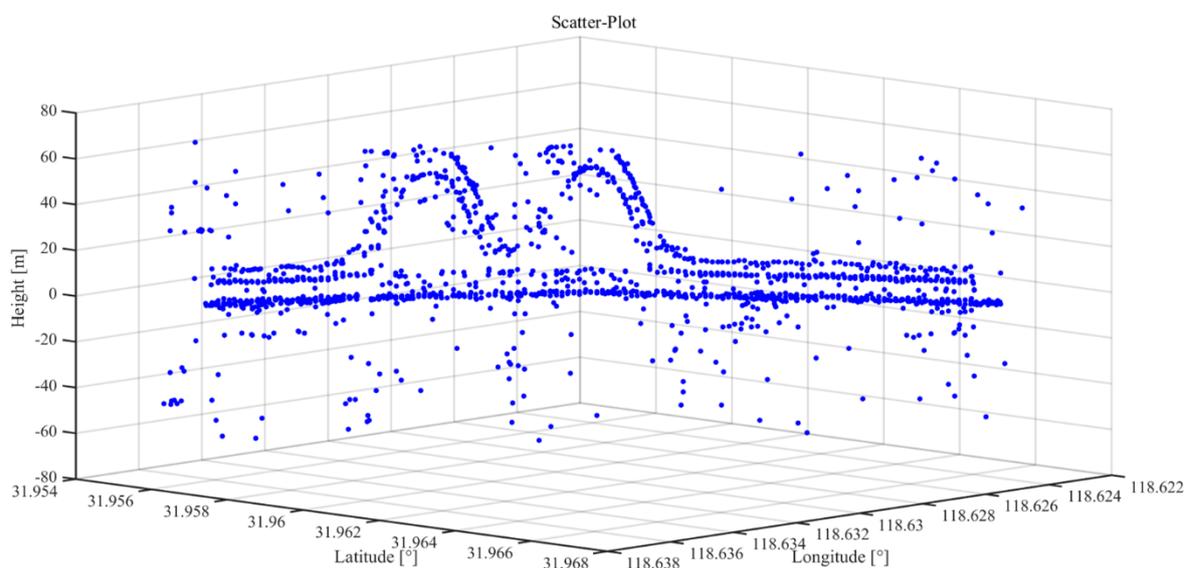
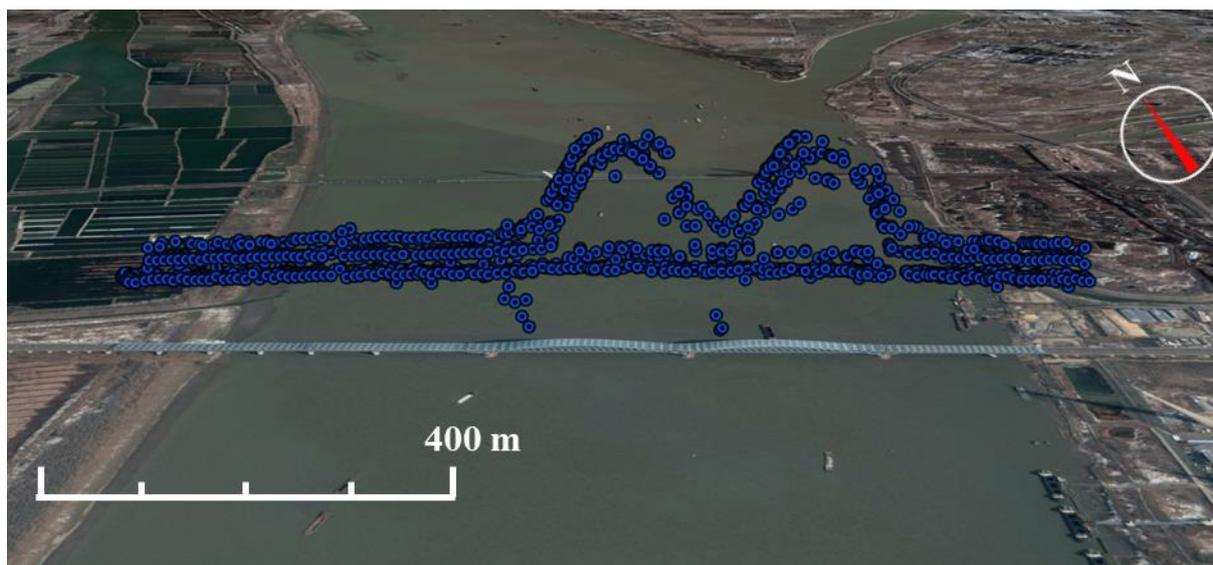
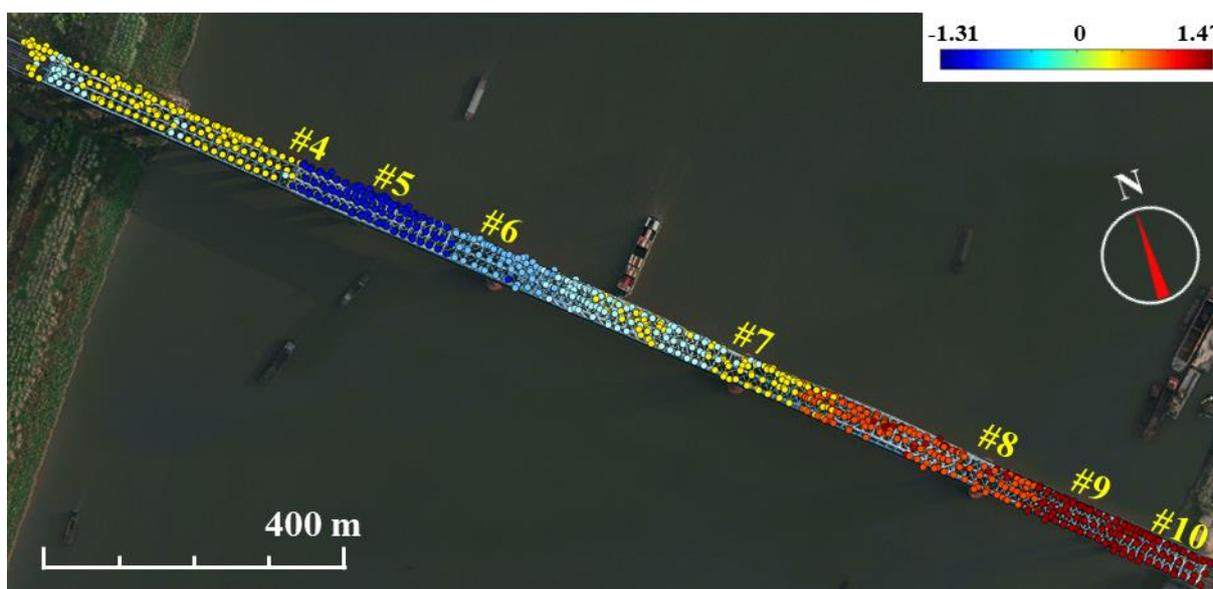


图 4.34 PS 点三维分布

可以看到整体PS点的分布与桥梁几何外形相近，但存在部分PS点高程异常，不在桥梁位置上。利用桥梁的几何信息，去除掉高程异常点，最终得到1206个PS点。对PS点进行地理编码，分别在GoogleEarth和QGIS中进行三维及平面展示，如图4.35所示。



a) GoogleEarth 三维展示



b) QGIS 二维展示

图 4.35 PS 点地理编码

从图4.35a)可以看出，大量PS点形成的三维图形与研究桥梁的几何外观高度契合，中间位置PS点的分布出现明显的拱弧。在PS点的二维影像中，各点的颜色表示其热膨胀系数。可以看出由跨中向两侧支座，热膨胀系数绝对值逐渐增大，并且呈现对称分布。与桥梁纵向中间固支，两端活动的对称支座分布变形特征一致。基于PS点的高程和变形解算结果与实际结构几何与变形特征十分符合，而且得到的PS点都具备较高的时序相干性。因此，本次基于改进的桥梁PS-InSAR技术，处理CSK数据得到的桥梁PS点时序变形结果具备可靠性。

4.5 本章小结

本章基于改进的桥梁PS-InSAR方法，利用SARPROZS软件分别处理了中精度

S1A数据和高精度CSK数据，获得了较为可靠的桥梁变形估计结果。得到结论如下：

(1) 在PS-InSAR处理中，裁剪只包含桥梁区域的影像。通过文献调研桥梁的几何与结构变形信息，能够帮助快速准确的确定参数取值范围，提高解算PS点的时间相干性。并且能根据桥梁结构信息判别参数估计结果的优劣，有效提升参数估计结果的可靠性。

(2) 在目标桥梁的变形解算过程中，参考点的选取对高程和热膨胀系数影响很大。通过SARPRoZ自选的参考点得到的参数估计结果可能会与桥梁实际差距较大。利用桥梁结构变形和几何信息，选取变形较小且与桥面平齐的参考点，能够获得符合桥梁集几何与变形特征一致的参数估计结果。

(3) 中精度S1A数据获取得到的PS点数量较少，桥梁上PS点的连接基线相干性较高，通过合理的优化PS网络能够使得获取的PS点保持较高的时间相干性。高精度CSK数据能够获得大量PS点，但是桥梁PS点连接网路中存在低相干连接，数据处理过程中容易由于参数设置不当引起严重失相干，导致变形求解失败。

第5章 基于有限元的大跨桥梁 InSAR 变形分解与验证

5.1 引言

利用 InSAR 技术获取的桥梁变形为 LOS 向变形，为桥梁实际变形在 LOS 向的投影。而且利用 InSAR 测量桥梁变形的数据采样间隔较大，无法与 SHM 监测变形数据直接对比。为了获取桥梁的真实变形，验证 InSAR 测量桥梁变形的准确性。建立目标桥梁的有限元模型，利用有限元模拟桥梁在均匀温度作用下的三维变形，确定真实三维变形的关系。再根据 InSAR 测量几何分解 LOS 向变形得到的桥梁支座纵向变形，利用纵向变形与温度建立温度变形模型。将 InSAR 获取的支座纵向变形和温度变形模型分别与有限元模拟支座纵向变形和 SHM 实测温度变形模型对比，验证 InSAR 求解变形的准确性。

5.2 有限元模型建立与校核

5.2.1 有限元模型建立

本次研究使用 ANSYS 2020R1 建立研究桥梁的三维有限元分析模型。全桥采用 BEAM188 单元模拟桁架拱、横向连接杆件、主梁加劲大小纵梁、吊杆，采用 SHELL181 单元模拟主梁桥面系和主梁横隔板。全桥共 59918 个节点，112706 个单元，其中梁单元 58370 个，壳单元 54336 个，如图 5.1 所示。有限元中的材料参数设置如表 5.1 所示。有限元模型的边界条件设置为：桥梁中间墩中间支座处完全约束（纵向 X、横向 Y、竖向 Z），上下游支座处约束竖向（Z 方向）、纵向（X 方向）；其他桥墩中间支座处约束竖向（Z 方向）、横向（Y 方向），上下游支座处约束竖向（Z 方向）。

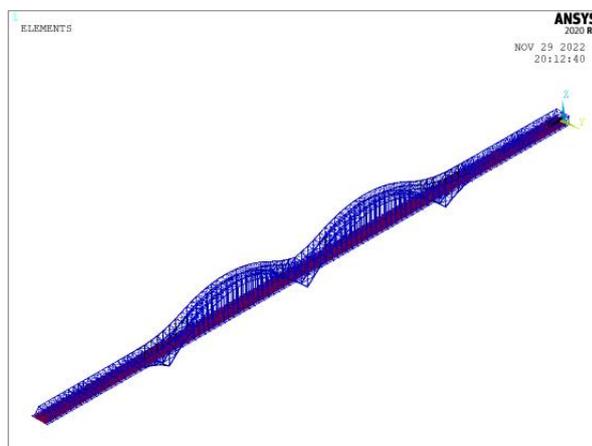


图 5.1 有限元模型

表 5.1 有限元模型材料参数表

构件名称	主桁	平联	横向联结系	桁外轻轨	整体桥面板
弹性模量 (N/mm ²)	2.06×10 ⁵				
容重 (kN/mm ³)	103.52	74.38	75.15	131.08	68.53
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
热膨胀系数 (°C ⁻¹)	12×10 ⁻⁶				

5.2.2 有限元模型校核

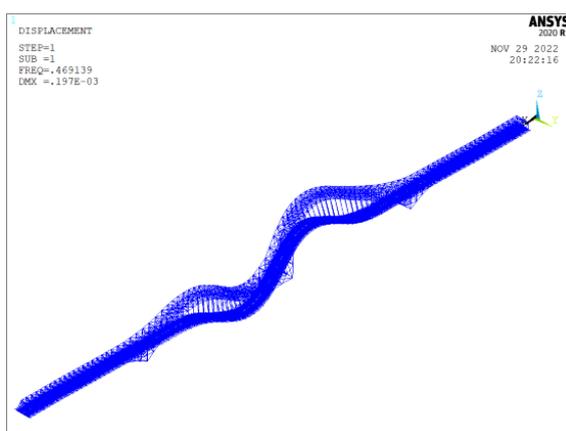
桥梁结构的温度变形主要与截面刚度和热膨胀系数有关。通过求解桥梁的前四阶模态振型与文献中的实测值对比，验证刚度的可靠性。按照钢材的热膨胀系数代表值计算支座纵向变形与温度线性相关系数，与已有文献的实测与模拟值对比，验证能够利用有限元模拟支座长期变形。

利用ANSYS模态分析模块求解前四阶频率振型，与文献^[134]中的实测值对比如表5.2所示，振型如图5.2 前四阶振型所示。前四阶频率误差在±10%范围以内，振型特征一致，验证了该有限元模型刚度的准确性。

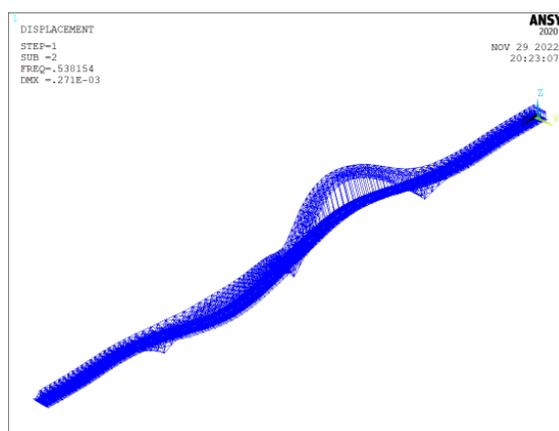
表 5.2 桥梁模态对比

阶数	频率实测值	振型特征	频率计算值	误差
第一阶	0.508	竖向反对称+横向反对称	0.469	-7.65%
第二阶	0.512	横向反对称+扭曲	0.538	5.11%
第三阶	0.5581	横向正对称	0.591	5.86%
第四阶	0.965	竖向正对称	0.927	-3.97%

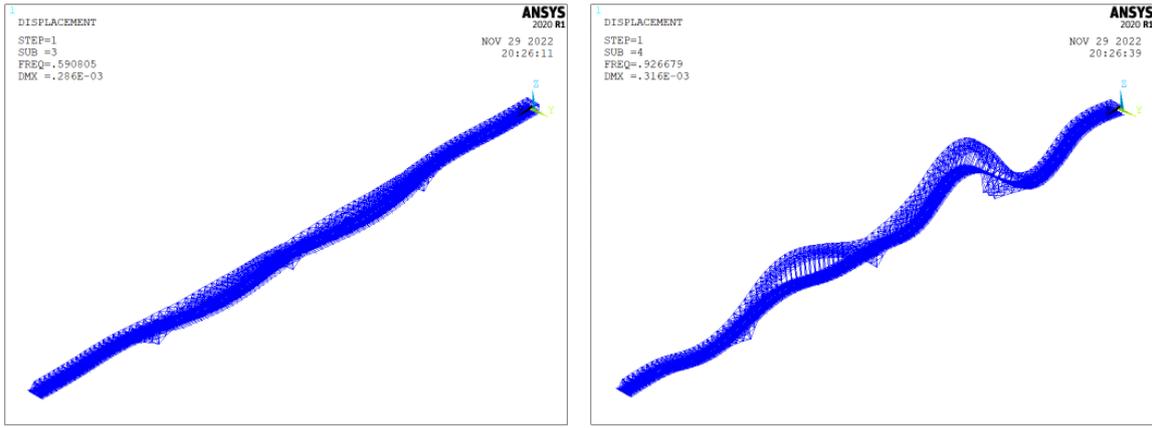
注：误差=(计算值-实测值)/实测值



a) 一阶



b) 二阶



c) 三阶

d) 四阶

图 5.2 前四阶振型

通过对有限元模型施加变化的均匀温度场，得到各支座的纵向变形。建立支座纵向变形与温度的线性相关模型，获取相关模型的斜率。与文献^[135]中的实测值和有限元模拟值对比结果如表5.3所示。与文献中的模拟值相比，斜率基本一致，与实测值的误差在10%之内。因此可以利用有限元模型模拟桥梁结构的长期变形。

表 5.3 斜率对比

支座	#4	#5	#6	#8	#9	#10
ANSYS	7.6298	6.3294	3.9964	3.9964	6.3294	7.6298
文献实测值	7.3168	6.0485	4.2099	4.4197	6.1214	7.4790
文献模拟值	7.6320	6.3360	4.0320	4.0320	6.3360	7.6320
误差	-4.28%	-4.64%	5.07%	9.58%	-3.40%	-2.02%

5.3 InSAR 变形分解与对比

5.3.1 基于有限元模型的 InSAR 变形分解

本次InSAR变形结果准确性通过支座变形对比验证，由于S1A和CSK数据的精度不同，得到PS点数量和高程精度不同。获取PS点的地理定位和地图存在一定误差，需要对PS点进行偏移与桥梁位置对准。由于主桥#4支座还连接有两跨引桥，而且该位置处两侧的变形差异较大，对应热膨胀系数差异较大。可根据热膨胀系数色阶图中颜色明显变化的位置来定位#4支座，如图5.3中圈出位置所示。

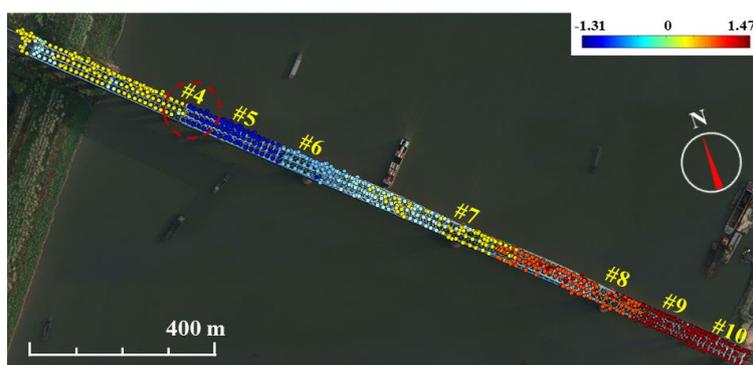
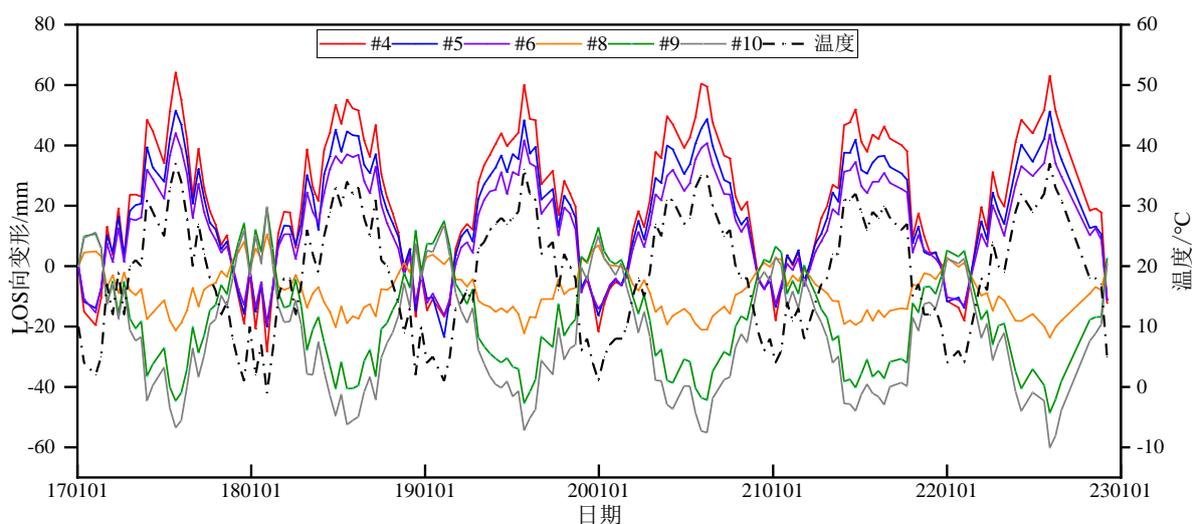


图 5.3 PS 点定位

对#4支座定位后，根据桥梁的实际长度和地图中桥梁长度的比值确定其余支座的位置。选取支座附近的PS点，去除其中高程差异较大的PS点，求得剩余PS点变形的均值。对于S1A数据，高程精度差，认为求得变形为支座上方钢桁架顶部的变形。对CSK数据，高程精度高，计算的PS点与支座高程相近，可以认为求得变形为支座变形。在S1A数据中的#10支座处没有PS点，因此求得变形为对应支座前面处的变形。在CSK数据的#8支座出没有获取和支座高程相近的PS点，因此选取与支座上方钢桁架顶部高程相近的PS点进行计算，求得变形为对应支座上方钢桁架顶部的变形。

根据上述方法计算InSAR测量的不同支座的LOS向变形，得到不同数据支座LOS向变形与对应SAR影像拍摄时间的实时温度如图5.4所示。从图中可以看到，利用InSAR获取的各支座LOS向变形变化趋势与温度高度一致，都呈现出季节性的周期变化。支座变形以支座#7为中心，整体呈现出对称特性。得到的变形结果符合研究桥梁结构的变形特征，有效地验证了InSAR测量桥梁变形的可行性和本次数据处理的可靠性。



a) S1A

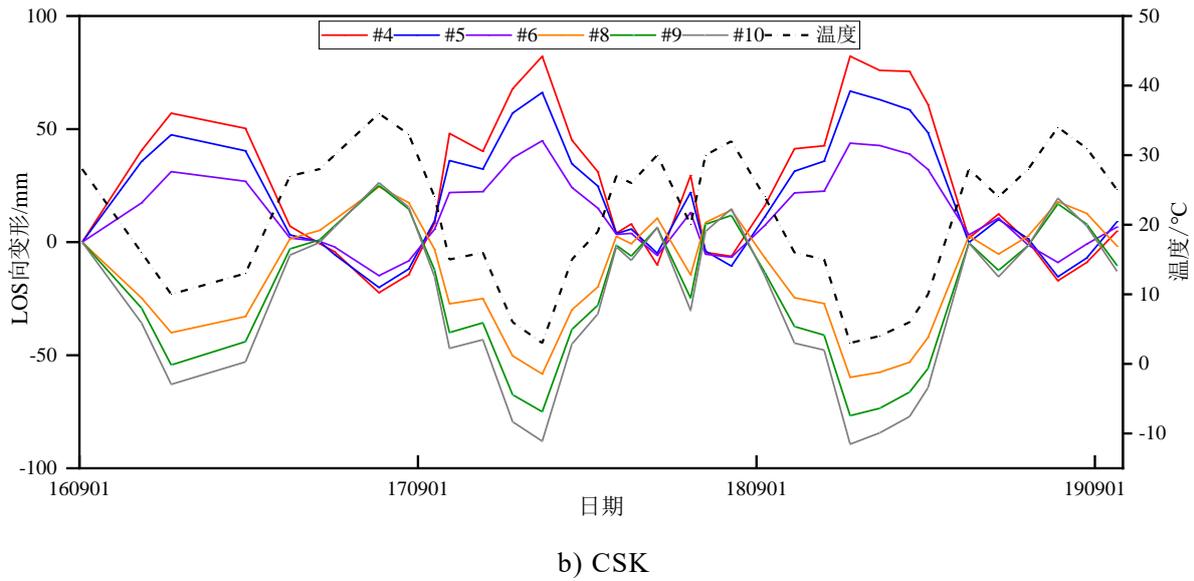


图 5.4 支座 LOS 向变形和温度的时间序列

但是，从图5.4a)可以发现S1A数据获取到的#4、#5、#6支座的LOS向变形绝对值大于对称位置的#8、#9、#10支座，其中#6支座的LOS向变形明显大于#8支座。在第三章中，通过对研究桥梁的文献调研，得到支座变形主要是纵向变形，横向和竖向都可以忽略不计。但是，由于S1A数据得到的PS点并不是在桥梁支座上，而是位于支座上方的钢桁架顶部。由于#6、#8位置的钢桁架顶部相对于支座高度较高，而且S1A卫星对竖向变形的敏感系数最大，因此竖向变形对LOS向变形有较大影响。

为获得支座真实纵向变形，利用有限元模型计算实际PS点所在位置的三维变形关系。根据卫星的观测几何获得LOS向变形中各分量的占比如表5-4和5-5所示。由于有限元中选取桥墩处中间支座或者其上方的钢桁架顶部计算三维变形，中间支座的Y向受到约束。均匀温度下Y方向变形为0，对应LOS向变形中Y方向变形的占比为0。

表 5.4 S1A 数据中 LOS 变形三维分量占比

支座	#4	#5	#6	#8	#9	#10
X (纵向)	0.938	0.926	0.725	-0.725	-0.926	-0.937
Y (横向)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z (竖向)	0.062	0.074	0.275	0.275	0.074	0.063

表 5.5 CSK 数据中 LOS 变形三维分量占比

支座	#4	#5	#6	#8	#9	#10
X (纵向)	1.000	1.000	1.000	0.795	1.000	1.000
Y (横向)	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Z (竖向)	0.000	0.000	0.000	0.205	0.000	0.000

从表5.4可以看出，越靠近#7支座，LOS向变形中Z向分量比重越大。S1A数据中4、#5、#6支座的X分量与Z分量符号相同，#8、#9、#10相反。所以S1A数据获取到的#4、#5、#6支座的LOS向变形绝对值大于对称位置的#8、#9、#10支座，且#6支座的LOS向变形明显大于#8支座。

从表5.5可以看出，除了#8支座外，CSK数据的其他支座的LOS向变形中只含有X向变形分量。因为选取的PS点都位于与支座等高的水平上，而中间支座Z向受到约束，对应LOS向变形中Z向变形占比为0。而#8支座的PS点位于支座上方的钢桁架顶部，所以LOS向变形中Z向变形占比不为0。

对研究桥梁的文献调研表明，桥梁支座纵向变形空间上沿着桥梁纵向呈现线性对称分布。对某一期影像InSAR获取的支座LOS向变形进行分解得到支座纵向变形，其空间分布如图5.5所示。

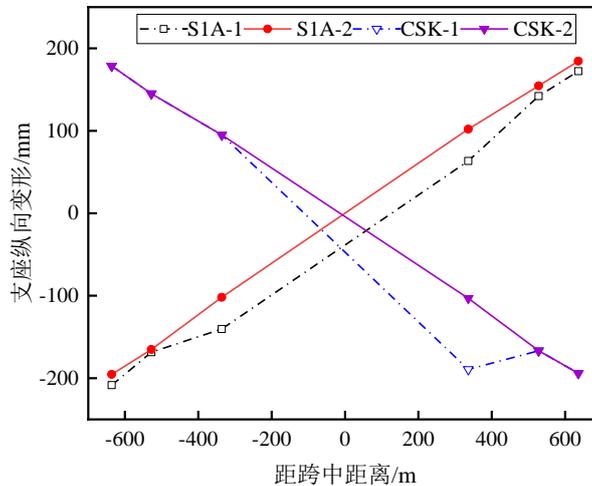


图 5.5 支座纵向变形空间分布

其中S1A-1和CSK-1为不考虑PS点位置，直接忽略竖向变形的对支座LOS向变形分解。S1A-2和CSK-2为根据PS点的实际位置表5.4和表5.5对支座LOS向变形分解。可以看到，根据有限元进行LOS向变形分解得到的桥梁支座纵向变形在空间上具有明显的线性对称分布特征。而忽略竖向变形对LOS向变形分解，得到的桥梁支座纵向变形空间不呈线性分布，而且对称位置支座变形差异较大。因此，基于有限元模型对LOS向变形进行分解，能够获取桥梁支座更加真实的变形。

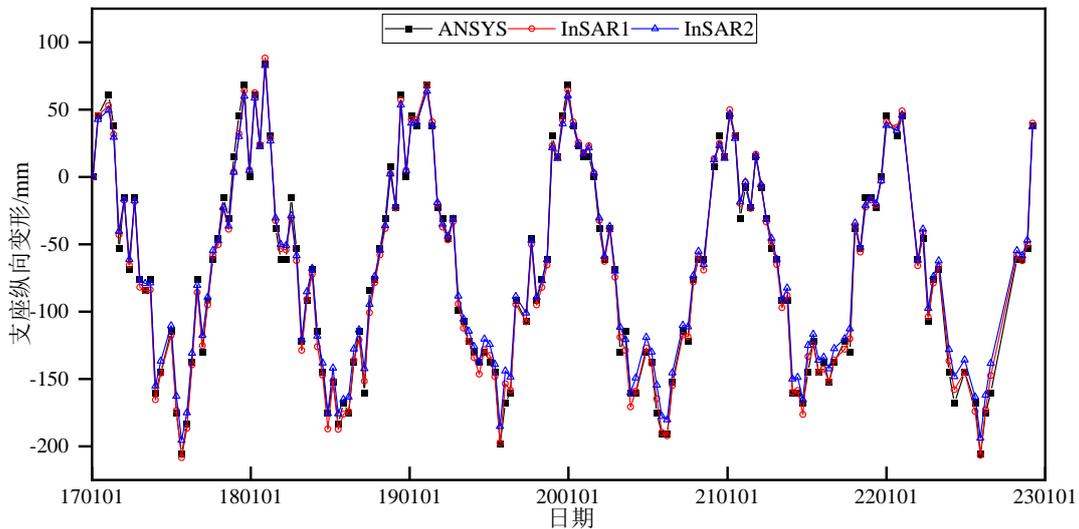
5.3.2 基于有限元模型的支座纵向变形对比

桥梁主梁的纵向变形主要受到温度场的影响，纵向变形与温度场之间的相关性可以表征位于支座上方主梁的纵向膨胀性能^[136]。主梁的纵向伸缩在桥梁运行初期几乎是自由的，之后随着承载摩擦的增加逐渐受到限制，主梁的纵向伸缩不可避免地会退化^[137]。如果纵向变形与温度场之间的初始相关性发生明显变化，则可以检测到桥梁支座发生退化。通过前文的文献调研可知，本文选取的桥梁支座

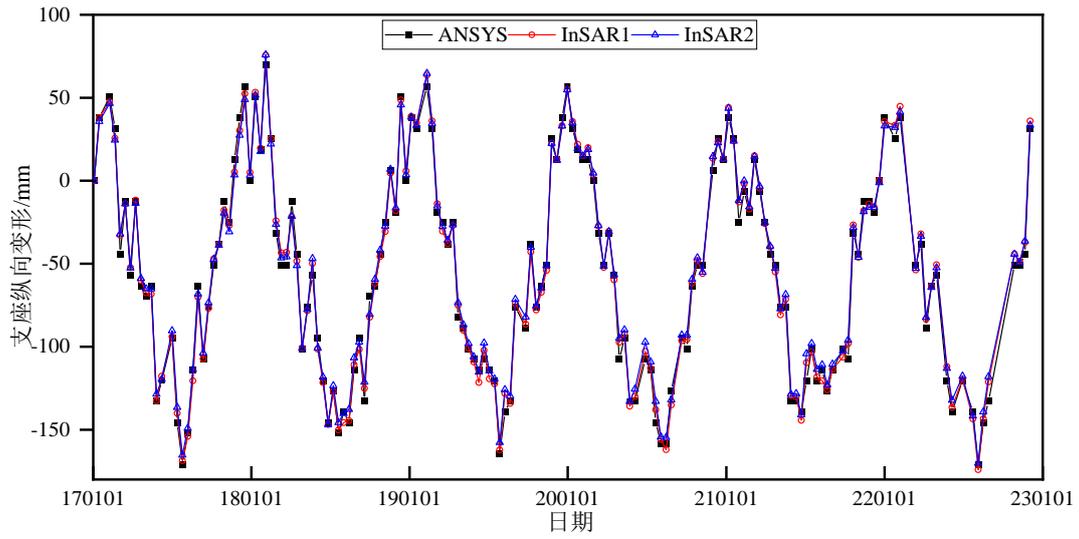
变形主要是纵向变形，且与温度具有很强的线性相关特性。因此，本文选取了桥梁支座纵向变形进行对比，以便后续研究可以利用该信息对桥梁结构安全性能进行评估。

InSAR测量桥梁变形的采样时间间隔较大，S1A和CSK数据的采样间隔分别为半个月和一个月左右。SHM监测数据采样频率为10min，两者相差过大。利用InSAR获取得到的是桥梁长期的历史变形，现有文献中没有长时间跨度的SHM变形监测数据。因此，无法利用现有文献中的实测变形直接与InSAR测量变形对比来验证其准确性。

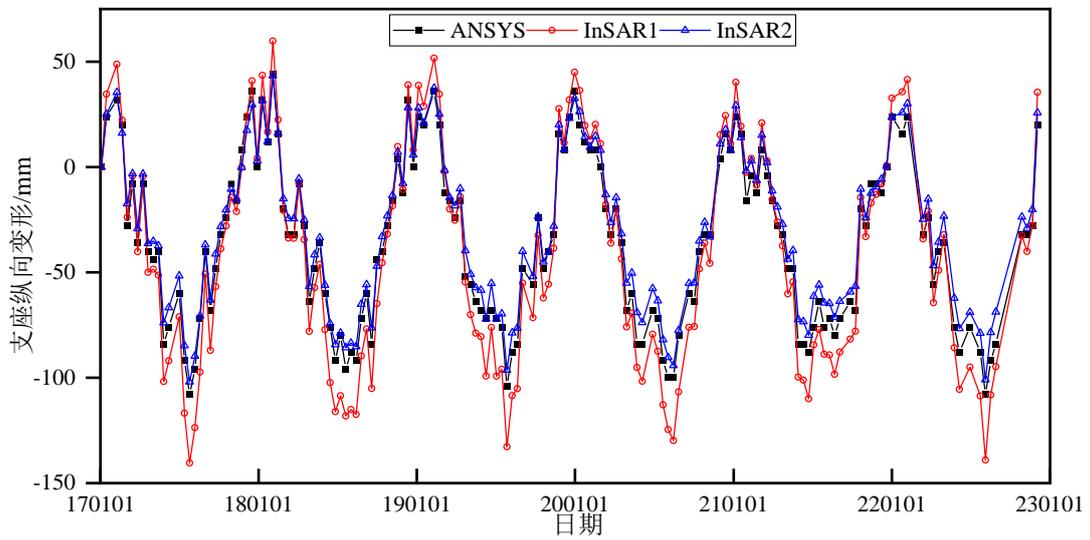
由前文可知，支座变形主要是纵向变形，且温度是主要影响因素。且卫星过境时对应时间段内桥梁近似处于均匀温度场，而桥梁的均匀温度与实时的大气温度存在很强的线性关系，斜率近似等于1。在InSAR时间序列上，对应桥梁温度的变化值与实时的大气温度接近一致。因此，通过对校准后的有限元模型施加均匀温度场，温度场对应的温度变化按照实时的大气温度时间序列进行选取，以获取研究桥梁支座的长期变形的时间序列。分别采用忽略竖向变形和表5.4、表5.5对InSAR的LOS向变形分解获取支座纵向变形。然后将上述支座纵向变形与有限元计算的支座纵向变形进行对比，如图5.6和图5.7所示。图中InSAR1表示忽略竖向变形，直接根据测量几何获取的支座纵向变形，InSAR2表示利用表5.4、表5.5获取的支座纵向变形。由于CSK数据中除#8支座外，其他支座采用两种方法得到的支座变形一致，因此直接用InSAR表示LOS变形分解得到的支座纵向变形。



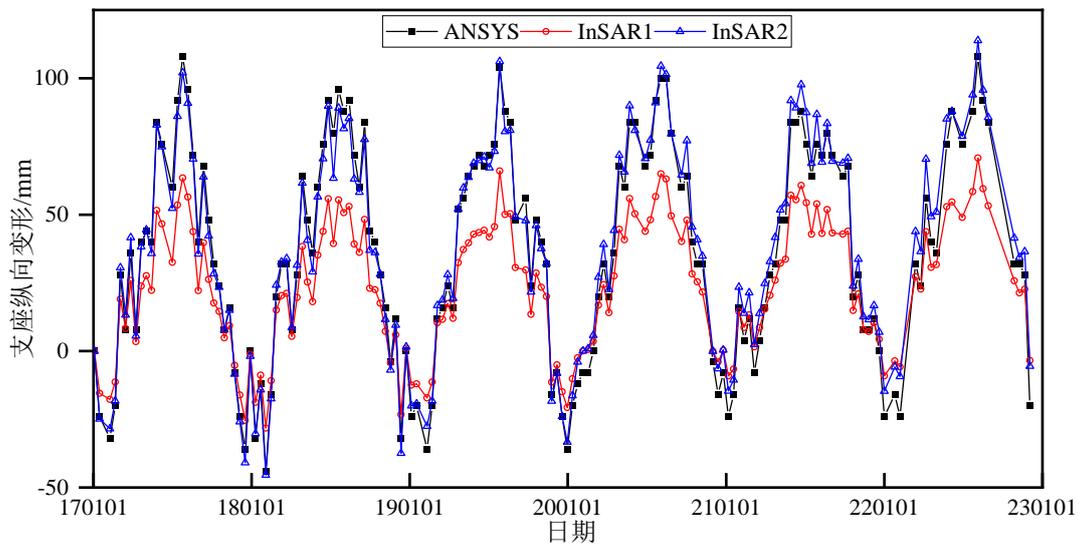
a) #4



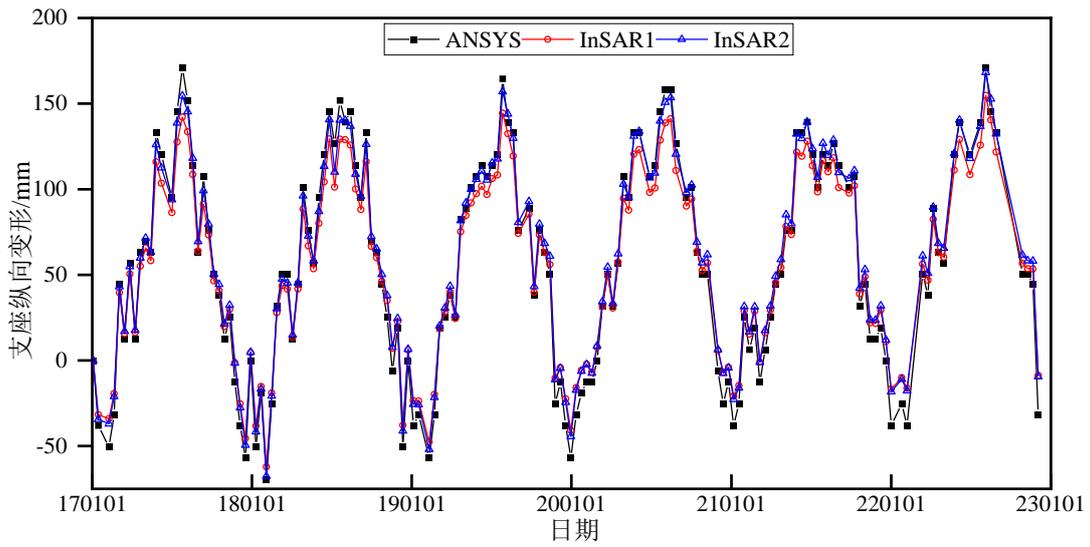
b) #5



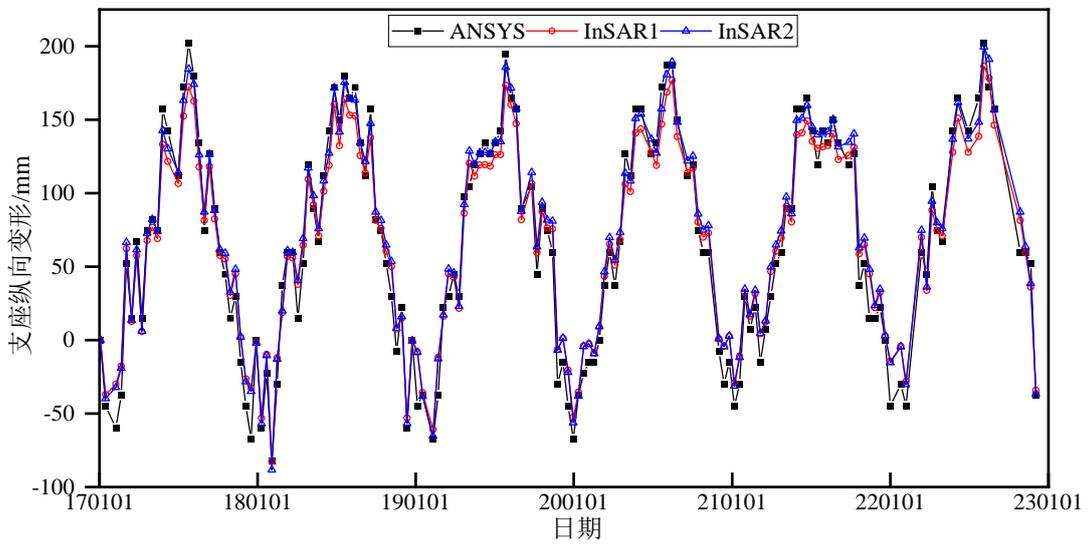
c) #6



d) #8

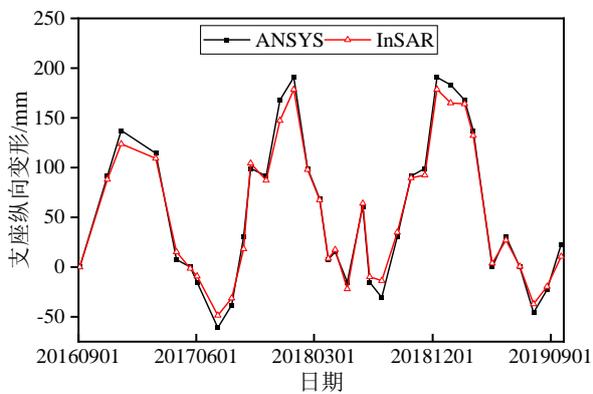


e) #9

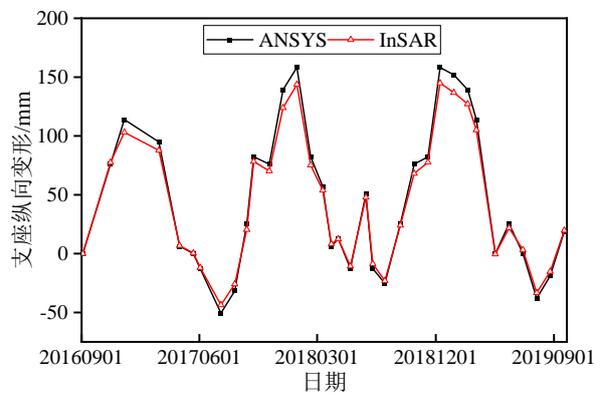


f) #10

图 5.6 S1A 数据支座纵向变形对比



a) #4



b) #5

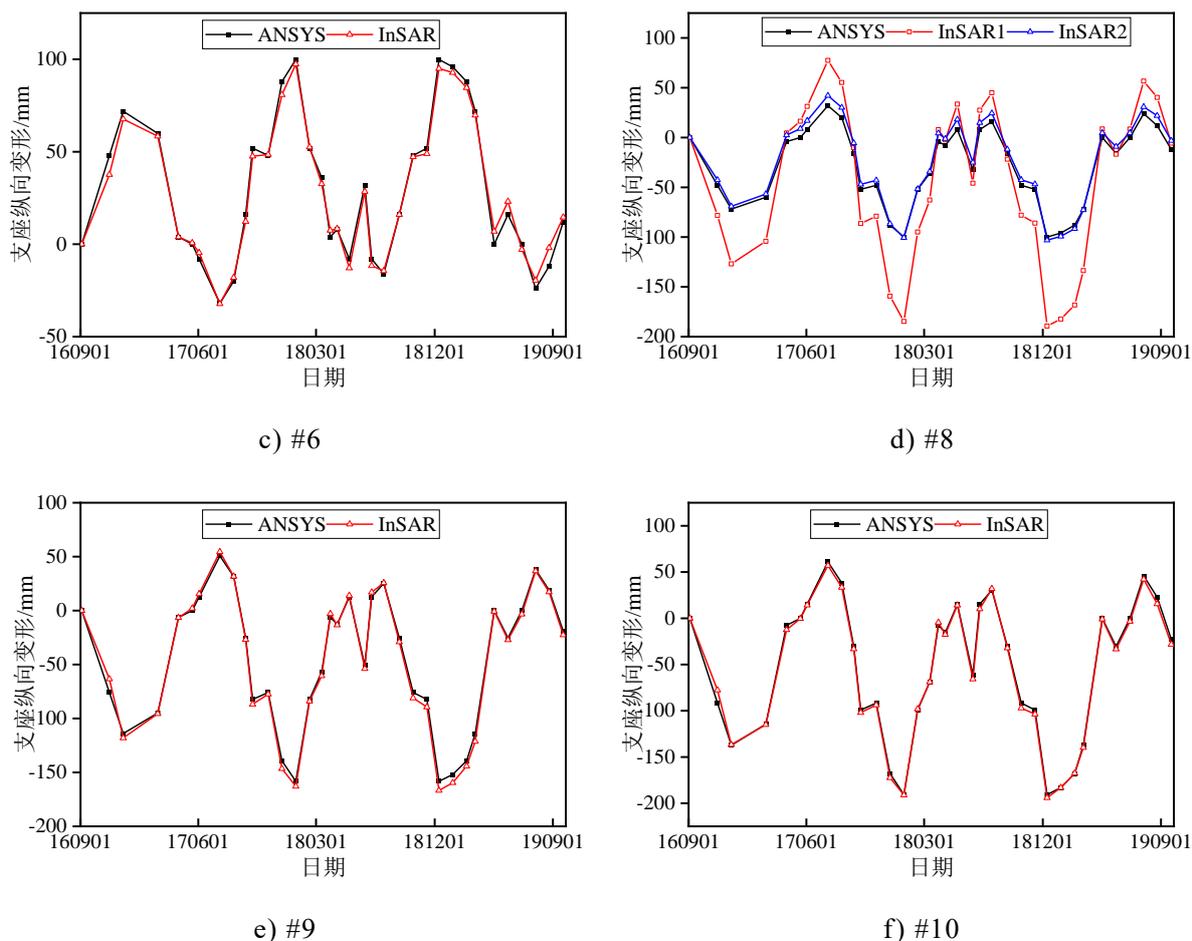


图 5.7 CSK 数据纵向变形对比

从图5.6和图5.7d)可以看出, InSAR1和InSAR2得到的纵向变形结果有所不同, 两端的支座变形差异较小, 而且越靠近#7支座的#6和#8支座, 差异越明显。因此, 当PS点位于研究桥梁支座上方时, 对应PS点相对于支座的高程差距越大, 其LOS向变形中竖向变形的占比越大, 忽略竖向变形分解得到的支座纵向变形差异也会越大。

从图5.6c)、d)以及图5.7d)可以看出, InSAR1得到的支座纵向变形时间序列与有限元模拟结果变化趋势一致, 但是数值上差异较大。而InSAR2得到的支座纵向变形时间序列与有限元模拟结果拟合较好, 两者数值上很接近。因此, 利用有限元能够有效的对InSAR获取的LOS向变形进行分解, 获取研究桥梁更加准确的支座纵向变形。

从图 5.6 和图 5.7 可以看出, 根据 PS 点的位置选取对应方法计算支座纵向变形, 得到的 InSAR 支座纵向变形时间序列与有限元模拟值变化趋势一致。为了更加准确的比较 InSAR 获取的支座纵向变形与有限元模拟值的差异, 以有限元模拟值为 Y 坐标, InSAR 测量值为 X 坐标, 计算两者的相关性如图 5.8、图 5.9 所示。计算两者的绝对误差得到其分布图如图 5.10 所示。

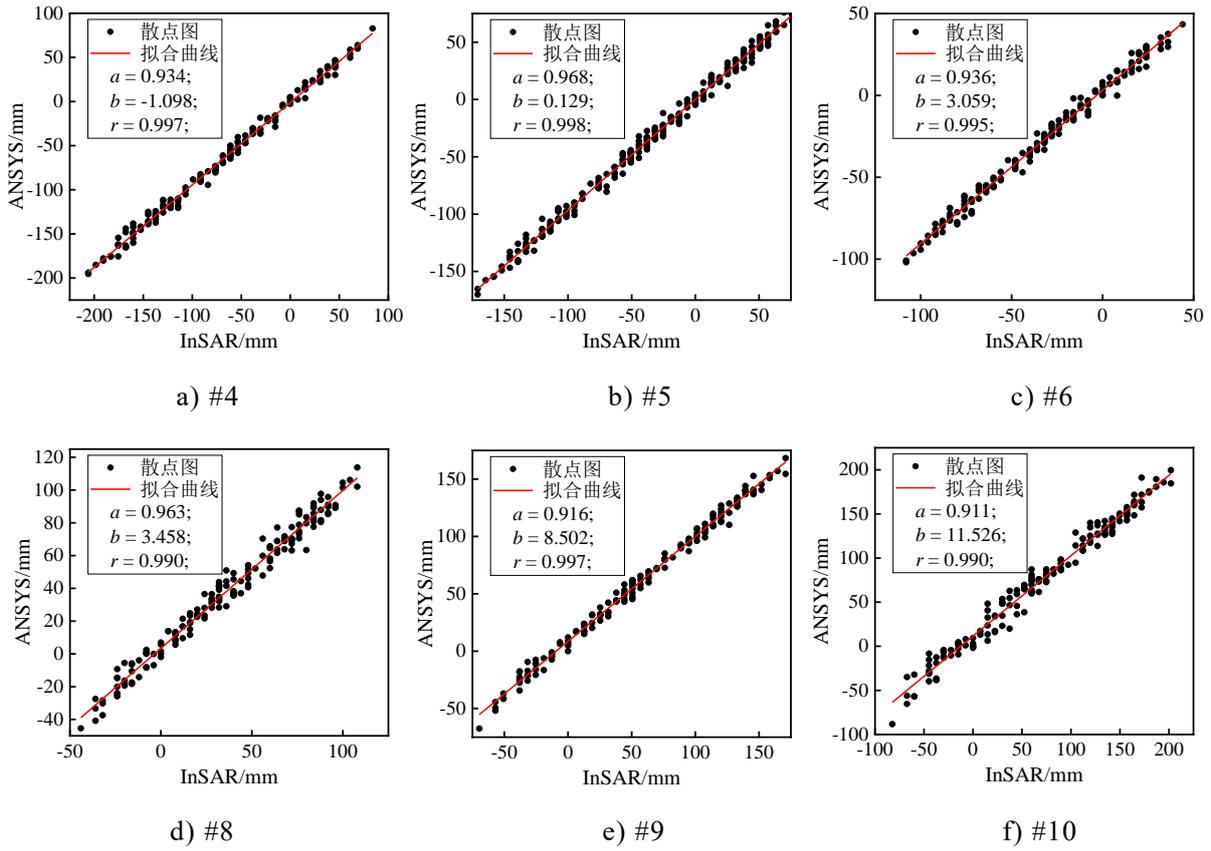


图 5.8 S1A 数据支座纵向变形 InSAR 测量值和有限元模拟值相关性

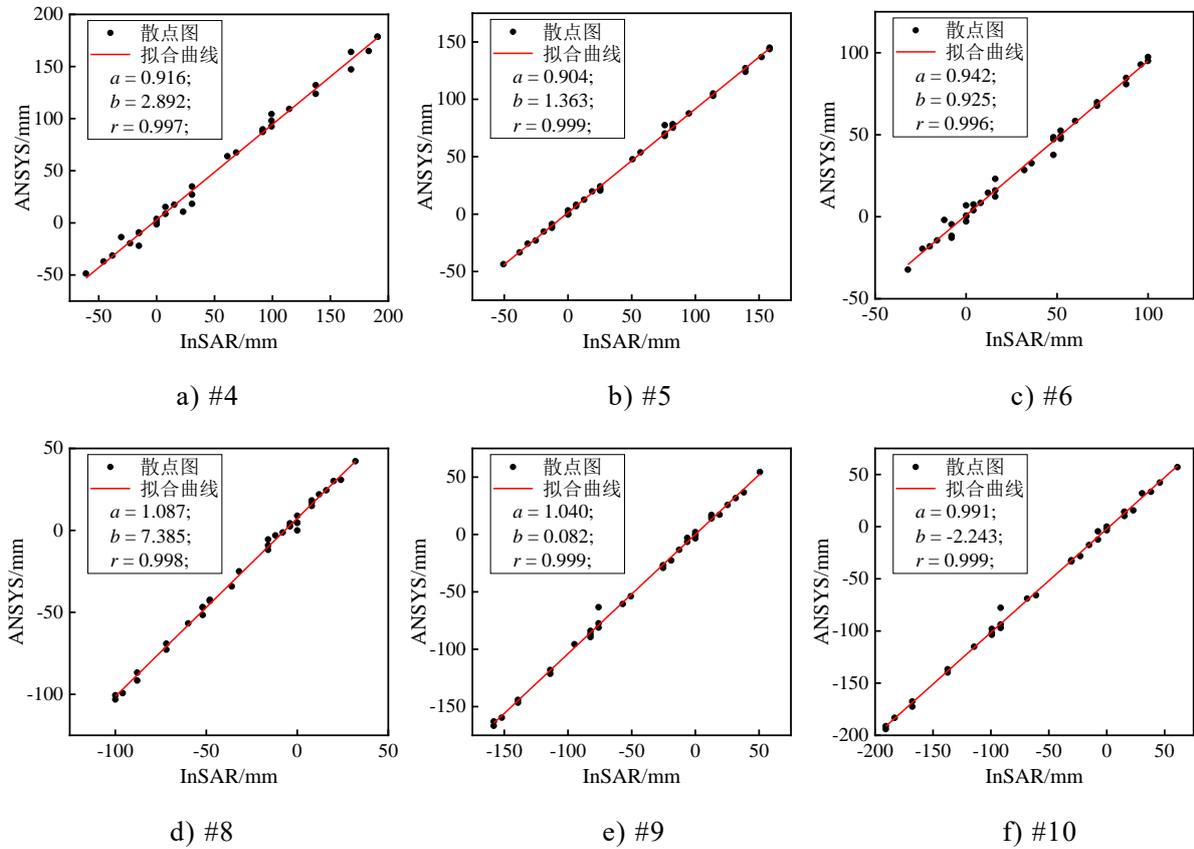


图 5.9 CSK 数据支座纵向变形 InSAR 测量值和有限元模拟值相关性

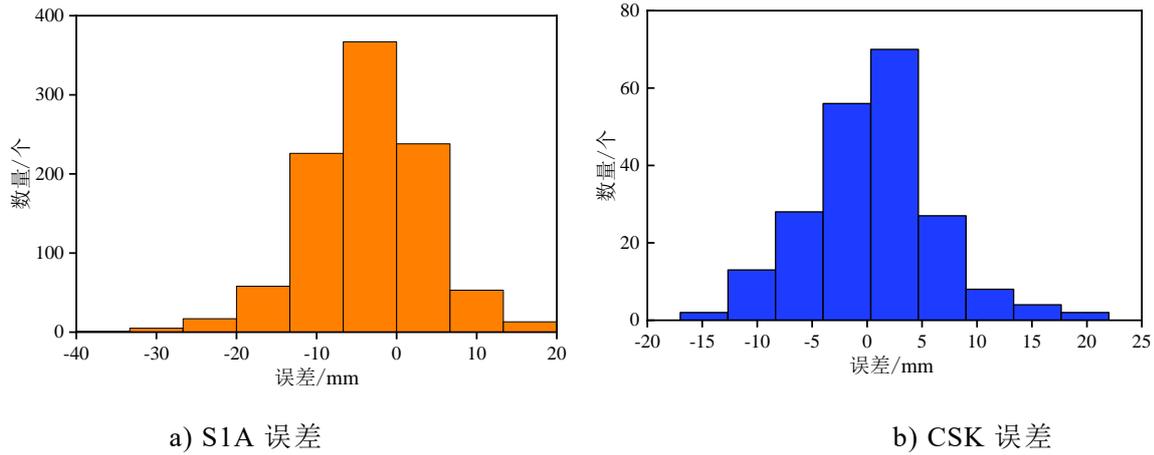


图 5.10 支座纵向变形误差分布图

由图5.8、图5.9可知，两者呈现明显的线性特征。采用最小二乘法，利用线性函数 $y=ax+b$ 进行拟合。从图中可以看到，各支座纵向变形的InSAR测量值和有限元模拟值的线性相关系数 a 和拟合优度 r 都很接近1。由于S1A数据的#10支座出没有PS点，用于与选取PS点数据对比的有限元模拟值定位可能有所差异，所以对应斜距差异较大。但其他数据的斜距都在 $[-10,10]$ 以内。有效的验证了InSAR技术能够比较准确的测量研究桥梁支座长期纵向变形。

经过计算得到S1A和CSK数据的误差范围分别为 $[-37.14,17.46]$ 和 $[-16.88,21.62]$ mm，对应误差的均值分别为 -3.74 和 0.65 mm。从图5.10可以看出，两个数据误差分布都呈现中间大两头小的正态分布特征。去除极个别较大的误差，可以看到S1A和CSK数据测量得到的支座纵向变形与有限元模拟值的绝对误差主要分布在 $[-20,10]$ 和 $[-10,10]$ mm。通过卫星的测量几何可以计算得到的LOS向变形绝对误差都在 $[-10,10]$ mm内，因此利用InSAR技术能够测量得到mm级精度的LOS向变形。

对于S1A数据，虽然选取了大量影像数据，InSAR数据处理得到PS点相干性都比较高。但是其分辨率较低，对应得到PS点较少。且PS点高程误差较大，定位精度较低。对于CSK数据，影像数据较少且时间间隔小，InSAR数据处理过程中产生了误差。因此两个数据的InSAR测量值与有限元模拟值都存在一定差异。

由于有限元模型跟真实桥梁结构存在差别，利用有限元模拟数据跟InSAR测量数据对比不能代表与真实值的差异。InSAR测量变形数据无法与SHM测量值直接对比，而文献中桥梁的支座纵向变形与温度呈现出很强的线性相关特性。因此利用InSAR求解的支座纵向变形与温度进行线性拟合，建立两者的线性相关模型，结果如图5.11和表5.6所示。

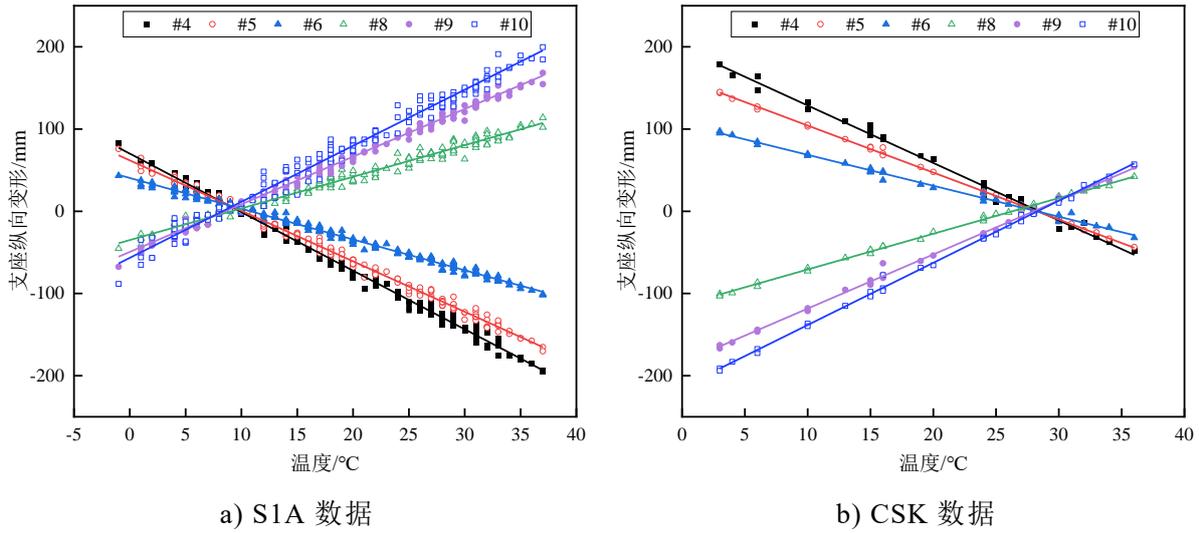


图 5.11 支座纵向变形与温度的相关性

表 5.6 InSAR 支座纵向变形与温度的相关模型

支座	S1A	CSK
#4	$d=-7.12+70.128$	$d=-6.99T+198.54$
#5	$d=-6.14T+61.92$	$d=-5.72T+161.48$
#6	$d=-3.74T+40.48$	$d=-3.76T+106.28$
#8	$d=3.85T-35.04$	$d=4.34T+114.28$
#9	$d=5.80T-49.47$	$d=6.58T+184.20$
#10	$d=6.82T-56.66$	$d=7.56T+213.99$

由图5.11和表5.6可知，InSAR测量得到的支座纵向变形与温度呈现出很强的线性相关特性，对称支座处线性模型的斜率绝对值相近，符合研究桥梁的实际变形特性。且不同数据得到的同一支座线性模型斜率绝对值相近，有效验证了本次研究数据处理的可靠性。为了与SHM实测值进行对比，计算得到上述模型的线性相关模型与文献^[135]中的实测值对比。线性模型的对比主要是对斜率的对比，即在发生单位温度变化时，对应支座发生纵向变形大小的对比。结果如表5.7所示。

表 5.7 支座纵向变形与温度的线性相关模型的斜率对比

支座	#4	#5	#6	#8	#9	#10
S1A	7.12	6.14	3.74	3.85	5.80	6.82
CSK	6.99	5.72	3.76	4.34	6.58	7.56
SHM	7.32	6.05	4.21	4.42	6.122	7.48
误差 1 (%)	2.73%	-1.49%	11.16%	12.90%	5.26%	8.82%
误差 2 (%)	4.51%	5.45%	10.69%	1.81%	-7.48%	-1.07%

注：误差=(SHM-InSAR)/SHM，误差 1 为 S1A 数据误差，误差 2 为 CSK 数据误差。

可以看到S1A和CSK数据得到的线性模型与SHM的斜率都比较接近，相对误

差主要分布在10%以内。验证了利用InSAR技术能够获取桥梁的真实长期变形。而且CSK数据的误差小于S1A,验证了高精度数据能够获取更加准确桥梁变形。但是个别支座的相对误差超过10%,最大相对误差为12.9%。一方面是SHM数据实测值为对应桥墩位置的上下游支座,而InSAR是利用LOS向分解为中间支座的纵向变形。对上下游支座的实测值取平均再与InSAR测量值进行对比。因此,选取对比的值跟真实中间支座会有一定差距。另一方面,同一桥墩处上下游支座的SHM实测是并不相等,即实际桥梁的温度场并不是绝对均匀。而在进行InSAR处理时,认为桥梁处于均匀温度场,其桥梁温度变化与实时的大气温度变化一致。因此,利用InSAR求得的变形会存在一定的误差。

5.4 本章小结

本章建立了研究桥梁的有限元模型,通过与文献的桥梁实测数据对比校核有限元模型。基于有限元模型对InSAR获取的LOS向变形进行三维分解,将得到桥梁支座的纵向变形与有限元模拟值进行对比。建立支座纵向变形与温度的线性相干模型,与文献中的SHM实测值进行对比。得到结论如下:

(1) 利用有限元模型对LOS向变形分解,得到的支座纵向变形空间上呈现线性对称分布,符合研究桥梁的实际变形特性。而忽略竖向变形对LOS向变形得到的支座纵向变形与实际桥梁会有较大差异。验证了利用有限元模型对InSAR获取的LOS向变形进行分解,能够获取更加可靠的桥梁变形状态。

(2) 利用InSAR得到的支座纵向变形与有限元模拟值的时间序列变化趋势高度一致,两者数值上高度拟合,线性拟合得到的斜率和拟合优度都很接近1。利用模拟值减去实测值,得到S1A数据的绝对误差主要在[-20,10]mm,CSK数据的绝对误差主要在[-10,10]mm。验证利用InSAR获取桥梁的长期变形的准确性。

(3) 建立InSAR得到的支座纵向变形与温度建立线性相关模型,与真实桥梁得到模型的斜率进行对比,两者相对误差主要在[-10%, 10%]以内。验证了利用InSAR能够获取桥梁变形的真实性。

结论与展望

桥梁结构是我国交通基础设施的重要组成部分，在国民经济发展中起重要作用。近年来我国桥梁规模不断新增，但同时也有大量桥梁随着使用年限上升进入性能退化阶段。加上日益加重的交通运输压力和环境劣化程度，可能会导致桥梁结构由于损伤累积出现倒塌事故。大跨桥梁倒塌会对人民生命财产造成严重的损失，并伴随巨大的社会影响。因此，需要对桥梁结构进行长期结构健康监测，保障其在服役期限内的安全运营。变形测量是结构健康监测的重要内容，通过结构变形能够有效地评估桥梁性能和结构状态。面对我国大跨桥梁群体量大面广的分布特点，常用的变形测量手段无法在兼顾经济性的同时实现全覆盖的长期监测。因此，本文提出了基于合成孔径雷达干涉测量的大跨桥梁长期变形监测方法。该方法具有“低成本”、“轻量化”、“非接触式”、“可持续”的特点，为实现智能化的大跨桥梁群体监测提供了新的思路和支持。

本文将 PS-InSAR 技术与桥梁结构工程知识相结合，在传统 PS-InSAR 处理流程中引入桥梁几何与机构变形的信息，实现了适用于大跨桥梁长期变形监测的改进 PS-InSAR 方法。然后利用该方法对国内某知名高速铁路桥梁的 SAR 影像数据处理，将得到的变形与有限元模拟结果和实测数据进行对比，有效地验证了该方法的准确性和可靠性。

具体研究内容和成果如下：

(1) 基于现有的 InSAR 技术理论，结合桥梁结构几何与变形的信息，提出一种改进的 PS-InSAR 方法。具体包括：通过结合桥梁的变形特性与卫星的观测几何，判断选取影像对目标桥梁变形监测的适用性；分析桥梁的复杂散射特征，采取多重阈值识别尽可能多的包含桥梁真实变形信息的 PS 点，并根据 PS 点与真实桥梁几何高度的误差去除异常 PS 点；根据桥梁的结构信息选取合适的差分相位干涉模型，进行精确的参数估计；根据卫星影像拍摄时刻桥梁温度场的分布特性，选取实时大气温度作为温度参数的输入。

(2) 基于改进的桥梁 PS-InSAR 方法的大跨桥梁长期变形监测试验。选取国内某知名高速铁路钢桁架拱桥为研究对象，通过文献调研获取其几何与结构变形信息。采用改进的桥梁 PS-InSAR 方法处理中精度 S1A 和高精度 CSK 卫星影像数据。通过将影像尺寸裁剪为只包含桥梁的大小，能够有效避免非桥梁 PS 点与桥梁 PS 点产生低相干连接，导致误差传递至桥梁 PS 点。根据桥梁的散射特征，结合多重阈值法获取包含桥梁真实变形的 PS 点。结合桥梁几何与结构变形信息，确定干涉相位的参数及其准确的参数估计范围。利用桥梁信息选取变形较小与桥面等高的参考点，能够获取更加真实的桥梁变形信息。与根据经验选取的参数估

计范围和软件自选的参考点相比, PS 点网络中连接基线的相干性明显提高, 对应 PS 点的时间相干性也得到提高。因此, 得到更加符合桥梁实际几何与变形特征参数估计结果, 使得桥梁变形监测结果更具可靠性。

(3) 基于有限元模型 InSAR 的测量变形三维分解与验证。建立研究桥梁的有限元模型, 由于温度是研究桥梁长期变形的主要影响因素, 因此施加变化的均匀温度场模拟研究桥梁的长期变形。根据有限元获取的真实三维变形关系和卫星几何观测方程对 LOS 向变形进行三维分解, 与忽略竖向变形进行 LOS 向变形分解变形相比较。得到各支座纵向变形的空间分布呈现出更明显的线性特征, 更符合桥梁实际变形特性, 有效地验证了根据有限元对 InSAR 获取的 LOS 向变形结果进行分解能够获得更加真实可靠的桥梁三维变形。将根据有限元分解得到的支座纵向变形与有限元模拟值进行比较, 两者变化趋势高度一致, 数值拟合较好。得到 S1A 和 CSK 获取支座纵向变形误差分别在 $[-20,10]$ mm 和 $[-10,10]$ mm, 有效地验证 InSAR 测量变形的准确性。并建立 InSAR 支座纵向变形与温度的线性相关模型, 与 SHM 实测数据对比, 相对误差在 $[-10\%,10\%]$, 有效地验证 InSAR 测量变形的真实可靠性。

尽管本文通过将桥梁结构工程知识和 PS-InSAR 技术结合, 对传统的 PS-InSAR 技术进行了有效地改进, 并将改进的方法应用到实际桥梁案例中试验得到了较好的结果。但是在处理过程中仍然存在不足之处, 在下列问题处还有待深入研究:

(1) 根据桥梁散射特征, 结合多重阈值法虽然能够有效去除不包含桥梁变形的 PS 点, 但同时也会导致部分真实 PS 点也被删除。特别是对于高精度影像数据, 得到的 PS 点数量比已有文献明显较少。因此, 未来需进一步改善选点策略, 通过改进选点算法, 将最大交集选点方式改正为最大并集, 从而有效提高 PS 点数量, 获得更加全面的桥梁整体变形特性。

(2) 根据卫星影像拍摄时间接近接近日出和日落, 假设桥梁处于均匀温度场。根据桥梁均匀温度与实时大气温度的线性关系, 利用实时大气温度来表示不同时刻影像的桥梁温度。虽然得到的结果比较符合桥梁真实变形, 但是数值上仍然有一定差异, 因为桥梁的实际温度场并非均匀温度场。因此, 未来需要建立大气温度和桥梁温度的相关模型, 根据大气信息获取更加真实的桥梁温度场。同时, 需改进参数估计时的相关算法, 实现对不同位置 PS 点施加不同的温度时间序列, 从而得到的变形结果更接近真实桥梁变形。

参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021年交通运输行业发展统计公报. https://xxgk.mot.gov.cn/2021/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html
- [2] 张小江, 乔可帅, 刘志东. 关于提升我国公路危桥改造管理模式和效率的思考. 公路交通科技(应用技术版), 2020, 16(09): 276-278
- [3] 彭卫兵, 沈佳栋, 唐翔等. 近期典型桥梁事故回顾、分析与启示. 中国公路学报, 2019, 32(12): 132-144
- [4] 吉伯海, 傅中秋. 近年国内桥梁倒塌事故原因分析. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 495-498
- [5] 秦权. 桥梁结构的健康监测. 中国公路学报, 2000(02): 39-44
- [6] 伊廷华. 结构健康监测教程. 高等教育出版社, 2021
- [7] 吴智深, 张建. 结构健康监测先进技术及理论. 科学出版社, 2015
- [8] Ye X W, Dong C Z, Liu T. A review of machine vision-based structural health monitoring: methodologies and applications. *Journal of Sensors*, 2016, 2016(5): 1-10
- [9] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述. 中国公路学报, 2019, 32: 21-39
- [10] Claudio P, Claudio M. Advantages of multi GNSS constellation: GDOP analysis for GPS GLONASS and Galileo combinations. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 2017, 7(1): 1-10
- [11] 刘国祥, 陈强, 罗小军等. InSAR原理与应用. 科学出版社, 2019
- [12] Mohammed O I, Saeidi V, Pradhan B, et al. Advanced differential interferometry synthetic aperture radar techniques for deformation monitoring: a review on sensors and recent research development. *Geocarto International*, 2014, 29(5): 536-553
- [13] Monserrat O, Crosetto M, Luzi G. A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2014, 93(1): 40-48
- [14] 王军飞. 地基干涉雷达测量关键技术研究. 中国地质大学(北京), 2020, 21-26
- [15] 赵争. 地形复杂区域InSAR高精度DEM提取方法. 武汉大学, 2014, 21-31
- [16] Jordan R L. The Seasat-A synthetic aperture radar system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1980, 5(2): 154-164

- [17] Schaber G G, Breed C S, Mccauley J F. The use of multifrequency and polarimetric Sir-C/X-SAR data in geologic studies of bir Safsaf, Egypt. *Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal*, 1997, 59(2): 337-363
- [18] Zebker, H A, Werner C L, Rosen P A, et al. Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 823-836
- [19] Desnos Y L, Buck C, Guijarro J. ASAR-Envisat's Advanced Synthetic Aperture Radar. *ESA Bulletin*, 2000, 102: 91-100
- [20] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24
- [21] Rosen P, Hensley S, Zebker H, et al. Surface deformation and coherence measurements of Kilauea Volcano, Hawaii, from SIR-C radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1996, 101: 23109-23125
- [22] Kankaku Y, Suzuki S, Osawa Y. ALOS-2 mission and development status ICI// *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2013, 2396-2399
- [23] Srivastava S, Cote S, Le Dantec P, et al. RADARSAT-1 calibration and image quality evolution to the extended mission. *Advances in Space Research*, 2007, 39(1): 7-12
- [24] Morena L, James K, Beck J. An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2004, 30(3): 221-234
- [25] Bianchessi N, Righini G. Planning and scheduling algorithms for the COSMO-SkyMed constellation. *Aerospace Science and Technology*, 2008, 12(7): 535-544
- [26] Covello F, Battazza F, Coletta A, et al. COSMO-SkyMed an existing opportunity for observing the Earth JI. *Journal of Geodynamics*, 2010, 49(3-4): 171-180
- [27] Du Y, Feng G, Li Z, et al. 2015. Generation of high precision DEM from TerraSAR-X/TanDEM-X. *Chinese Journal of Geophysics*, 58: 1634-1644
- [28] 田维, 徐旭, 卞小林等. 环境一号C卫星SAR图像典型环境遥感应用初探. *雷达学报*, 2014, 3(3): 339-351
- [29] 张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术. *测绘学报*, 2017, 46(3): 269-277
- [30] 邓云凯, 禹卫东, 张衡等. 未来星载SAR技术发展趋势. *雷达学报*, 2020, 9(01): 1-33
- [31] 秦晓琼. 时间序列D-InSAR城市28-基础设施精细形变测量研究. 武汉大学, 2019, 28-36

- [32] 贺黎明, 裴攀科, 吴立新等. 基于时序InSAR的矿区滑坡前地表运动特征分析. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(09): 1314-1321+1368
- [33] 韩炳权, 刘振江, 陈博等. 2022年泸定Mw6.6地震InSAR同震形变与滑动分布. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 1-12
- [34] Chen Y, Yu S W, Tao Q X, et al. Accuracy Verification and Correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in Monitoring Mining Surface Subsidence. *Remote Sensing*, 2021, 13(21): 4365-4387
- [35] Meng Z G, Shu C Z, Yang Y, et al. Time Series Surface Deformation of Changbaishan Volcano Based on Sentinel-1B SAR Data and Its Geological Significance. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1213-1231
- [36] Guo L, Gong H L, Li J W, et al. Understanding Uneven Land Subsidence in Beijing, China, Using a Novel Combination of Geophysical Prospecting and InSAR. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(16): 1-11
- [37] Gheorghe M, Armas I, Dumitru P, et al. Monitoring subway construction using Sentinel-1 data: a case study in Bucharest, Romania. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(7): 2644-2663
- [38] Shi X G, Niu F J, Qu T T, et al. Stability analysis of Shiwei-Labudalin Highway in Inner Mongolia, Northeastern China using Sentinel-1 InSAR. *Cold Regions Science and Technology*, 2022, 202: 1-14
- [39] Graham, L C, Goodyear A C, Litchfield P, et al. Synthetic interferometer radar for topographic mapping. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 763-768.
- [40] Gabriel A K, Goldstein R M, Zebker H A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research. Part B: Solid Earth*, 1989, 94: 9183-9191.
- [41] Massonnet D, Rossi M, Carmona C. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 1993, 364(6433): 138-142
- [42] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(5): 950-959
- [43] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 1997, 102: 7547-7563
- [44] Sandwell D T, Price E J. Phase gradient approach to stacking interferograms. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 1998, 103: 30183-30204.

- [45] 廖明生, 王腾. 时间序列InSAR技术与应用. 科学出版社, 2014
- [46] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [47] Werner C, Wegmuller U, Strozzi T, et al. Interferometric point target analysis for deformation mapping. *IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No.03CH37477)*. IEEE, 2004, 4362-4364
- [48] KAMPES B M. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2006. 20-26
- [49] Hooper A, Segall P, Zebker H. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23): 1-5
- [50] Costantini M, Falco S, Malvarosa F, et al. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2009, 449-452
- [51] Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, et al. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3460-3470
- [52] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential sar interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375-2383
- [53] Mora O, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and nonlinear terrain deformation maps from a reduced set of interferometric SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2243-2253
- [54] Zhang L, Ding X, Lu Z. Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(1): 547-556
- [55] 林琿, 马培峰, 王伟玺. 监测城市基础设施健康的星载MT-InSAR方法介绍. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1422-1424
- [56] Quin G, Loreaux P. Submillimeter accuracy of multipass corner reflector monitoring by ps technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1775-1783
- [57] 王彦平, 白泽朝, 林赟等. InSAR双向矩形角反射器阵列形变监测精度评估

- 与验证. 武汉大学学报:信息科学版, 2021, 46(10): 1471-1477+1488
- [58] Qin X Q, Liao M S, Yang M S, et al. Monitoring structure health of urban bridges with advanced multi-temporal InSAR analysis. *Annals of GIS*, 2017, 1-10
- [59] 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. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 1-18
- [60] Bao L, Xing X M, Chen L F, et al. Time series deformation monitoring over large infrastructures around Dongting Lake using X-band PSI with a combined thermal expansion and seasonal model. *Journal of Sensors*, 2021, 1-17
- [61] Qin X Q, Ding X L, Liao M S, et al. A bridge-tailored multi-temporal DInSAR approach for remote exploration of deformation characteristics and mechanisms of complexly structured bridges. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 156:27-50
- [62] Zhang L, Sun Q, Hu J. Potential of TCPINSAR in monitoring linear infrastructure with a small dataset of SAR images: application of the Donghai Bridge, China. *Applied Sciences*, 2018, 8(3): 1-14
- [63] Sousa J J, Bastos L. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(3): 659-667
- [64] Selvakumarana S, Plankb S, C Geißb, et al. Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 73: 463-470
- [65] Milillo P, Giardina G, Perissin D, et al. Pre-collapse space geodetic observations of critical infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1-14
- [66] 陈艳青, 赵景堂. 基于时序InSAR技术监测大桥历史形变. *测绘工程*, 2021, 30(02): 50-54+59
- [67] Monserrat O, Crosetto M, Cuevas M, et al. The Thermal expansion component of persistent scatterer interferometry observations. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 2011, 8(5): 864-868
- [68] 张宁宁, 陈志坚, 陈元俊等. PSI和CRI联合算法用于苏通大桥基础沉降监测.

- 岩土力学, 2012, 33(07): 2167-2173
- [69] 黄其欢, 丁幼亮, 王一安等. 基于InSAR的南京大胜关大桥纵向位移监测与分析. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(03): 584-589
- [70] 刘星, 吕孝雷. 基于卡尔曼滤波的PS-InSAR地表形变预测方法. 中国科学院大学学报, 2017, 34(06): 743-750
- [71] 江剑锋, 黄其欢, 王一安等. InSAR技术在安庆铁路长江大桥变形监测中的应用. 甘肃科学学报, 2018, 30(6): 73-77
- [72] Hoppe E J, Novali F, Rucci A, et al. Deformation monitoring of posttensioned bridges using high-resolution satellite remote sensing. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(12): 1-13
- [73] Jung J, Kim D J, Vadivel P, et al. Long-term deflection monitoring for bridges using X and C-Band time-series SAR interferometry. *Remote Sensing*, 2019, 11(11): 1-21
- [74] 查显杰, 傅容珊, 戴志阳. DInSAR技术对不同方位形变的敏感性研究. 测绘学报, 2006, 35(2): 133-137
- [75] Sousa J J, HlaváčOvá I, Bakoň M, et al. Potential of multi-temporal InSAR techniques for bridges and dams monitoring. *Procedia Technology*, 2014, 16: 834-841
- [76] Lazecky M, Perissin D, Sousa J J, et al. Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. *Urban Remote Sensing Event. IEEE*, 2015, 1-4
- [77] 潘军, 李威, 赵冰等. 面向PS-InSAR技术的桥梁随机形变规律. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2016, 13(04): 57-65
- [78] Qin X Q, Ding X L, Liao M S. Capturing the deformation characteristics of cable-stayed bridges with multi-temporal SAR Interferometry. *2018 Fifth International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications (EORSA)*, 2018, 1-5
- [79] Ma P F, Li T, Fang C Y, et al. A tentative test for measuring the sub-millimeter settlement and uplift of a high-speed railway bridge using COSMO-SkyMed images. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2019, 155(SEP.): 1-12
- [80] Selvakumaran S, Webb G, Bennetts J, et al. Understanding InSAR measurement through comparison with traditional structural Monitoring-Waterloo Bridge,

- London. IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2019, 6368-6371
- [81] Zhao J W, Wu J C, Ding X L, et al. Elevation extraction and deformation monitoring by multitemporal InSAR of Lupu Bridge in Shanghai. *Remote sensing*, 2017, 9(9): 1-13
- [82] 段伟, 吕孝雷. 一种新的桥梁区域时序InSAR相位解缠方法. *中国科学院大学学报*, 2019, 36(02): 251-258
- [83] Fornaro G, Reale D, Verde S. Bridge Thermal Dilation Monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional SAR imaging. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(4): 677-681
- [84] Poreh D, Iodice A, Riccio D, et al. Railways stability observed in Campania (Italy) by InSAR data. *European Journal of Remote Sensing*, 2016, 49(1): 417-431
- [85] Lazecky M, Hlavacova I, Bakon M, et al. Bridge displacements monitoring using space-borne X-Band SAR Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2016, 10(1): 205-210
- [86] Daniel C, Ken T, Daniel H, et al. Satellite-based InSAR monitoring of highway bridges-validation case study on the North-Channel Bridge in Ontario, Canada. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2018, 76-86
- [87] 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. *遥感学报*, 2020, 24(07): 883-893
- [88] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. et al. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: a review. *Earth-Science Reviews*, 2014, 133(1): 1-17
- [89] Hu J, Li Z W, Ding X L, et al. 3D coseismic displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1029-1041
- [90] Grandin R, Klein E, Metois M, et al. Three-dimensional displacement field of the 2015 Mw8.3 Illapel Earthquake (Chile) from-across and along-track Sentinel-1 tops interferometry. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(6): 2552-2561
- [91] Huang Q H, Crosetto M, Monserrat O, et al. Displacement monitoring and

- modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 128(JUN.): 204-211
- [92] Qin X Q, Ding X L, Liao M S. Three-dimensional deformation monitoring and structural risk assessment of bridges by integrating observations from multiple SAR sensors. *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, 2018, 1384-1387
- [93] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry. *proceedings of the IEEE*, 2002, 88(3): 333-382
- [94] Ferretti A, Monti-Guarnieri A, Prati C, et al. InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation. 2007,10(10): 156-162
- [95] Scheiber R, Moreira A. Coregistration of interferometric SAR images using spectral diversity. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2179-2191
- [96] 刘国祥. 利用雷达干涉技术监测区域地表形变. 北京:测绘出版社, 2006
- [97] Hanssen R F. *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Delft University of Technology, 2018
- [98] Kazuyoshi, Itoh. Analysis of the phase unwrapping algorithm. *Applied Optics*, 1982, 21(14): 2470-2476
- [99] Ghiglia D C, Pritt M D, *Two-dimensional phase unwrapping theory, algorithms, and software*. New York: John Wiley and Sons Ltd, 1998
- [100] 廖明生, 林琿. *雷达干涉测量—原理与信号处理基础*. 测绘出版社, 2003
- [101] Goldstein R M, Zebker H A, Werner C L. Satellite radar interferometry two-dimensional phase unwrapping. *radio science*, 1988, 23(4): 713-720
- [102] Loffeld O, Nies H, Knedlik S, et al. Phase unwrapping for SAR interferometry: a data fusion approach by Kalman filtering. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 47-58
- [103] Pu L, Zhang X, Zhou Z, et al. A robust insar phase unwrapping method via phase gradient estimation network. *Remote Sensing*. 2021, 13(22): 1-24
- [104] Zebker H A, Klees R, High-resolution water vapour mapping from interferometric radar measurements. *Science*, 1999 (283): 1295-1297
- [105] Liu G X, Buckley S M, Ding X L, et al. Estimating spatiotemporal ground deformation with improved permanent-scatterer radar interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(9): 3209-3219

- [106] Ferretti A, Prati C. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2202-2212
- [107] Albert P, Bennartz R, Fischer J. Remote sensing of atmospheric water vapor from backscattered sunlight in cloudy atmospheres. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, 18(6): 865-874
- [108] Guo J M, Zhou L, Yao C L, et al. Surface subsidence analysis by multi-temporal InSAR and GRACE: a case study in Beijing. *Sensors*, 2016, 16(9): 1495
- [109] Dong J, Zhang L, Tang M G, et al. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: a case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 180-198
- [110] Duan G Y, Gong H L, Liu H H, et al. Monitoring and analysis of land subsidence along Beijing-Tianjin inter-city railway. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2016, 44(6): 915-931
- [111] Yu B, Liu G X, Zhang R, et al. Monitoring subsidence rates along road network by persistent scatterer SAR interferometry with high-resolution TerraSAR-X imagery. *Journal of Modern Transportation*, 2013. 21(4): 236-246
- [112] 刘国祥, 陈强, 罗小军等. 永久散射体雷达干涉理论与方法. 科学出版社, 2012
- [113] Qin X Q, Li Q Q, Ding X L, et al. A structure knowledge-synthetic aperture radar interferometry integration method for high-precision deformation monitoring and risk identification of sea-crossing bridges. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 1-17
- [114] Zuk W. Thermal behavior of composite bridges insulated and uninsulated. *Highway Research Record*, 1965(76): 231-253
- [115] McClure R M, West H H, Hoffman P C. Observations from tests on a segmental bridge. *Second Bridge Engineering Conference*. Washington: Transportation Research Board, 1984: 60-67.
- [116] 刘华波. 异形截面预应力混凝土箱梁温度场及温度效应研究. 上海: 同济大学, 2002, 24-29
- [117] Kim S H, Park S J, Wu J, et al. Temperature variation in steel box girders of cable-stayed bridges during construction. *Journal of Constructional Steel*

- Research, 2015, 112: 80-92
- [118] Barr P J, Stanton J F, Eberhard M O. Effects of temperature variations on precast, prestressed concrete bridge girders. *Journal of Bridge Engineering*, 2005, 10(2): 186-194
- [119] Im C K, Chang S P. Thermal behavior of composite box-girder bridges *Structures and Buildings*, 2000, 140 (2): 117-126
- [120] Lucas J M, Berred A, Louis C. Thermal actions on a steel box girder bridge. *Structures and Buildings*, 2003, 156(2): 175-182
- [121] Lucas J M, Virlogeux M, Louis C. Temperature in the box girder of the normandy bridge. *Structural Engineering International*, 2005, 15(3): 156-165
- [122] Abid S, Taysi N, Ozakca M. Experimental analysis of temperature gradients in concrete box-girders. *Construction and Building Materials*, 2016, 106(C): 523-532
- [123] Eurocode1, actions on structures, part1-5: general actions-thermal actions. Belgium, Brussels: European Committee for Standardization
- [124] 南京大胜关长江大桥（京沪高速铁路跨江大桥）百度百科. <https://baike.baidu.com/item/南京大胜关长江大桥/249208?fr=aladdin>
- [125] 图集 | 镜头里的中国铁路巨变. https://m.thepaper.cn/newsDetail_forward_13122195
- [126] 肖海珠, 易伦雄. 南京大胜关长江大桥主桥上部结构设计. *桥梁建设*, 2010, (1): 1-4
- [127] 肖海珠, 刘承虞, 易伦雄. 南京大胜关长江大桥铁路钢桥面设计与研究. *桥梁建设*, 2009, (4): 9-12+45
- [128] 刘琳杰, 李华云. 南京大胜关长江大桥6~8号主墩基础设计. *交通科技*, 2010, (2): 1-3
- [129] Zhao H W, Ding Y L, Nagarajaiah S, et al. Longitudinal displacement behavior and girder end reliability of a jointless steel-truss arch railway bridge during operation. *Applied Sciences*, 2019, 9(11):2222
- [130] Wang G X, Ding Y L, Song Y S, et al. Detection and location of the degraded bearings based on monitoring the longitudinal expansion performance of the main girder of the Dashengguan Yangtze Bridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(4): 1-10
- [131] Ding Y L, Wang G X, Peng S, et al. Long-term structural health monitoring

- system for a high-speed railway bridge structure. *The Scientific World Journal*, 2015, 2015:1-17
- [132] Zhao H W, Ding Y L, Nagarajaiah S, et al. Behavior analysis and early warning of girder deflections of a steel-truss arch railway bridge under the effects of temperature and trains: case study. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(1)
- [133] <https://www.sarproz.com/>
- [134] 徐伟周. 基于振动监测的高速铁路桥梁安全预警方法研究. 东南大学, 2016, 70-74
- [135] Zhu Q X, Wang H, Spencer Billie F J. Investigation on the mapping for temperature-induced responses of a long-span steel truss arch bridge. *Structure & Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design & Performance*, 2022, 1-18
- [136] Li A Q, Ding Y L, Wang H, et al. Analysis and assessment of bridge health monitoring mass data-progress in research/development of "Structural Health Monitoring". *Science China (Technological Sciences)*, 2012, 55(8): 2212-2224
- [137] De B N, Westgate R, Koo K Y, et al. Wireless monitoring of the longitudinal displacement of the Tamar Suspension Bridge deck under changing environmental conditions. *Conference on Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2011*. 1-15

致 谢

谨以此文，感谢三年硕士生涯遇到的所有人，为我的校园生涯画上句号。

硕士生涯始于疫情开始的第一年，而硕士生涯终于疫情结束的第一年，所以姑且称自己为“疫情这一届”。回首往昔三年，本想感慨我这短暂而又坎坷的学术研究生涯。但是相比于在这场全球浩劫中失去生命的人们，仍旧健康活着的我是何其幸运。生活从来不是被打败的，无论命运怎么捉弄，接受现实并大步朝前走下去，每个人都是真正的勇士。一念及此，便觉得往事没什么大不了，或许一切都是最好的安排。

科研是没有止境的，科研道路也不存在绝对正确。有些人总是喜欢走在前面，寻找新的道路，所以会被认为“离经叛道”。而我的导师周云教授，就属于这类人。对于导师给我的课题方向，我的第一反应是质疑。土木本应该是在压几个混凝土试件，研究太空中飞的卫星来测量结构变形，这不是异想天开吗？没办法，接受现实咬紧牙关硬着头皮干呗。这一趟取经之路走的很慢，经历了看不懂书，找不到方法，不会用软件等接近八十一难后。我发现天马行空的想法好像真的能脚踏实地，这时候我开始理解导师了。之后，我又觉得好像可以尝试走出一条新的路。最终，我也成为了导师那般“离经叛道”之人。走在前面，充满未知，可能容易跌倒失败。但失败总是贯穿人生始终，不能因为害怕失败而畏惧走在前沿。从质疑到理解，再到成为。非常感谢周老师这三年的栽培，带我领略了不一样的风景。

漫漫人生路，无伴很难渡。感谢师门郝官旺、罗先明、周易师兄，同门胡锦涛、刘鹏、郑佳缘、周晓枫，师弟陈嘉豪、叶鹏、张鑫、张文杰、赵贺俊，师妹张路遥的陪伴和帮助。感谢郝官旺师兄伴我在荆棘的科研之路上前行，帮我排忧解难，攻克难关。感谢同门胡锦涛，周晓枫，刘鹏，郑佳缘的三年同窗。永远都难以忘记咱们满脸煤灰的坐在夜宵摊上吃着炒饭，讨论着山胡椒油的味道真不错。感谢师弟张鑫、陈嘉豪、叶鹏、陈建炜、冷建波伴我在篮球场上挥洒汗水。感谢“酒肉朋友”阿超，阿帆，阿国，阿楠，阿枫的陪伴，永远难以忘记咱们在无名烧烤那里吃着烧烤讨论谁是老几，咱们形似酒肉之交，实是真心之交。感谢十年老友池总，周总的陪伴，厚爱无需多言。希望接下来漫长的人生道路，还能有幸跟各位同行。

家永远是最好的避风港。感谢父母数十年的养育之恩，文化程度不高的您们，靠着日复一日的劳作供我完成近二十年的学业生涯。岁月在您们身上留下的痕迹，会时刻提醒着我要还恩于您们。感谢胞姐老华老慧，从小时候护着我，到长大后

在生活中关照我。

最后，感谢各位评审专家、教授、老师能够在百忙之中参与本论文的评审和答辩。

危俊杰

2023年5月10日于湖南大学

附录A （攻读学位期间所发表的学术论文）

- [1] 周云, 危俊杰, 李剑等. 基于 InSAR 技术的大跨桥梁温度变形监测研究. 湖南大学学报(自然科学版) (已录用)
- [2] 周云, 郝官旺, 危俊杰等. 基于 PS-InSAR 技术的大跨度桥梁结构变形监测综述. 工程力学 (已录用)