

# 杭州湾跨海大桥时序 InSAR 监测：空间非连续形变的挑战与应对

宋鑫友<sup>1</sup>, 杨建<sup>2</sup>, 李明辉<sup>2</sup>, 胡在华<sup>3</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 梁鸿俞<sup>1</sup>

1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092;
2. 宁波市杭州湾大桥管理有限公司, 宁波 315327;
3. 中铁大桥局集团第一工程有限公司, 郑州 450053

**摘要:** 时序 InSAR 技术因具备全天候、全天时、高精度和高空间分辨率等优势, 已广泛应用于桥梁结构健康监测。但在大型桥梁监测中, 大量伸缩缝和显著的热胀冷缩效应会导致相位跳变, 破坏传统解缠方法所依赖的空间连续性假设, 从而难以准确反演形变。本文介绍了一种无需先验模型假设的自适应分段解缠时序 InSAR 算法: 通过设定弧段误差阈值自动识别伸缩缝处的相位突变并实现网络分割, 结合桥梁力学特性完成子网参考点选取和分段解缠, 进而恢复相干点位移序列。以杭州湾跨海大桥为研究对象, 利用 13 景 PAZ X 波段卫星影像对方法进行了验证。结果表明该方法能有效定位伸缩缝并实现稳定解缠, 其适应性和稳健性优于最小费用流 (MCF) 算法。进一步分析发现, 桥梁整体形变与温度高度相关 (最高相关系数 0.988); 在扣除热效应后, 97.1% 的相干点残余形变速率小于 2 mm/a, 仅个别路段呈现潜在非热源性变形。研究成果为大型桥梁健康监测提供了新的思路, 有助于提升时序 InSAR 在基础设施监测中的可靠性与实用性。

**关键词:** InSAR, 分段相位解缠, 桥梁形变监测, 热胀冷缩形变, 杭州湾跨海大桥

**中图分类号:** TP701/P2

**引用格式:** 宋鑫友, 杨建, 李明辉, 胡在华, 张磊, 梁鸿俞. 2026. 杭州湾跨海大桥时序 InSAR 监测: 空间非连续形变的挑战与应对. 遥感学报, 30(4): 1045-1059

Song X Y, Yang J, Li M H, Hu Z H, Zhang L and Liang H Y. 2026. Monitoring the Hangzhou Bay Bridge with time-series InSAR: Addressing the challenges of spatially discontinuous deformation. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1045-1059 [DOI: 10.11834/jrs.20265354]

## 1 引言

截至 2024 年, 中国已建成各类公路桥梁约 108 万座, 在长达 4 万余公里的高铁里程中, 有将近一半都是桥。这些桥梁在运营期间长期受到自然因素 (例如风力、温度、地震、潮汐、洪水与土体流失等) 与人为因素 (如车辆的载荷、与施工不当) 影响, 这可能会使其结构发生扭曲、振动、塌陷与沉降等变形, 直接关乎结构的健康状况与承载能力 (Ko 和 Ni, 2005; Macchiarulo 等, 2022)。因此, 相关部门已开展桥梁等基础设施的常态化位移监测, 这对确保设施的安全运营以及人民群众的生命财产安全等有着重要的现实意义。

目前, 传统的监测技术主要有加速度计、倾斜传感器、GNSS、水准仪、全站仪等, 这些监测手段在特定情况下都有一定的效果, 同时也存在很多局限之处。例如 GNSS、水准测量以及传感器等监测方式都是单点监测, 数据空间分辨率较低, 难以有效评估整个桥梁结构的健康状况。其次, 全站仪与水准仪等设备受通视与天气等条件的限制, 采样率也较难达到动态测量的要求。

相比于上述传统监测手段, 合成孔径雷达干涉技术 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 开创了遥感技术应用于地表形变探测的先河, 目前已经成为一种重要的空间对地观测遥感手段 (廖明生 等, 2020)。时序 InSAR 技术依托其

收稿日期: 2025-09-12; 预印本: 2025-12-09

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42574040, 42174005)

第一作者简介: 宋鑫友, 研究方向为时序 InSAR 算法开发与应用。E-mail: xinyou@tongji.edu.cn

通信作者简介: 张磊, 研究方向为时序 InSAR 算法及复杂场景应用。E-mail: lslzhang@tongji.edu.cn

全天时、全天候、短重访周期、高空间分辨率与高精度的特点，在基础设施形变监测中表现出良好的应用前景 (Hilley 等, 2004; Ma 等, 2022a)。例如，国内外学者们已基于时序 InSAR 技术的开展了桥梁形变监测 (Schlöggl 等, 2022; Zhou 等, 2025)、大坝形变监测 (Di Martire 等, 2014; Milillo 等, 2016)、铁路监测 (Chang 等, 2017; Ma 等, 2019)、高速公路监测 (Xing 等, 2019; Perissin 等, 2012; Qin 等, 2017)、楼房健康监测 (Zhu 等, 2018; Zhou 等, 2019; Ma 等, 2022b)、机场沉降监测 (Wu 等, 2020; Zhou 等, 2022; Wen 等, 2024)、地铁线路监测 (Zhao 等, 2023; Zhang 等, 2023; 秦晓琼 等, 2016) 等。

由于桥梁结构复杂且在交通运输体系中具有重要地位，近年来时序 InSAR 技术在桥梁形变监测中得到了广泛而深入的应用。主要表现为：(1) 数据类型多样化。已有研究表明，X、C 及 L 波段 SAR 数据均被应用于桥梁监测 (Selvakumaran 等, 2018; Sousa 和 Bastos, 2013; Zhang 等, 2018)，其中 X 波段借助其空间分辨率优势被高频使用；(2) 监测方法与对象多元化。针对不同类型的桥梁及其结构部件，研究者提出了相应的数据处理与分析方法。例如针对斜拉索桥 (Jia 和 Liu, 2016; Qin 等, 2021)、拱形桥 (Qin 等, 2018) 等不同桥梁类型与箱梁 (Cusson 等, 2021)、桥墩 (Selvakumaran 等, 2020) 等关键部位采用了针对性的分析方法。(3) 监测精度高。已证明 X 波段影像可实现桥梁结构 mm 级精度的热膨胀监测 (Ma 等, 2019; Fornaro 等, 2013)。

尽管时序 InSAR 技术在桥梁形变监测中具有独特优势，但在大型桥梁应用中仍面临一定挑战，主要源于大量伸缩缝的存在以及显著的热胀冷缩效应。伸缩缝作为大桥的重要结构部件，通常设置于相邻梁段之间，其主要功能是缓解温度变化引起的热应力以及车辆荷载对结构造成的破坏 (Ko 和 Ni, 2005)。在热胀冷缩作用下，伸缩缝两侧的箱梁始终以相反方向运动 (即同向膨胀或反向收缩)，从而在伸缩缝处引起干涉相位的突变。当箱梁长度或温差超过一定阈值时，伸缩缝两侧的相位差绝对值可能超过  $\pi$ ，导致传统相位解缠所依赖的相位连续性假设失效，进而引发解缠错误 (Song 等, 2024)。

虽然已经有研究表明大桥的水平热膨胀变形在伸缩缝处达到最大，且在空间上伴随伸缩缝的位置呈周期性变化 (Crosetto 等, 2015; 林珩 等, 2017)。但是由于其研究的桥梁长度较短，伸缩缝处的相位跳变幅度有限，该问题并未得到充分体现。同时，大部分时序 InSAR 方法在分析时是以线性形变模型为基本假设 (Ferretti 等, 2001; Hooper 等, 2004; Kampes, 2006)，并不直接适用于桥梁因温度驱动所表现出的非线性形变特征。

针对上述问题，本文介绍了一种无先验形变模型假设的自适应分段解缠时序 InSAR 算法。该方法能够自动识别伸缩缝处的相位跳变位置，并实现空间网络的自适应分割，从而在各独立子网内分别开展形变反演，恢复相干点的原始位移时间序列。在此基础上，设计了一种普适性的桥梁非热胀冷缩形变分析方案。最后，以杭州湾跨海大桥为研究对象，利用 13 景 X 波段 PAZ 影像对所提方法进行了综合验证与分析，结果表明该方法具有良好的可行性与可靠性。

## 2 方法与原理

### 2.1 弧段估计模型

对于第  $j$  幅干涉图上像元  $x$  处的干涉相位主要由以下几部分组成：

$$\phi_x^j = \phi_{x, \text{topo}}^j + \phi_{x, \text{defo}}^j + \phi_{x, \text{atm}}^j + \phi_{x, \text{orbit}}^j + \phi_{x, \text{noise}}^j - 2k_x \pi \quad (1)$$

式中， $\phi_{x, \text{topo}}^j$  为地形相位， $\phi_{x, \text{defo}}^j$  为形变相位， $\phi_{x, \text{atm}}^j$  为大气延迟相位， $\phi_{x, \text{orbit}}^j$  为轨道误差相位， $\phi_{x, \text{noise}}^j$  为噪声相位， $k_x$  为相位模糊度。其中轨道误差可通过现有方法 (宋鑫友 等, 2024; Zhang 等, 2014) 或者精密轨道数据加以校正。大气相位一般则具有显著的空间相关性，因此可通过邻近像元干涉相位作差 (即构建弧段) 近似去除 (Ferretti 等, 2001)，此时干涉相位的主要成分为

$$\Delta\phi_{x,y}^j = \Delta\phi_{x,y, \text{topo}}^j + \Delta\phi_{x,y, \text{defo}}^j + \Delta\phi_{x,y, \text{noise}}^j - 2\pi k_{x,y}^j \quad (2)$$

式中， $\Delta\phi_{x,y}^j$  为  $x, y$  两点的干涉相位差 (即弧段观测值)， $\Delta\phi_{x,y, \text{topo}}^j$  为相对地形误差相位， $\Delta\phi_{x,y, \text{defo}}^j$  为相对形变相位， $k_{x,y}^j$  为整周模糊度。

正确开展相位解缠通常需假设弧段两端点的真实相位差的绝对值不超过  $\pi$ ，此时若对其差值再

次缠绕, 则可恢复出真实的相位差 (Itoh, 1982; Zhang 等, 2012), 则式 (3) 可进一步写为

$$\text{wrap}(\Delta\phi_{x,y}^j) = \Delta\phi_{x,y,\text{topo}}^j + \Delta\phi_{x,y,\text{defo}}^j + \Delta\phi_{x,y,\text{noise}}^j \quad (3)$$

式中,  $\text{wrap}(\cdot)$  为缠绕算子。地形相位可进一步展开为 (Hanssen, 2001):

$$\Delta\phi_{x,y,\text{topo}}^j = \frac{-4\pi B_{\perp}^j}{\lambda R_x^i \sin \theta_x^i} \cdot \Delta h_{x,y} = B_k^j \cdot \Delta h_{x,y} \quad (4)$$

式中,  $B_{\perp}^j$  为第  $j$  幅干涉图的空间垂直基线,  $\lambda$  为雷达波长,  $R_x^i$  为观测斜距,  $\theta_x^i$  为雷达入射角,  $\Delta h_{x,y}$  为相对地形误差,  $B_k^j$  表示与垂直基线相关的变量。该地形误差可通过现有方法在数据预处理阶段估计并去除 (Song 等, 2025)。形变相位可写为

$$\Delta\phi_{x,y,\text{defo}}^j = \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot \Delta T^j \cdot \Delta v_{x,y} \quad (5)$$

式中,  $\Delta T^j$  为第  $j$  幅干涉图的时间基线,  $\Delta v_{x,y}$  为  $x, y$  两点的相对形变速率。综上, 式 (3) 可进一步表示为

$$\text{wrap}(\Delta\phi_{x,y}^j) = \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot \Delta T^j \cdot \Delta v_{x,y} + \Delta\phi_{x,y,\text{noise}}^j \quad (6)$$

式 (6) 是被使用较为广泛的形变模型 (Ferretti 等, 2001; Kampes, 2006), 但是该模型成立的前提条件是相干点在监测周期内发生的是随时间均匀变化的线性形变。因此当研究对象发生的是周期性、非线性形变时, 式 (6) 所得结果的可靠性将大大降低。而如果将整个监测周期发生的位移拆分成多个子时段的位移和, 则可得到较为真实的位移时间序列。因此可将式 (5) 改写为

$$\Delta\phi_{x,y,\text{defo}}^j = \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot \Delta d_{x,y}^j \quad (7)$$

式中,  $\Delta d_{x,y}^j$  表示  $x, y$  两点在观测时段内发生的相对位移。对比式 (6), 式 (7) 则没有任何先验形变模型, 可同时适用于线性形变和非线性形变。

假设有覆盖研究区域的  $N+1$  幅按时间顺序排列  $(t_0, t_1, \dots, t_N)$  的 SAR 影像, 共生成  $M$  幅差分干涉图。若形成第  $j$  幅干涉图的两景影像的日期分别为  $t_s, t_e (t_s < t_e)$ , 基于以上分析, 联合式 (7), 式 (6) 可展开为

$$\text{wrap}(\Delta\phi_{x,y}^{(t_s, t_e)}) = \Delta\phi_{x,y,\text{noise}}^{(t_s, t_e)} + \frac{-4\pi}{\lambda} \cdot (\Delta d_{x,y}^{(t_s, t_{s+1})} + \Delta d_{x,y}^{(t_{s+1}, t_{s+2})} + \dots + \Delta d_{x,y}^{(t_{e-1}, t_e)}) \quad (8)$$

此时对于  $x, y$  两点构成的弧段  $i$ , 基于式 (8), 可得如下观测方程:

$$\begin{pmatrix} \text{wrap}(\Delta\phi_i^{(t_0, t_1)}) \\ \text{wrap}(\Delta\phi_i^{(t_1, t_2)}) \\ \vdots \\ \text{wrap}(\Delta\phi_i^{(t_{N-1}, t_N)}) \end{pmatrix}_{M \times 1} = \begin{pmatrix} -\frac{4\pi}{\lambda} & -\frac{4\pi}{\lambda} & -\frac{4\pi}{\lambda} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\lambda} & -\frac{4\pi}{\lambda} & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}_{M \times N} \begin{pmatrix} \Delta d_i^{(t_0, t_1)} \\ \Delta d_i^{(t_1, t_2)} \\ \Delta d_i^{(t_2, t_3)} \\ \Delta d_i^{(t_3, t_4)} \\ \vdots \\ \Delta d_i^{(t_{N-1}, t_N)} \end{pmatrix}_{N \times 1} \quad (9)$$

等式左侧为弧段观测值, 右侧每个相邻时段的相对位移  $\Delta d_i$  为待估量。基于最小二乘原理即可完成上述方程的解算。同时可得弧段解算的中误差为

$$\hat{\sigma}_0^{\text{arc}} = \sqrt{\frac{v^T v}{M - N}} \quad (10)$$

式中,  $v$  为最小二乘解算后的观测值残差,  $\hat{\sigma}_0^{\text{arc}}$  即为弧段解算中误差。

## 2.2 自适应分段解缠

在完成所有弧段的解算后, 可以获得各弧段端点在相邻时段内的相对位移值。为了进一步恢复相干点相对于参考点的绝对位移, 还需在每个相邻时段内进行空间解缠。然而, 在大型桥梁形变监测中常常发现, 伸缩缝位置处会出现显著的相位跳变, 从而导致传统相位解缠失败。如图 1 所示, 桥梁在受热胀冷缩作用时, 伸缩缝两侧的箱梁始终沿相反方向运动, 即当一侧远离卫星时, 另一侧则靠近卫星, 反之亦然, 从而表现为空间不连续的形变。这种不连续性将直接引起伸缩缝处干涉相位的突变, 当跳变幅度超过  $\pi$  时, 弧段观测值中将出现粗差, 进而导致解缠结果错误。

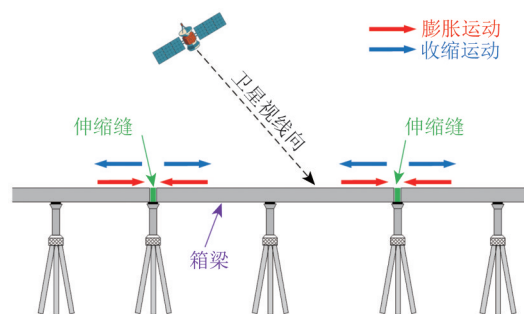


图 1 桥梁热胀冷缩运动示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bridge thermal expansion and contraction

本质上, 伸缩缝两侧的箱梁属于结构与运动均不连续的两个单元体, 对其整体进行解缠不仅缺乏物理意义, 还可能显著降低解缠精度。针对这一问题, 本文介绍了一种空间自适应分段解缠方法。具体而言, 对于跨越伸缩缝的弧段, 由于相位跳变引起的粗差将导致式 (10) 中的弧段解算中误差明显增大, 因此可以通过设定中误差阈值, 自动剔除误差超限的弧段观测, 从而实现弧段网络的自适应分割。随后, 利用子网搜索算法提取各个独立子网内的弧段集, 并在每个子集中分别完成空间解缠 (Song 等, 2024)。

例如对于第  $j$  个时段, 可得如下观测方程

$$\begin{aligned} V &= B \hat{X} - L \\ C \hat{X} - W &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $m$  为总的弧段数量,  $n$  为相干点点数量,  $s$  为独立子网数量;  $L = (\Delta d_1^j \ \Delta d_2^j \ \cdots \ \Delta d_m^j)^T$  为第  $j$  个时段中弧段端点的相对位移值,  $\hat{X} = (d_{p_1}^j \ d_{p_2}^j \ \cdots \ d_{p_n}^j)^T$  为待估的相干点位移值,  $V$  为残差矩阵,  $W$  为参考点的形变值, 此处设为 0;  $B$  和  $C$  都为设计矩阵, 分别为

$$B = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & -1 & \cdots & 1 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \\ 0 & 0 & -1 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{m \times n}, C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{s \times n} \quad (12)$$

用附加约束条件的最小二乘法即可得参数解为

$$\hat{X} = (N_{bb}^{-1} C^T N_{cc}^{-1} C N_{bb}^{-1} - N_{bb}^{-1}) Z - N_{bb}^{-1} C^T N_{cc}^{-1} W \quad (13)$$

式中,  $N_{bb} = B^T P B$ ,  $Z = B^T P L$ ,  $N_{cc} = C N_{bb}^{-1} C^T$ ,  $P$  为观测值权阵, 可由对应弧段的解算中误差确定。

### 3 研究对象与数据

本文研究对象为杭州湾大桥, 该桥为一座跨越杭州湾的特大型跨海桥梁, 于 2008 年 5 月 1 日建成通车, 是沈海高速公路的重要组成部分。大桥北起浙江省嘉兴市海盐县郑家埭, 南至宁波市慈溪市水路湾, 全长约 36 km, 在建成时曾是世界上最长的跨海大桥。本研究所使用的 SAR 数据为 13 景 PAZ 卫星影像, 时间覆盖范围为 2024 年 1 月 27 日至 2025 年 1 月 24 日, 平均采样周期为每月一景。PAZ 卫星为西班牙于 2018 年发射的 X 波段合成孔

径雷达 (SAR) 卫星, 其轨道与德国 TerraSAR-X 卫星一致, 两者可作为姊妹星进行联合干涉处理。所使用影像的空间分辨率为 3 m×3 m。研究区覆盖范围如图 2 (a) 所示, 其中红色矩形表示影像覆盖范围, 绿色矩形为研究区范围。绿色区域内的平均雷达强度图显示, 杭州湾大桥具有强烈的雷达后向散射信号, 成像效果清晰。

获取影像后, 利用 GAMMA 软件完成数据预处理, 主要包括影像配准、裁剪、差分干涉生成及地理编码等步骤。在构建干涉网络时, 为兼顾观测值数量与相干性, 时间基线阈值设为 99 d, 空间基线阈值设为 450 m, 共生成 33 景干涉图, 其时空基线分布如图 2 (b) 所示。随后, 采用振幅离差法 (Ferretti 等, 2001) 选取相干点, 阈值设为 0.3, 并对无关区域进行掩膜, 最终获取约 3.6 万个永久散射体 PS (Permanent Scatterers), 其空间分布如图 2 (c) 所示。可以看出, 大桥上的 PS 点分布密集且连续, 为后续形变监测提供了良好的观测基础。

## 4 形变解算与分析

### 4.1 自适应分段解缠

由前文分析可知, 热胀冷缩效应会在桥梁伸缩缝位置引起相位跳变。杭州湾跨海大桥由多个独立的箱梁单元构成, 以其中中心观景台南侧的 5 个箱梁为例展示伸缩缝处的相位跳变情况。如图 3 (a) 所示即为箱梁的空间位置分布, 连接处共对应 6 个伸缩缝, 分别编号为 #1 至 #6。图 3 (b) — (d) 分别为伸缩缝 #1、#4 与 #6 所在位置的光学影像。

为直观展示伸缩缝处的相位跳变, 本文将干涉相位沿方位向 (近似桥梁走向) 进行投影, 如图 3 (e) 与 (f) 所示, 分别对应干涉对 2024 年 1 月 27 日—2024 年 2 月 18 日和 2024 年 3 月 11 日—2024 年 6 月 18 日。从图 3 (e) 可以看出, 在伸缩缝位置存在明显的相位不连续现象; 而在图 3 (f) 中, 由于对应时段温差较大, 伸缩缝两侧的相位跳变幅度进一步增加, 例如 #5 伸缩缝两侧的真实相位差接近  $2\pi$ , 导致相位解缠所依赖的连续性假设失效。实际上, 伸缩缝两侧相位跳变的幅度不仅取决于温度差, 还受到箱梁长度、材料的

热膨胀系数以及雷达观测几何等多种因素的共同影响 (Song 等, 2024)。例如, 箱梁越长, 两端之间的相对位移累积效应越显著, 从而导致更大的相位跳变。同时, 雷达入射角决定了位移在视线方向上的投影大小, 因此即使针对同一监测对象,

不同轨道获取的 SAR 影像也可能表现出差异化的相位跳变幅度。需要指出的是, 该类由热胀冷缩引起的相位突变在实际处理中还会与相位缠绕造成的跳变叠加, 从而进一步增加了解缠错误的风险。

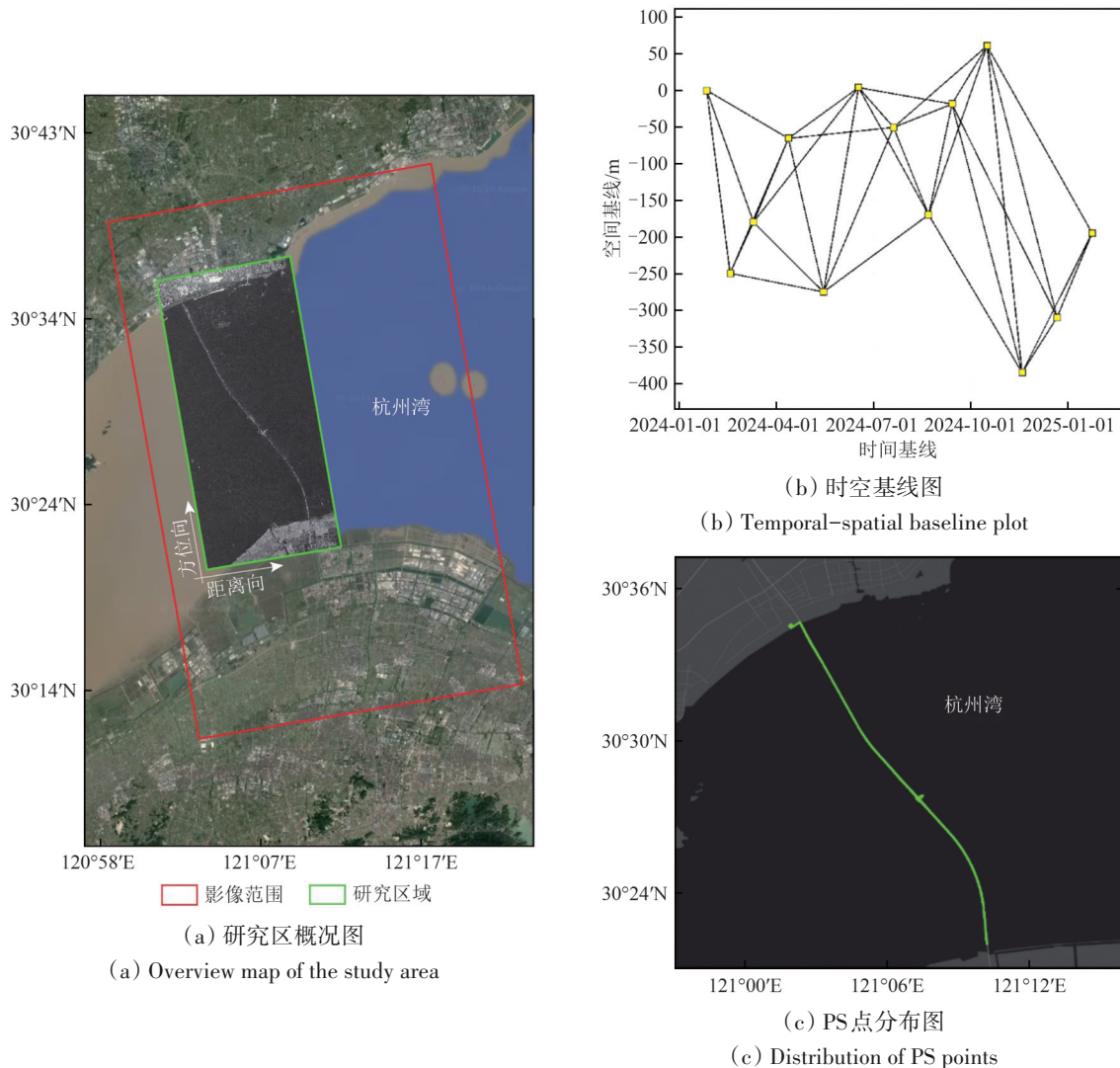


图2 研究区概况与数据预处理

Fig. 2 Overview of the study area and data preprocessing

基于第2节所述原理, 在完成PS点选取后, 本文利用Delaunay三角网构建弧段并开展时序解算。随后, 通过弧段解算中误差的大小实现空间网络的自适应分割, 并在子网内进行形变反演。以伸缩缝#2、#4与#5为例, 图4展示了对应位置弧段的中误差分布。结果表明, 跨越伸缩缝的弧段普遍存在较大的中误差, 大部分数值超过1.5 rad, 显著高于周边弧段的水平, 从而验证了第2节理论分析的正确性。同时还可以看出, 除跨越伸缩缝的

弧段外, 图4中也存在部分非跨缝弧段的中误差较大。这类现象通常与局部相位观测质量较差有关, 例如某些散射点受噪声主导, 从而导致与之相连弧段的解算结果不稳定。这些弧段虽然会在中误差阈值判定下被剔除, 但其数量远低于跨伸缩缝的弧段, 因此通常只是导致部分高噪声的散射点被剔除, 并不会对整体弧段网络结构造成显著破坏。

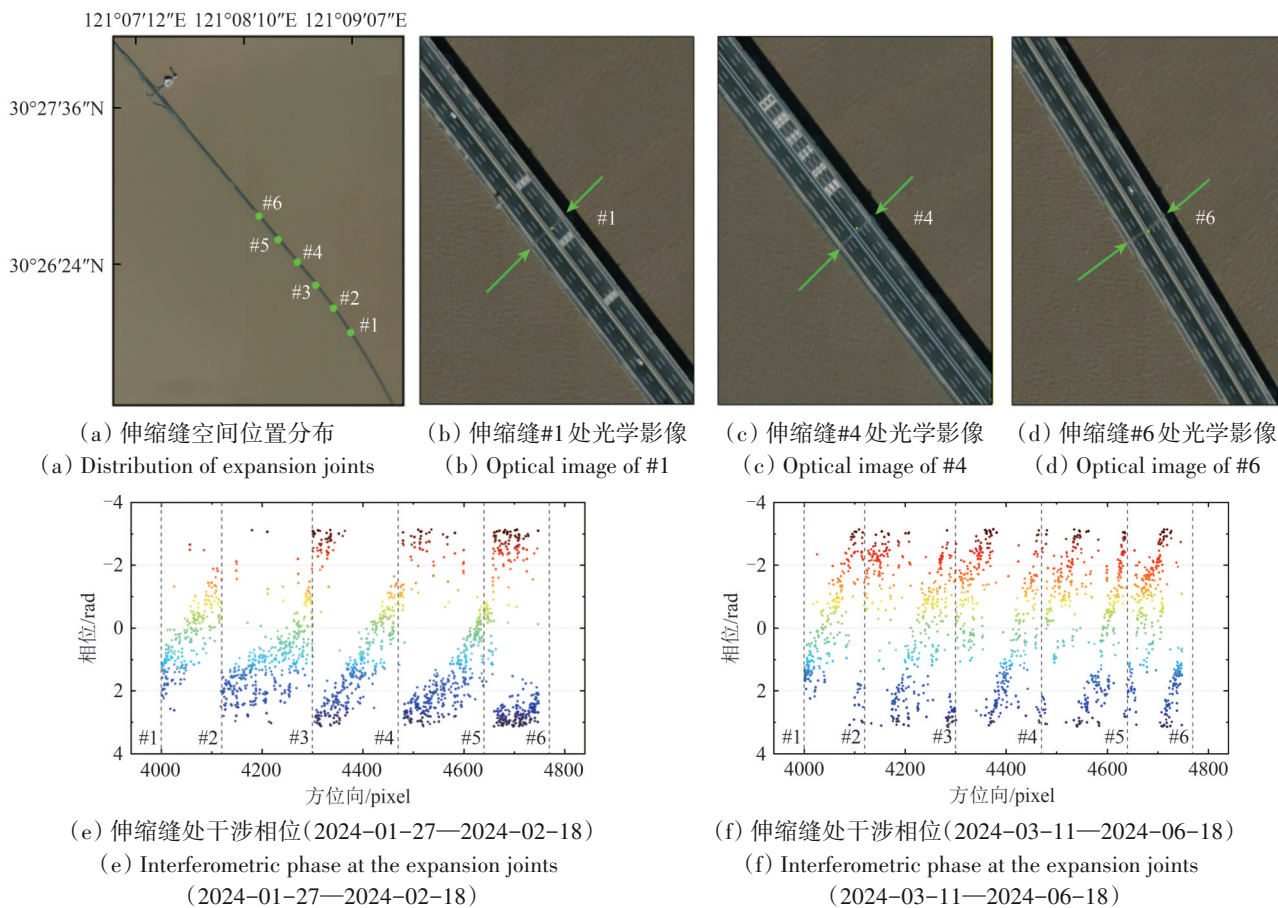


图3 伸缩缝与干涉相位跳变示意

Fig. 3 Illustration of expansion joints and interferometric phase discontinuities

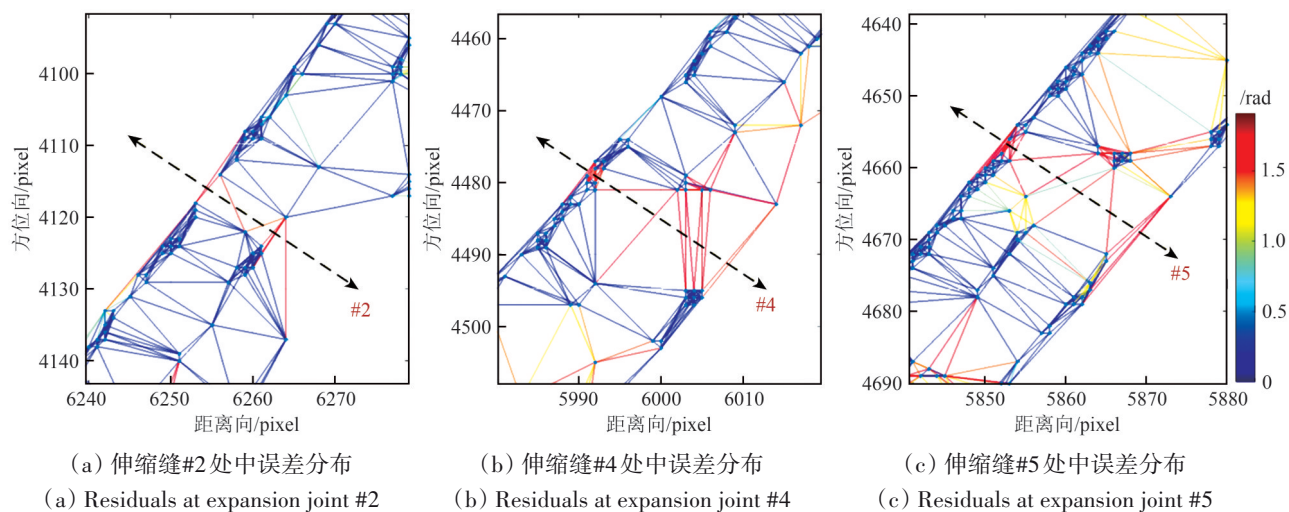


图4 跨伸缩缝处的弧段解算中误差

Fig. 4 Arc solution residuals at expansion joints

在设置弧段中误差阈值并剔除质量较差的弧段后，弧段网络可自适应地分割为多个子集。在每个子集中，可依据弧段两端点的时序相对位移完成空间解缠。对于弧段中误差阈值的设定，本文基于目标位移精度和协方差传播定律反推而得。

对于X波段的PAZ数据（波长约0.031 m），1 mm的位移对应的相位量约为0.405 rad。考虑到弧段观测值为两端点相位差以及解算过程中的残差传播效应，为保证最终反演精度不低于1 mm，对应的弧段中误差阈值需控制在约0.572 rad以内。因此，

中误差阈值最终设置为0.572 rad。需要指出的是，该阈值与监测目标精度及SAR波段密切相关，在其他应用场景下可根据实际需求进行相应调整。经过上述处理，整个桥梁的弧段网络被划分为70个子网，并在每个子网中以箱梁中心像元作为参考点进行空间解缠。之所以选择箱梁中心作为参考点，

是因为箱梁作为线型结构，其变形具有对称性，理论上中心位置的形变最小（Krkoška和Moravčik，2015）。同时，为进行对比，本文还采用经典的最小费用流（MCF）方法开展相位解缠（Pepe和Lanari，2006）。仍以图3中所示的干涉相位为例，对比两种方法的解缠结果，结果如图5所示。

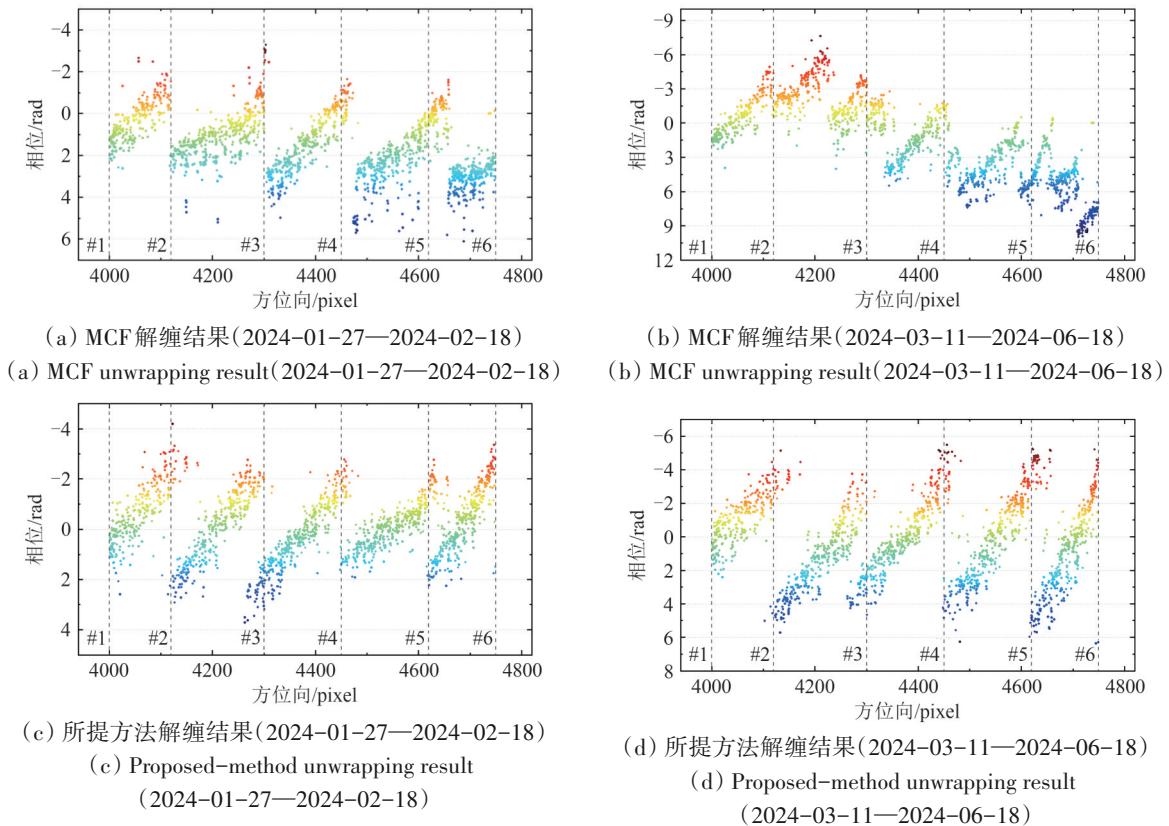


图5 相位解缠结果对比

Fig. 5 Comparison of phase unwrapping results

由图可见，在干涉图2024年1月27日—2024年2月18日中，由于相位跳变幅度较小，MCF解缠结果整体较为正确，仅在箱梁#5—#6处出现局部异常。而在干涉图2024年3月11日—2024年6月18日中，由于温差较大导致相位跳变显著增强，MCF解缠结果出现明显错误，无法准确反映各箱梁自身的位移及其相对位移关系。相比之下，本文方法所得结果在每个箱梁内部均表现为连续相位分布，有效刻画了箱梁受热胀冷缩作用产生的形变特征；同时在伸缩缝位置呈现出合理的相位跳变，反映了结构的真实空间非连续性，体现了所提方法在桥梁热胀冷缩监测中的可行性与有效性。

#### 4.2 桥梁位移与温度的相关性分析

完成解缠处理后，得到每个PS点相对于起始

时刻（2024年1月27日）的累计位移时间序列。为便于直观地分析桥梁的时空位移特性，本文将所有PS点的累计位移按照不同时相投影至桥梁走向方向，结果如图6所示，覆盖范围从南岸至北岸约25 km。由图6可以看出，在整个监测时段内桥梁的总体累计位移幅度在 $[-50, 50]$  mm。对于任一固定时刻而言，桥梁沿走向方向的位移分布呈现为典型的“锯齿”状特征。

事实上，每个“锯齿”对应于单个子箱梁，其波峰与波谷反映了箱梁两端的相对位移幅度。结合前文讨论可知，这种空间非连续性主要源于各子箱梁受温度胀缩作用的独立响应。进一步比较不同时段的结果表明，起始阶段（例如2024年2月18日和2024年3月11日）与末期阶段（例如

2024年12月22日与2025年1月24日)的累计位移整体较小。相比之下,中间阶段(特别是7—9月)的累计位移显著增大,部分位于北岸附近的桥段累计位移超过50 mm,且各箱梁两端的相对位移幅

度明显增强。考虑到该时段与起始时刻之间的温差较大,初步推测温度变化是驱动桥梁形变季节性增强的主要因素。

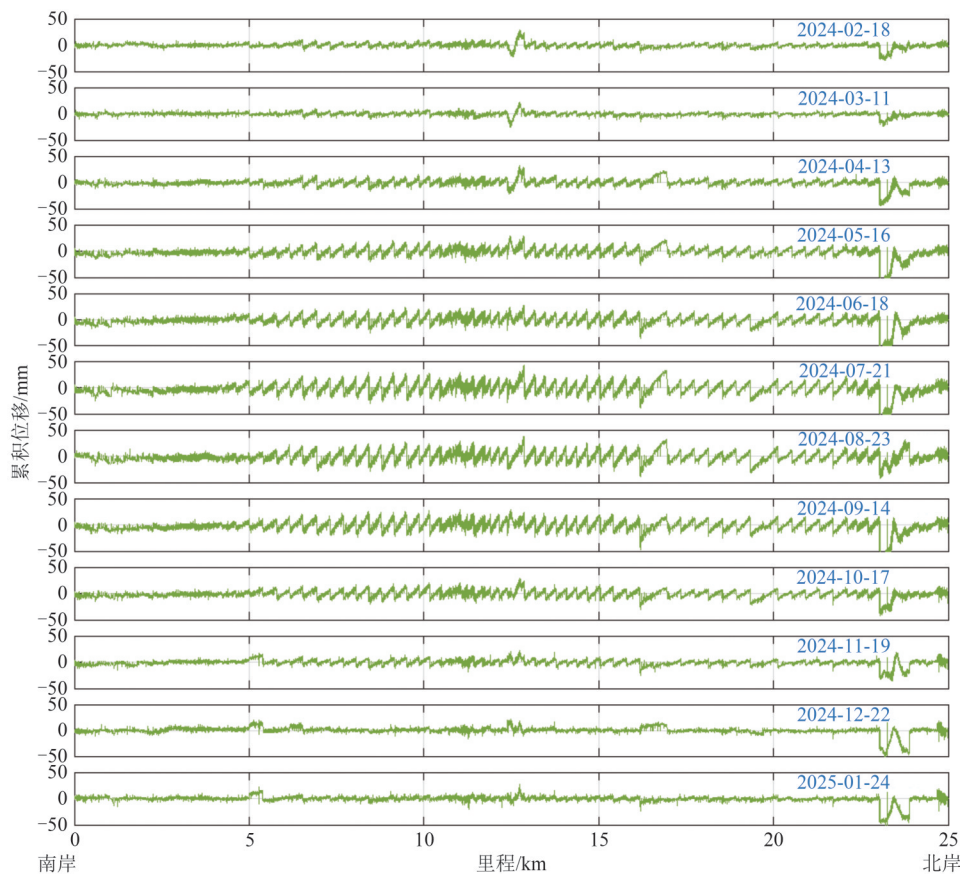


图6 桥梁位移时空分布

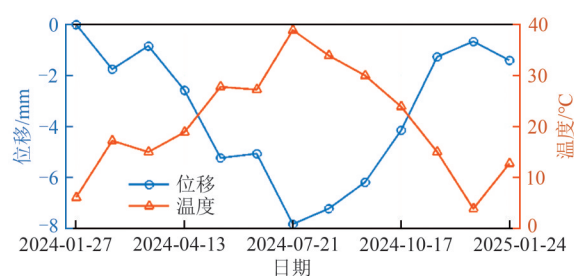
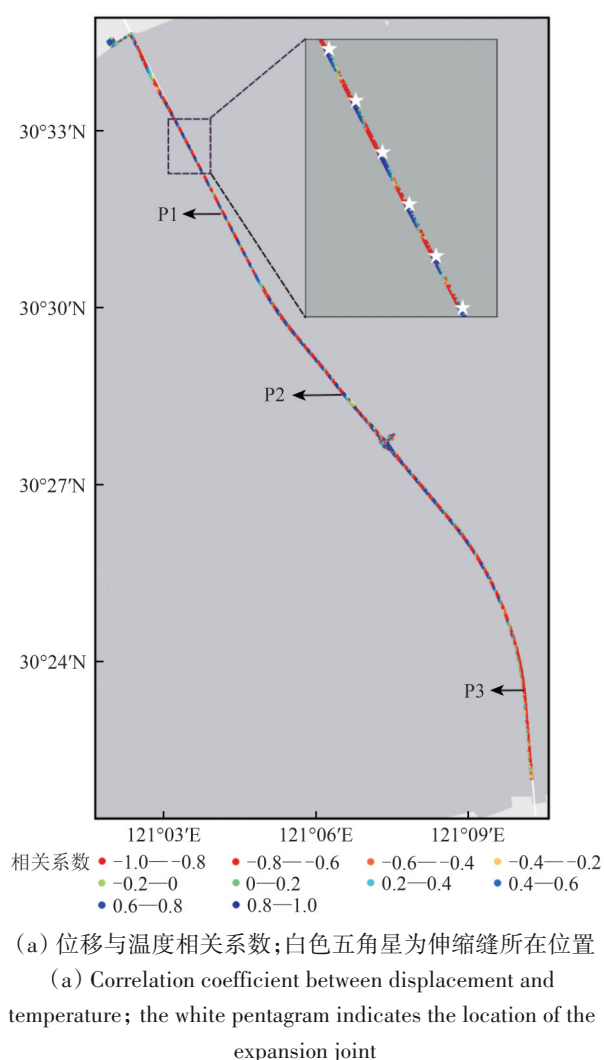
Fig. 6 Spatiotemporal distribution of bridge displacement

为进一步探讨桥梁位移与温度之间的耦合关系,本文收集了研究区在SAR影像获取时刻的气温数据,并计算了PS点位移时间序列与温度序列之间的相关系数,结果见图7(a)。可以看出,位移与温度的相关性较强,其相关系数绝对值普遍大于0.8,其中正相关最大值为0.980,负相关最大值为-0.988,表明桥梁位移受温度变化驱动的显著性较高。

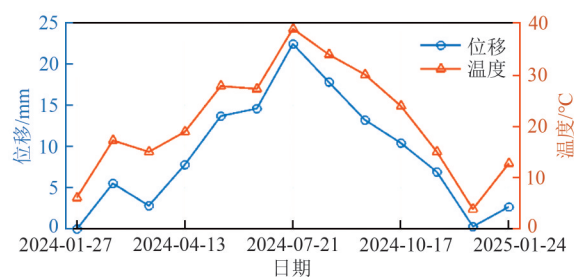
同时,相关系数在桥梁走向上呈现明显的正负交替分布。结合图7(a)的局部放大图可见,相关系数发生正负跃变的位置主要对应于伸缩缝与箱梁中心。该现象与桥梁结构的热学与力学特性相一致:一方面,在伸缩缝位置,受热膨胀或冷缩时相邻箱梁的位移方向始终相反,从而导致相关系数在正负之间切换;另一方面,在箱梁中心位置,线型结构的热胀冷缩效应具有中心对称

性,使得箱梁两侧的位移方向随温度变化呈镜像分布,进而形成以中心为界的正负对称特征。

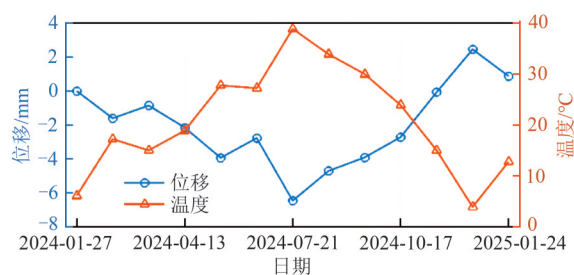
此外,为更直观地说明这一规律,本文选取了位于桥梁南侧、中部及北侧的3个代表性PS点(P1、P2和P3),绘制了其位移与温度时间序列,分别如图7(b)—(d)所示。结果表明P1与P3的累计位移幅度整体在8 mm以内,但与其与温度的相关系数仍高达-0.969和-0.966。这一现象不仅反映出桥梁位移对温度变化具有极高的敏感性,也从侧面验证了位移反演结果的可靠性与精度。相比之下,P2与温度呈显著正相关,相关系数为0.978,最大累计位移达到25 mm。综上所述,桥梁位移与温度变化之间存在高度相关性,其空间分布特征与前文第2.2节的理论分析相吻合,进一步验证了热胀冷缩效应在桥梁时空形变中的主导作用。



(b) Displacement and temperature time series at points P1



(c) Displacement and temperature time series at points P2



(d) Displacement and temperature time series at points P3

图7 桥梁位移与温度相关性分析

Fig. 7 Correlation analysis between bridge displacement and temperature

### 4.3 非线性模型构建与解算

由第4.2节的分析可知,桥梁整体形变表现出随温度变化的非线性响应特征,因此传统以线性形变速率为假设的时序 InSAR 算法难以准确描述该过程。另一方面,监测部门不仅需要掌握桥梁的整体变形规律,更关注在热胀冷缩效应之外可能指示结构异常的非热源性形变。因此,本文基于 PS 点的位移时间序列,构建了顾及温度变化的非线性形变速率求解模型。具体而言,该模型在传统线性形变模型的基础上引入热膨胀系数,以吸收由温度变化引起的可逆形变,并进一步分离和估计残余形变速率,用于评估桥梁结构的潜在异常状态。模型形式如下:

$$d_{is} = K \cdot Temp + T \cdot V_{res} \quad (14)$$

式中,  $d_{is}$  为 PS 点的位移时间序列;  $Temp$  为相对于起始时间的温度差时间序列,单位:  $^{\circ}\text{C}$ ;  $K$  为热膨

胀系数,单位:  $\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ ;  $T$  为观测时间,单位:  $\text{a}$ ;  $V_{res}$  为残余形变速率(即非热胀冷缩形变速率),单位:  $\text{mm}/\text{a}$ 。

对于每个 PS 点,基于最小二乘原理可反演出对应的  $K$  与  $V_{res}$ ,同时可通过下式求解得到残余位移时间序列:

$$d_{res} = d_{is} - K \cdot Temp \quad (15)$$

式中,  $d_{res}$  即为桥梁扣除热胀冷缩效应后的残余形变时间序列。

同理,为进一步揭示桥梁非热胀冷缩形变的时空特征,本文将残余形变序列按不同时相投影至桥梁走向方向,结果如图8所示。可以看出,桥梁残余形变整体幅度较小,大部分位于  $[-10, 10]$  mm 范围内,仅有个别路段接近 20 mm。与图6的累计位移结果相比,扣除热胀冷缩效应后桥梁的累计位移显著减小,尤其是在温差较大的7—

9月阶段。以2024年7月21日为例, PS点原始位移时间序列的标准差约为9.6 mm, 而在剔除温度效应后标准差降至约1.6 mm。此外, 从空间分布上看, 残余形变已不再呈现箱梁热胀冷缩导致的

典型“锯齿”特征; 从时间维度上看, 残余形变序列整体保持稳定, 且与温度不再具有显著相关性。这一结果充分表明桥梁的主要位移来源于温度驱动的热胀冷缩过程, 而非结构异常变形。

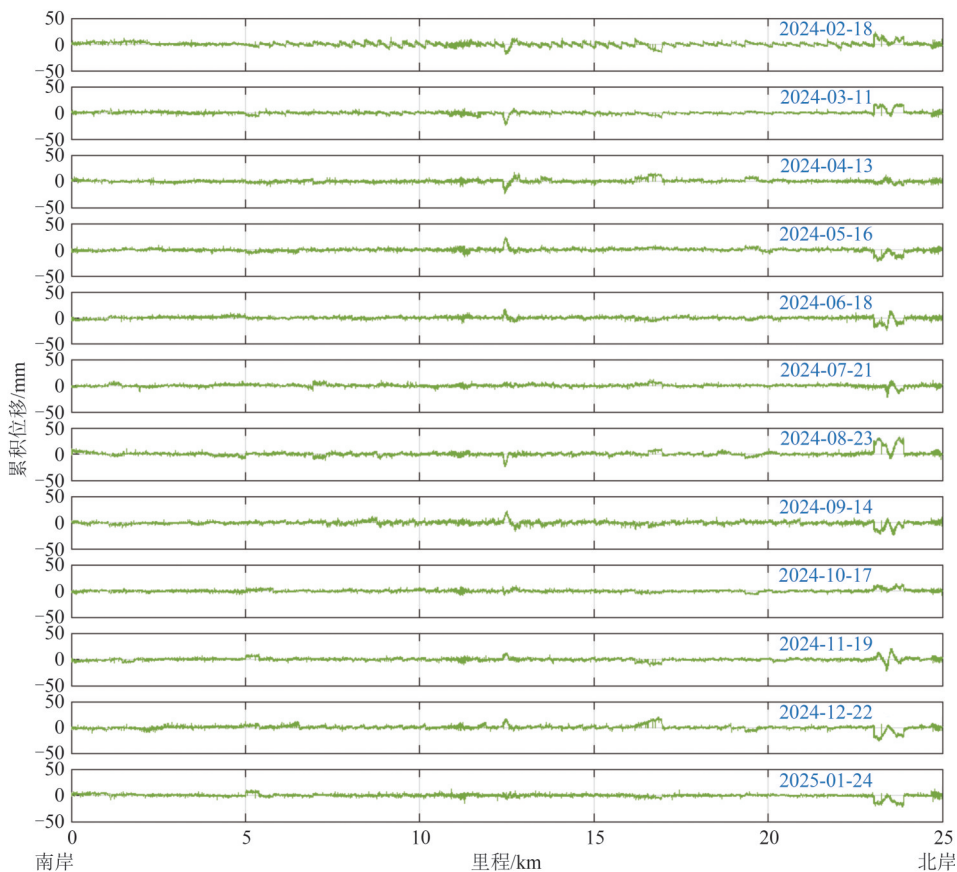


图8 桥梁残余形变时空分布

Fig. 8 Spatiotemporal distribution of residual deformation of the bridge

#### 4.4 桥梁残余形变速率分析

通过上述解算过程, 还得到了PS点在扣除热胀冷缩效应后的残余形变速率, 其统计分布直方图如图9所示。由图9可见, 桥梁残余形变速率整体较小, 最大值不超过8 mm/a, 其中97.1%的PS点残余速率不超过2 mm/a, 且总体分布近似正态分布。这表明桥梁绝大多数点位的位移主要由温度变化驱动。为进一步排查潜在的异常区域, 本文对残余形变速率进行了空间展示, 结果见图10(a)。

图10(a)显示, 桥梁整体残余形变速率普遍较低, 有3个局部路段表现出相对偏大的残余速率, 分别记为L1、L2和L3。局部放大结果表明, L1位于桥梁北端, 空间跨度约1000 m, 残余速率最大接近-8 mm/a; L2位于桥梁中部, 空间范围最小, 残余速率约为5 mm/a; L3位于桥梁南侧, 残余速率约为4 mm/a。为进一步探究这3处路段的具

体变形特征, 本文选取了4个代表性PS点(A1—A4), 绘制了其原始位移与残余位移时间序列对比图, 如图10(b) — (e)所示。

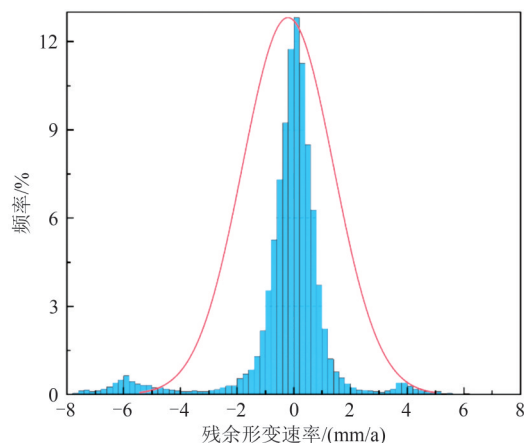


图9 桥梁残余形变速率统计分布

Fig. 9 Statistical distribution of residual deformation rates of the bridge

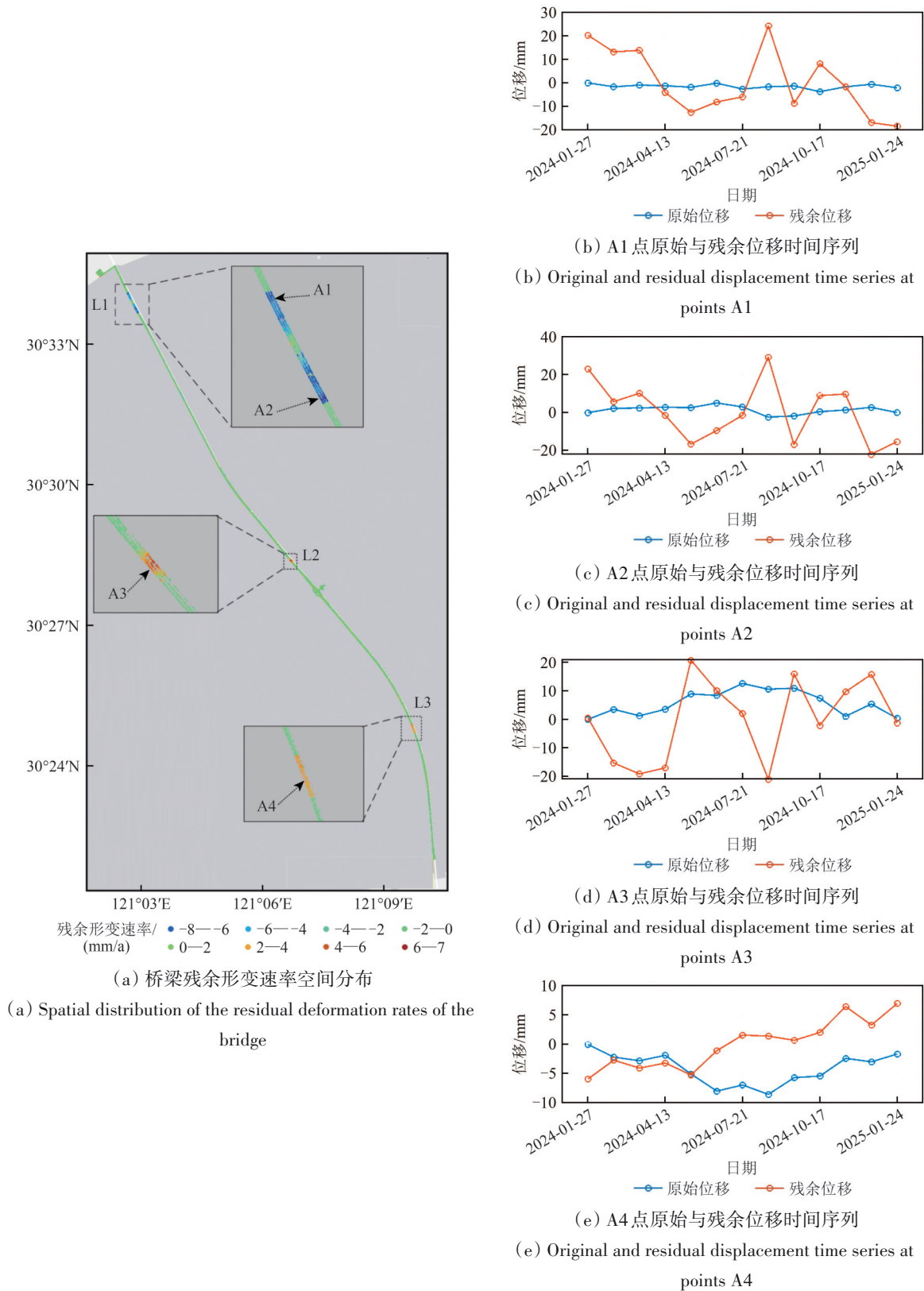


图 10 桥梁残余形变分析

Fig. 10 Residual deformation analysis of the bridge

由位于L1的A1与A2点可见, 其残余形变速率偏大的主要原因在于位移与温度的相关性较弱 (相关系数分别为0.4和-0.3), 鉴于原始位移幅度

均小于5 mm, 且未表现出明显的长期趋势, 说明该路段整体较为稳定。同样, L2内的A3点与温度的相关性也较低 (相关系数为0.2), 导致残余项

偏大,但其原始位移幅度较小且无显著趋势性,因此亦可视为稳定区域。事实上,L1与L2分别对应杭州湾跨海大桥的北航道桥与南航道桥路段,而这两个航道桥分别是双塔斜拉索大桥与单塔斜拉索大桥,因此其位移将受斜拉索牵引力约束,导致位移与温度的相关性较低。

相比之下,位于L3的A4点与温度呈显著相关(相关系数为-0.8),但其残余位移时间序列表现出明显的时间趋势,残余位移与时间的相关系数高达0.92,累计残余位移约12 mm。这表明L3路段可能存在非热胀冷缩效应驱动连续性变形。从工程应用角度来看,这些残余异常虽不足以直接说明结构疲劳或严重病害,但可作为潜在的预警指标,提示在日常巡检和长期健康监测中需要对该类位置进行重点关注。例如,可在异常区域加密布设GNSS、应变计或倾角仪等传感器。由此可见,本文提出的分段解缠方法不仅能够有效分离热胀冷缩效应,还能够识别并定位潜在的非热源性形变,从而为大型桥梁的精细化健康监测与风险预警提供重要参考。

## 5 结论

本文围绕大型桥梁伸缩缝导致相位非连续与温度驱动的非线性形变难题,应用了一种自适应分段解缠的时序InSAR处理算法。方法首先构建无先验形变模型假设的函数模型,然后以弧段解算中误差为剔除准则,自动识别跨缝粗差并将网络划分为若干子网,在子网内完成空间解缠与位移时间序列恢复,有效规避了相位跳变大于 $\pi$ 导致的传统解缠失效。

在基于X波段PAZ影像的杭州湾跨海大桥形变监测实验中,依据1 mm位移精度反推的中误差阈值(0.572 rad)对弧段网络进行质量控制并自动分割为70个子网;与最小费用流(MCF)的相位解缠结果对比表明,当温差引起相位跃变显著时,本文方法获取的解缠相位能在箱梁内部保持连续、在伸缩缝处呈现合理跃变,从而更准确反映桥梁真实的形变状态。进一步的温度与位移相关性分析显示,相关系数绝对值普遍大于0.8(最大0.980/-0.988),其正负交替分布与伸缩缝及箱梁中心位置相吻合,符合方法部分的理论分析;扣除热胀冷缩后,97.1%的PS点残余速率大小不超过2 mm/a,说明桥梁整体形变由温度变化引起,其

中仅个别路段呈现弱异常,后续需进一步跟踪监测。

值得一提的是,当桥梁没有伸缩缝或伸缩缝处的相位跳变较小时,所提方法依然适用,因为此时跨伸缩缝的弧段将被保留,后续算法将自适应开展全局解缠。另一方面,当前结果反映的是桥梁真实形变在卫星视线方向上的投影,因而主要代表桥梁走向变形的线性分量。未来若能结合多轨或多角度SAR观测,则可进一步分解出桥梁竖向与走向位移分量,从而获取更全面的形变信息并提升工程判读的精度。总体而言,所提方法能够在复杂桥梁结构中稳健处理相位非连续、提升解缠可靠性并实现热效应分离,为桥梁在役期的精细化安全监测提供了可行技术路径,未来可在更长时间序列与多源传感协同条件下开展推广与验证。

**志 谢** 本研究使用的X波段PAZ卫星数据由西班牙Hisdesat公司提供,在此表示感谢。

## 参考文献(References)

- Chang L, Dollevoet R P B J and Hanssen R F. 2017. Nationwide railway monitoring using satellite SAR interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(2): 596-604 [DOI: 10.1109/Jstars.2016.2584783]
- Crosetto M, Monserrat O, Cuevas-González M, Devanthery N, Luzi G and Crippa B. 2015. Measuring thermal expansion using X-band persistent scatterer interferometry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100: 84-91 [DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2014.05.006]
- Cusson D, Rossi C and Ozkan I F. 2021. Early warning system for the detection of unexpected bridge displacements from radar satellite data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11(1): 189-204 [DOI: 10.1007/s13349-020-00446-9]
- Di Martire D, Iglesias R, Monells D, Centolanza G, Sica S, Ramondini M, Pagano L, Mallorquí J J and Calcaterra D. 2014. Comparison between differential SAR interferometry and ground measurements data in the displacement monitoring of the earth-dam of Conza Della Campania (Italy). *Remote Sensing of Environment*, 148: 58-69 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.03.014]
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20 [DOI: 10.1109/36.898661]
- Fornaro G, Reale D and Verde S. 2013. Bridge thermal dilation monitoring with millimeter sensitivity via multidimensional sar imag-

- ing. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(4): 677-681 [DOI: 10.1109/lgrs.2012.2218214]
- Hanssen R F. 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/0-306-47633-9]
- Hilley G E, Burgmann R, Ferretti A, Novali F and Rocca F. 2004. Dynamics of slow-moving landslides from permanent scatterer analysis. *Science*, 304(5679): 1952-1955 [DOI: 10.1126/science.1098821]
- Hooper A, Zebker H, Segall P and Kampes B. 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, 31(23): L23611 [DOI: 10.1029/2004gl021737]
- Itoh K. 1982. Analysis of the phase unwrapping algorithm. *Applied Optics*, 21(14): 2470 [DOI: 10.1364/AO.21.002470]
- Jia H G and Liu L Y. 2016. A method for the extraction of long-term deformation characteristics of long-span high-speed railway bridges using high-resolution sar images. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B7: 35-38 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XLI-B7-35-2016]
- Kampes B M. 2006. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Dordrecht: Springer [DOI: 10.1007/978-1-4020-4723-7]
- Ko J M and Ni Y Q. 2005. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27(12): 1715-1725 [DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.02.021]
- Krkoška L and Moravčík M. 2015. The analysis of thermal effect on concrete box girder bridge. *Procedia Engineering*, 111: 470-477 [DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.118]
- Liao M S, Wang R, Yang M S, Wang N, Qin X Q and Yang T L. 2020. Techniques and applications of spaceborne time-series InSAR in urban dynamic monitoring. *Journal of Radars*, 9(3): 409-424 (廖明生, 王茹, 杨梦诗, 王楠, 秦晓琼, 杨天亮. 2020. 城市目标动态监测中的时序 InSAR 分析方法及应用. *雷达学报*, 9(3): 409-424) [DOI: 10.12000/JR20022]
- Lin H, Ma P F and Wang W X. 2017. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1421-1433 (林珏, 马培峰, 王伟玺. 2017. 监测城市基础设施健康的星载 MT-InSAR 方法介绍. *测绘学报*, 46(10): 1421-1433) [DOI: 10.11947/j.agcs.2017.20170339]
- Ma P F, Li T, Fang C Y and Lin H. 2019. 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 and Remote Sensing*, 155: 1-12 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.06.013]
- Ma P F, Lin H, Wang W X, Yu H W, Chen F L, Jiang L M, Zhou L F, Zhang Z J, Shi G Q and Wang J L. 2022a. Toward fine surveillance: a review of multitemporal interferometric synthetic aperture radar for infrastructure health monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 10(1): 207-230 [DOI: 10.1109/Mgrs.2021.3098182]
- Ma P F, Zheng Y, Zhang Z J, Wu Z R and Yu C. 2022b. Building risk monitoring and prediction using integrated multi-temporal InSAR and numerical modeling techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114: 103076 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.103076]
- Macchiarulo V, Milillo P, Blenkinsopp C and Giardina G. 2022. Monitoring deformations of infrastructure networks: a fully automated GIS integration and analysis of InSAR time-series. *Structural Health Monitoring*, 21(4): 1849-1878 [DOI: 10.1177/14759217211045912]
- Milillo P, Perissin D, Salzer J T, Lundgren P, Lacava G, Milillo G and Serio C. 2016. Monitoring dam structural health from space: insights from novel InSAR techniques and multi-parametric modeling applied to the Pertusillo dam Basilicata, Italy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 221-229 [DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.013]
- Pepe A and Lanari R. 2006. On the extension of the minimum cost flow algorithm for phase unwrapping of multitemporal differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(9): 2374-2383 [DOI: 10.1109/Tgrs.2006.873207]
- Perissin D, Wang Z Y and Lin H. 2012. Shanghai subway tunnels and highways monitoring through cosmo-SkyMed persistent scatterers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 73: 58-67 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002]
- Qin X Q, Li Q Q, Ding X L, Xie L F, Wang C S, Liao M S, Zhang L, Zhang B C and Xiong S T. 2021. 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*, 103: 102476 [DOI: 10.1016/j.jag.2021.102476]
- Qin X Q, Liao M S, Zhang L and Yang M S. 2017. Structural health and stability assessment of high-speed railways via thermal dilation mapping with time-series InSAR analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 10(6): 2999-3010 [DOI: 10.1109/Jstars.2017.2719025]
- Qin X Q, Yang M S, Wang H M, Yang T L, Lin J X and Liao M S. 2016. Application of high-resolution PS-InSAR in deformation characteristics probe of urban rail transit. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 45(6): 713-721 (秦晓琼, 杨梦诗, 王寒梅, 杨天亮, 林金鑫, 廖明生. 2016. 高分辨率 PS-InSAR 在轨道交通形变特征探测中的应用. *测绘学报*, 45(6): 713-721) [DOI: 10.11947/j.agcs.2016.20150440]
- Qin X Q, Zhang L, Yang M S, Luo H, Liao M S and Ding X L. 2018. Mapping surface deformation and thermal dilation of arch bridges by structure-driven multi-temporal DInSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 216: 71-90 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.032]
- Schlögl M, Dorninger P, Kwapisz M, Ralbovsky M and Spielhofer R. 2022. Remote sensing techniques for bridge deformation monitoring at millimetric scale: investigating the potential of satellite ra-

- dar interferometry, airborne laser scanning and ground-based mobile laser scanning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 90(4): 391-411 [DOI: 10.1007/s41064-022-00210-2]
- Selvakumaran S, Plank S, Geiß C, Rossi C and Middleton C. 2018. Remote monitoring to predict bridge scour failure using interferometric synthetic aperture radar (InSAR) stacking techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73: 463-470 [DOI: 10.1016/j.jag.2018.07.004]
- Selvakumaran S, Rossi C, Marinoni A, Webb G, Bennetts J, Barton E, Plank S and Middleton C. 2020. Combined InSAR and terrestrial structural monitoring of bridges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(10): 7141-7153 [DOI: 10.1109/Tgrs.2020.2979961]
- Song X Y, Zhang L, Li T, Lei B C and Song R Q. 2024. Baseline refinement and DEM accuracy analysis during the in-orbit test phase of LT-1 SAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(10): 1920-1929 (宋鑫友, 张磊, 李涛, 雷宝成, 宋瑞庆. 2024. 陆探一号干涉 SAR 在轨测试阶段基线精化与 DEM 精度分析. *测绘学报*, 53(10): 1920-1929) [DOI: 10.11947/j. AGCS. 2024. 20230540]
- Song X Y, Zhang L, Lu Z, Liang H Y and Ren W J. 2025. Optimizing DEM error mitigation in multi-temporal InSAR: a detection-and-estimation strategy based on phase gradient direction consistency. *Remote Sensing of Environment*, 331: 115028 [DOI: 10.1016/j.rse.2025.115028]
- Song X Y, Zhang L, Lu Z, Wu J C, Song R Q, Liang H Y and Bian W W. 2024. Toward retrieving discontinuous deformation of bridges by MTInSAR with adaptive segmentation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 5202215 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3347478]
- Sousa J J and Bastos L. 2013. Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3): 659-667 [DOI: 10.5194/nhess-13-659-2013]
- Wen M C, Yang M S, Zhao X and Zhao Z F. 2024. Postconstruction deformation characteristics of high-fill foundations of kunming changshui international airport using time-series InSAR technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 206-218 [DOI: 10.1109/Jstars.2023.3328321]
- Wu S B, Yang Z F, Ding X L, Zhang B C, Zhang L and Lu Z. 2020. Two decades of settlement of Hong Kong international airport measured with multi-temporal InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 248: 111976 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111976]
- Xing X M, Chang H C, Chen L F, Zhang J H, Yuan Z H and Shi Z N. 2019. Radar interferometry time series to investigate deformation of soft clay subgrade settlement—a case study of Lungui Highway, China. *Remote Sensing*, 11(4): 429 [DOI: 10.3390/rs11040429]
- Zhang B C, Liao X N, Zhang J Y, Xiong S T, Wang C S, Wu S B, Zhu C H, Zhu J S, Qin X Q and Li Q Q. 2023. Megalopolitan-scale ground deformation along metro lines in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China, revealed by MT-InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 122: 103432 [DOI: 10.1016/j.jag.2023.103432]
- Zhang L, Ding X L, Lu Z, Jung H S, Hu J and Feng G C. 2014. A novel multitemporal InSAR model for joint estimation of deformation rates and orbital errors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(6): 3529-3540 [DOI: 10.1109/Tgrs.2013.2273374]
- Zhang L, Lu Z, Ding X L, Jung H S, Feng G C and Lee C W. 2012. Mapping ground surface deformation using temporarily coherent point SAR interferometry: application to Los Angeles Basin. *Remote Sensing of Environment*, 117: 429-439 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.10.020]
- Zhang L, Sun Q and Hu J. 2018. Potential of TCPInSAR in monitoring linear infrastructure with a small dataset of SAR images: application of the Donghai Bridge, China. *Applied Sciences*, 8(3): 425 [DOI: 10.3390/app8030425]
- Zhao S H, Li P X, Li H R, Zhang T and Wang B. 2023. Monitoring and comparative analysis of hohhot subway subsidence using StaMPS-PS based on two DEMs. *Remote Sensing*, 15(16): 4011 [DOI: 10.3390/rs15164011]
- Zhou L F, Ma P F, Xia Y and Gong S R. 2019. Deformation monitoring and analysis of the thermal expansion of high-rise buildings in Shanghai Lujiazui using tomography-based persistent scatterer interferometry. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(4): 044517 [DOI: 10.1117/1.Jrs.13.044517]
- Zhou Y, Hao G W, Qin X Q, Yi F and Tan Z K. 2025. A refined DS-InSAR technique for long-term deformation monitoring of low-coherence bridge groups. *Engineering Structures*, 335: 120335 [DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.120335]
- Zhou Z K, Yao X, Ren K Y and Liu H Y. 2022. Formation mechanism of ground fissure at Beijing capital international airport revealed by high-resolution InSAR and numerical modelling. *Engineering Geology*, 306: 106775 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106775]
- Zhu M, Wan X L, Fei B G, Qiao Z P, Ge C Q, Minati F, Vecchioli F, Li J P and Costantini M. 2018. Detection of building and infrastructure instabilities by automatic spatiotemporal analysis of satellite SAR interferometry measurements. *Remote Sensing*, 10(11): 1816 [DOI: 10.3390/rs10111816]

## Monitoring the Hangzhou Bay Bridge with time-series InSAR : Addressing the challenges of spatially discontinuous deformation

SONG Xinyou<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>2</sup>, LI Minghui<sup>2</sup>, HU Zaihua<sup>3</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, LIANG Hongyu<sup>1</sup>

1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Ningbo Hangzhou Bay Bridge Management Co., Ltd., Ningbo 315327, China;

3. China RAILWAY MAJOR BRIDGE Engineering Group Co., Ltd., Zhengzhou 450053, China

**Abstract:** Time-series Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR), which has the advantage of an all-weather, 24-hour operation with high precision and high spatial resolution, has been widely applied to bridge structural health monitoring. However, numerous expansion joints and pronounced thermal expansion and contraction effects identified during large-scale bridge monitoring often cause phase discontinuities. This limitation undermines the spatial continuity assumption required by conventional phase unwrapping methods and hinders accurate deformation inversion. This paper presents an adaptive segmented unwrapping time-series InSAR algorithm that does not rely on prior model assumptions. Phase discontinuities at expansion joints and the interferometric network partitioned by setting arc error thresholds are automatically identified. Then, subnet reference points are selected based on bridge mechanical characteristics to enable segmented unwrapping, thereby recovering the displacement time series of coherent points. The method was validated using 13 scenes of PAZ X-band satellite imagery over the Hangzhou Bay Bridge. Results show that the proposed approach effectively locates expansion joints and achieves stable unwrapping, with better adaptability and robustness than the minimum cost flow algorithm. Further analysis reveals that the overall bridge deformation is highly correlated with temperature (maximum correlation coefficient of 0.988). After the thermal effects are removed, 97.1% of coherent points exhibit residual deformation rates below 2 mm/year, with only a few sections showing potential nonthermal deformation. These findings provide new insights for the health monitoring of large bridges and contribute to enhancing the reliability and applicability of time-series InSAR in infrastructure monitoring.

**Key words:** InSAR, segmented phase unwrapping, bridge deformation monitoring, thermal expansion and contraction, Hangzhou Bay Bridge

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42574040, 42174005)