

时序 InSAR 对流层大气延迟改正的相位堆叠方法

李思慧¹, 董杰¹, 张路², 廖明生²

1. 武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430079;

2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

摘要: 对流层大气延迟一直是限制合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) 技术形变测量精度的主要因素之一。基于含有共同日期的干涉相位也包含相同的大气延迟相位分量这一事实, 相位堆叠 CSS (Common Scene Stacking) 方法采用叠加求和的方式来估计共有日期的大气延迟相位, 并通过迭代运算提高估计精度, 具有实现简单、计算效率高的优势。本文对 CSS 方法估算出的大气延迟相位进行空间低通滤波, 并将相位解缠与 CSS 大气延迟相位估计进行迭代运算, 改善形变估计结果。首先, 基于模拟数据分析了迭代次数和时间窗口尺寸对 CSS 方法对流层大气延迟改正效果的影响; 然后, 将本文方法应用于真实 SAR 数据, 分析了不同大小的时间窗口对改正结果的影响, 并与其他方法进行对比, 结果表明该方法可以获得较好的大气延迟改正结果, 改正后空间相位标准差平均降低了 62%, 稳定点的时间序列标准差平均降低了 58%。在此基础上, 对目前存在的问题进行了分析和讨论。

关键词: 时间序列 InSAR, 对流层大气延迟, 相位堆叠方法, 参数设置, 形变估计

中图分类号: P2

引用格式: 李思慧, 董杰, 张路, 廖明生. 2023. 时序 InSAR 对流层大气延迟改正的相位堆叠方法. 遥感学报, 27(10): 2406–2417

Li S H, Dong J, Zhang L and Liao M S. 2023. Time-series InSAR tropospheric atmospheric delay correction based on common scene stacking. National Remote Sensing Bulletin, 27(10): 2406–2417 [DOI:10.11834/jrs.20221736]

1 引言

合成孔径雷达干涉测量技术 InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry) 具备全天时、全天候的工作能力, 在地表形变测量中有着高分辨率成像、大范围覆盖、高精度测量的优势 (Hanssen, 2005)。常规雷达差分干涉测量 DInSAR (Differential InSAR) 技术容易受到时空去相干、大气延迟扰动等因素的影响, 形变测量精度不高。在此基础上发展起来的时间序列 InSAR 技术能够克服 DInSAR 技术的这些缺陷, 可以获得毫米级精度的形变信息 (廖明生和王腾, 2014)。

对流层大气延迟是由于两次获取 SAR 影像时刻的大气参数不一致引起的 (蒋厚军, 2012), 如压强、温度和湿度, 可以分为垂直分层延迟和湍流混合延迟两部分。垂直分层延迟是由于大气折

射率在垂直剖面的差异引起的, 与地形呈强相关性; 湍流混合延迟是大气中的湍流过程产生的结果, 随机性较强。对于微小地表形变监测来说, 对流层大气相位延迟仍然是 InSAR 提取形变的主要误差来源 (Bekaert 等, 2015b)。

目前 InSAR 技术中对流层大气延迟改正方法主要包括: (1) 基于 InSAR 差分干涉相位的方法, 如时空滤波法 (Hooper 等, 2007)、基于相位与高程关系的线性模型 (Lin 等, 2010) 或幂律模型 (Bekaert 等, 2015a); (2) 基于外部数据的方法, 常用的外部数据包括 GNSS (Global Navigation Satellite System) (Yu 等, 2018a)、MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer) (Li 等, 2012)、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) (Li 等, 2005) 等; (3) 基于气象再分析资料的方法 (Tang 等, 2016)、基于气象预测模型 WRF

收稿日期: 2021-11-17; 预印本: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41904001); 中国博士后科学基金 (编号: 2018M640733); 博士后创新人才支持计划 (编号: BX20180220)

第一作者简介: 李思慧, 研究方向为 InSAR 地表形变监测。E-mail: lisihui@whu.edu.cn

通信作者简介: 董杰, 研究方向为时间序列 InSAR 算法及其在地表形变监测中的应用。E-mail: dongjie@whu.edu.cn

(Weather Research and Forecasting Model) 的方法 (Nico 等, 2011)、联合气象再分析资料和 GNSS (Global Navigation Satellite System) 观测数据的方法, 如 GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service) 方法 (Yu 等, 2018b)。但是每种方法都有各自的局限性 (Bekaert 等, 2015b; Li 等, 2019), 时空滤波方法很容易低估形变信号; 基于相位与高程关系的方法只能对高程相关的大气延迟分量进行建模; GNSS 站点分布稀疏, 全球很多区域内无法获取数据; MERIS 和 MODIS 数据易受到天气影响, 且时间分辨率无法满足大气延迟改正的需求; 气象再分析资料的时空分辨率尤其是空间分辨率较低, 无法对时空随机分布的大气湍流成分进行准确建模。

通过相位叠加来抑制大气延迟的方法早有应用 (Peltzer 等, 2001; Fialko 和 Simons, 2001), 2015 年 Tymofyeyeva 和 Fialko (2015) 明确提出了相位堆叠 CSS (Common Scene Stacking) 方法, 该方法基于含有共同日期的干涉相位也包含相同的大气延迟相位分量这一事实, 采用叠加求和的方式来估计共有日期的大气延迟相位, 不需要依赖外部数据或气象模型数据, 可获得较好的大气延迟改正结果, 并且实现简单, 计算效率高, 在大气延迟改正方面具有独特的优势, 已经在地质构造 (Tymofyeyeva 和 Fialko, 2018)、地震活动 (Wang 和 Fialko, 2018)、矿区形变测量 (Tang 等, 2020)、冻土监测 (Rouyet 等, 2019)、三角洲地面沉降监测 (Rateb 和 Abotalib, 2020) 等 InSAR 形变监测领域中作为有效的大气延迟改正方法被广泛应用。但是目前公开发表的 CSS 方法相关论文中, 对该方法中参数设置、改正结果的讨论研究较少。

常用的时间序列 InSAR 算法 StaMPS (Hooper 等, 2007) 中采用的时空滤波方法很容易低估形变信号, GAMMA IPTA (Werner 等, 2003) 中大气延迟改正需要大量的人工干预, 在实际应用中都受到了限制。鉴于此, 本文首先对 CSS 方法进行改进, 对估算出的大气延迟相位进行空间低通滤波, 使其更加符合大气延迟的空间平滑分布特征; 然后将其嵌入 StaMPS SBAS 数据处理流程中, 替换 StaMPS 中的时空滤波方法, 并将相位解缠与 CSS 大气延迟相位估计进行迭代运算, 以精化数据处理结果; 最后采用模拟数据分析不同参数设置对

CSS 方法的影响, 并基于真实 SAR 数据, 对比分析大气延迟改正效果, 验证本文方法的有效性和可靠性。

2 原理与方法

InSAR 差分干涉相位中包含形变相位 ϕ_{def} 、高程误差相位 $\Delta\phi_{\text{topo}}$ 、大气延迟相位 ϕ_{atm} 、土壤湿度变化引起的相位 ϕ_{smr} 、随机散射相位 ϕ_{sct} 和噪声相位 ϕ_{noi} :

$$\Delta\phi = \phi_{\text{def}} + \Delta\phi_{\text{topo}} + \phi_{\text{atm}} + \phi_{\text{smr}} + \phi_{\text{sct}} + \phi_{\text{noi}} \quad (1)$$

相位堆叠方法基于差分干涉相位来计算大气延迟相位, 假设 t_1 、 t_2 、 t_3 等 3 个日期采集的 SAR 影像, 组合了两个干涉对, 它们的差分干涉相位可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \Delta\tau_{12} + \alpha_2 - \alpha_1 + \varepsilon_{12} \\ \Delta\phi_{23} &= \Delta\tau_{23} + \alpha_3 - \alpha_2 + \varepsilon_{23} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, α_i 是 t_i 日期的大气延迟相位, $\Delta\tau$ 是由于地表形变而引起的相位, ε 是误差项, 包含轨道误差、高程误差、解缠误差、热噪声等。当这两个干涉对具有相同的时间基线, 并且假设形变速率保持恒定时, 将两个干涉对的差分相位相减, 即 $\Delta\phi_{12} - \Delta\phi_{23}$, 就可以计算出两个干涉对共有日期 t_2 的大气延迟相位 α_2 。

假设大气延迟在时间上的分布是随机的, 将多个含有共同日期的干涉对组合起来, 可以大大提高大气延迟相位估计的准确性。大气延迟相位 α_i 可以通过下式来计算 (Tymofyeyeva 和 Fialko, 2015):

$$\begin{aligned} \alpha_i \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^N \Delta\phi_{i(i-j)} - \Delta\phi_{(i+j)i} = \\ \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{j=0}^{N-1} (N-j) (\Delta\phi_{(i-j)(i-j-1)} - \Delta\phi_{(i+j+1)(i+j)}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $2N$ 为参与计算的干涉对数量, 在应用中通过调整时间窗口来改变参与计算的干涉对。如果有足够多满足条件的干涉对参与计算, 那么可以得到准确的大气延迟相位估计结果, 但是在实际应用中, 由于 CSS 方法假定在时间窗口内形变速率保持恒定, 参与计算的干涉对数量会受到限制, 所以需要采取迭代计算的方式来逐渐提高大气延迟相位估计的准确性。

CSS 方法迭代计算的基本步骤是首先根据式 (3) 对每个 SAR 影像采集时刻的大气延迟相位进行初始估计, 并计算大气噪声指数 ANC (Atmospheric

Noise Coefficient) (Tymofyeyeva 和 Fialko, 2015):

$$ANC_i = (10.0)(R_{\max})^{-1} \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (\alpha_i(x_m) - \bar{\alpha}_i)^2} \quad (4)$$

式中, $\alpha_i(x_m)$ 指日期 t_i 中像素 m 位置处的大气延迟相位, $\bar{\alpha}_i = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \alpha_i(x_m)$ 是所有 M 个像素大气延迟相位的平均值, $R_{\max}$ 是大气延迟扰动最严重的日期所对应的大气延迟相位标准差值, 用于对 ANC 值进行标准化。ANC 是衡量每个日期大气噪声严重程度的指标, ANC 值越大, 代表该日期的大气延迟相位越严重, 在一次迭代中, 需要优先对大气延迟相位严重的日期进行估计, 避免其对其他日期大气延迟相位的估计造成影响。在下一次迭代时, 分别对每个日期计算 ANC, 按照 ANC 值的大小进行排序, 并根据上一次迭代估计的大气延迟相位对原始差分相位进行校正, 然后从 ANC 值最大的日期开始进行估计。

原始的 CSS 方法逐点估计大气延迟相位, 虽然能够保留更多的细节信息, 但是也会引入较多的噪声, 根据大气延迟在空间维表现为低频分量的特性, 本文对 CSS 方法估计得到的大气延迟相位进行空间低通滤波, 减弱噪声的影响, 同时使估计得到的大气延迟相位更加符合空间平滑的分布特征。本文首先对 CSS 方法进行改进, 然后将其嵌入 StaMPS 时序 InSAR 数据处理流程中, 并将相位解缠与 CSS 大气延迟相位估计进行迭代运算, 以提高相位解缠和大气延迟相位估计的准确性。

具体方法流程如图 1, 首先按照时序 InSAR 的常规流程, 进行主影像选取、配准、差分干涉、相干点选取、相位解缠等处理, 得到初始的形变估计结果, 然后基于 CSS 方法估计大气延迟相位, 并对其进行空间低通滤波, 即可得到大气延迟改正后的形变结果。由于 CSS 方法容易受到解缠误差的影响, 将相位解缠与大气延迟改正进行迭代处理, 在估算大气延迟相位后, 从差分干涉相位中减去大气延迟相位再重新进行相位解缠, 有助于改善相位解缠的结果, 进而有利于 CSS 方法估计大气延迟相位, 得到精化的形变结果。

3 模拟数据实验

本文以单个稳定点为例, 模拟其时间序列上的原始解缠相位值, 分析迭代次数、时间窗口尺寸对 CSS 方法的影响。在时间序列上共模拟了

50 期数据, 时间间隔均为 12 d, 对于稳定点来说, 形变相位为 0, 用随机噪声来模拟大气延迟相位。形变相位与大气延迟相位之和作为原始的解缠相位, 并按照小基线集的方法组合干涉对, 得到每个干涉对的差分相位, 然后利用 CSS 方法进行大气延迟改正, 设置不同的迭代次数、时间窗口, 比较大气改正的结果。

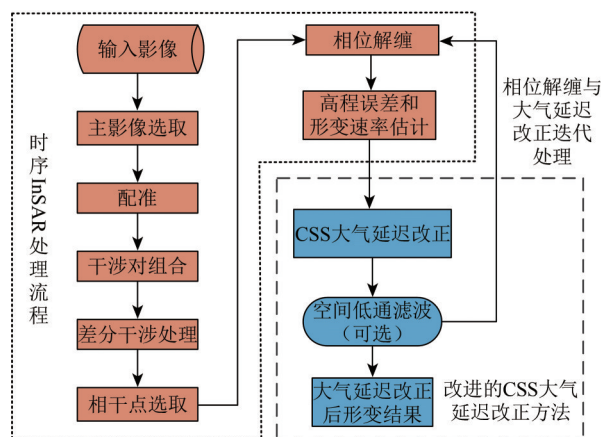


图 1 基于相位堆叠的时序 InSAR 对对流层大气延迟改正方法流程

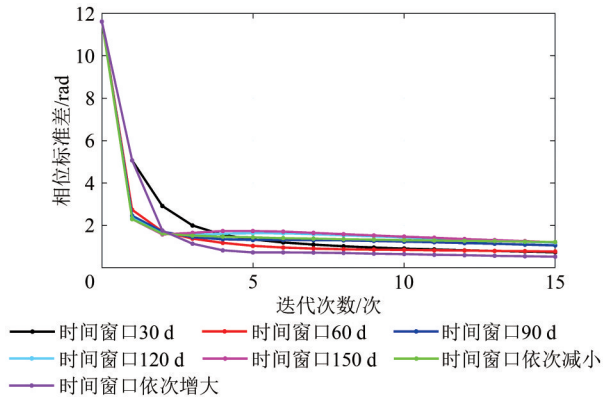
Fig. 1 The flowchart of time-series InSAR tropospheric atmospheric delay correction based on Common Scene Stacking

在实验中, 以大气改正后时间序列相位值的标准差作为改正效果的评价指标, 来分析迭代次数和时间窗口对于 CSS 方法的影响。大气改正后时间序列相位标准差随迭代次数和时间窗口的变化如图 2 (a), 进行大气延迟改正之前, 该稳定点的时间序列受到大气延迟的影响严重, 相位随时间的波动很大, 标准差为 11.61 rad, 随着迭代次数增加, 相位标准差逐渐变小。在不同的时间窗口下, 标准差随迭代次数的变化趋势相同, 经过 5 次迭代后, 标准差逐渐开始保持稳定。迭代次数继续增加时, 相位标准差仍然会有微小的变化, 但是变化幅度较小, 考虑到计算效率, 一般选择迭代 5 次, 就可以获得较为满意的结果。

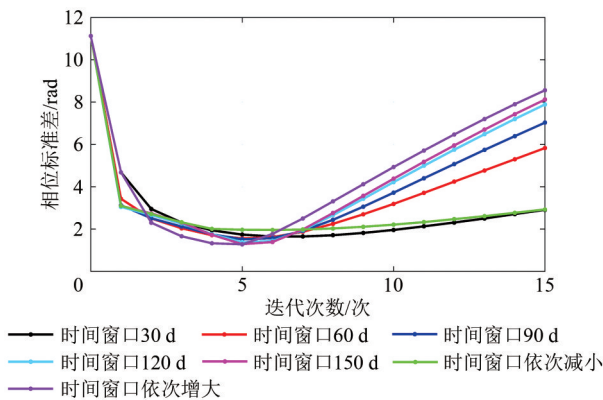
对于模拟数据集, 测试了 30 d、60 d、90 d、120 d、150 d 以及时间窗口依次减小和时间窗口依次增大共 7 种不同的时间窗口组合方式, 其中时间窗口依次减小是指前 5 次迭代时间窗口分别为 150 d、120 d、90 d、60 d、30 d, 后 10 次迭代时间窗口均为 30 d, 时间窗口依次增大是指前 5 次迭代时间窗口分别为 30 d、60 d、90 d、120 d、150 d, 后 10 次迭代窗口均为 150 d。根据图 2 (a) 展示的相位标

准差变化, 不同时间窗口得到的改正效果相似, 差异很小。当仅迭代5次时, 时间窗口 60 d 和时间窗口依次增大两种窗口组合的改正效果略好, 改正后的相位标准差分别为 1.04 rad 和 0.73 rad, 二者的改正结果如图 2 (b), 输入的形变信号为 0, 以随机噪声来模拟改正前的大气延迟相位, 红色

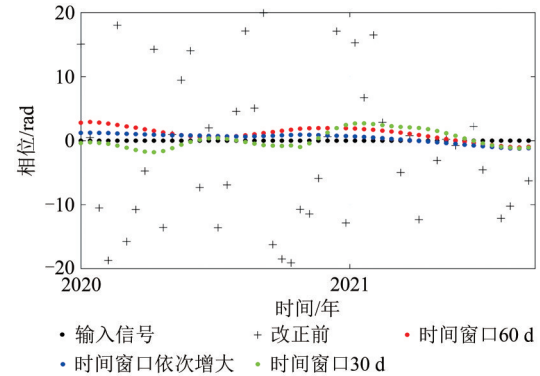
点和蓝色点分别为采用时间窗口均为 60 d 和时间窗口分别为 30 d、60 d、90 d、120 d、150 d 迭代 5 次的改正结果, 绿色点为采用时间窗口 30 d 迭代 5 次的改正结果, 可以看出时间窗口为 30 d 时改正结果在时间序列上波动较大, 而时间窗口 60 d 和依次增大的改正结果在时间序列上更加平滑。



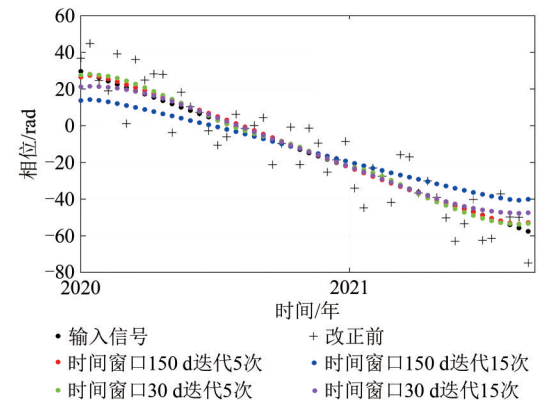
(a) 相位标准差随迭代次数和时间窗口的变化(稳定点)
(a) The change of phase standard deviation with the number of iterations and size of time windows on a stable point



(c) 相位标准差随迭代次数和时间窗口的变化(形变点)
(c) The change of phase standard deviation with the number of iterations and size of time windows on a deformation point



(b) 不同参数设置的改正结果(稳定点)
(b) The correction results with different parameter settings on a stable point



(d) 不同参数设置的改正结果(形变点)
(d) The correction results with different parameter settings on a deformation point

图 2 不同参数设置对 CSS 方法改正结果的影响

Fig. 2 The influence of different parameter settings on CSS method

为了探究迭代次数和时间窗口变化对于形变点是否具有相同的影响, 按照相同的方式模拟了单个形变点的时间序列解缠相位值。输入线性形变相位, 同样以随机噪声来模拟大气延迟相位, 以大气延迟改正后形变相位与输入的真实形变相位之间差值的标准差作为评价指标, 改正结果随迭代次数和时间窗口尺寸的变化如图 2 (c) 所示。当迭代次数小于 5 次时, 相位标准差随着迭代次数的增加而下降, 不同时间窗口的改正结果相似;

但迭代次数超过 5 次时, 相位标准差随着迭代次数的增加而增加, 并且时间窗口尺寸越大, 相位标准差增加的幅度越大。

图 2 (d) 展示了时间窗口 30 d 和 150 d 迭代 5 次和 15 次的改正结果。输入模拟的形变信号, 当迭代 5 次时, 时间窗口为 30 d 和 150 d 的改正结果相似, 在时间序列第一期和最后一期位置处存在轻微的扭曲现象; 当迭代 15 次时, 时间窗口为 30 d 的改正结果在时间序列前端和后端各 5 期处都出现

了明显的扭曲,而时间窗口为150 d的改正结果严重偏离了真实的输入信号。

通过形变点的模拟实现发现,CSS方法改正后的时间序列两端会存在扭曲的情况。根据CSS方法的原理,对处于时间序列中间的影像来说,可以根据其两侧相连的干涉相位来计算大气延迟相位;而对于时间序列第一期和最后一期影像,只能根据其一侧的干涉相位来估计大气延迟相位。对于形变点来说,只使用一侧的干涉相位来估计大气延迟相位时,式(2)中的形变项无法抵消,使得基于式(3)估计得到的大气延迟相位不准确,改正后的时间序列两端偏离真实值,即两端扭曲。随着迭代次数的增加,时间窗口越大,受到时间序列第一期和最后一期不准确的大气相位估计值影响的日期越多,导致两端扭曲的问题越严重。这与图2(c)中随着迭代次数增加,时间窗口尺寸越大,改正后的相位标准差越大相符。

综合稳定点和形变点的模拟实验结果,迭代次数并不是越多越好,考虑计算效率的同时,在实际应用中一般选择迭代5次可以获得较为满意的改正效果。对于稳定点来说,不同时间窗口的改正结果差异较小,但较大的时间窗口会使得改正后的时间序列较为平滑;对于形变点来说,较大的时间窗口会导致两端扭曲的问题,所以在实际应用中需要根据实际情况选择合适的时间窗口。

4 真实SAR数据实验

除了模拟数据外,本文还采用了真实SAR数据进行实验,比较了不同时间窗口得到的结果,并与目前较为常用的时空滤波、GACOS、IPTA方法进行对比,对CSS大气延迟改正结果进行评价。

4.1 实验区域与SAR数据

选择了GAMMA IPTA中的样例SAR数据集,分别采用IPTA、时空滤波、GACOS方法进行大气延迟改正,与本文方法的结果进行对比分析。

样例SAR数据的研究区域为雅典西部地区,该区域中包含由于垃圾填埋场压实而导致的快速局部沉降,如图3。使用了2014年10月06日到2016年04月10日采集的38景Sentinel-1影像,以小基线集方式共组合108个干涉对。本文方法使用的实验数据以及干涉对组合方式等与IPTA样例数据保持完全一致,并且使用样例数据中识别出的候选点,以保证实验结果具有可比性。

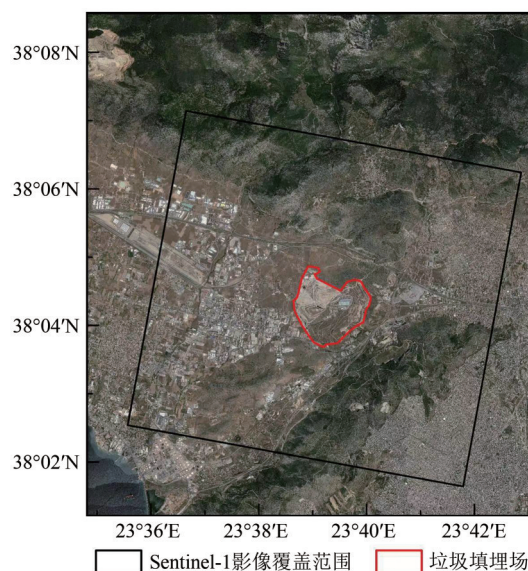


图3 研究区域及SAR数据覆盖范围(黑色框为Sentinel-1影像覆盖范围,红色框为垃圾填埋场区域)

Fig. 3 Study area and SAR data coverage (black box is Sentinel-1 image coverage, red box is the landfill area)

4.2 CSS方法不同时间窗口结果对比

根据模拟数据实验的结论,在本实验中将迭代次数设置为5次。为了对不同时间窗口得到的结果进行对比,分别采用时间窗口均为30 d、60 d、90 d、120 d、150 d以及时间窗口分别为30 d、60 d、90 d、120 d、150 d和时间窗口分别为150 d、120 d、90 d、60 d、30 d共7种不同的时间窗口设置对真实SAR数据进行处理。实验中采用的空间滤波窗口均为300 m。

选取大气延迟改正后形变速率小于5 mm/a的点作为稳定点,在空间上分别计算每个干涉对中稳定点的相位标准差,在时间上分别计算每个稳定点的形变时间序列标准差,用于比较不同时间窗口得到的大气延迟改正结果。统计结果如表1,经过CSS方法大气延迟改正后,空间相位标准差均值、时间序列标准差均值均明显降低,时间序列标准差小于3 mm的点所占比例显著提高。随着时间窗口从30 d逐渐增加到90 d,改正效果不断变好,但当时间窗口继续增大到120 d和150 d时,改正效果仅发生了微小的变化,时间窗口为120 d时改正结果略好于时间窗口为90 d和150 d,但三者之间差异并不显著。时间窗口分别为30 d、60 d、90 d、120 d、150 d时也取得了与时间窗口120 d类似的改正效果,而时间窗口分别为150 d、120 d、90 d、60 d、30 d时改正效果略差。这说明对于稳定

点来说, 采用较大的时间窗口会使改正后的时间序列变得更加平滑, 但当时间窗口增大到一定程度时, 改正效果将不再会有明显的改善。

表 1 真实数据不同时间窗口改正结果对比
Table 1 Comparison of results of different time windows

	改正前	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	30—150 d	150—30 d
空间相位标准差均值/mm	5.45	2.33	2.16	2.13	2.12	2.11	2.13	2.13
时间序列标准差均值/mm	4.91	2.43	2.16	2.09	2.08	2.09	2.09	2.13
时间序列标准差小于 3 mm 的点所占比例/%	5.82	80.65	90.38	92.31	92.92	92.76	92.66	92.34

图 4 (a) (b) 分别展示了实验区域中稳定点和形变点经过不同时间窗口改正前后的时间序列。对于稳定点来说, 时间窗口越大, 改正后的时间序列越平滑, 但对于形变点来说, 时间窗口越大, 会导致两端扭曲的问题越严重, 而两端扭曲会对

形变速率估计、时间序列趋势分析造成影响, 所以在实际应用中需要根据情况选择合适的时间窗口大小。对于文中使用的真实 SAR 数据集, 根据对比结果, 下文 CSS 方法均采用迭代 5 次, 时间窗口为 120 d, 空间滤波窗口为 300 m 的参数设置。

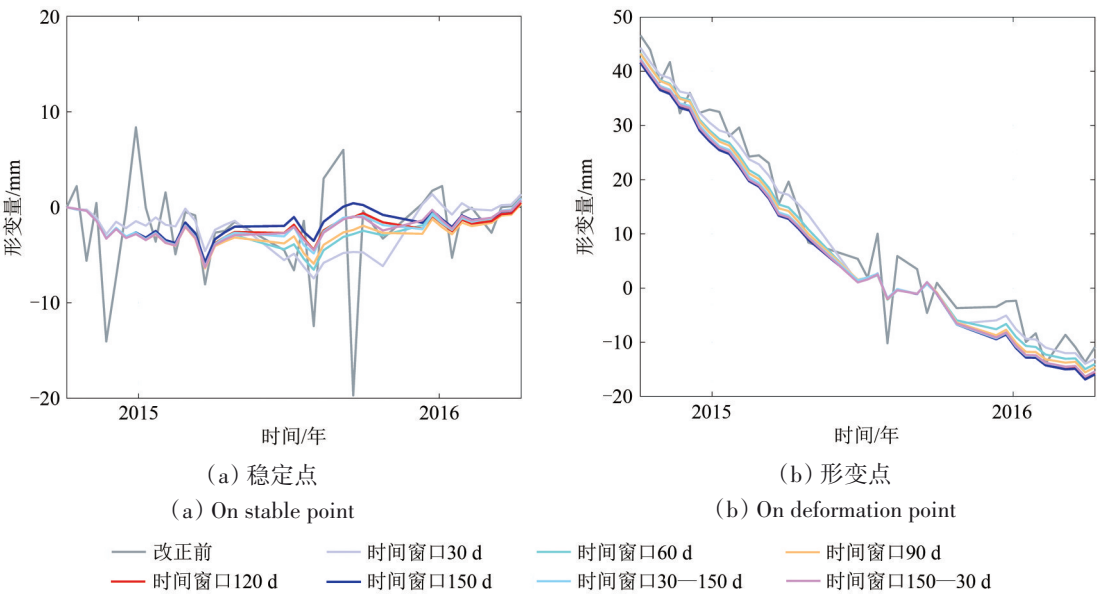


图 4 不同时间窗口改正结果对比
Fig. 4 Comparison of results of different time windows

4.3 与其他方法结果对比

为了分析 CSS 方法大气延迟改正的效果, 将大气延迟改正前、时空滤波、GACOS、IPTA 和 CSS 方法改正后的结果进行对比。为了使结果具有可比性, 时空滤波方法中采用的时间滤波窗口设置为 120 d, 空间滤波窗口设置为 300 m, 与 CSS 方法保持一致。下面讨论中的解缠相位均已对高程误差进行了改正, 只讨论大气延迟相位的影响。

图 5 为干涉对 20150919_20151001 大气延迟改正前后的解缠相位, 改正前, 受到大气延迟扰动的影响, 许多测量点的解缠相位不为 0, 表现为形变; 时空滤波方法消除了一部分大气延迟相位, 但仍存在较多的残余相位, 并且在部分区域引入

了错误的改正; GACOS 方法改正后仍然存在明显的大气延迟相位; IPTA 和 CSS 方法获得了相似的改正结果, 消除了大部分测量点上的大气延迟相位。需要指出的是, GACOS 方法的大气延迟改正效果与实验区域的空间范围密切相关, 在大范围对流层大气延迟改正的应用中 GACOS 方法可以取得良好的改正结果 (李德伟 等, 2019)。但对于本文的研究区域来说, 空间范围较小, 并且地形起伏小, 对流层大气延迟中的垂直分层分量不明显, 大气相位多表现为随机分布, GACOS 方法难以获得较好的改正结果。而 CSS 方法逐点估计大气延迟相位, 针对小区域大气延迟仍然能够进行有效的改正, 可以在一定程度上弥补 GACOS 方法的不足。

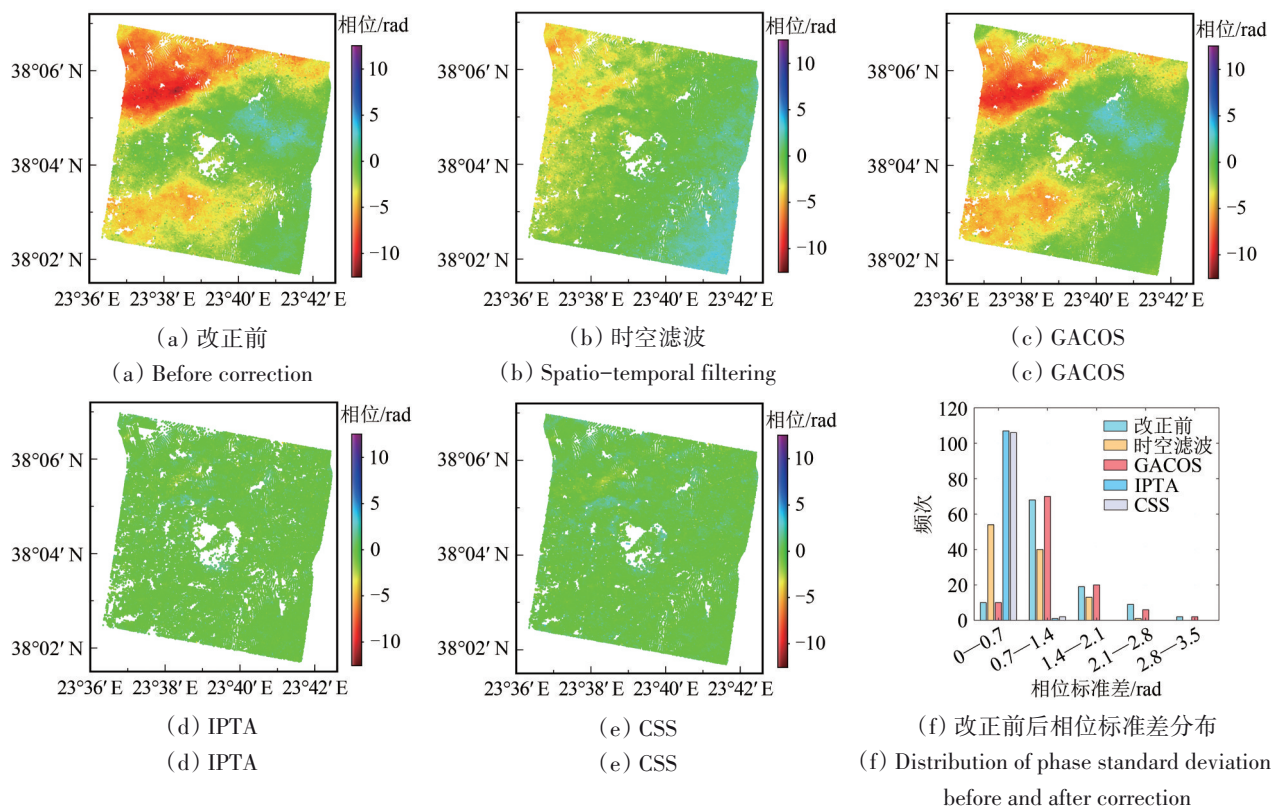


图5 不同方法大气延迟改正结果对比

Fig. 5 Comparison of atmospheric delay correction results of different methods

为了对改正效果进行定量评估,选取形变速率小于5 mm/a的点作为稳定点,对稳定点的相位稳定性进行分析。图中展示的干涉对20150919_20151001大气改正前相位标准差为2.69 rad,经过时空滤波、GACOS、IPTA、CSS方法改正后分别为1.95 rad、2.43 rad、0.52 rad、0.60 rad。图5(f)展示了所有108个干涉对大气延迟改正前后的相位标准差分布情况,改正前相位标准差均值为1.23 rad,时空滤波方法改正后相位标准差均值降低至0.84 rad,与改正前相比降低了32%,而GACOS方法受限于研究区域的空间范围,改正后相位标准差均值为1.21 rad,与改正前相比并没有明显的改善,IPTA和CSS方法改正后结果相似,相位标准差均值分别为0.43和0.47 rad,与改正前相比降低了65%和62%,取得了较好的大气延迟改正效果。

图6展示了大气改正前后的形变速率,几种方法得到的形变区域一致,形变速率也没有明显的差异。如图5所示,改正之前存在着严重的大气延迟相位,几种方法的改正效果也不同,但由于该研究区域地形起伏小,垂直分层分量不明显,大气延迟相位在时间上表现为随机分布,而随机噪

声对于年平均线性形变速率的计算影响很小,所以几种方法得到的形变速率较为一致。挑选稳定点P1和形变点P2对其形变时间序列进行分析。如图7(a)稳定点P1大气延迟改正前形变序列受到大气延迟的影响,存在较大的波动,时空滤波方法能够消除一部分波动,GACOS方法改正后波动没有得到明显改善,而IPTA和CSS方法改正后形变序列变得平滑。图7(b)为形变点P2的时间序列,GACOS方法对于小范围地形平坦区域的大气延迟改正效果较差,改正后形变序列与改正前基本保持一致,时空滤波、IPTA和CSS方法改正后时间序列的波动减小,但与CSS方法相比,时空滤波和IPTA方法均会导致形变量减小。

选取形变速率小于5 mm/a的点作为稳定点,计算稳定点在时间序列上的稳定性。如图7(c)所示,改正前,稳定点在时间序列上标准差的均值为4.91 mm,标准差小于3 mm的点所占比例为5.82%;经过时空滤波、GACOS、IPTA、CSS方法改正后,稳定点在时间序列上标准差的均值分别为3.06 mm、4.96 mm、1.66 mm和2.08 mm,与改正前相比分别降低了38%、-1%、66%和58%,标准

差小于 3 mm 的点所占比例分别为 47.25%、5.49%、96.69%、92.92%，可见 GACOS 方法由于在小区域大气延迟改正方面的局限性，反而导致稳定性降低，时空滤波方法改正后稳定性略有提高，而 IPTA 和 CSS 方法均能显著提高稳定点在时间序列上的稳定性。IPTA 方法采用不同大小的窗口尺寸在空间上

进行多次滤波，虽然能够去除大部分大气延迟相位的影响，使稳定点的时间序列变得更加平滑，但是同时也会导致部分形变相位被滤除，使得形变点的形变量被低估（图 7（b）），而 CSS 方法在稳定点上能够得到与 IPTA 相似的平滑时间序列，在形变点上也能有效改善形变量被低估的问题。

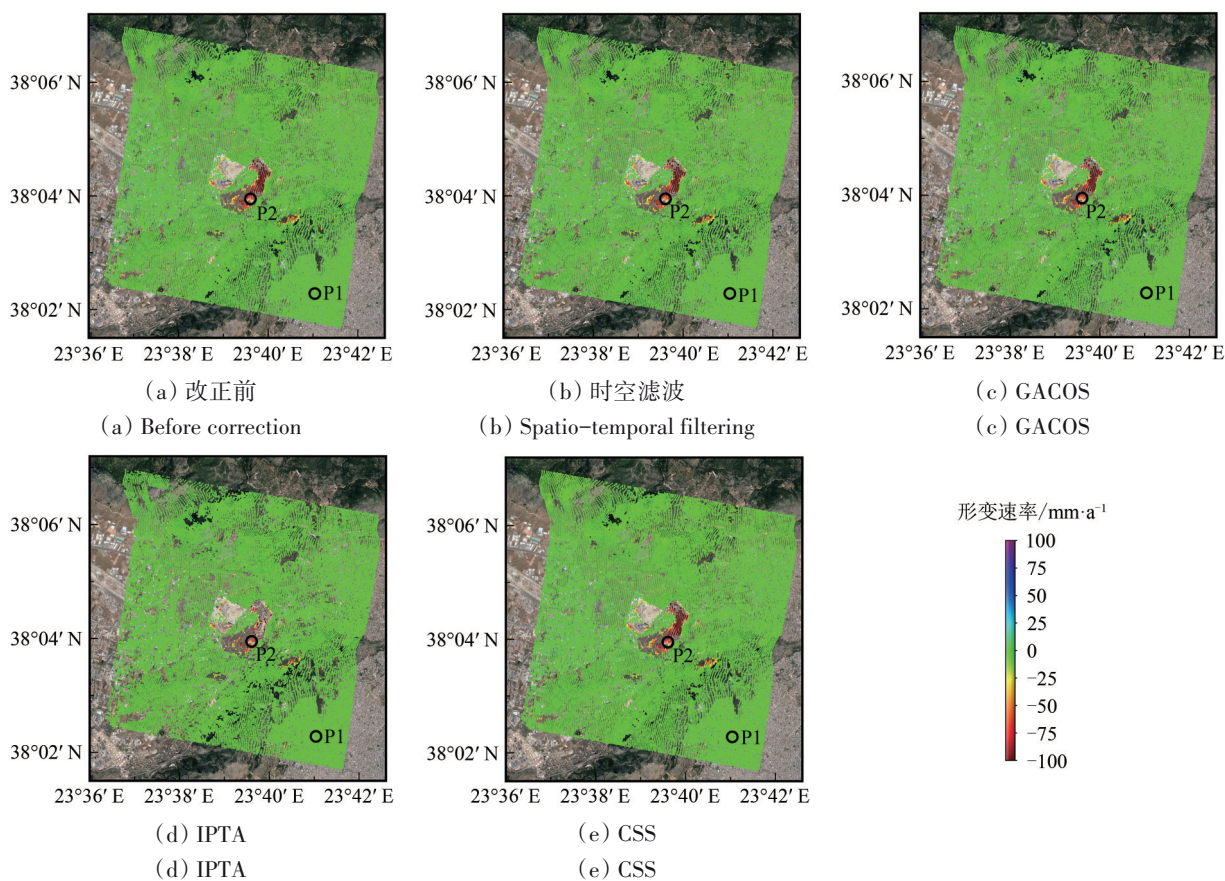


图6 大气延迟改正前后的形变速率

Fig. 6 Deformation rate and displacement time series before and after atmospheric delay correction

5 讨论

对流层大气延迟通常可以分为垂直分层分量和湍流混合分量，其中湍流混合分量在时空上均为随机分布，而垂直分层分量与地形相关，在地形陡峭区域经常会呈现出季节性的振荡趋势（Dong 等，2019）。CSS 方法的一个重要前提是假设大气延迟在时间上随机分布，上述模拟数据实验中也是采用随机噪声来模拟大气延迟中的湍流混合分量，结果表明 CSS 方法对于随机分布的湍流混合分量可以获得很好的改正结果。而垂直分层分量中的季节性振荡趋势并不满足随机分布的假设，为了验证 CSS 方法是否可以对季节性变化的大

气延迟进行有效的改正，按照模拟数据实验中的方法，以稳定点为例，输入形变相位为 0，以随机噪声来模拟湍流混合分量，以正弦形式变化的周期信号来模拟季节性变化的垂直分层大气延迟，将湍流混合分量与垂直分层分量之和作为模拟的大气延迟信号，利用 CSS 方法进行大气延迟改正。

实验结果如图 8 所示，模拟数据的时间间隔为 12 d，图 8（a）的时间跨度为 1 年，图 8（b）的时间跨度为 2 年，经过改正后的信号都保留了模拟大气延迟信号中的周期性趋势，也就是说 CSS 方法仅对呈随机分布的湍流混合分量进行了改正，而无法对周期性变化的垂直分层分量进行改正。因此，在地形平坦地区，仅存在随机分布的湍流混合分

量, CSS方法可以取得较好的改正效果;而在地形陡峭的山区, 垂直分层分量明显, 大气延迟呈现

出非随机分布时, CSS方法并不适用。

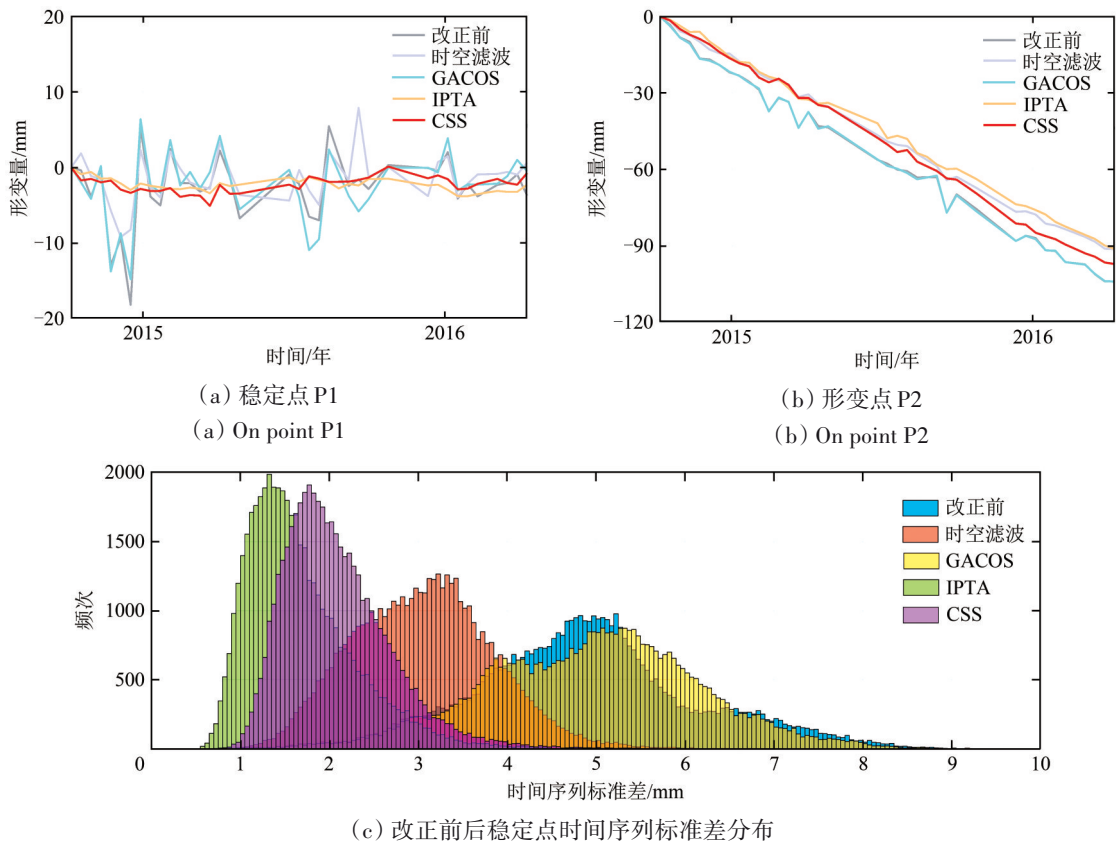


图7 大气延迟改正前后的时间序列
Fig. 7 Displacement time series before and after atmospheric delay correction

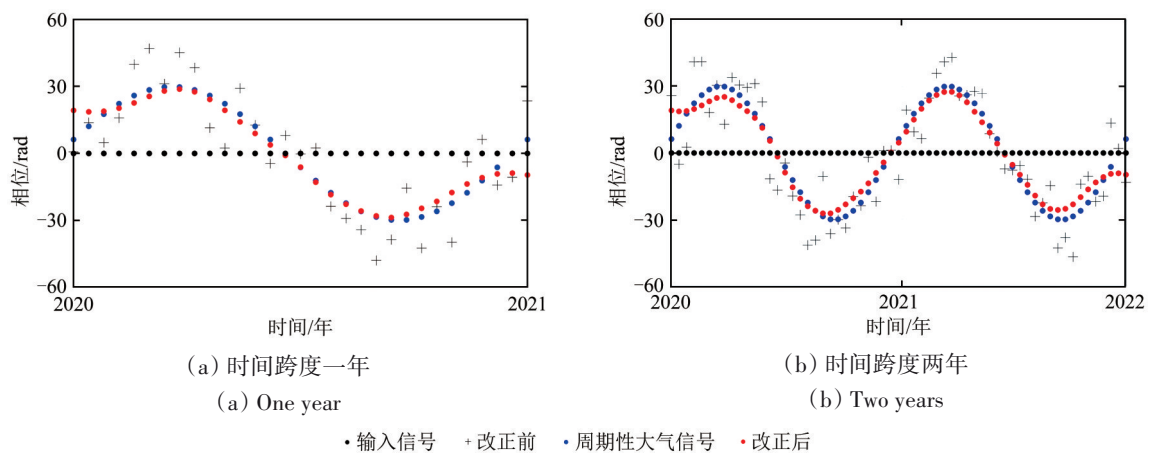


图8 大气延迟相位非随机分布时的CSS方法改正结果
Fig. 8 CSS correction results for nonrandom atmospheric delay phases

原始的CSS方法逐点估计大气相位, 得到的大气相位中含有较多的噪声信息, 本文提出在此基础上加入空间低通滤波, 使估计得到的大气相位更加符合空间平滑的分布特征, 但需要指出的是,

经过空间低通滤波后, 形变时间序列的稳定性略有降低, 因此在处理流程中将空间低通滤波作为可选项, 需要根据研究目的自由选择是否进行空间低通滤波。同时, 高程误差只与空间基线相关,

在时间上也呈现出随机分布, 利用 CSS 方法估计大气延迟相位时需要首先对高程误差进行改正, 避免高程误差对大气延迟相位估计产生影响。两端扭曲的问题也需要在后续进行深入研究。

6 结 论

大气延迟改正一直是 InSAR 技术中的关键问题, 相位堆叠方法不需要依赖外部数据或气象模型数据, 直接基于差分干涉相位本身来计算大气延迟相位, 具有实现简单, 计算效率高等优势。本文提出了基于相位堆叠方法的时序 InSAR 对流层大气延迟改正, 在时序 InSAR 处理的基础上, 使用改进的 CSS 方法进行大气延迟改正, 同时将相位解缠与大气延迟改正迭代处理, 精化形变测量结果。根据模拟数据的实验结果, CSS 方法迭代 5 次可以获得较好的改正效果, 过多的迭代次数会导致形变点两端扭曲的问题更加严重; 对于稳定点来说不同时间窗口的改正结果差异不大, 但较大的时间窗口会得到更加平滑的时间序列, 对于形变点来说过大的时间窗口会使两端扭曲的问题更严重, 需要根据实际情况选择合适的时间窗口。将该方法应用于真实 SAR 数据, 结果表明, 经过该方法改正后, 解缠相位标准差平均降低了 62%、稳定点的时间序列标准差平均降低了 58%, 得到的形变结果更加可靠; 不同时间窗口的对比结果说明, 较大的时间窗口能够使稳定点改正后的时间序列更平滑, 但对于形变点会导致两端扭曲; 将该方法与时空滤波、GACOS、IPTA 方法进行对比, 在小范围地形平坦区域, 该方法的大气延迟改正效果明显优于时空滤波和 GACOS 方法, 而与 IPTA 方法相比, 该方法在稳定点上能够得到相似的改正结果, 在形变点上能够有效改善 IPTA 方法导致形变低估的问题。但由于 CSS 方法假设大气延迟相位在时间上随机分布, 只能对大气湍流分量进行改正, 无法对季节性变化的垂直分层分量进行改正。此外, 在使用 CSS 方法前需要对高程误差进行改正, 以减少其对于大气延迟改正的干扰; 改正后的时间序列存在两端扭曲的问题可以在后续进行深入研究。

参考文献 (References)

Bekaert D P S, Hooper A and Wright T J. 2015a. A spatially variable

power law tropospheric correction technique for InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(2): 1345-1356 [DOI: 10.1002/2014JB011558]

Bekaert D P S, Walters R J, Wright T J, Hooper A J and Parker D J. 2015b. Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques. *Remote Sensing of Environment*, 170: 40-47 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.08.035]

Dong J, Zhang L, Liao M S and Gong J Y. 2019. Improved correction of seasonal tropospheric delay in InSAR observations for landslide deformation monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 233: 111370 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111370]

Fialko Y and Simons M. 2001. Evidence for on-going inflation of the Socorro Magma Body, New Mexico, from interferometric synthetic aperture radar imaging. *Geophysical Research Letters*, 28(18): 3549-3552 [DOI: 10.1029/2001GL013318]

Hanssen R F. 2005. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 6(3/4): 253-260 [DOI: 10.1016/j.jag.2004.10.004]

Hooper A, Segall P and Zebker H. 2007. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7): B07407 [DOI: 10.1029/2006JB004763]

Jiang H J. 2012. High-Resolution Spaceborne SAR Interferometry for DEM Generation and Updating. Wuhan: Wuhan University (蒋厚军. 2012. 高分辨率星载 InSAR 技术在 DEM 生成及更新中的应用研究. 武汉: 武汉大学)

Li D W, Jiang L M, Jiang H J, Dong J L and Wang H S. 2019. InSAR phase simulation of solid earth tide and its influence on surface deformation monitoring at wide-area scale. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(12): 4527-4539 (李德伟, 江利明, 蒋厚军, 董景龙, 汪汉胜. 2019. 固体潮位移 InSAR 相位模拟及对广域地表形变监测的影响初探. *地球物理学报*, 62(12): 4527-4539) [DOI: 10.6038/cjg2019M0595]

Li Z W, Cao Y M, Wei J C, Duan M, Wu L X, Hou J X and Zhu J J. 2019. Time-series InSAR ground deformation monitoring: atmospheric delay modeling and estimating. *Earth-Science Reviews*, 192: 258-284 [DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.03.008]

Li Z H, Muller J P, Cross P and Fielding E J. 2005. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 110(B3): B03410 [DOI: 10.1029/2004JB003446]

Li Z W, Xu W B, Feng G C, Hu J, Wang C C, Ding X L and Zhu J J. 2012. Correcting atmospheric effects on InSAR with MERIS water

- vapour data and elevation-dependent interpolation model. *Geophysical Journal International*, 189(2): 898-910 [DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05432.x]
- Liao M S and Wang T. 2014. *Time Series InSAR Technology and Application*. Beijing: Science Press (廖明生, 王腾. 2014. 时间序列 InSAR 技术与应用. 北京: 科学出版社)
- Lin Y n N, Simons M, Hetland E A, Muse P and DiCaprio C. 2010. A multiscale approach to estimating topographically correlated propagation delays in radar interferograms. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(9): Q09002 [DOI: 10.1029/2010GC003228]
- Nico G, Tomé R, Catalão J and Miranda P M A. 2011. On the use of the WRF model to mitigate tropospheric phase delay effects in SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(12): 4970-4976 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2157511]
- Peltzer G, Crampé F, Hensley S and Rosen P. 2001. Transient strain accumulation and fault interaction in the Eastern California shear zone. *Geology*, 29(11): 975-978 [DOI: 10.1130/0091-7613(2001)029<0975:TSAAFI>2.0.CO;2]
- Rateb A and Abotalib A Z. 2020. Inferencing the land subsidence in the Nile Delta using Sentinel-1 satellites and GPS between 2015 and 2019. *Science of the Total Environment*, 729: 138868 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138868]
- Rouyet L, Lauknes T R, Christiansen H H, Strand S M and Larsen Y. 2019. Seasonal dynamics of a permafrost landscape, Adventdalen, Svalbard, investigated by InSAR. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111236 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111236]
- Tang W, Liao M S, Zhang L, Li W and Yu W M. 2016. High-spatial-resolution mapping of precipitable water vapour using SAR interferograms, GPS observations and ERA-Interim reanalysis. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(9): 4487-4501 [DOI: 10.5194/amt-9-4487-2016]
- Tang W, Motagh M and Zhan W. 2020. Monitoring active open-pit mine stability in the Rhenish coalfields of Germany using a coherence-based SBAS method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 93: 102217 [DOI: 10.1016/j.jag.2020.102217]
- Tymofeyeva E and Fialko Y. 2015. Mitigation of atmospheric phase delays in InSAR data, with application to the eastern California shear zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(8): 5952-5963 [DOI: 10.1002/2015JB011886]
- Tymofeyeva E and Fialko Y. 2018. Geodetic evidence for a blind fault segment at the southern end of the San Jacinto Fault Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1): 878-891 [DOI: 10.1002/2017JB014477]
- Wang K and Fialko Y. 2018. Observations and modeling of coseismic and postseismic deformation due to the 2015 M_w 7.8 Gorkha (Nepal) earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(1): 761-779 [DOI: 10.1002/2017JB014620]
- Werner C, Wegmuller U, Strozzi T and Wiesmann A. 2003. Interferometric point target analysis for deformation mapping//2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toulouse: IEEE: 4362-4364 [DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1295516]
- Yu C, Li Z H and Penna N T. 2018a. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model. *Remote Sensing of Environment*, 204: 109-121 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.10.038]
- Yu C, Li Z H, Penna N T and Crippa P. 2018b. Generic atmospheric correction model for interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(10): 9202-9222 [DOI: 10.1029/2017JB015305]

Time-series InSAR tropospheric atmospheric delay correction based on common scene stacking

LI Sihui¹, DONG Jie¹, ZHANG Lu², LIAO Mingsheng²

1. School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) technology has the advantages of high resolution, high precision, and wide coverage; it has been widely used in the field of ground deformation monitoring. However, the tropospheric atmospheric delay has always been one of the main factors limiting the accuracy of deformation measurement of InSAR. Given that the interferograms sharing a common scene contain the same contribution of atmospheric delay, the Common Scene Stacking (CSS) method uses simple summation to estimate the atmospheric delay phase of the common date and improves the estimation accuracy through iterations with the advantages of simple

implementation and high computational efficiency. The CSS method estimates the atmospheric delay phase point by point, thereby introducing more noise. The estimated atmospheric delay phase by CSS is spatially low-pass filtered in this study given the characteristics of the atmospheric delay phase as a low-frequency component in the spatial dimension, and the phase unwrapping and CSS atmospheric delay phase estimation are iterated to improve the deformation estimation results. The influence of different parameters on the tropospheric atmospheric delay correction results of CSS is analyzed using simulated data. The results show that satisfactory results can be obtained after five iterations. Then, this method is applied to real SAR data. The comparison of the results of different time windows indicates that using a larger time window smoothens the time series of stable points. However, at the same time, it leads to distortion at both ends of the time series of deformation points. The proposed method is compared with spatio-temporal filtering, GACOS, and IPTA methods, and the correction result of the CSS method is found to be significantly better than that of spatio-temporal filtering and GACOS. After correction by the CSS method, the spatial phase standard deviation is reduced by 62% on the average, and the time-series standard deviation of the stable points is reduced by 58% on the average. Compared with IPTA, the CSS method can obtain similar results and improve the problem of underestimation of deformation. On this basis, the applicability of the CSS method for the vertically stratified tropospheric delay is discussed. The simulation results show that the CSS method can only correct the turbulent mixing delay, but cannot effectively remove the vertically stratified delay. Therefore, the CSS method is unsuitable for the steep mountainous areas, where the vertically stratified component is evident and the atmospheric delay presents a seasonal oscillation trend.

Key words: time-series InSAR, tropospheric atmospheric delay, common scene stacking, parameters setting, deformation estimation

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41904001); China Postdoctoral Science Foundation (No.2018M640733); National Postdoctoral Program for Innovative Talents (No. BX20180220)