

A Multi-Scale Approach for Estimating MT-InSAR Atmospheric Delay and Its Application

Mu He¹, Rui Zhang^{1,2*}, Chong Yang¹, Guangyu Li¹

¹Department of Remote Sensing and Geospatial Information Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology for High-Speed Railway Safety, Chengdu Sichuan

Email: *zhangrui@swjtu.edu.cn

Received: Apr. 8th, 2018; accepted: Apr. 20th, 2018; published: Apr. 27th, 2018

Abstract

Atmospheric delay has always been the problem restricting the precision of Multi-temporal InSAR (MT-InSAR). In order to correcting vertically stratified troposphere delay, a multi-scale approach was used to determine a robust linear model. Based on the model, atmospheric correction was applied for MT-InSAR. In this research, high-coherence points were selected from 14 Sentinel-1A images of Chengdu urban areas by using MT-InSAR technology. Atmosphere delay was corrected based on the linear relationship between vertically stratified troposphere delay and elevation in multiple scales. The land deformation information was extracted and then compared with the measurements of continuously operating reference station (CORS). The result shows that atmosphere delay values estimated by the model range from 0 to 30.2 mm. The root mean square error (RMSE) of phase is reduced in the mass after atmosphere correction. The annual mean deformation velocity of research area is about 6 mm/y, with nearly no subsidence. RMSE of difference between two measurements is 3.9 mm. Therefore, the multi-scale approach to estimating MT-InSAR atmospheric delay is proved to be effective and reliable.

Keywords

Multi-Temporal InSAR, Multi-Scale Robust Estimation, High-Coherence Points Analysis, Atmosphere Delay Correction

多尺度MT-InSAR大气延迟估计及其应用

何 沐¹, 张 瑞^{1,2*}, 杨 崇¹, 李广宇¹

*通讯作者。

¹西南交通大学地球科学与环境工程学院测绘遥感信息系, 四川 成都

²西南交通大学高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都

Email: zhangrui@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2018年4月8日; 录用日期: 2018年4月20日; 发布日期: 2018年4月27日

摘要

大气延迟一直是制约多时相合成孔径雷达干涉测量(MT-InSAR)精度的问题之一。为抑制区域性大气窗口和对流层垂直分层效应导致的精度损失, 本文引入多尺度稳健估计模型优化MT-InSAR大气延迟分量的解算和校正。实验利用MT-InSAR技术从成都主城区的14景Sentinel-1A影像中选取高相干点, 根据多尺度下对流层垂直分层延迟与高程的线性关系精确估算和校正大气延迟, 提取出地表形变信息, 并用同时段连续运行参考站(CORS)数据进行验证。实验结果表明: 模型评估的大气延迟在0~30.2 mm, 大气校正后相位均方根误差总体上减少; 两类监测结果差值的均方根误差为3.9 mm, 证明了本文所提出模型与方法的有效性和可靠性。

关键词

多时相合成孔径雷达干涉测量, 多尺度稳健估计, 高相干点分析, 大气延迟校正

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

卫星合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)是一种重要的空间对地观测技术。相比于传统测量技术, 这种技术具有观测范围大、空间分辨率高、自动化程度高等优点[1] [2] [3] [4]。InSAR 技术起初主要应用于生成数字高程模型和制图。后来, 随着差分雷达干涉技术(Differential InSAR, DInSAR)的出现, 其应用领域扩展到测量地表形变[5] [6] [7]。但是 DInSAR 的应用受到时空失相关和大气延迟的负面影响, 限制了其在应用中的精度和可靠性[4]。有研究表明, 在二轨差分干涉测量中, 20%的湿度变化会导致 10 cm 的形变误差, 会影响毫米到厘米级的 InSAR 形变监测结果的可靠性[8]。

针对常规 DInSAR 中的应用局限性, 国内外诸多学者开展了基于多时相卫星 SAR 影像探测形变时空演变的研究, 提出了相应的时序差分雷达干涉理论与方法。其中最典型的两种方法是: Ferretti 等人率先提出的永久散射体雷达干涉(PSI)和 Berardino 等率先提出的短基线集(SBAS)干涉[9] [10] [11]。在 PS 和 SBAS 方法的基础上, Hooper 提出一种提高可用信号空间采样率的方法, 优化并融合两种方法提取的高相干点, 构建模型解算形变信息[12] [13] [14]。虽然构建形变解算模型时有顾及大气延迟的影响, 但是大气延迟产生的误差可能达到十几厘米。误差仍会通过模型传递给形变解算结果。因此, 有必要在解算前对大气延迟进行校正, 提高多时相 InSAR 形变监测的可靠性。

较早的用于缓解大气延迟的方法是层叠法[8]。该方法基本原理是大气信号在时间尺度上超过一天的间隔是不相关的, 因此可以通过平均独立的干涉图的方法来缓解大气延迟问题。但是该方法局限是通过

大量干涉图进行平均,且不能获得时序形变。目前在时序上缓解大气延迟的方法是应用滤波技术,例如 Berardino 等人在 2002 年提出一种通过时间域和空间域滤波提取大气延迟相位的方法[11]。该方法根据大气延迟具有高空间相关性和低时间相关性,在先移除模型评估出的形变信号的前提下,通过进行空间域低通滤波和时间域高通滤波的处理,提取出大气延迟相位。但是这种滤波方法在对噪声进行平滑处理的同时也对形变信号进行了平滑处理,而且去除的大气延迟相位受主观因素影响。此外,还有许多直接估计并去除大气延迟的方法,例如基于 GPS 数据或雷达数据辅助 InSAR 大气校正的方法和基于气象数据的大气模型校正方法[15] [16] [17] [18]。但是,基于 GPS 数据的方法受站点的位置和密度的局限,MODIS 和 MERIS 则不能在夜间进行观测且受云雾影响很大,而基于数值大气模型的校正方法的稳定性相对较差。

大气延迟可以分为与空间异质分布有关的延迟和与大气垂直特性有关的延迟[19]。其中,与大气垂直特性有关的大气延迟称为对流层垂直分层延迟,与高程有关。大气延迟受水汽含量影响最大,而水汽含量随高程呈指数级的下降[20]。在此基础上,Lin 等用泰勒级数将指数表达式展开并保留一次项,得到大气延迟与高程的线性关系式,提出了一种使用多尺度的方法线性评估大气延迟[21]。该方法侧重于减轻对流层垂直分层延迟的影响,能够在不借助外部先验数据的条件下,实现精准的多时相合成孔径雷达干涉测量大气校正。

本文以 Sentinel-1A SAR 影像为数据源,以成都市主城区为实验区域,在 MT-InSAR 技术提取出高相干点的基础上,引入多尺度稳健估计模型优化 MT-InSAR 大气延迟分量的解算和校正,大气校正后相位均方根误差总体上减少。探索 2016 年 2 月至 2017 年 9 月地表形变情况,并用同时段 CORS 数据进行验证,以证明基于多尺度的 MT-InSAR 大气延迟校正方法是有效和可靠的。

2. 技术原理

Hooper 在 PSI 方法提取 PS 点的基础上,提出可以利用短基线干涉对里的滤波后相位微失相干 (slowly-decorrelating filtered phase, SDFP) 点。这些点在短时间域内滤波处理后仍保持较高相干性,可以与 PS 点一起通过优化筛选,融合成高相干点集,用于 SBAS 模型解算形变信息。在此基础上,本文引入多尺度稳健估计模型优化 MT-InSAR 大气延迟分量的解算,再对校正后的高相干点集进行相位解缠。经完善后的 MTI 形变提取流程图如图 1 所示。

假设有覆盖研究区域的 $p+1$ 幅 SAR 影像,选择一幅作为公共主影像,将其余影像分别与主影像配准并重采样到主影像空间,与单一主影像干涉得到 PS 差分干涉对,同时选取合适的时空基线阈值,构建稳健且无孤立子集的短基线集。经过去除参考椭球面和地形相位处理,分别得到两种二次差分干涉图集(PS 二次差分干涉图集和 SBAS 二次差分干涉图集)。通过设置振幅离差(Amplitude Dispersion, AD)和振幅差分离差(Amplitude Difference Dispersion, ADD)阈值分别提取 PS 候选点集和 SDFP 候选点集。振幅离差指数的计算公式为

$$D_A = \frac{\delta_A}{\mu_A} \quad (1)$$

其中, δ_A 为像元在 p 幅 PS 二次差分干涉图中的振幅标准差, μ_A 为像元在 $p+1$ 幅干涉图中的振幅平均值。振幅差分离差的计算公式为

$$D_{AA} = \frac{\delta_{AA}}{\mu_{AA}} \quad (2)$$

其中, δ_{AA} 为像元在各 SBAS 二次差分干涉图的振幅差标准差; μ_{AA} 为像元在各 SBAS 二次差分干涉图的振幅差平均值。

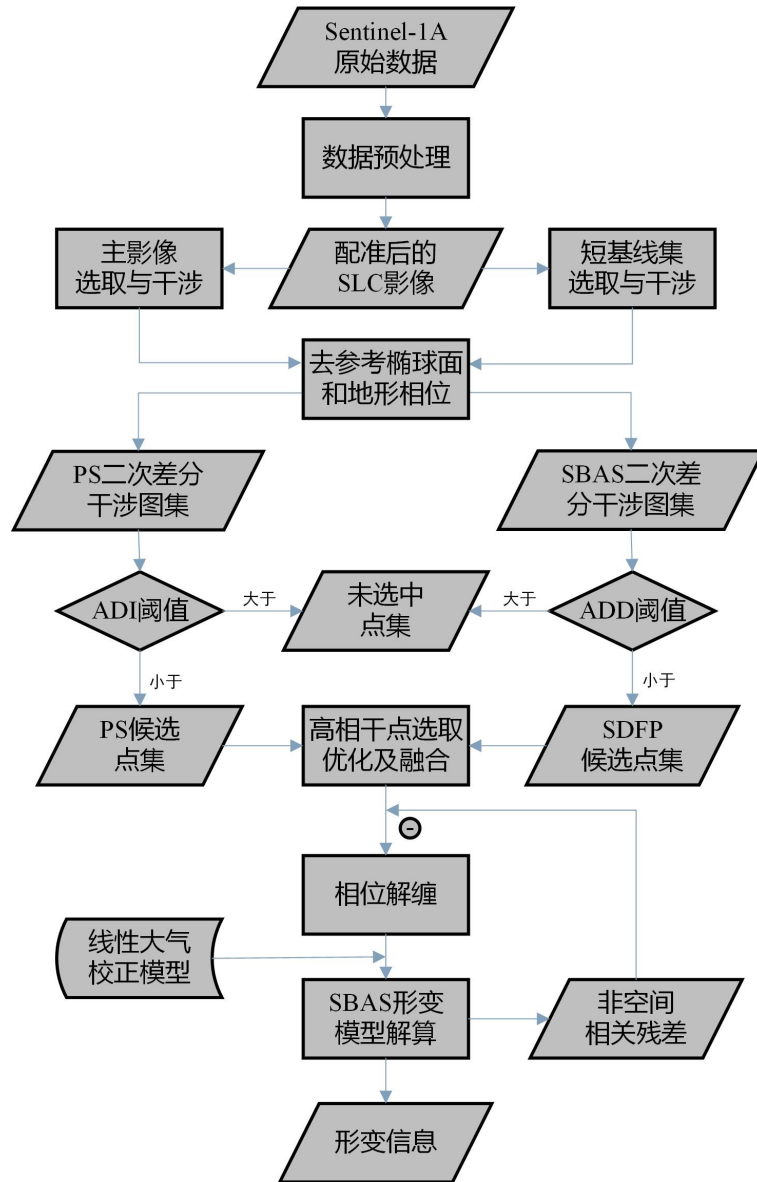


Figure 1. Flow chart of deformation extraction
图 1. 形变提取流程

对干涉图低通滤波后，将信噪比低于阈值的 PS 候选点和 SDFP 候选点去除，得到高相干点集。把信噪比作为定权的依据，在空间域上按照加权平均的方式计算各候选点的相位，用于之后的相位解缠。

在相位解缠后，我们引入线性模型校正与高程相关的大气相位。模型根据大范围区域大气的全局属性建立，由整幅差分干涉图线性回归分析得到，所以不会影响局部形变与高程的关系。假设干涉图仅受静态大气延迟的影响，那么差分干涉图相位表达式如下

$$\Delta\varphi = b + Kh \tag{3}$$

其中， $\Delta\varphi$ 为大气延迟； b 是模型的偏移常量； K 是模型的系数，描述对流层垂直分层延迟与高程的线性关系； h 是高程。

然而，实际情况下差分干涉图受其他干扰因素的影响，很难定义大气相位与高程的线性关系，所以

需要一种稳健的方法去评估出模型参数。有关文献中提到,不同的空间尺度对不同的噪声敏感性不同[21]。在一定空间尺度范围内,差分能很大程度上抑制噪声的影响,而对流层垂直分层延迟与高程的线性关系不会变。

基于此,本文采用多尺度的方法稳健地评估模型的参数。首先,用重采样和滤波的方法将高程图和差分干涉图分解到不同尺度的空间,生成不同空间尺度下高程图和差分干涉图像,然后分别计算相邻两个尺度间的差值,最后运用选出的高相干点评估模型参数。假设通过不同空间尺度 λ 的滤波和差分处理后,得到高程图和差分干涉图各 n 组,式3可以写为

$$\Delta\varphi(\lambda_i) = b + K h(\lambda_i) \quad (4)$$

其中, $\Delta\varphi(\lambda_i)$ 、 $h(\lambda_i)$ 分别为第 $i(i \leq n)$ 组范围尺度下的相位差值和高程差值。

对于同一地区 m 幅差分干涉图,用影像获取时间间隔去定义一组模型参数分量,每一个时间段都有对应的转换系数因子分量和偏移量分量。 $p+1$ 幅影像对应 p 段时间间隔,可以得到线性模型新的表达式

$$\Delta\varphi_q(\lambda_i) = \sum_{j=1}^p a_j b_j + \sum_{j=1}^p a_j K_j h(\lambda_i) \quad (5)$$

其中, $\Delta\varphi_q(\lambda_i)$ 为第 $q(q \leq m)$ 幅差分干涉图在第 i 组范围尺度下的相位; b_j 和 k_j 分别为第 $j(j \leq p)$ 个时段对应的模型参数分量; a_j 为差分干涉图跨越第 j 个时段的判定系数,取值为0或1。式5的矩阵表达式为

$$\begin{bmatrix} a_1 h_1(\lambda_1) & a_2 h_1(\lambda_1) & a_3 h_1(\lambda_1) & \cdots & a_p h_1(\lambda_1) & a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_p \\ a_1 h_1(\lambda_2) & a_2 h_1(\lambda_2) & a_3 h_1(\lambda_2) & \cdots & a_p h_1(\lambda_2) & a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_p \\ & & \vdots & & & & & \vdots & & \\ a_1 h_1(\lambda_n) & a_2 h_1(\lambda_n) & a_3 h_1(\lambda_n) & \cdots & a_p h_1(\lambda_n) & a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_p \\ & & \vdots & & & & & \vdots & & \\ a_1 h_m(\lambda_n) & a_2 h_m(\lambda_n) & a_3 h_m(\lambda_n) & \cdots & a_p h_m(\lambda_n) & a_1 & a_2 & a_3 & \cdots & a_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \\ \vdots \\ K_p \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\varphi_1(\lambda_1) \\ \Delta\varphi_1(\lambda_2) \\ \vdots \\ \Delta\varphi_1(\lambda_n) \\ \vdots \\ \Delta\varphi_m(\lambda_n) \end{bmatrix} \quad (6)$$

考虑到解缠相位中噪声的影响,采用最小二乘方法评估出模型参数分量的最优解,根据干涉对的时间跨度可以计算得到每幅干涉对的大气校正模型参数,进而求得大气相位。对高相干点集进行大气相位校正后,构建SBAS形变解算模型,即可求解得到高相干点集雷达视(LOS)方向的年平均形变速率和形变时间序列。

3. 实验分析

成都市地处四川盆地西缘,毗邻龙门山断裂带,多阴雨天气,水汽的不均匀分布和对流层垂直分层效应都对MT-InSAR构成挑战,是理想的实验对象。本文选取实验区域范围大小约为 $35 \times 24 \text{ km}^2$,位于成都市区周边(详见图2)。

观测数据选用欧洲空间局哥白尼计划发射的工作波长为5.6cm的Sentinel-1A卫星雷达数据,观测时段从2016年2月6日至2017年9月16日,获取影像共计14景,方位向和斜距向分辨率分别为13.98 m和2.33 m。为对雷达影像坐标转换,实验采用SRTM提供的空间分辨率为30 m的DEM数据,用于模拟地形相位和坐标转换。对于用振幅离差法选取PS候选点时,选取以获取时间为2016年11月20日的影

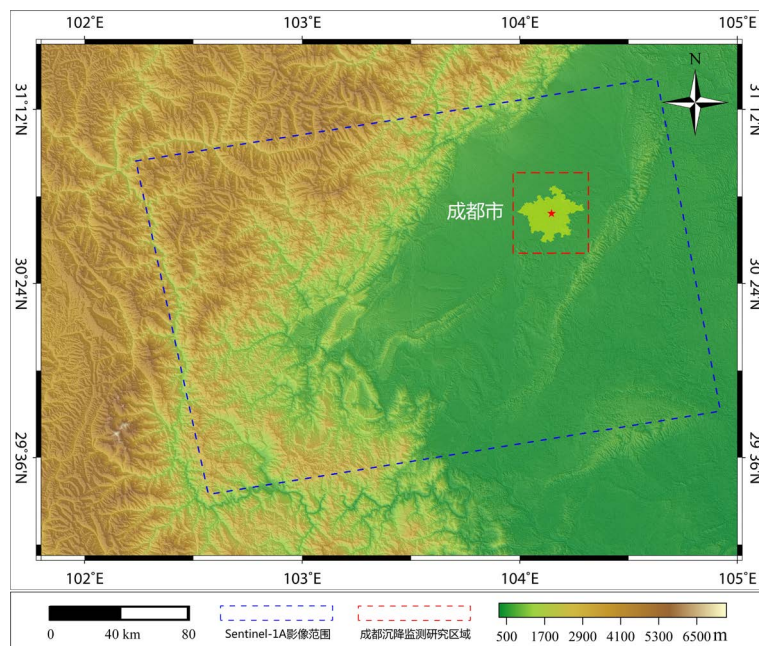


Figure 2. Location of research area

图 2. 实验区域地理位置

像为主影像，得到 13 幅单一主影像差分干涉图。对于用振幅差分离差值法选取 SDFP 点时，通过时空基线选取，得到 65 幅短基线干涉对，SBAS 时空基线如图 3 所示。

实验通过融合振幅离差法和振幅差分离差值法提取到的 PS 点和 SDFP 点，得到 1,099,478 个高相干点，高相干点密度为 1340 个/平方公里。提取过程中，ADI 阈值为 0.4，ADD 阈值为 0.6。高相干点地物除了包括人工建筑物等优势散射体，也包括在一段时间内保持较高相干性的散射体。在相位解缠后，按照本文提出的方法，根据实验区域的覆盖范围，将高程图和短基线干涉图通过滤波分解到不同的空间尺度。根据实验区域范围大小，选取 2000 m、4000 m、8000 m、16,000 m 为空间尺度，相邻空间尺度进行差分后得到 3 个尺度范围下的高程图和短基线干涉图，将 3 个尺度范围下 65 幅干涉对的高相干点代入式 6 求解模型参数，即可得到线性大气校正模型。用线性模型进行大气校正前后相位对比图如图 4 所示。

图 4 中，a、b、c 分别为 65 个 SBAS 干涉对中的 3 个干涉对大气校正前的相位图；d、e、f 分别为三幅干涉图用线性模型模拟的大气相位图；g、h、i 分别为三幅干涉图大气校正后的相位图。从 d、e、f 可以看到，线性模型模拟的大气相位与高程相关，对于工作波长为 C 波段(5.6 cm)的 Sentinel-1A 卫星来说，其改正值约在 0~30.2 mm 之间。模型参数 K (单位: rad/km) 由多尺度的高程差分图和相位差分图评估得到，它能反映该区域对流层垂直分层相位延迟的平均值。对比大气校正前后的相位图，可以较明显的看出相位变化梯度有一定的改善。大气校正前后相位的均方根误差(表 1)对比也表明，大气校正后相位均方根误差有所减小，说明干涉图相位中确实存在对流层垂直分层延迟相位，证明本文提出的方法是有效的。值得一提的是，大气校正后有的干涉对均方根误差增加，说明在这些干涉对中，与空间异质分布有关的延迟占主导地位。

在进行大气校正后，构建 SBAS 形变解算模型，对大气校正后的高相干点集形变解算，得到实验区域在该时段内年平均沉降速率图如图 5 所示。由图 5 可以看出，实验区域的年平均形变速率在 6 mm/y 以内，整个城区无相对位移趋势，几乎没有沉降。其中，CHDU 为一个 CORS 站点，位于城区形变稳定的区域；五角星 R 为形变解算的参考点；a、b、c 分别为农田、湖泊和施工用地，相干性有所降低。

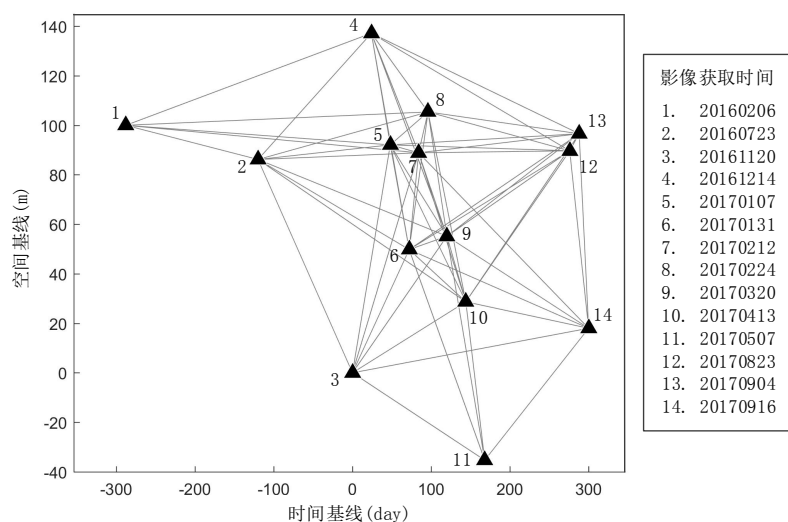


Figure 3. Temporal and spatial baselines of SBAS

图 3. SBAS 时空基线

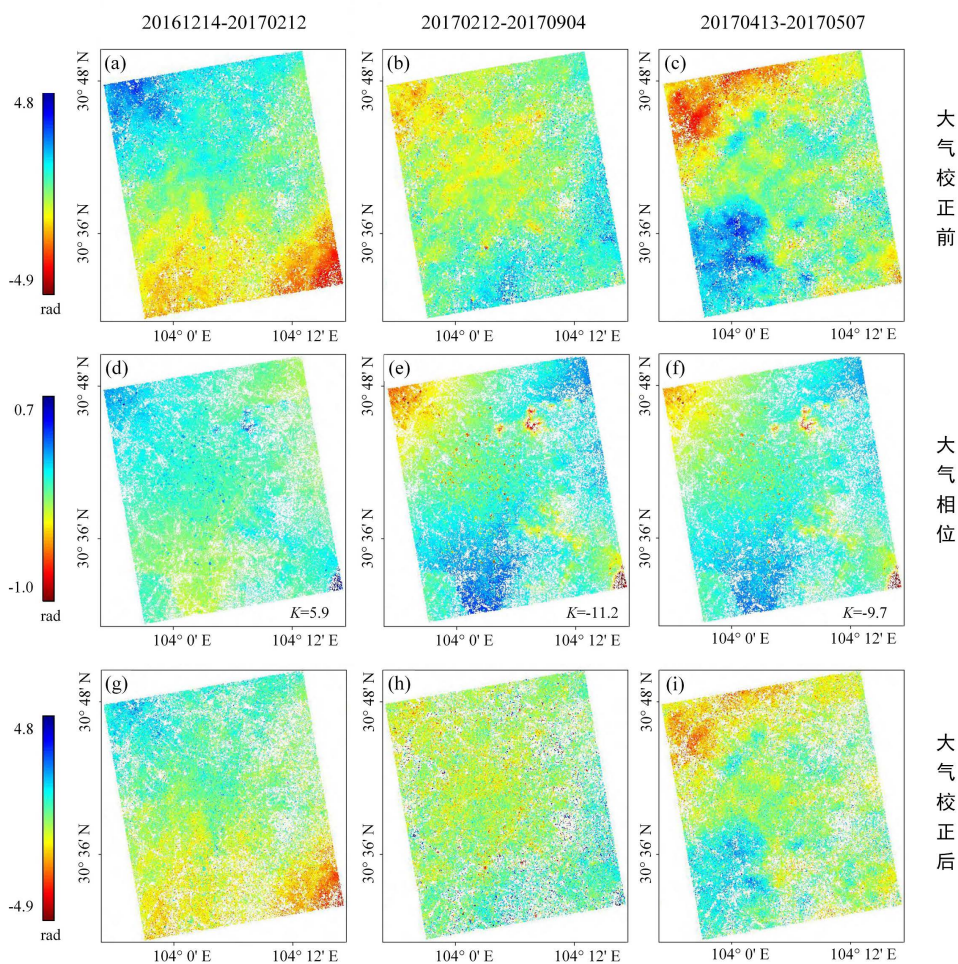


Figure 4. Comparison of phase before and after atmospheric correction

图 4. 大气校正前后相位对比

Table 1. Comparison of RMSE of phase before and after atmospheric correction
表 1. 大气校正前后相位均方根误差对比

SBAS 干涉对	RMSE (rad)		SBAS 干涉对	RMSE (rad)		SBAS 干涉对	RMSE (rad)	
	校正前	校正后		校正前	校正后		校正前	校正后
20160206-20160723	2.10	2.15	20161214-20170212	1.41	1.38	20170212-20170413	1.23	1.24
20160206-20161214	2.00	2.00	20161214-20170224	1.40	1.40	20170212-20170823	1.52	1.50
20160206-20170107	1.74	1.74	20161214-20170320	1.19	1.22	20170212-20170904	1.41	1.37
20160206-20170212	1.52	1.52	20161214-20170823	1.95	1.95	20170212-20170916	1.61	1.56
20160206-20170224	1.45	1.46	20161214-20170904	1.44	1.44	20170224-20170320	1.26	1.25
20160723-20161120	1.85	1.89	20170107-20170131	0.92	0.93	20170224-20170413	1.51	1.53
20160723-20161214	2.03	2.11	20170107-20170212	1.13	1.13	20170224-20170823	1.39	1.39
20160723-20170107	1.77	1.83	20170107-20170224	0.99	0.99	20170224-20170904	1.38	1.36
20160723-20170131	1.74	1.74	20170107-20170320	0.99	0.99	20170320-20170413	1.81	1.80
20160723-20170212	1.80	1.82	20170107-20170413	1.84	1.87	20170320-20170507	1.88	1.87
20160723-20170224	1.72	1.77	20170107-20170823	1.66	1.66	20170320-20170823	1.85	1.85
20160723-20170320	1.97	1.98	20170107-20170904	1.39	1.40	20170320-20170904	1.44	1.44
20160723-20170413	2.40	2.39	20170131-20170212	0.78	0.76	20170320-20170916	1.94	1.95
20161120-20170107	1.09	1.06	20170131-20170224	0.72	0.71	20170413-20170507	1.49	1.42
20161120-20170131	1.16	1.12	20170131-20170320	1.21	1.21	20170413-20170823	1.88	1.86
20161120-20170212	1.53	1.46	20170131-20170413	1.53	1.53	20170413-20170904	1.85	1.82
20161120-20170320	1.34	1.32	20170131-20170507	1.86	1.83	20170413-20170916	2.11	2.07
20161120-20170413	2.21	2.20	20170131-20170823	1.50	1.52	20170507-20170916	2.45	2.47
20161120-20170507	2.26	2.26	20170131-20170904	1.42	1.42	20170823-20170904	1.25	1.26
20161120-20170916	1.79	1.79	20170131-20170916	1.46	1.47	20170823-20170916	1.32	1.31
20161214-20170107	1.15	1.15	20170212-20170224	0.75	0.76	20170904-20170916	1.46	1.46
20161214-20170131	1.44	1.45	20170212-20170320	1.28	1.25	RMSE 累计减小: 0.13 rad		

实验通过 CORS 的形变观测数据对形变解算结果进行精度验证。由于 CORS 站点数量有限, 实验假设在监测起始时间, CORS 和对应高相干点累积形变量为 0 mm, 将 LOS 向形变监测结果投影到竖直方向, 计算两类监测结果差值的均方根误差来验证解算结果的可靠性。两类监测结果差值 RMSE 如表 2 所示。

验证结果表明, 两类形变监测结果差值的标准差在 4 mm 以内, 证明了本文所提出模型与方法是有有效而可靠的。

4. 结论

本文以 Sentinel-1A SAR 影像为数据源, 以成都市主城区为实验区域, 基于 MT-InSAR 技术提取出高相干点集, 引入多尺度稳健估计模型优化 MT-InSAR 大气延迟分量的解算和校正。模型评估的大气延迟在 0~30.2 mm, 大气校正后相位均方根误差总体上减少, 说明多尺度方法评估出的线性模型应用于大气校正是有效的。大气校正后有的干涉对均方根误差增加, 说明该模型局限于校正大气延迟中的垂直分层

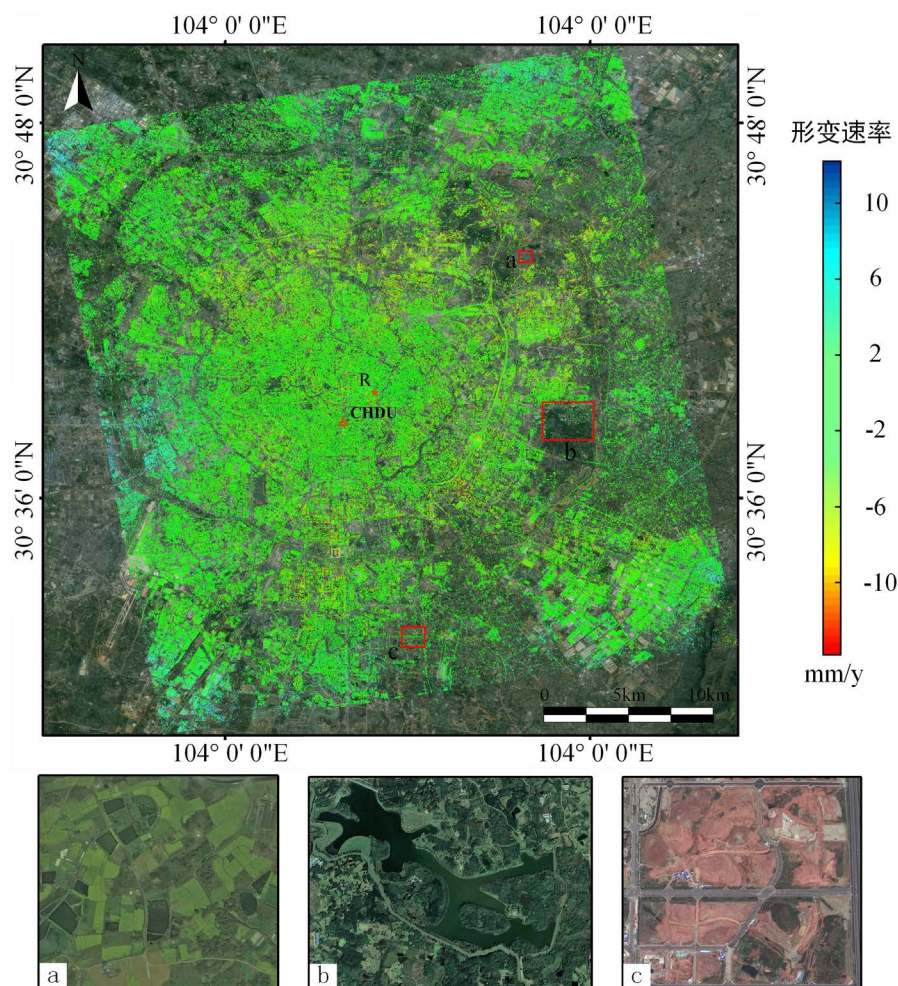


Figure 5. Average deformation rate of LOS direction

图 5. LOS 向平均形变速率

Table 2. Accuracy verification

表 2. 精度验证

CORS	纬度	经度	形变监测结果差值 RMSE(单位: mm)
CHDU	30°38'21.8"	104°3'52.1"	3.9

延迟。利用 MT-InSAR 技术提取出的地表形变结果分析表明, 整个实验区域较为稳定, 年平均形变速率多在 6 mm/y 以内, 用同时段 CORS 数据进行验证, 两类形变监测结果差值的均方根误差在 4 mm 以内, 证明了基于多尺度的 MT-InSAR 大气延迟校正方法是有效和可靠的。

致 谢

本文获得了国家重点研发计划“地球观测与导航”领域重点专项课题(2017YFB0502704), 国家自然科学基金青年科学基金项目(41601503), 西南交通大学理工类科技创新项目(2682016CX087)和西南交通大学“雏鹰学者”人才计划项目(2682016CY19)的联合资助。此外, 美国地质调查局和欧洲空间局分别为本研究提供了数字高程模型(SRTM DEM)和 Sentinel-1A 卫星影像数据, 成都市勘察测绘研究院提供了

CORS 监测结果, 在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] Rosen, P.A., Hensley, S., Joughin, I.R., *et al.* (2000) Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, **88**, 333-382. <https://doi.org/10.1109/5.838084>
- [2] 丁晓利, 陈永奇. 合成孔径雷达干涉技术及其在地表形变监测中的应用[J]. 紫金山天文台台刊, 2000, 19(2): 158-167.
- [3] 刘国祥, 丁晓利, 陈永奇, 等. 极具潜力的空间对地观测新技术——合成孔径雷达干涉[J]. 地球科学进展, 2000, 15(6): 734-735.
- [4] 王超, 张红, 刘智. 星载合成孔径雷达干涉测量[J]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 刘国祥, 丁晓利, 陈永奇, 等. 使用卫星雷达差分干涉技术测量香港赤腊角机场沉降[J]. 科学通报, 2001, 46(14): 1224-1228.
- [6] Strozzi, T., Wegmuller, U., Werner, C.L., *et al.* (2003) JERS SAR Interferometry for Land Subsidence Monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **41**, 1702-1708. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.813273>
- [7] 刘国祥. Monitoring of Ground Deformations with Radar Interferometry. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [8] Zebker, H.A., Rosen, P.A. and Hensley, S. (1997) Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, **102**, 7547-7563. <https://doi.org/10.1029/96JB03804>
- [9] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2000) Non-Linear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **38**, 2202-2212. <https://doi.org/10.1109/36.868878>
- [10] Ferretti, A., Prati, C. and Rocca, F. (2001) Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **39**, 8-20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- [11] Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., *et al.* (2002) A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 2375-2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- [12] Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., *et al.* (2004) A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and Other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers. *Geophysical Research Letters*, **31**, L23611, 1-5.
- [13] Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H. (2007) Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo, Galapagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**, B07407, 1-21.
- [14] Hooper, A. (2008) A Multi-Temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches. *Geophysical Research Letters*, **35**, L16302. <https://doi.org/10.1029/2008GL034654>
- [15] 宋小刚, 李德仁, 廖明生, 等. 基于 GPS 观测量的 InSAR 干涉图中对流层改正方法及其论证[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(3): 33-236.
- [16] 刘圣伟, 张朝林, 郭小芳, 等. MODIS 水汽反演用于 InSAR 大气校正的理论研究[J]. 遥感学报, 2007, 11(3): 367-372.
- [17] 许文斌, 李志伟, 丁晓利, 等. 利用 MERIS 水汽数据改正 ASAR 干涉图中的大气影响[J]. 地球物理学报, 2010, 53(5): 1073-1084.
- [18] 鄢子平, 李振洪. InSAR 大气水汽改正模型比较应用研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(10): 862-867.
- [19] 李永生, 张景发, 姜文亮, 等. 基于网络法时序 InSAR 大气误差校正方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2015, 35(1): 145-149.
- [20] Delacourt, C., Briole, P. and Achache, J. (1998) Tropospheric Corrections of SAR Interferograms with Strong Topography: Application to Etna. *Geophysical Research Letters*, **25**, 2849-2852. <https://doi.org/10.1029/98GL02112>
- [21] Lin, Y.N., Simons, M., Hetland, E.A., *et al.* (2010) A Multiscale Approach to Estimating Topographically Correlated Propagation Delays in Radar Interferograms. *Geochimistry Geophysics Geosystem*, **11**, Q09002.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2329-549X，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：gst@hanspub.org