

基于短基线差分干涉法的上海地面沉降分析

张丽娜, 伍吉仓, 李涛, 陈杰

(同济大学 测量与国土信息工程系, 上海 200092)

摘要: 利用短基线差分干涉时序分析方法获取上海城区的地面形变信息. 短基线时序分析方法选择较短的干涉对组合, 利用干涉对中的高相干目标的相位和幅度信息在长时间序列中保持稳定的特性, 获得高精度的地表形变信息. 实验选择上海外环以内的区域, 利用 2007—2010 年间的 17 景日本 ALOS 卫星的 PALSAR 数据, 采用短基线时序分析方法提取了相干目标视线向的平均沉降速率. 在沉降速率图中, 杨浦区与虹口区交界处存在一个明显的漏斗状沉降; 闵行区和浦东新区出现了一个较大范围的不规则的沉降条带.

关键词: 合成孔径雷达干涉测量; 短基线时序分析方法; 相干目标; 地面沉降

中图分类号: P 128.15

文献标识码: A

Monitoring Ground Deformation Based on Small Baseline Approach in Shanghai

ZHANG Lina, WU Jicang, LI Tao, CHEN Jie

(Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Ground subsidence information is obtained by using small baseline differential SAR interferograms in Shanghai. Amplitude and phase information of some high coherent targets remain stable in a long time sequence, so accurate deformation velocities of these points can be obtained with small baseline method. The area within the outer loop road in Shanghai is chosen for time series analysis of small baseline interferogram. 17 ALOS PALSAR data between 2007 and 2010 are used to extract the LOS average rates of coherent targets. The result shows that there is a clear funnel-shaped settlement in the junction of Hongkou and Yangpu districts, and a wide range irregular settlement in Minhang and Pudong districts.

Key words: interferometric synthetic aperture radar (InSAR); small baseline analysis method; coherent target; ground subsidence

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)是近年来发展非常迅速的微波遥感对地观测技术. 因其具有全天候、大范围、高空间分辨率的特点, 不仅可以快捷地提取出 m 级的地形信息, 而且能够观测探测到亚厘米级的微小地表形变^[1]. 因此, InSAR 研究方法广泛地应用在地震、火山、山体滑坡等突发形变监测领域^[2-5].

对于地面沉降、断层构造运动等长时间跨度的缓慢形变, 受时间去相干和大气延迟影响比较严重^[6-7]. 意大利学者通过对大量 SAR 影像的研究发现, 在建筑物相对集中的城区和岩石裸露的山区, 存在一些相干点, 即使在干涉效果很差的情况下, 其相位和幅度信息仍能在长时间范围内保持稳定. 利用这些高相干点上的相位信息, 就可以有效地克服时间去相干和大气延迟的干扰, 提取长时间序列的地表形变信息^[8]. 由此发展出一系列基于相干点目标的长时间序列分析方法, 最具代表性的有两种: 永久散射体干涉测量方法(permanent scatterer InSAR, PSInSAR)^[8]和短基线集方法^[9]. PSInSAR 依赖于主影像的质量, 并且基线过长容易导致几何失相干. 短基线方法则采用多主影像, 并且选择基线较短的干涉对, 提高了影像的利用率, 增加了多余观测信息.

本文首先介绍了基于短基线差分干涉测量方法提取地面沉降的基本原理和过程, 主要讨论了短基线方法的关键技术. 然后利用 ALOS PALSAR 数据, 采用短基线干涉测量的方法提取了上海城区的沉降信息. 因为 ALOS 数据受轨道误差和电离层延迟影像比较大. 本文采用多项式拟合的方法, 将残余的轨道误差和大气误差等空间相关的部分拟合成一个平面, 从干涉相位中去除, 从而提高影像的质量.

收稿日期: 2011-09-05

基金项目: 国家自然科学基金(41074019), 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放研究基金(10-01-04)

第一作者: 张丽娜(1981—), 女, 博士生, 主要研究方向为 InSAR 原理及应用. E-mail: 9linazhang@tongji.edu.cn

通讯作者: 伍吉仓(1963—), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为 InSAR、GPS 原理与应用等. E-mail: jcwu@tongji.edu.cn

1 短基线集方法

短基线集干涉测量方法的主要思想是牺牲信息的空间密度来获取可靠的形变相位信息:将所有 SAR 数据任意两两干涉处理,选择垂直基线和时间基线较短的干涉对进行研究,提取在时间序列中保持稳定的相干目标.根据相干目标各组成部分的时间维和空间维的特征不同,将地表形变相位分离出来,求得视线向的沉降速度.主要计算流程可用图 1 表示^[10-13]:

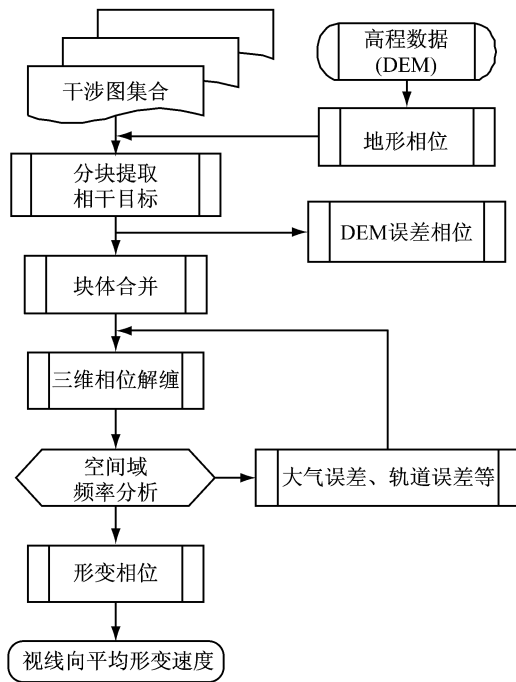


图 1 短基线算法流程

Fig.1 Flow chart of small baseline approach process

图 1 各步骤中,短基线方法的关键在于相干点的识别、三维相位解缠的实现以及线性速度的拟合.下面将详细说明这些算法和过程.

1.1 识别相干目标

本文考虑利用幅度和相位两者的稳定性来挑选相干目标.先用幅度稳定性来初步筛选出候选相干点.幅度稳定性判断采用 Hooper 等提出的振幅离散度指标^[13].幅度离散度越小,说明相干像元越稳定.然后对候选点的相位进行时间序列分析,利用相位的时间相关性测度来进行计算,确定其相位稳定性,剔除不合格点,最终得到稳定的相干目标.

1.2 三维解缠

因为解缠相位和缠绕相位之间相差 2π 的整数倍,所以相位解缠实际上是一个求取最小化整数变

量问题.本文假设相位差在时间维和二维空间上都小于半个周期,实现近似三维解缠算法:先在时间维上解缠,然后把这个结果作为初始值,在二维空间上进行优化处理^[14].

时间维的解缠.假设所有相邻采样点之间的相位差由大部分的平滑的变形信号和很少的随机噪声组成,而且其在时间维上小于半个周期,这样经过时间上的低通滤波之后,就可以先在时间维上对相位差进行解缠,估计出相位差在时间维上的变化量.

空间域的解缠采用网络最小费用流法.利用时间域的解缠结果构建先验概率函数,由先验函数的负对数函数提取费用函数,然后用最小费用流法(SNAPHU)来计算总体最小费用解决方案.

1.3 提取 LOS 平均沉降速度

对解缠后的相位进行时间域和空间域的处理,将大气延迟、轨道误差、地形误差等干扰信号分离出去之后,这时的信号主要包含地形形变相位以及很少量的噪声,可表示为

$$\varphi = \varphi_{\text{def}} + \varphi_{\text{noi}} \quad (1)$$

式中: φ_{def} 为干涉对两次成像期间的形变相位; φ_{noi} 为残余误差相位和噪声相位.

假设在主辅影像成像时间段 Δt 之间,地面点 x 发生了地形位移,一般认为位移在时间上的变化为线性的, v_x 为点 x 的平均形变速度, λ 为波长,式(1)变为

$$\varphi = 4\pi \cdot v_x \cdot \Delta t / \lambda + \varphi_{\text{noi}} \quad (2)$$

令 $\alpha = 4\pi \cdot \Delta t / \lambda$,则可得到:

$$\varphi = \alpha \cdot v_x + \varphi_{\text{noi}} \quad (3)$$

若研究区中总共检测出 H 个相干点,则可以组成 H 个方程.用最小二乘方法对方程组求解,即可得到视线向(LOS)的平均线性速度.

2 上海市区地面沉降实验及分析

上海是受地面沉降影响最严重的城市之一.从 2000 年起,地面沉降得到控制,目前上海市中心城区的年均沉降量在 10 mm 以内^[15],线性趋势较为明显.近年来随着城市大规模改建和郊区新城的发展,地面沉降开始出现在郊区.本文选择上海外环线以内的城区作为实验区,以斯坦福大学开源软件 StaMPS 中的短基线模块为基础,利用日本 ALOS 卫星的 PALSAR 数据开展上海地面沉降的研究.

2.1 实验数据

本文的 DEM 数据采用 ASTER GDEM. SAR

影像是日本的 L 波段的 ALOS PALSAR 数据。PALSAR 数据具有两种: FBS 和 FBD。在处理时可对 FBS 数据进行重采样,使其与 FBD 数据具有相同的距离向分辨率。文中所用数据为 2007—2010 年间上海地区的 17 景 PALSAR 影像,见表 1。

表 1 实验所用的 PALSAR 数据

Tab.1 PALSAR data

编号	Scene ID	模式	成像日期
1	ALPSRP057550610	FBS	2007-02-22
2	ALPSRP084390610	FBD	2007-08-25
3	ALPSRP097810610	FBS	2007-11-25
4	ALPSRP104520610	FBS	2008-01-10
5	ALPSRP111230610	FBD	2008-02-25
6	ALPSRP117940610	FBD	2008-04-11
7	ALPSRP131360610	FBD	2008-07-12
8	ALPSRP144780610	FBD	2008-10-12
9	ALPSRP151490610	FBD	2008-11-27
10	ALPSRP158200610	FBD	2009-01-12
11	ALPSRP164910610	FBD	2009-02-27
12	ALPSRP171620610	FBD	2009-04-14
13	ALPSRP185040610-	FBD	2009-07-15
14	ALPSRP198460610	FBD	2009-10-15
15	ALPSRP211880610	FBS	2010-01-15
16	ALPSRP218590610	FBS	2010-03-02
17	ALPSRP245430610	FBS	2010-09-02

2.2 实验结果及分析

地形误差相位与垂直基线成正比,因此在干涉图组合时对垂直基线的要求比较严格。考虑到数据比较少,本次试验限定垂直基线 800 m,时间基线 1 000 d,干涉数据基线组合情况如图 2 所示。图 2 中每条连线代表一个干涉对组合,本次实验共产生了 40 个干涉对。满足上面基线组合生成干涉图如图 3 所示。

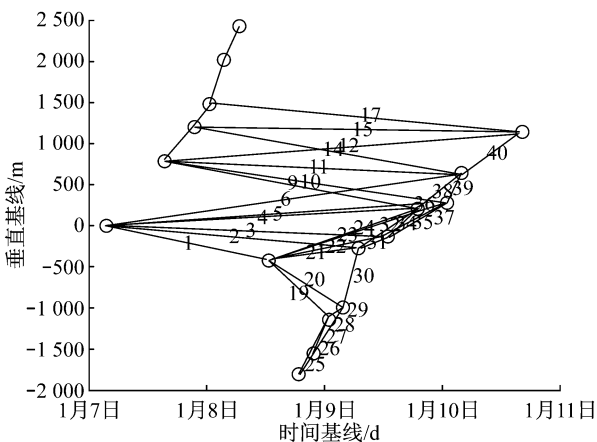


图 2 数据基线组合图

Fig.2 Baseline combination chart

从图 3 中,可以看出干涉图整体颜色比较平滑。利用短基线方法得到所有相干目标点上视线向的平

均速度,如图 4 所示。

由图 4 可以看出,相干目标的分布均匀,LOS 向速度在 $-27.4 \sim 4.9 \text{ mm} \cdot \text{年}^{-1}$ 之间,其中负号表示沉降。在研究区约 750 km 的范围内,总共提取出了 65 819 个相干目标,相干目标点的密度达到了 $84 \text{ 个} \cdot \text{km}^{-2}$ 。从图中可以看出,在 2007—2010 年间,图像的上半部分,在虹口区与杨浦区均有沉降分布,杨浦区的四平路附近存在一个明显的漏斗状沉降;图像中部也就是中心城区,总体比较平稳,没有明显的沉降;图像的下半部分,在闵行区东部有较大的沉降发生,而浦东新区的南部出现一个大范围的不规则的沉降条带。总体来看,中心城区沉降比较缓慢,较大的沉降主要发生在新开发区域,说明上海的沉降开始明显地由中心城区向新城区和郊区转移,这与实际情况是相符的。同时,也应当注意到,图像中存在一些突变点,比如大片沉降区域中间夹杂着一些抬升速度较大的蓝点,这可能是由于所选的相干目标并不是稳定点造成的。

从上述结果中,利用短基线方法监测地面沉降的主要优点有以下几个方面:① 利用短基线方法,在没有地面控制点的情况下,仍能够提取城区地面沉降范围和沉降速度信息;② 利用短基线方法,即使是在计算机的内存有限的情况下,可以通过分块分析再合并的方法,提取大范围区域的沉降信息;③ 图 4 中相干目标点的密度远远大于传统的水准测量点密度。利用 InSAR 提取的沉降结果作为先验信息,对发生沉降的区域增加水准观测的频率和密度。因此相对于水准测量来说,利用短基线 InSAR 方法是一个非常有益的补充。

3 与水准数据的比较

将 LOS 方向的沉降速度转换到垂直方向,在距离水准点 100m 的范围内搜索相干目标点,选取距离最近的相干目标与水准数据相对比。因只有上海部分地区的水准数据,而且水准点与 ALOS 的观测时间不一致,故比较的结果是初步的。图 4 中三角形表示水准点位置。水准测量得到的沉降速率与本文得到的沉降速率及其差值列于图 5 中。

图 5 中沉降速率观测值为负号代表下降。对比三期观测结果可以看出,随着时间的推移,17 水准点里有 14 个点的沉降观测在变小,说明在这些点附近沉降趋势是减弱的,这与实际情况相吻合。本文重点对比分析 2001—2006 年的水准观测结果与

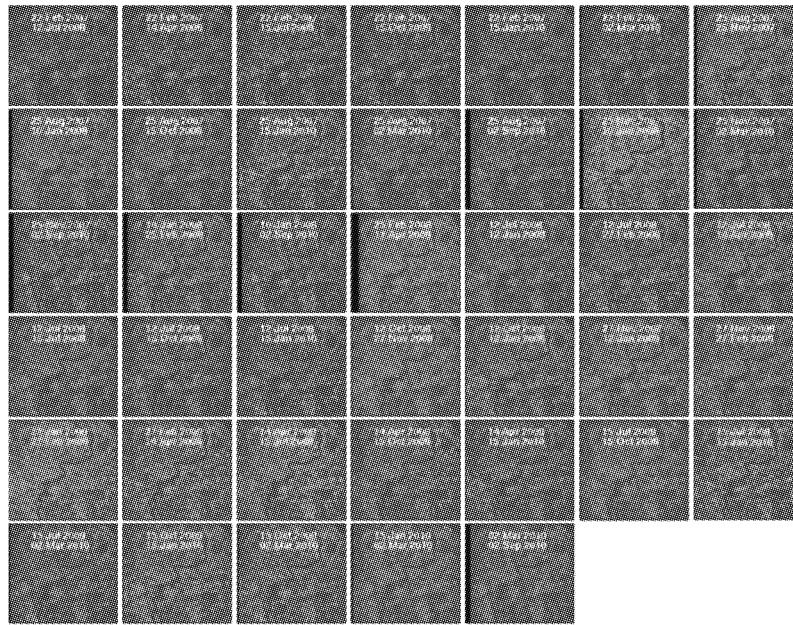


图 3 全部干涉图

Fig.3 All interferograms

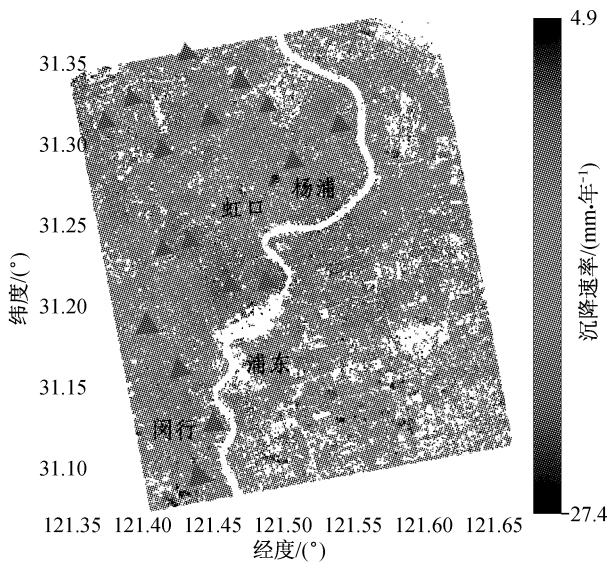


图 4 LOS 沉降速度

Fig.4 Subsidence rate in LOS

2007—2010 年的短基线观测结果,有 1,2,3,4,6,8,9,14 等 8 个点的两种观测量差异很小,在 8 mm 以内,说明这些点上本文采用的短基线结果是比较可靠的;5,7,11,12,13,15 这六个点,通过对比 1995—2001 和 2001—2006 年的沉降速率可知,两期水准数据也都相差较大,而且两期水准的差异与两种观测方法的差异很接近,说明这些点的沉降速率变小了,本文的结果是比较符合事实的. 10,16,17 这三个点,其两种观测结果差异比较大但是两期水准数据的差异比较小,这说明这些点附近的相干目标(PS)点观

测量有误差. 经分析,主要有两个原因:(1) 相干目标点与水准点的不匹配. 本文在水准点周围 100 m 以内搜索相干目标点,在这个距离内,即使地表地物相同,水准点与相干目标点的沉降情况也可能不同.(2) 相干目标点的选取和沉降计算过程中存在误差. 由于地形误差、轨道误差、大气延迟等因素的影响,选择相干目标的时候可能引进了部分不稳定点,导致由 InSAR 所得到的相干目标点的沉降速度不可靠.

4 结论

本文讨论了基于短基线方法提取地面沉降的基本过程和原理,并以上海城区为例,利用 PALSAR 数据提取了上海城区的平均地面沉降速率. 杨浦区存在一个明显的漏斗状沉降;在闵行区 and 浦东新区出现了一个较大范围的不规则的沉降条带. 总体来看,中心城区的沉降比较缓慢,较大的沉降主要都发生在新开发区域,说明上海的沉降开始明显地由中心城区向新城区和郊区转移. 将短基线提取的沉降结果与水准数据相比较,可以推断本文提取的沉降速率是能够达到厘米级或者更高的精度.

从观测结果可以看出,利用短基线方法监测的优点主要体现在两个方面:(1) 利用短基线方法,在没有地面控制点的情况下,仍能够提取大时间跨度、大区域、高精度的地面沉降信息.(2) 短基线方法提取的相干目标的密度远远大于传统的水准测量,能

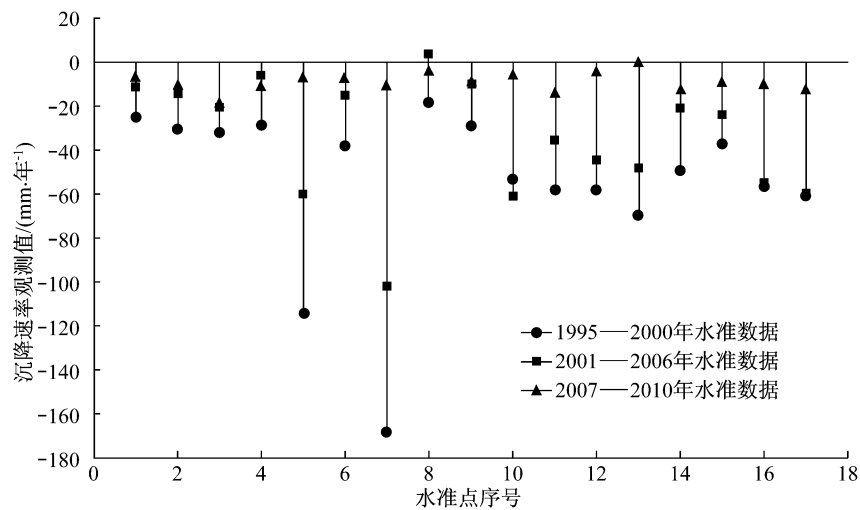


图 5 相干点与水准点的沉降速度对比

Fig.5 Comparison of subsidence rate of coherent target and leveling

够体现出沉降区域的范围和趋势. 利用 InSAR 提取的大范围沉降结果作为参考, 对那些沉降观测量比较大的区域增加水准观测的频率和密度. 因此, 在地面沉降监测应用中, 基于 InSAR 技术的短基线集方法是传统水准测量的有效补充.

致谢: 本文采用的 ALOS 卫星 PALSAR 数据由日本航天局提供.

参考文献:

- [1] Prati C, Rocca F, Monti G A. SAR interferometry experiments with ERS-1[C]//Proceedings First ERS-1 Symposium. Tokyo: ESA, 1993; 211-218.
- [2] Prati C, Ferretti A, Persin D. Recent advance on surface ground deformation measurement by means of repeated spaceborne SAR observations[J]. *Journal of Geodynamics*, 2010, 49:161.
- [3] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface[J]. *Reviews of Geophysics*, 1998, 36 (4):441.
- [4] Rosen P A, Hensley S, Joughin I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2000, 88 (3):333.
- [5] Bamler R, Hartl P. Topical review: synthetic aperture radar interferometry[J]. *Inverse problems*, 1998, 14(4):R1.
- [6] Joaquin M S, Ramon H, Bert M K, et al. Physical analysis of atmospheric delay signal observed in stacked radar interferometric data [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium. [S.l.]:IEEE, 2003:2112-2115.
- [7] 王艳, 廖明生, 李德仁, 等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(2):598.
- [8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. *IEEE TRANS. Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1):8.
- [9] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11):2375.
- [10] 张红, 王超, 吴涛, 等. 基于相干目标的 DInSAR 方法研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [11] Hooper A. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation[D]. Delft: Department of Remote Sensing and Geoscience of Stanford University, 2006.
- [12] Hooper A, Zebker H A, Segall P, et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31:L23611.
- [13] Hooper A. StaMPS/MTI Manual[Z/OL]. [2009-11-24]. <http://radar.tudelft.nl/~ahooper/Stamps/Stamps>.
- [14] Hooper A, Zebker H A. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series[J]. *Optical Society of America*, 2007, 24:2737.
- [15] 上海市规划和国土资源管理局. 上海市地质环境公报(2008年)[R/OL]. [2009-05-25]. <http://www.shgtj.gov.cn>. Shanghai Municipal Planning and Land Resources Administration. *Shanghai geological environmental bulletin (2008)*[R/OL]. [2009-05-25]. <http://www.shgtj.gov.cn>.

WANG Yan, LIAO Mingsheng, LI Deren, et al. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks[J]. *Chinese Journal Geophysics*, 2007, 50(2):598.