

先验模型选择对 PS-DInSAR 参数解算精度影响分析

罗海滨¹ 何秀凤²

摘要

研究了永久散射体雷达差分干涉测量(PS-DInSAR)技术观测方程的建立和参数求解方法,分析验证了观测方程建立过程中先验模型的正确选择对提高参数解算精度的重要影响,提出了用 GPS 辅助确定先验模型以改善参数解算精度的思路.最后,对进一步利用 GPS 提高 PS-DInSAR 测量精度进行了探讨,给出了一些有益结论.

关键词

PS-DInSAR; GPS; 先验模型; 精度分析

中图分类号 P236

文献标志码 A

0 引言

Introduction

差分合成孔径雷达干涉测量(DInSAR)技术具有高精度、低成本、空间近连续性和遥感探测等优势,已成为多种原因导致的地表形变监测的重要手段^[1-5].但时空去相干及大气延迟误差极大地限制了 DInSAR 技术的应用范围,成为目前 DInSAR 技术面临的主要难题.为了解决这一难题,Ferretti 等^[6-7]提出了永久散射体雷达差分干涉测量(PS-DInSAR)技术.与常规 DInSAR 技术相比,PS-DInSAR 技术具有如下优点:首先,PS-DInSAR 技术突破了常规 DInSAR 技术面临的时空基线的限制,提高了其对 SAR 影像的利用率和对缓慢形变的识别能力;其次,PS-DInSAR 技术能够估计并剔除永久散射体(PS 点)处低频大气的影响;第三,PS-DInSAR 技术可以利用低精度数字高程模型(DEM),并且能对 PS 点处的 DEM 改正值进行估计.凭借这些独特优势,PS-DInSAR 技术在监测诸如断层运动、火山运动以及矿区地面沉降等区域地表形变方面已逐渐展现出广阔的应用前景^[8-14].

尽管存在上述诸多优点,但在实际应用中,PS-DInSAR 技术仍面临一些难题亟待研究和解决.本文针对 PS-DInSAR 技术在观测方程建立过程中先验模型的选择问题开展研究,用实验验证了先验模型选择的正确与否对方程参数解算精度的重要影响,提出了用 GPS 辅助确定先验模型以改善参数解算精度的思路.此外,本文对进一步利用 GPS 提高 PS-DInSAR 测量精度进行了探讨,给出了一些有益结论.

1 PS 差分观测方程的建立及求解

Establishing and solving of PS differential observation equation

1.1 差分观测方程的建立

假设研究区域有 $N + 1$ 幅不同时相的 SAR 影像,按一定的规则选取其中 1 幅作为主影像,其余 N 幅为副影像并分别与主影像配准,得到 $N + 1$ 幅配准的 SAR 影像和 N 个干涉像对.将 N 个干涉像对与由已知 DEM 反演的干涉相位进行差分处理得到 N 幅差分干涉图.通过对 $N + 1$ 幅配准 SAR 影像的灰度和 N 幅差分干涉图的差分干涉相位进行分析可以提取出 PS 点.如果假设 PS 点处的地表形变主要是线性形变,同时顾及 DEM 改正值、大气延迟和失相关噪声影响,就可将某 PS 点 i 在第 k 幅差分干涉相位图中的差分干涉相位 ϕ_i^k 看作是上

收稿日期 2010-08-29

资助项目 国家自然科学基金(50579013); 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金(LED2009C07)

作者简介

罗海滨,男,博士,讲师,研究方向为 InSAR 技术理论及应用. hbluo@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 遥感学院,南京,210044

2 河海大学 卫星及空间信息应用研究所,南京,210098

述各因素贡献的和,即可建立如下观测方程:

$$\phi_i^k = C_h \cdot B_{\perp}^k \cdot \Delta h_i + C_v \cdot T^k \cdot v_i + \phi_{\text{res},i}^k + 2K_i^k \pi. \quad (1)$$

其中, $C_h = 4\pi/(\lambda \cdot R \cdot \sin \theta)$, $C_v = 4\pi/\lambda$.

式(1)中: B_{\perp}^k 、 T^k 为第 k 个干涉像对的垂直空间基线和时间基线; Δh_i 、 v_i 为 PS 点 i 的高程改正值和沿 SAR 视线向的线性形变速率; $\phi_{\text{res},i}^k$ 为残余差分干涉相位,它是非线性形变、大气延迟和失相关噪声引起的差分干涉相位之和; K_i^k 为未知整数周数 $K_i^k = 1, 2, \dots$; λ 为雷达波长; R 为雷达到地面点的距离; θ 为雷达波视角.

为减弱大气延迟等空间相关噪声的干扰,构建 PS 点集的 Delaunay 三角网,并根据式(1)求每条边两顶点的邻域差分得:

$$\Delta\phi_{ij}^k = C_h \cdot B_{\perp}^k \cdot \nabla \Delta h_{ij} + C_v \cdot T^k \cdot \Delta v_{ij} + \Delta\phi_{\text{res},ij}^k + 2\Delta K_{ij}^k \pi. \quad (2)$$

式(2)中: $\nabla \Delta h_{ij}$ 、 Δv_{ij} 和 $\Delta\phi_{\text{res},ij}^k$ 分别为邻域 PS 点 i 和 j 高程改正值之差、线性形变速率之差和残余相位之差; ΔK_{ij}^k 为未知整数周数. 对于式(2)而言,较小的高程改正值之差所导致的差分干涉相位梯度在长空间基线情况下也会超过一个周期,因此,不能利用对 $\Delta\phi_{ij}^k$ 求积分的方法完成对式(2)的解缠. 但如果知道了 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} 的值,并且条件 $|\Delta\phi_{\text{res},ij}^k| < \pi$ 成立,那么将 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} 导致的干涉相位梯度从 $\Delta\phi_{ij}^k$ 剔除后就可以很容易地利用常规解缠算法实现对 $\phi_{\text{res},i}^k$ 的解缠,进而求得非线性形变.

1.2 参数求解

由于 ΔK_{ij}^k 未知,无法采用最小二乘方法求 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} 的最优估值,因此, Ferretti 等^[7] 提出采用二维频谱分析的方法求解 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} . 得到 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} 的最优估值后,一方面,如果已知一 PS 点的高程改正值和线性形变速率,则以这个 PS 点为起算点,分别对 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} 求积分就可以得到其他 PS 点的 DEM 改正值和线性形变速率;另一方面,将 $\nabla \Delta h_{ij}$ 和 Δv_{ij} 导致的干涉相位梯度从 $\Delta\phi_{ij}^k$ 中剔除,并采用常规相位解缠算法进行解缠,就可得到解缠的残余相位 $[\phi_{\text{res},i}^k]^u$. 为了从 $[\phi_{\text{res},i}^k]^u$ 中分离出非线性形变,可考虑非线性形变、大气延迟和失相关噪声在时间和空间上的相关性,采用合理的滤波方法对 $[\phi_{\text{res},i}^k]^u$ 进行滤波,具体方法如下:

$$\phi_{\text{NL},i}^k = \{ [\phi_{\text{res},i}^k]^u - \{ [\phi_{\text{res},i}^k]^u \}_{\text{HP_Time}} \}_{\text{LP_Space}}. \quad (3)$$

式(3)中: $\phi_{\text{NL},i}^k$ 为 PS 点 i 在第 k 幅差分干涉图上的非线性形变相位; $\{ \cdot \}_{\text{HP_Time}}$ 和 $\{ \cdot \}_{\text{LP_Space}}$ 分别表示时间域上的高通滤波和空间域上的低通滤波. 由非线性

形变相位可得各 PS 点在不同时间段内的非线性形变量,将所得非线性形变量与前面求得的线性形变速率结合即可得到各 PS 点在不同时间段内的总形变量. 另外,采用滤波方法,还可从残余相位中分离出各 PS 点的大气延迟,具体参见文献[6-7],本文不再赘述.

2 先验模型选择影响分析

Impact analysis of priori model selection

当前,大多 PS 技术都采用本文前述过程进行参数的建模和解算,其成立的前提是假设被研究区域的形变主要是线性形变,即在建立观测方程时采用了线性先验模型 $T^k \cdot v_i$. 但当这个前提假设不成立,即被研究形变主要是非线性形变时,仍利用上述过程进行解算,其精度又如何呢? 这里采用如下模拟实验来说明这一问题. 设某一地区地表形变的运动形式为匀加速直线运动,其加速度分布如图 1. 该地区 DEM 改正值均值为 0 m, 标准差为 3 m 的高斯分布模型模拟.

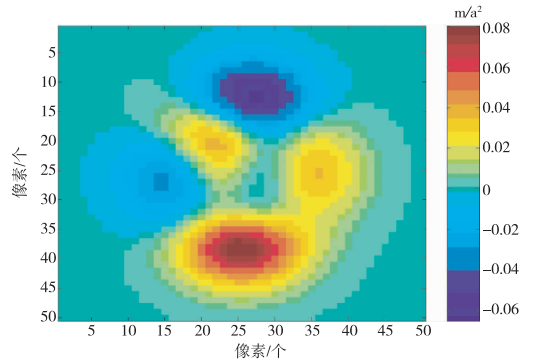


图 1 模拟加速度分布

Fig. 1 The distribution of simulated acceleration

表 1 盐城 SAR 数据干涉像对时空基线分布

Table 1 The temporal and geometric baselines of the SAR interferometric pairs over Yancheng

像对编号	垂直基线/m	时间基线/d
1	540	-630
2	454	-595
3	238	-350
4	528	-245
5	-483	-70
6	-194	35
7	-480	70
8	414	175
9	-92	770

利用表 1 所示时空基线参数将图 1 对应的形变场和模拟 DEM 改正值投影到 SAR 视线方向并进行相位缠绕,缠绕差分干涉相位如图 2. 由图 2 可以看出,9 幅差分干涉图的信噪比各不相同,这是由其不同的时空基线造成的. 时间基线越长形变量越大,由其导致的相位信息就越强;而垂直基线越长,DEM 改正值导致的噪声相位就越强. 因此,具有长时间基线和短垂直基线的干涉像对信噪比高、影像清晰,如像对 9;具有短时间基线和长垂直基线的干涉像对信噪比低、影像模糊,如像对 7.

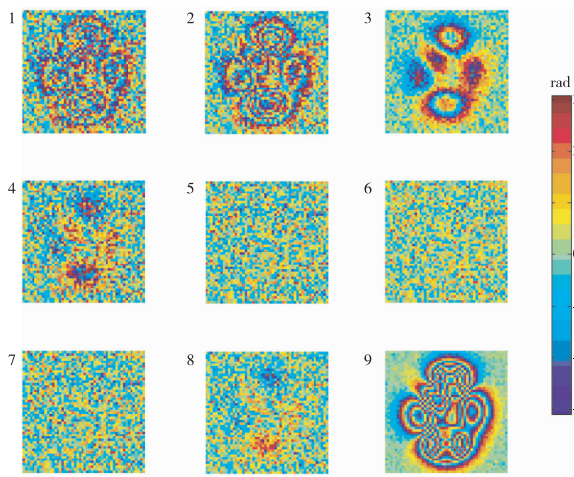


图 2 模拟缠绕差分干涉相位图

Fig. 2 The simulated wrapped differential interferogram

随机选取 20 个点以模拟 PS 点,构建 PS 点集的 Delaunay 三角网,结果如图 3. 对应每个 Delaunay 三角形边有 9 个邻域差分观测方程. 用线性模型(式(1))对缠绕差分干涉相位建模. 为了比较,另用一匀加速直线先验模型(非线性模型)对缠绕差分干涉相位建模,非线性模型如下:

$$\Delta\phi_{ij}^k = C_h \cdot B_{\perp}^k \cdot \nabla \Delta h_{ij} + 0.5 \cdot C_v \cdot \Delta a_{ij} \cdot (T^k)^2 + \Delta\phi_{res,ij}^k + 2\Delta K_{ij}^k \pi. \quad (4)$$

式(4)中, Δa_{ij} 为邻域 PS 点加速度之差,其他参数同式(1). 用二维频谱分析法分别对两个模型进行求解,得两组形变速率之差 Δv_{ij} 和 DEM 改正值之差 $\nabla \Delta h_{ij}$. 对两个模型计算结果进行比较,结果如图 4 和图 5 所示.

由图 4 和 5 可以看出,线性模型的误差很大,几乎得不到正确的结果,这使得其对应的残余相位较大,从而导致条件 $|\Delta\phi_{res,ij}^k| < \pi$ 得不到满足,使得后续的相位解缠无法进行. 而非线性模型得到了很好的结果,其所有邻域 PS 点高程改正值之差的

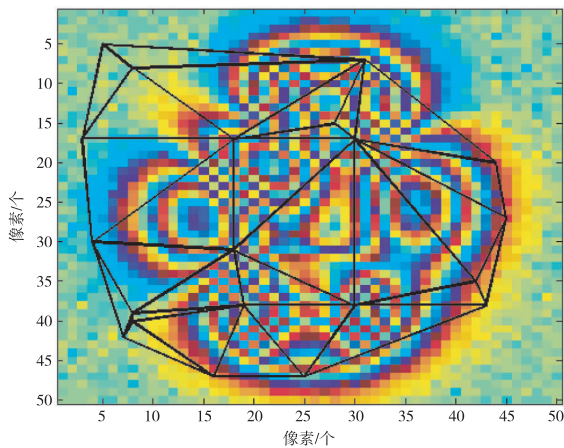


图 3 Delaunay 三角网

Fig. 3 Delaunay triangulation network

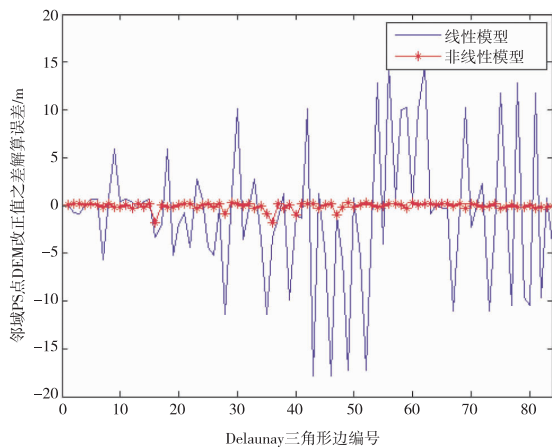


图 4 邻域 PS 点 DEM 改正值之差 ($\nabla \Delta h_{ij}$) 解算误差比较

Fig. 4 Error comparison of the differences between DEM corrections of two neighboring PS

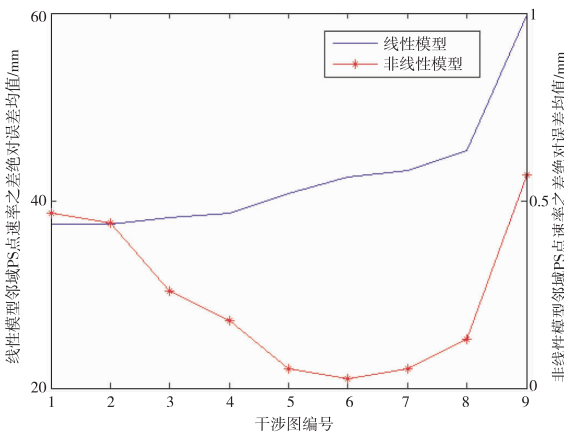


图 5 邻域 PS 点速率之差 (Δv_{ij}) 解算误差比较

Fig. 5 Error comparison of the differences between velocities of two neighboring PS

绝对误差均值和速率之差绝对误差均值分别达到了 0.23 m 和 0.24 mm, 这为残余相位的精确解缠提供了保证。

由以上模拟实验可以看出, 先验形变模型的正确选择对 PS 技术参数的精确求解至关重要. 在实际应用 PS 技术时, 应根据研究区域的具体情况采用合适的先验形变模型, 盲目的采用线性先验模型会极大地降低参数解算精度, 甚至得到错误的结果. 高时间分辨率的 GPS 数据可以较为有效地刻画区域地表运动的基本形式, 在被研究区布设有 GPS 时, 可以先对被研究区域内的 GPS 数据进行分析, 得到被研究区域地表运动的先验模型, 再将这一先验模型引入 PS 处理中, 从而提高 PS 测量精度。

3 利用 GPS 改善 PS 技术测量精度探讨

Discussions on using GPS to further improve the PS-DInSAR accuracy

除利用 GPS 确定先验模型外, 还可以在以下几方面利用 GPS 数据提供的信息进一步改善 PS 技术的精度。

1) 目前大部分 PS 解算处理软件都要用到时空滤波技术来分离非线性形变和大气延迟, 而时空滤波的精度在一定程度上取决于对被滤波量时空特性的了解, 如非线性形变和大气延迟的时空相关距离. 因此, 可以利用 GPS 数据对被滤波量的时空特性进行分析, 从而更加精确地进行时空滤波。

2) PS 技术获得的形变量仍是 SAR 视线方向上的一维形变量, 因此, 可以利用参考文献[15]中给出的 GPS 和 DInSAR 综合方法将其分解到三维方向, 从而得到真正意义上的地面沉降. 但与文献[15]在 GPS 和 DInSAR 观测值定权过程中仅仅考虑观测精度不同, 对 PS 技术需进一步考虑 PS 点的可靠性, 如可以将总体相位相干系数作为定权的一个指标, 使越可能是 PS 的点获得越大的权。

3) 由于大气延迟与轨道不确定性误差对干涉图的影响具有相同的频谱特性, 因此, 目前大部分 PS 解算处理软件都无法对二者进行有效地分离, 而 GPS 数据的引入为二者的分离提供了可能. 可以利用离散的高精度的 GPS 数据对 SAR 卫星轨道误差进行估计, 从而将大气延迟与轨道误差分离, 为利用 PS 技术进行大气研究提供条件; 同时, 还可以将分离出的大气延迟与 GPS 气象技术获得的大气延迟进行比较, 以验证 PS 计算过程的正确性。

4 结束语

Concluding remarks

本文研究了 PS-DInSAR 技术观测方程的建立和参数求解方法, 用实验验证了先验模型的正确选择对 PS 技术参数精确求解的重要影响. 指出在 PS 技术中引入 GPS 信息, 一方面, 可以确定先验模型、获取非线性形变和大气延迟的时空分布特性, 从而在一定程度上提高 PS 技术参数解算精度; 另一方面, 可以辅助 PS 技术实现视线向形变分解, 从而获得真正意义上的地面沉降. 此外, 利用 GPS 信息, 还可以将 PS 技术获得的大气和轨道误差分离, 为利用 PS 技术研究大气提供条件, 拓展 PS 技术的应用范围. 可见, 综合 GPS 与 PS-DInSAR 技术, 将突破单一技术应用的局限, 发挥其各自优势, 必将在地面沉降监测等领域展现出巨大的潜力。

参考文献

References

- [1] Massonnet D, Holzer T, Vadon H. Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry [J]. *Geophysical Research Letter*, 1997, 24 (8): 901-904
- [2] Hoffmann J, Zebker H A, Galloway D L, et al. Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(6): 1551-1566
- [3] Raucoules D, Maisons C, Carnec C, et al. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France): Comparison with ground-based measurement [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 88(4): 468-478
- [4] 吴立新, 高均海, 葛大庆, 等. 工矿区地表沉降 D-InSAR 监测试验研究 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2005, 126 (8): 778-782
WU Lixin, GAO Junhai, GE Daqing, et al. Experimental study on surface subsidence monitoring with D-InSAR in mining area [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2005, 126 (8): 778-782
- [5] 王润峰, 赵英志. 基于 D-InSAR 技术进行煤矿开采与环境灾害监测的系统建设方案 [J]. *测绘通报*, 2010(7): 30-32
WANG Runfeng, ZHAO Yingzhi. A system for coal mining and land environment and disaster monitoring based on D-InSAR [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2010(7): 30-32
- [6] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38 (5): 2202-2212
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20
- [8] Lyons S, Sandwell D. Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (B1), 2047, doi:10.1029/2002JB001831
- [9] 程滔, 单新建. CR/PS 干涉测量联合解算算法研究 [J]. *地震*,

- 2007,27(2):64-71
CHENG Tao, SHAN Xinjian. Research on algorithm of CRInSAR and PSInSAR combined calculation [J]. Earthquake, 2007, 27(2):64-71
- [10] Hooper A, Zebker H, 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, doi:10.1029/2004GL021737
- [11] Hooper A. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation[D]. Stanford, California; Stanford University, 2006
- [12] Colesanti C, Ferretti A, Prati C, et al. Monitoring landslides and tectonic motions with the permanent scatterers technique[J]. Engineering Geology, 2003, 68(1/2):3-14
- [13] Colesanti C, Ferretti A, Novali F, et al. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the permanent scatterers technique[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7):1685-1701
- [14] 刘国祥, 陈强, 丁晓利. 基于雷达干涉永久散射体网络探测地表形变的算法与实验结果[J]. 测绘学报, 2007, 36(1):13-18
LIU Guoxiang, CHEN Qiang, DING Xiaoli. Detecting ground deformation with permanent-scatterer network in radar interferometry: Algorithm and testing results [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2007, 36(1):13-18
- [15] 罗海滨, 何秀凤, 刘焱雄. 利用 DInSAR 和 GPS 综合方法估计地表 3 维形变速率[J]. 测绘学报, 2008, 37(2):168-171
LUO Haibin, HE Xiufeng, LIU Yanxiong. Estimation of three-dimensional surface motion velocities using integration of DInSAR and GPS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008, 37(2):168-171

Impact analysis of priori model selection on parameters calculation accuracy in PS-DInSAR

LUO Haibin¹ HE Xiufeng²

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Institute of Satellite Navigation & Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098

Abstract The method of establishing and solving of observation equation in permanent scatterers differential synthetic aperture radar interferometry (PS-DInSAR) technique was studied. The important impact of priori model selection on the calculation accuracy of parameters was analyzed with a simulated test. Then, the concept of selecting priori model aided by GPS is pointed out. At last, the measures using GPS to further improve the PS-DInSAR accuracy are discussed, and some useful conclusions are given.

Key words PS-DInSAR; GPS; priori model; accuracy analysis