

InSAR/GPS 集成技术在常州—无锡地面沉降监测中的应用研究

于 军^{1,2*} 李振洪³ 武健强⁴

1. 江苏省地质调查研究院博士后科研工作站, 南京 210018; 2. 吉林大学博士后科研流动站, 长春 130026;

3. Department of Geographical and Earth Science, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom;

4. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018

摘要 精确监测地表形变是地面沉降防控工作中的重要内容,也是多年来该研究领域面临的难题。GPS和InSAR是近年来迅速发展起来的两种空间大地测量监测手段,在区域地表形变监测方面都显示出了各自的优势及良好的应用前景。文中根据二者技术特点,分析了InSAR/GPS集成技术监测地面沉降的方案可行性,并以常州—无锡地区为例开展了同步观测试验,利用GPS数据来建立大气改正模型,从而削弱InSAR干涉图像中大气影响,提高了InSAR形变量监测精度。

关键词 地面沉降 GPS 合成孔径雷达干涉测量 常州—无锡地区

过量开采地下水引起的地面沉降现象已成为目前长江三角洲平原区主要的地质灾害,其规模之大、持续影响时间之长、所造成的社会经济损失之巨,已引起社会广泛关注。常州—无锡地区位于长江三角洲腹地,地面沉降灾害最为严重,40多年来的累计最大沉降量近3 m。地面沉降是一种缓变型形变,年沉降量一般在几毫米至几十毫米不等,为准确掌握地面沉降的空间分布规律,过去采用的监测方法主要有水准测量和GPS测量,而在90年代发展起来并日臻成熟的InSAR技术近年来地面沉降监测领域也得到了应用,并取得了初步成效。从技术特点分析,GPS与InSAR两种方法在监测地面沉降方面都各自具有明显的优势,并展现出良好的应用前景。本文以常州—无锡地区为对象,研究探讨InSAR/GPS集成技术在地面沉降监测中的可行性。

1 GPS与InSAR集成监测原理

合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术利用雷达

信号的强度和相位信息获取地球表面的三维空间信息。雷达信号具有穿透云雨、全天候、高精度、大范围等特点,采用InSAR可以获取大面积地面点的高程信息,而其差分干涉测量(Differential InSAR/DInSAR)技术,可用于探测亚厘米级的地表形变^[1,2]。全球定位系统(GPS)和InSAR两种技术在其技术特点上具有很好的互补性^[3,4]:一方面,GPS是理想的点定位系统,相对定位精度达到 10^{-8} — 10^{-9} ,可以获得高精度的三维绝对坐标,同时,由于GPS可以精确地测定大气延迟量,GPS数据无疑可以用来减弱大气(尤其是水汽部分)对InSAR干涉影像的影响;另一方面,InSAR提供整个区域面上的连续信息,对高程信息非常敏感,但是,其仅提供相对坐标,而且时间分辨率较低,只能提供瞬息测量。GPS和InSAR的集成,可取长补短,同时保证时间和空间的高分辨率。

2 GPS选点与同步观测

图1是对由42幅升轨039 ENVISAT ASAR卫

2009-05-18 收稿, 2009-06-15 收修改稿

* E-mail: jingLingLingdaling@gmail.com

星影像生成的 336 幅相干图像取平均而成, 时间跨度为 2003 年 11 月 27 日至 2008 年 10 月 16 日, 约为 5 年. 黑色区域表示无任何相干性(即为 0), 白色区域表示具有中等相干性(约为 0.5), 而红色区域表示强相干(即为 1). 显然, 地物在 SAR 图像上的强相干性为进一步研究提供了条件. 为了测得 InSAR 观测中的大气延迟量影响, 需要有配套的 GPS 网, 本次研究工作在原有 GPS CORS 网基础上适当补建了 GPS 测站, 共形成 9 个控制点. 所建测站位置均设计在相干像素上, 同时满足《全球定位系统测量规范》(GB/T 18314-2001)要求, 如: 远离大功率无线电发射源, 视野较开阔, 易于安装接收设备, 视场周围 15°以上无障碍物且地面基础稳定, 避免点位周围有大面积水域和不利于卫星信号接收的物体.

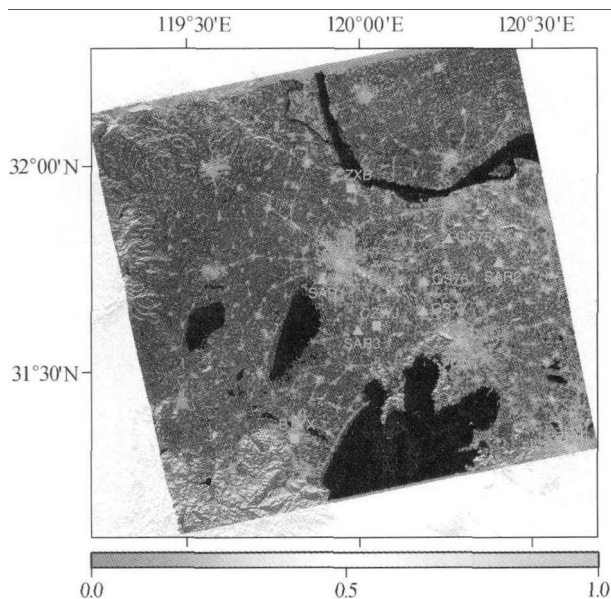


图 1 GPS 同步观测选点设计图

红色正方形为 GPS CORS 站, 红色三角形为新增 GPS 监测点

GPS 两期观测分别于 2008 年 3 月 20 日和 2008 年 10 月 16 日与 ENVISAT 卫星升轨 039 进行同步观测(卫星在北京时间 21:50 左右过境). 观测时段为 24 h; 观测时间从北京时间 8:00 准时开始. 观测过程使用强制对中装置安置 GPS 接收机采集数据, 并仔细读取天线高. 最小卫星高度角的设置为 5°, 数据采样率为 30 s.

3 GPS 数据处理

数据处理使用 NASA(美国航空航天局)/JPL(喷气推进实验室)开发的高精度数据处理软件 GIPSY-OASIS II(版本 5.0), 提取对流层大气时延信息和精密测站坐标及沉降信息. 根据数据处理目的不同(提取测站精密坐标或者大气对流层延迟), 采用了两种不同策略来处理 GPS 数据.

3.1 精密测站坐标和形变量的提取

本试验中 GPS 同步观测时间较长, 数据质量好. 在估算测站坐标时本着精确可靠原则, 采用 10°截止高度角以上的所有卫星数据. 首先利用精密单点定位(precise point positioning/PPP)处理每个测站的数据^[5], 同时估计测站坐标、接收机钟误差和大气对流层延迟, 接着以估计得到的测站坐标为初始值. 以往的研究表明, 利用 GIPSY PPP 处理 24 h 的数据所获得的测站坐标可达厘米级精度, 此次设测站位置的中误差为 0.08 m, 并利用 PPP 重新估计测站坐标、接收机钟误差和大气对流层延迟, 然后联合同期的多个测站数据固定整周模糊度^[6]. 最后利用 JPL 提供的参数文件将各个测站坐标转换到 IGS05(由 GPS 数据定义的一个最新国际参考框架 ITRF2005)参考框架下, 由此提取出的各个测站精密坐标, 差分两期精密测站坐标即可求得各个测站的形变量. Hill 和 Blewitt (2006)^[7]利用 BARGEN CGPS 网络长达 3.8 年的数据, 对 GIPSY 与当前国际上另一个流行的高精度 GPS 数据处理软件——GAMIT 进行了比较, 其研究表明这两个软件处理结果东方向上相差仅为 0.06 mm/a, 北方向为 0.10 mm/a, 垂直方向为 0.23 mm/a. 这项研究也充分表明 GIPSY 系统处理误差很小, 完全可以用来处理长期连续 GPS 数据提取 >0.30 mm/a 的微小形变量; 另外, GIPSY 输出的正规误差(formal error)可较客观地表征其解的精密度(Hill 和 Blewitt, 2006). 本文处理得到的 GPS 结果为测站单天解, 其水平方向分量的正规误差约为 1 mm, 而垂直方向分量的约为 3—4 mm, 因此 GPS 测得的形变量的精密度约为 5 mm.

3.2 大气对流层延迟量的提取

大气对流层延迟量分为干延迟和湿延迟, 前者

的典型值为 2.3 m, 其可由地表压力数据计算而得, 如果地表压力的误差小于 0.4 hPa, 干延迟分量估值的精度可优于 1 mm. 相比较而言, 湿延迟分量要小得多, 从极地到赤道其值逐渐由 0 升至 30 cm 左右, 但湿延迟分量无论在时间上还是空间上变化都较大, 无法利用地表气象观测值来精确估计.

由于较低的卫星截止高度角有利于提取大气对流层延迟量(含干延迟和湿延迟), 试验采用了 7° 的卫星截止高度角来估算大气对流层延迟量. 测站高程与大气对流层延迟强相关, 真实的大气对流层延迟的变化可引起明显的测站高程的变化, 因此同时估计大气对流层延迟和测站高程可导致大气对流层延迟量估计值的不精确. 利用如下方法提取大气对流层延迟量:

(1) 首先利用精密单点定位(Zumberge 等, 1997^[5])同时估计每个测站的坐标、接收机钟误差和大气对流层(总)延迟量;

(2) 将测站的坐标固定为当天的最佳估计值(即当天的平均值), 利用 PPP 仅仅估计接收机钟误差和大气对流层(总)延迟量;

(3) 如果已知地表压力值, 则可精确地计算得到对流层干延迟分量; 相减大气对流层总延迟量与干延迟分量则可求得大气对流层湿延迟分量. 以往的研究表明: 上述方法提取的对流层湿延迟量的精度优于 6—8 mm^[8].

值得指出的是, 只有拥有精确的地表压力值才可精密地从对流层总延迟量中分离出湿延迟分量, 而本次没有采集(也没有必要采集)地表压力数据, 这是因为对 InSAR 干涉图像而言, 大气影响不仅包含湿延迟分量, 还包含干延迟分量, 利用 GPS 估计得到的对流层总延迟可以更好地削弱 InSAR 干涉图像的大气影响.

4 InSAR/GPS 集成数据处理

本实例采用的 InSAR/GPS 集成技术为基于地形的 GPS 扰动大气改正模型(GTTM)^[9,10]. 其关键性技术为: 利用空间结构函数(spatial structure function)构造既可表征大气扰动(湍流)的特性, 又可表征大气(尤其是水汽)与地形相关的特征的协方差矩阵, 进一步结合点位平面二维坐标和地表高程值确定最佳线性无偏估计(BLUE)的系数, 进而结

合 GPS 求得的大气延迟量(或大气延迟改正值)估计出工作区域任何一点的大气延迟量(或大气延迟改正值).

表 1 列出了 GIPSY 输出的与 ENVISAT ASAR 影像同步的 GPS 大气对流层总延迟量及其差值. 很明显, 2008 年 10 月 16 日(秋季)的大气对流层总延迟量比 2008 年 3 月 20 日(初春)要大 8.5—11.5 cm. 如图 2 所示, 西南部 BTYX 测站大气对流层延迟产值最小(8.87 cm), 往东北偏东方向逐渐变小, 在最东端的 SAR2 测站达到最大值(11.37 cm), 显示出了明显的梯度.

表 1 大气对流层延迟量及其差值

测站名	对流层总延迟量/cm		对流层延迟差值/cm
BTYX	238.03 ^{a)}	246.91 ^{b)}	8.87
CZWJ	235.65 ^{a)}	245.71 ^{b)}	10.06
CZXB	234.77 ^{a)}	244.82 ^{b)}	10.05
GS75	236.46 ^{a)}	246.87 ^{b)}	10.41
GS76	235.84 ^{a)}	246.65 ^{b)}	10.80
GS77	236.07 ^{a)}	247.06 ^{b)}	10.99
SAR1	237.28 ^{a)}	247.56 ^{b)}	10.28
SAR2	235.68 ^{a)}	247.04 ^{b)}	11.37
SAR3	236.53 ^{a)}	246.99 ^{b)}	10.46

a) 2008 年 3 月 20 日数据, b) 2008 年 10 月 16 日数据

图 3(a)为利用传统双轨(two-pass)差分 InSAR 生成的形变图像, 在图像的西部, 存在着很明显呈蓝色的信号, 经过 GTTM 大气改正后, 该信号被

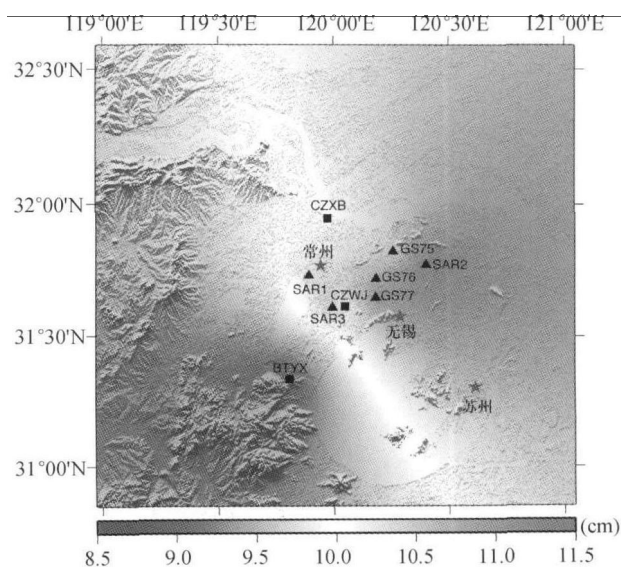


图 2 GTTM 大气延迟差分图像(20080320-20081016)

大幅度削弱(见图 3(b)), 表明这些信号为大气延迟; 在干涉图像的东北部, 改正前后都存在呈紫蓝色的信号, 由于其没有覆盖整个图像, 因此轨道误差的可能性不大(不能完全排除由于数据处理软件基线模型的不完善, 干涉图像中存在着一定量的轨道误差, 但就其本身无法单独解释区域性的信号),

最大的可能性是西南至东北方向的大气对流层的梯度所引起, 只是由于该区域没有有效的 GPS 测站, 无法很好地估计并加以削弱. 在 SAR2 和 SAR3 测站附近, 大气改正前后都存在明显的小范围的沉降区域(尽管沉降量大小有了变化), 表明这些信号为真正的形变信号.

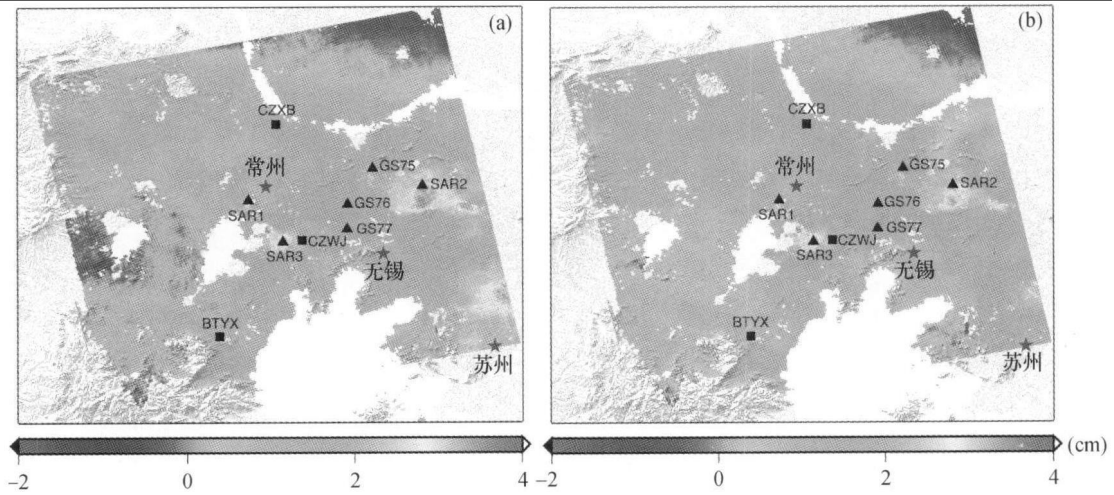


图 3 干涉图像(20080320-20081016)

正值表示地表远离卫星(地面沉降), 负值表示地表移向卫星(地面反弹)

5 精度评定

本实例采用了不同处理模式提取 GPS 形变量和大气对流层延迟, 在一定程度上可以认为形变量与大气对流层延迟估计值相互独立, 因此可以利用 GPS 形变量来评定 GTTM 大气改正的精度.

由于 InSAR 干涉图像仅提供卫星到地球表面的距离方向上一维的形变量, 为了比较 InSAR 和 GPS 的结果, 可利用下式将 GPS 三维形变量投影到卫星到地球表面的距离向上^[11]:

$$\rho_{LOS} = - [(D_N \sin \phi - D_E \cos \phi) \sin \lambda + D_U \cos \lambda] \quad (1)$$

其中 D_N , D_E , 和 D_U 分别为北方向, 东方向和垂直方向的地表形变量; ϕ 为卫星飞行方向的方位角, 从正北方向开始顺时针旋转为正(ENVISAT 升轨为 -12° 左右); λ 为雷达信号的入射角(ENVISAT 约为 23°). 因为习惯上采用正值表示地表远离卫星, 负值表示地表移向卫星, (1)式所示在等号右式最

前面有个负号.

依据(1)式, 可求得 GPS 三维形变向量在卫星至地表方向上的投影值(即距离变化)及其误差(约为 5.0 mm). 图 4 给出了各个 GPS 测站 GTTM 大

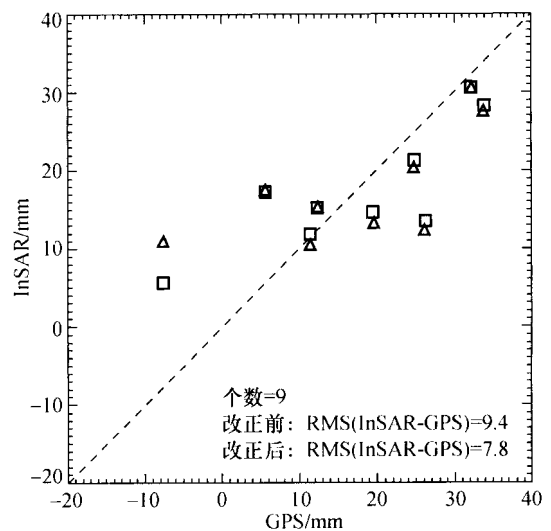


图 4 InSAR/GPS 集成结果与 GPS 资料的比较

三角形为改正前 InSAR 的形变量, 正方形为经 GTTM 大气改正后 InSAR 的结果

气改正前后 InSAR 与 GPS 测得的形变量的相关性分析结果。大气改正前, InSAR 与 GPS 结果的差值中误差为 9.4 mm, 考虑到 GPS 距离向变化的中误差(约为 5.0 mm), 可求得大气改正前 InSAR 形变量的精度为 8.0 mm, 这说明这幅干涉图像本身受大气影响比较小, 这与表 1 中显示的 GPS 大气延迟总量的均衡性(除西南部 BTYX 测站外, 其他测站对流层延迟差值都在 100 mm 左右)一致, 主要是因为工作区域在初春和中秋前后大气比较稳定有关。尽管如此, 经 GTTM 大气改正后, InSAR 与 GPS 结果的差值中误差将为 7.8 mm, 考虑到 GPS 距离向变化的中误差, 大气改正后 InSAR 形变量的精度提高到 6.0 mm。

6 结论

为了评定 InSAR/GPS 集成技术用于常州—无锡地区地面沉降监测的适宜性, 进行了两期 GPS 同步观测, 第一期在初春季节—2008 年 3 月 20 日; 第二期在秋末时分—2008 年 10 月 16 日。实例证明, 大气改正前 InSAR 形变量的精度为 8.0 mm, 经 GTTM 大气改正后, InSAR 形变量的精度提高到 6.0 mm。

GTTM 可削弱与地形相关的较短波段的大气水汽影响(如图 3 实验区域的西南部), 这是缺乏大气水汽物理属性的数学内插模型(如曲面和 kriging)所无法比拟的, 其自然是 GTTM 的主要特点。毋庸讳言, GTTM 无法除去地形平缓而又无 GPS 测站的地区的大气影响(如图 3 的东北部), 这说明了 GPS 测站分布对 GTTM 改正效果的影响, 合理地选取 GPS 同期观测测站无疑可提高 InSAR/GPS 集成技术的工作成效。

致谢 本文所用部分 GPS CORS 数据由江苏省测绘局提供, 在此表示感谢。

参 考 文 献

1 Massonnet D, Feigl KL. Radar interferometry and its application

- to changes in the Earth's surface. *Rev Geophys*, 1998, 36: 441—500
- 2 Simons M, Rosen PA. Interferometric synthetic aperture radar geodesy. In: Schubert, G, ed. *Treatise on Geophysics*, 2007
- 3 Williams S, Bock Y, Fang P. Integrated satellite interferometry: Tropospheric noise, GPS estimates and implications for interferometric synthetic aperture radar products. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103: 27, 51—27, 68
- 4 Li Z, et al. Successful application of GPS-derived water vapor to the improvement of the estimation of surface deformation from InSAR. *ION GNSS 2005*, Long Beach, California, September, 2005, 13—16
- 5 Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 5005—5017
- 6 Blewitt G. Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B8): 10187—10283
- 7 Hill E, Blewitt G. Testing for fault activity at Yucca Mountain, Nevada, using independent GPS results from the BARGEN network. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L14302, doi: 14310. 11029/12006GL026140R
- 8 Li Z, et al. Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D20), 4651, doi: 4610. 1029/2003JD003372
- 9 Li Z. Correction of atmospheric water vapour effects on repeat-pass SAR interferometry using GPS, MODIS and MERIS data, 2005, PhD thesis, University College London, London
- 10 Li Z, et al. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 111 (B2), B02404, doi: 02410. 01029/02005JB003711
- 11 Fialko Y, Simons M, Agnew D. The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28 (16): 3063—3066