

苏州地区地面沉降的星载合成孔径 雷达差分干涉测量监测*

王超 张红 刘智

中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学开放实验室, 北京 100101;

陈锁忠 闫国年

南京师范大学地理系, 南京 210097

摘要 利用欧洲空间局 ERS-1/2 获取的苏州地区 1993~2000 年 SAR 数据, 通过差分干涉测量处理, 得到 1993~1995, 1995~1998 和 1998~2000 年苏州市地面沉降场测量值. 地面水准测量数据的验证分析表明, 差分干涉测量值与水准测量值的相关度达 0.943, 标准误差均值为 0.1706, 雷达差分干涉测量精度可达 5mm(以水准测量代表地面形变的真实情况). 文中以 7 个水准测量基准点为例, 分析上述 3 个时段的地面沉降速率, 其总体趋势反映苏州市地面沉降速率趋于减缓, 说明近年苏州的地面沉降得到了有效的控制. 研究结果表明, SAR 差分干涉测量技术进行城市地面沉降方面监测和时空演化特征研究具有很大的优势, 同时可用于其他类型城市地质灾害的监测.

关键词 合成孔径雷达 雷达差分干涉测量 城市 地面沉降

随着国民经济的持续发展, 我国城镇化建设不断加快, 尤其是经济发达的沿海地区, 如长江三角洲地区, 城市化水平已达 40%. 随着城市建设的发展, 人类工程经济活动引起日益严重的城市问题. 其中, 城市地面沉降成为人们日益关注的问题. 地下水超量开采是引起城市地面沉降的主要原因. 长江下游的苏(州)、(无)锡、常(州)地区已形成一较大范围的沉降漏斗, 沉降速率超过 10 mm/a. 直接影响区域经济的可持续发展并威胁人民的生命安全.

地面沉降测量的常规方法主要是精细测量和网站观测. 近年来全球定位系统(GPS)和倾斜仪(tilt-meter)也得以应用. 传统的精细测量和网站测量主要有如下问题: (1) 需在有限的基准点位置测量高程变化; (2) 需要进行大量的观测以确定沉降分布; (3) 需要亲临测区; (4) 通常费用高. 因此要进行持续长久的大规模监测仍然存在一定的困难.

20 世纪 90 年代以来, 随着一系列星载合成孔

径雷达(SAR)的升空, 雷达遥感成为研究热点. 特别是 SAR 干涉测量技术(InSAR), 充分利用获取信号的相位信息, 能够获取高精度的地表三维信息^[1,2]. 近年来发展起来的雷达差分干涉测量技术(D-InSAR), 因其独特的成像特点, 能够全天候获取大面积的、高精度(mm 级)的地表变化信息, 已在环境变化监测和军事侦察等方面显示其巨大威力^[3,4]. 近年来, 随着 D-InSAR 研究的不断深入, 许多科学家开始利用 D-InSAR 技术进行城市地面沉降监测的研究工作, 并取得了很好的成果, 如墨西哥的墨西哥城、意大利的博洛尼亚和那波利、法国的巴黎, 美国的拉斯维加斯等城市的监测研究^[5~10]. D-InSAR 技术获取的变化监测精度可达到 mm 级, 所测量距离向的变化是一定面积的空间平均的变化估算值, 可以给出整个区域场的沉降趋势, 而非传统测量离散点的观测. 因此, 与常规的测量方法相比, D-InSAR 监测城市地面沉降具有大面积、快速、准确的优势.

2001-09-10 收稿, 2001-11-12 收修改稿

* 中国科学院知识创新工程重大方向项目(批准号: KZCX2-309)、国家“八六三”计划(批准号: 863-308-14-01(7))和欧洲遥感卫星研究计划(ERS AO3-374)资助项目

E-mail: cwang@public.bta.net.cn

本研究以欧洲空间局(ESA)欧洲遥感卫星 1/2 号(ERS-1/2)1993 年以来获取的雷达数据为信息源,选取长江下游苏州地区为试验区,利用 D-InSAR 技术研究苏州城市地面沉降,获取了苏州市 1993~2000 年的地面垂直形变量及沉降速率,测量结果得到了地面水准测量数据的验证.

1 雷达差分干涉测量基本原理

雷达差分干涉测量几何示意图 1^[3]. 如果在获取干涉图像对期间,地表发生形变,则有

$$l_2 = l_1 + D - B, \quad (1)$$

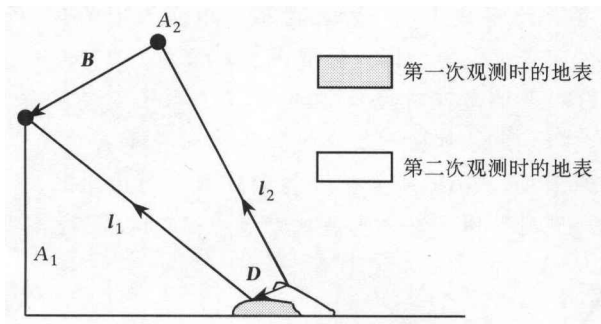


图1 雷达干涉测量几何示意图

其中 l_i 是视线矢量,即第 i 幅天线与目标物之间的矢量, D 表示在观测期间地表的位移矢量, B 为两幅天线的间距矢量,则干涉相位 ϕ 表示为

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (\langle l_1 + D - B, l_1 + D - B \rangle^{1/2} - \rho_1), \quad (2)$$

λ 为雷达波长, $\langle \rangle$ 表示点乘, ρ_1 表示第一副天线与目标物之间的距离. 对于星载系统来说,一般基线距都 < 1 km, 地表形变量一般在 m 级范围,而 ρ_1 为 600~800 km, 也就是说,上式中的 $|B|$, $|D|$ 和 $|\langle B, D \rangle|$ 都远小于 ρ_1 , 则(2)式可以表示为

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (-\langle l_1, B \rangle + \langle l_1, D \rangle). \quad (3)$$

从上式可以看出干涉得到的相位是由两部分组成:地形相位 ϕ_t 和地表位移 ϕ_d 造成的相位

$$\phi = \phi_t + \phi_d,$$

$$\phi_t = -\frac{4\pi}{\lambda} \langle l_1, B \rangle, \phi_d = -\frac{4\pi}{\lambda} \langle l_1, D \rangle. \quad (4)$$

(4)式通常表示为

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda} B \cos(\theta_0 - \alpha) \frac{h}{\rho_0 \sin \theta_0} + \frac{4\pi}{\lambda} \delta \rho_d, \quad (5)$$

其中, α 为基线与水平参考面的夹角, θ_0 是常数高程参考面的视角, ρ_0 是雷达与常数高程参考面之间的距离, $\delta \rho_d$ 是视线向的地表形变量, h 是基于参考面的地形高度.

由(5)式可知,雷达差分干涉相位的测量值(等号左边项),消除地形因素的影响(即等号右边第一项),即可求出雷达视线向的地表形变信息. 一般有两种方法消除相位的地形因素影响:一种是利用已有的 DEM 数据,称之为“二轨法”^[3];一种是利用其他的干涉影像对生成 DEM,称之为“多轨法”^[4]. 具体采用何种方法获取 DEM 数据主要取决于地表运动的特征(爆发性的或缓慢持久的)、成像特征(基线距和时间间隔)以及数据的可获取性等.

从(5)式可看出,相位对地形变化的敏感度要远高于对地形本身. 对于 ERS-1/2 SAR 系统来说, $\lambda = 5.6$ cm, $\rho_1 \approx 830$ km, 一般应用于干涉测量的基线距 B 都小于 200 m, 则 $\delta \rho_d = 2.8$ cm 将会引起一个 2π 的变化,而必须地形高程 $h \geq 4500$ cm, 才会产生相同的效果. 因此,理论上雷达差分干涉测量精度可达 mm 级.

2 实验区与实验数据

2.1 实验区

截止到 1995 年底的资料显示,苏州市沉降中心的累积最大沉降量为 1.45 m. 苏锡常地区地质构造及工程地质条件复杂,基岩面起伏不平,高低落差大,松散地层的厚度与结构变化很大,地面沉降易产生不均匀性差异沉降,导致发生地裂缝和地面塌陷灾害. 因此在苏锡常地区因地面沉降所造成的破坏性相对其他城市要更大,灾害也更严重. 因此,本研究选取苏州地区作为实验研究区.

2.2 实验数据与处理

欧洲遥感卫星 1 号(ERS-1)于 1991 年 7 月发射,其上携带了 C 波段 VV 极化雷达,1995 年 4 月,欧洲空间局(ESA)发射了与 ERS-1 相同的欧洲遥感卫星 2 号(ERS-2),两颗卫星呈串行模式(tandem mode),即轨道覆盖周期相隔 1 d. 本研究共收集了从 1993 年 2 月到 2000 年 2 月间的 11 景 ERS-1/2 SAR SLC 影像数据. 数据的中心经纬度为 31.79°N , 120.71°E ,多数影像的覆盖区为 $106 \text{ km} \times 38 \text{ km}$, 完全覆盖整个苏州市.

基于成像参数和时间间隔, 根据不同的应用选取了7个干涉图像对, 具体的参数见表1.

表1 干涉图像对的时间和基线参数

图像对编号	主图像卫星-轨道号	主图像成像时间	辅图像卫星-轨道号	辅图像成像时间	干涉图像对时间间隔/d	垂直基线距/m
1	E1-23309	1995-12-30	E2-3636	1995-12-31	1	-282
2	E1-23309	1995-12-30	E1-8436	1993-02-25	-1038	37
3	E1-23309	1995-12-30	E1-8937	1993-04-01	-1002	-11
4	E1-23309	1995-12-30	E1-24311	1996-03-09	70	-20
5	E2-3636	1995-12-31	E2-15660	1998-04-19	840	-48
6	E2-18165	1998-10-11	E2-15660	1998-04-19	-175	-199
7	E2-18165	1998-10-11	E2-25179	2000-02-13	490	30

我们所采用的差分干涉法是三轨法, 利用一个影像对生成DEM, 从其他的干涉纹图消除DEM影响, 得到形变信息. 1995-12-30数据与1995-12-31数据是ERS-1/2特有的串行(tandem mode)模式, 时间间隔为1d, 相干性好, 我们将其用于获取DEM. 表1中, 编号为2, 5和7三个干涉影像对用于研究苏州地区的地面沉降情况. D-InSAR数据处理过程包括: SAR影像对的同配准、干涉纹图的形成、去除平地 and 计算相干、相位解缠以及差分干涉处理. 具体步骤见文献[11].

3 雷达差分干涉测量结果与验证

3.1 雷达差分干涉测量结果

通过处理表1编号1, 2数据, 获取苏州地区1993~1995年地表沉降的雷达差分干涉纹图(图版I-A), 图中色彩代表雷达视向地面形变量(一个色周代表2.8cm的变化), 亮度代表雷达后向散射强度. 由图版I-A可以看出, 沉降主要分布于苏州市城区内. 图版I-B反映了苏州市城区的地面沉降情况.

采用同样方法对表1编号5数据进行处理, 获取1995~1998年的测量值(图版I-C), 对编号7数据的处理, 获取了1998~2000年的测量值(图版I-D), 这样, 我们得到1993~2000年苏州市的地面沉降雷达差分干涉测量结果.

3.2 测量结果验证

研究中我们使用由苏州市有关部门提供的1991~1994年苏州市18个三级水准点和23个四级水准点的水准测量数据进行验证对比. 我们从1993~1995年雷达差分干涉纹图中确定水准点位置, 并提取干涉测量值. 表2是1993~1995年InSAR测量值与水准测量值的比较结果, 其中水准测量值由

1991年和1994年的水准资料插值得到, 这里假定这段时间沉降速率不变.

表2 1993~1995年苏州地区地面沉降的InSAR测量值与水准测量值的比较

水准点	InSAR 值/m	水准值/m	水准点	InSAR 值/m	水准值/m
IV1	0.006872	0.007	III1	0.0243299	0.023
IV2	0.058380	0.032	III2	0.0458992	0.040
IV5	0.032323	0.032	III3	0.0663299	0.066
IV9	0.128876	0.111	III6	0.0411693	0.042
IV11	0.021833	0.033	III7	0.0512087	0.038
IV13	0.125420	0.133	III8	0.0337761	0.032
IV16	0.040143	0.043	III9	0.0330612	0.034
IV17	0.033711	0.035	III13	0.0337731	0.034
IV21	0.055839	0.030	III16	0.0320103	0.030
IV23	0.038751	0.038	III17	0.0337681	0.034
IV28	0.029523	0.031	III19	0.0350043	0.038
IV31	0.036157	0.036	III20	0.0421474	0.034
IV36	0.1045161	0.026	III21	0.0467762	0.034
IV37	0.0425067	0.041	—	—	—
IV38	0.0346874	0.034	—	—	—

由表2可以看出, 差分干涉测量值与水准测量值保持很高的一致性, 尽管一些差分干涉测量值要高于水准测量值, 这主要是由于基线距误差引起的, 今后的研究应尽量在无运动地区选取控制点.

对差分干涉测量值与水准测量值进行统计分析(表3, 4), 两者的相关度达0.943, 标准误差均值为0.1706423. 两种测量值样本对的T检验结果见表4, 如果以水准测量代表地面形变的真实情况, 则雷达差分干涉测量精度可达5mm(样本对的差异均值+标准误差均值).

表3 1993~1995年差分干涉测量与水准测量数据统计特征

参量	干涉测量值	水准测量值
样本点	27	27
均值	4.46020807	4.130
标准偏差	2.6532455	2.519
标准误差均值	0.5106173	0.485

表4 1993~1995年差分干涉测量与水准测量数据样本对T检验

相关度	样本对的差异				T	显著度
	均值	标准偏差	标准误差均值	95%差异置信区间		
0.943	0.33065	0.88668	0.17064	低 -2.0×10^{-2} 高 0.6814114	1.938	0.064

3.3 地面沉降速率

通过选取7个水准测量基准点,对1993-02-25~1995-12-30,1995-12-31~1998-04-19,1998-10-11~2000-02-13期间的地表形变干涉测量值进行分析比较,可以计算出相应时段地面沉降速率(图2)。由图2可以看出,最大沉降速率可达8 cm/a,1993~1995年间多数测点速率在1 cm/a左右(平均1.46 cm/a),1998~2000年间所有统计测点速率都小于1 cm/a,反映从1993年到2000年苏州市的沉降速率逐渐变缓。这表明近年来在加强城市用水管理的情况下,苏州的地面沉降得到了有效的控制。

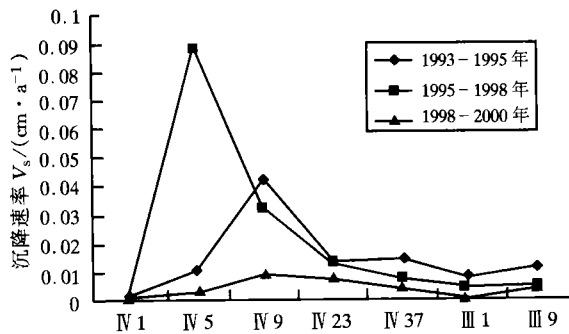


图2 苏州市地面沉降速率年度变化图

4 结论

本研究利用欧洲空间局ERS-1/2获取的苏州地区1993~2000年SAR数据,通过差分干涉测量处理,得到1993~1995,1995~1998和1998~2000年苏州市地面沉降场测量值。地面水准测量数据的验证分析表明,差分干涉测量值与水准测量值的相关度达0.943,标准误差均值为0.1706423。雷达差分干涉测量精度可达5 mm(以水准测量代表地面形变的真实情况)。

以7个水准测量基准点为例,分析了1993~1995,1995~1998,1998~2000年地面沉降速率,总体趋势反映苏州市地面沉降速率趋于减缓,说明近年苏州的地面沉降得到了有效的控制。

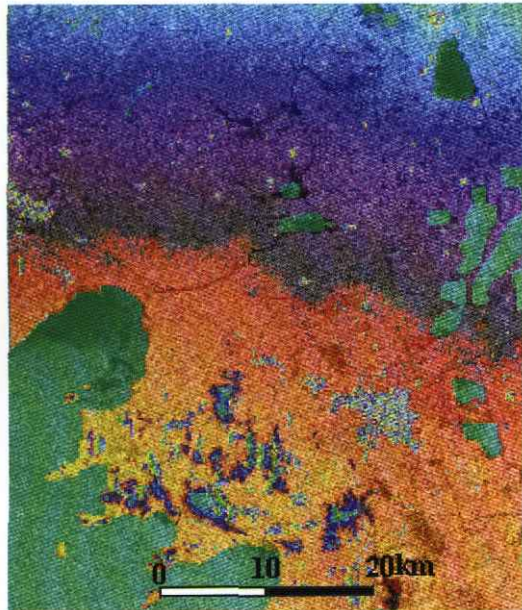
研究表明,D-InSAR技术在进行城市地面沉降方面具有很大的优势。如果再结合水准测量和GPS测量,进行准确地空间定位,将有利于进行长期的大范围的高密度的变化监测。我国目前很多地

区都出现了严重的地面沉降问题,严重地影响了国民经济建设的各个方面。通过D-InSAR技术,不仅可以进行沉降监测,服务城市建设,同时还可以对地面控制点网的设计进行优化,指导水文地质数据的采集工作。结合其他的水文地质信息,深入了解地面沉降的机理本研究成果也可用于城市活动断裂等其他城市地质灾害的监测。

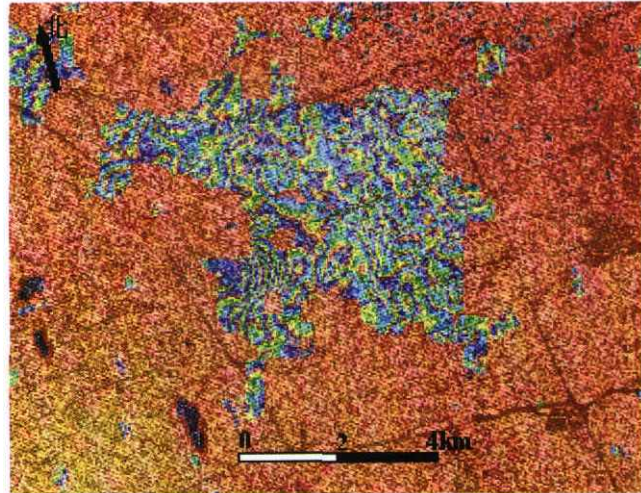
致谢 项目工作中得到了徐冠华院士、国家“八六三”计划信息获取与处理主题专家组组长郭华东研究员、苏州市勘察测绘院黄翔院长的关心和支持以及课题组其他成员的帮助,在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

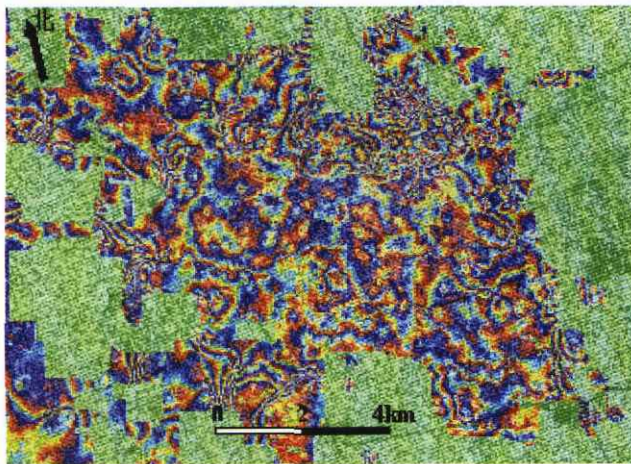
- 1 王超. 利用航天飞机成像雷达干涉数据提取数字高程模型. 遥感学报, 1997, 1(1): 46
- 2 Paul A R, et al. Synthetic aperture radar interferometry. Proceedings of IEEE, 88(3): 333
- 3 Massonnet D, et al. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441
- 4 王超,等. 张北-尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量. 科学通报, 2000, 45(23): 2550
- 5 Massonnet D, et al. Land subsidence caused by the East Mesa geothermal field, California, observed using SAR interferometry. Geophys Res Lett, 1997, 24(8): 901
- 6 Eric J F, et al. Rapid subsidence over oil fields measured by SAR interferometry. Geophys Res Lett, 1998, 25(17): 3215
- 7 Carnec C, et al. Monitoring and modeling land subsidence at the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, using SAR interferometry. Geophys Res Lett, 1999, 26(6): 1211
- 8 Falk A, et al. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. Geology, 1999, 27(6): 483
- 9 Avallone A, et al. Subsidence of Campi Flegrei (Italy) detected by SAR interferometry. Geophys Res Lett, 1999, 26(15): 2303
- 10 Galloway D L, et al. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. Water Resources Research, 1998, 34(10): 2573
- 11 张红,等. 获取张北地震同震形变场的差分干涉测量技术. 中国图像图形学报, 2000, 5(A6): 473



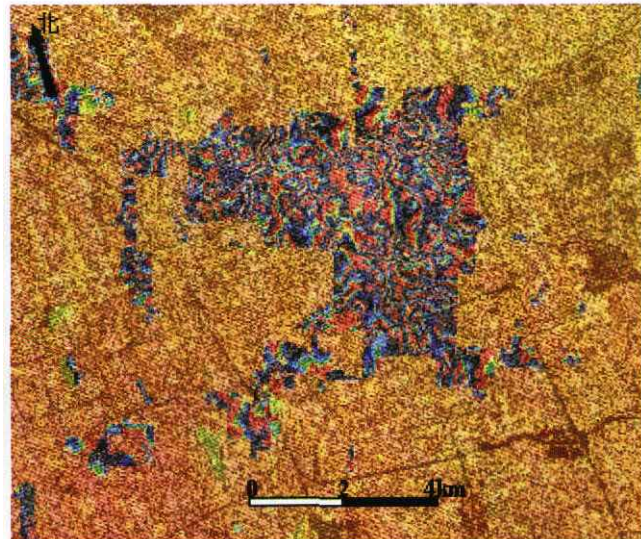
A 苏州地区 1993 ~ 1995 年地面沉降雷达差分干涉纹图 (亮度为雷达后向散射强度, 色彩代表视向形变量, 一个色周为 2.8cm, 下同)



B 苏州市 1993 ~ 1995 年地面沉降雷达差分干涉纹图 (图版 I-A 局部放大)



C 1995 - 1998 年苏州市地面沉降雷达差分干涉纹图 (1998-04-19 与 1995-12-31)



D 1998 - 2000 年苏州市地面沉降雷达差分干涉纹图 (1998-10-11 与 2000-02-13)