

InSAR 系列讲座 6

InSAR 应用实例及其局限性分析

刘国祥

(西南交通大学测量工程系, 四川 成都 610031)

[摘要] 作为 InSAR 系列讲座的最后一篇, 本文以台湾西部作为典型的实验区, 基于 InSAR 技术, 使用欧洲空间局卫星 ERS-1/2 所获取的多幅 SAR 影像进行地表三维重建和地震同震形变探测, 并与 GPS 观测数据对比, 分析干涉结果的精度。最后分析 InSAR 的应用局限性, 并指出潜在的解决途径。

[关键词] 合成孔径雷达干涉; 三维重建; 形变探测; 精度; 局限性

APPLICATION EXAMPLES OF INSAR AND ITS LIMITATION ANALYSIS

LIU Guo-xiang

(Dept. of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As the last part of the tutorial, the paper shows the experimental results derived with satellite InSAR over the typical testing site, the west of Taiwan. The experiments are conducted for both the three-dimension (3D) reconstruction and the co-seismic deformation detecting by using the multiple SAR images collected by the satellites, ERS-1/2, operated by European Space Agency. The accuracies of the interferometric results are evaluated by comparing with the GPS data. The emphasis is finally placed onto the discussion of InSAR limitations, and the potential approach overcoming the problems is also pointed out.

Key words: InSAR; 3D reconstruction; deformation detecting; accuracy; limitation

1 引言

前已述及, InSAR 具有高精度、高空间分辨率、几乎不受云雨天气制约和数据处理高度自动化等突出的技术优势, 对可见光、近红外被动遥感技术具有很好的补充作用。目前, InSAR 在地形制图和地表三维重建、地球表面形变场探测、土地利用分类和气象研究等方面已表现出极好的应用前景。在前面的讲座中, 我们已分别对 InSAR 历史与技术背景、SAR 成

像原理与图像特征、InSAR 基本原理、InSAR 数据处理与关键算法以及 InSAR 误差传播这五个方面的问题作了介绍和讨论。作为 InSAR 系列讲座的最后一讲, 本文以台湾西部 (1999 年 9 月 21, 发生 $M_w=7.6$ 级集集大地震) 作为实验区域, 使用多幅 ERS-1/2 SAR 影像数据进行干涉处理, 将展示卫星 InSAR 在数字高程模型 (DEM) 生成与区域地表形变探测两方面的应用情况, 并讨论其应用局限性。

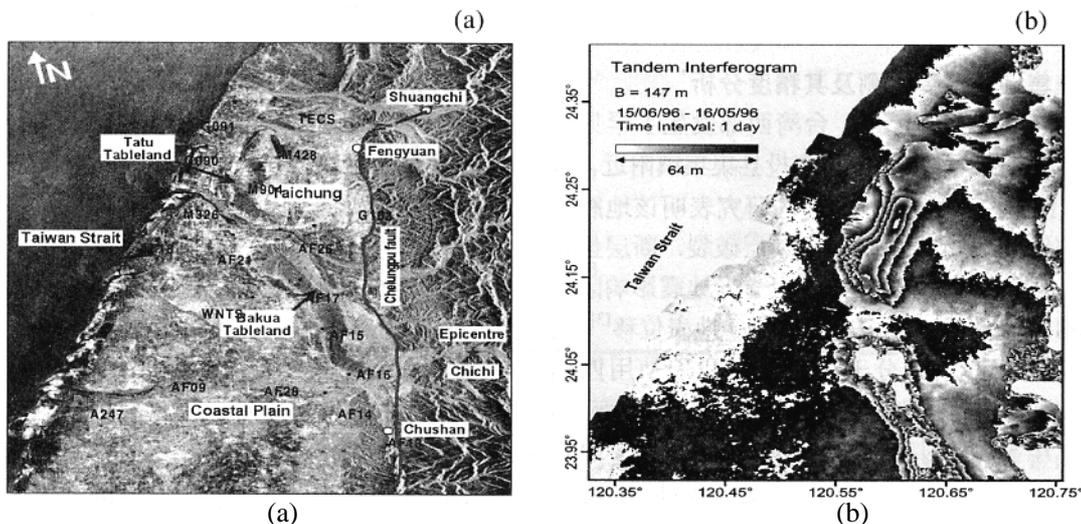


图 1 (a)台湾西部地区 ERS SAR 图像; (b)ERS-1/2 Tandem 干涉相位图

2 台湾西部 DEM 生成及其精度分析

为考察使用卫星 InSAR 生成 DEM 的情况，我们选择由卫星 ERS-1 和 ERS-2 以串接飞行方式分别于 1996 年 6 月 15 日和 16 日对台湾西部地区成像所获取的两幅 C 波段 ($\lambda = 5.6\text{cm}$) SAR 图像作为源数据；为检验干涉 DEM 的精度，我们使用大致均匀分布在研究区域内 19 个 GPS 点的高程(由台湾地球科学研究所提供)作为评价标准^[1]。图 1a 显示了研究区域的 ERS SAR 灰度图像(19 个 GPS 点位置、一些主要地名、地质断层和集集地震震央被标示出来)，覆盖实地约 1500km^2 的范围，其影像中心垂直基线长度为 147m，模糊高为 64m/周(见第 3 讲式 15)。图 1b 显示了由这两幅 SAR 图像所生成的干涉相位图(参考面相位已被去除)，图中的灰阶(由白到黑)表示一个完整的干涉条纹，相当于 $0 \rightarrow 2p$ 的相位变化，对应于 64 米的高程变化，从图中可见，干涉相位随地形起伏而变化且类似于等高线趋势。

将图 1b 所示的干涉图进行相位解缠，再结合卫

星轨道(基线)数据，可以计算出 DEM(为节省篇幅，这里未显示出结果)，最后，从干涉 DEM 中提取与 19 个 GPS 点位对应的高程，并与 GPS 高程结果作比较和统计分析，比较结果见图 2 所示。在这 19 个点上，GPS 高程范围在 21.9m 到 271.6m 之间变化，两类高程值的最大差异为 -13.5m ，而最小差异为 $+9.5\text{m}$ ，差异标准偏差为 $\pm 9.9\text{m}$ ，这表明 ERS 干涉 DEM 的高程精度可达 10m 左右。

对于卫星系统来说，这样的 DEM 精度状况是比较理想的，这是因为两幅图像成像时间间隔仅有一天，时态失相关比较轻微，使得相位噪声水平较小，加之该干涉对的模糊高合理，故干涉 DEM 的精度可得到保证。改善卫星干涉 DEM 的精度可考虑的潜在因素包括：(1) 卫星轨道/基线数据的精确确定，和(2) 时空尺度上大气条件变化引起的附加相位延迟影响(进一步讨论见第 4 节)。因此，从这一实验结果可以看到，卫星干涉 DEM 的精度具有米级水平的潜力。

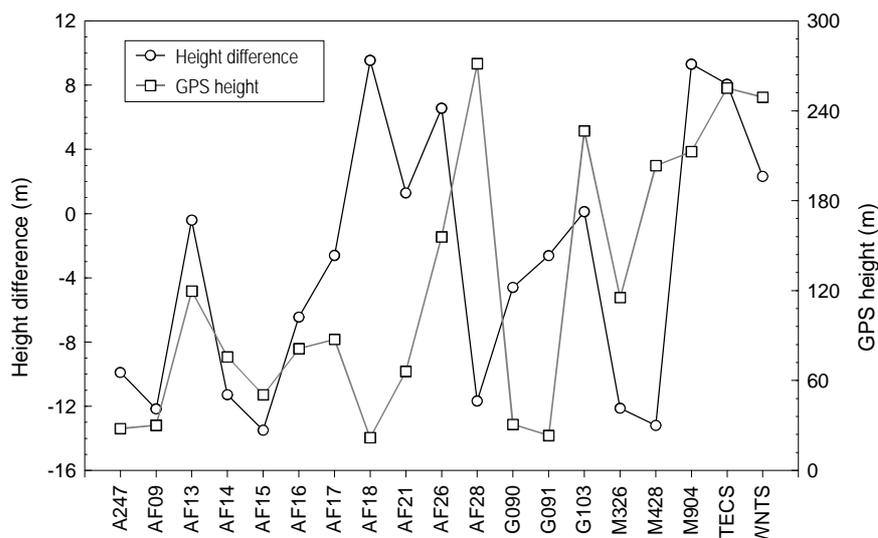


图 2: 19 个 GPS 点上 GPS 高程及其与干涉高程的差异

3 台湾集集地震形变探测及其精度分析

1999 年 9 月 21 日，台湾西部发生了罕见的 $M_w=7.6$ 级大地震，震中位于南投县集集镇附近(震中 23.87°N , 120.75°E)。已有的研究表明该地震主要沿老的约 80 km 长的车龙辅断层破裂，断层呈南北走向，低角度逆冲且向东倾斜^[2]。受地震影响区域内的 GPS 测量结果已显示出了明显的地表位移^[3](见图 1a)。基于四轨差分干涉方法，我们使用四幅 ERS-1/2 SAR 图像探测该地震所引起的地表形变，其中，1999 年 5 月 6 日和 1999 年 10 月 28 日由 ERS-2 获取的两幅图像形成“地形—形变干涉对”(影像中心垂直基线长度为 20m)；而 1996 年 5 月 15 和 16

日分别由 ERS-1 和 ERS2 所获取的两幅图像形成一个“地形干涉对”(干涉图如图 1b 所示)，用于建立扣除地形影响所需的数字高程模型(结果及精度如第 2 节中所述)^[2, 4]。

图 3 显示了最后所生成的同震形变干涉图(覆盖范围约 1500km^2)，每一干涉条纹代表 2.8 cm(雷达波长的一半)的斜距向(雷达至地面分辨元方向)地表位移，研究区域内呈现共约 10 个弧形干涉条纹，相当于斜距向地表位移在空间尺度上呈相对总量为 28 cm 的分布，显著的非均匀地表位移是车龙辅逆冲断层应力释放的结果。这些同震干涉条纹与其它的地震研究结果是相符的：南部弯曲度较小的干涉条

纹主要反映了因车龙辅断层左旋逆冲破裂引起的显著地表形变，北部的条纹呈向东弯曲趋势，这涉及到另一个紧接车龙辅断层北端且呈东西走向的断层系统右旋逆冲破裂。从图 3 可以看到，越靠近断层，干涉条纹率越高，也就是地表形变的梯度越大。参

照 Yu 等^[3]的 GPS 三维形变观测结果可知，这些同震干涉条纹反映了地表位移引起震前和震后两次成像间卫星到地表的雷达斜距变短，此外，最显著的位移发生在近断层的台中市范围内，水平位移大致呈东南向，介于 70~140 cm，城市下沉介于 10~30 cm。

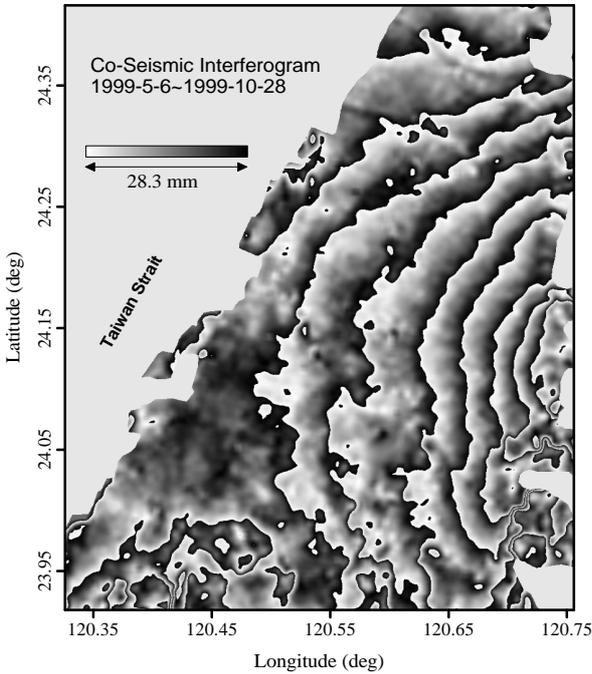


图 3 台湾集集地震形变干涉图

对图 3 中的相位进行解缠，便得到绝对差分相位，最后可逐像素计算出沿雷达视线方向的地表位移量（见第 3 讲式 14）。我们以图 1a 所示的 19 个 GPS 点上同震形变观测结果（见文献 3）作为比较标准，来分析干涉形变测量结果的精度，表 1 列出了这些 GPS 点上的两类观测结果比较情况，注意表中已将 GPS 所测量的三维地表位移矢量投影到雷达视线方向上，得到一维位移量（必须指出，InSAR 仅能观测到一维形变量）。从两类结果的差异统计分析可知：两类观测的相关性程度为 0.95；差异均值为 0，差异标准偏差为 1.3 cm。这说明所得到的干涉形变观测的综合精度为 1 cm 左右。但是，在少数 GPS 点（如 AF15 和 AF16）上，吻合程度不高，值得指出的是，GPS 观测为单点位移，而 InSAR 所观测的是一个面元上的均值位移，在这个面元内部过渡的非均匀位移分布会严重地影响两类观测的可比性。此外，GPS 有限的高程精度也是影响两类结果可比性的原因之一。

表 1 19 个 GPS 点上 DInSAR 与 GPS 形变结果对比

GPS 点名	纬度(deg)	经度(deg)	GPS (cm)	DInSAR(cm)	差异(cm)
A247	24.02044	120.40778	-8.3	-8.1	-0.2
AF09	24.03731	120.51428	-9.5	-8.8	-0.7
AF13	23.94653	120.69767	-16.5	-15.9	-0.6
AF14	24.01502	120.64324	-17.4	-17.2	-0.2
AF15	24.09426	120.64775	-12.2	-15.2	+3.0
AF16	24.03643	120.66834	-19.2	-21.3	+2.1
AF17	24.15659	120.63185	-13.7	-15.4	+1.7
AF18	24.21601	120.52691	-8.4	-8.4	0.0
AF21	24.21644	120.57254	-12.6	-10.6	-2.0
AF26	24.22169	120.65141	-15.0	-13.9	-1.1
AF28	24.01601	120.60064	-10.9	-11.5	+0.6
G090	24.31193	120.56194	-6.9	-7.3	+0.4
G091	24.37942	120.58882	-5.4	-5.7	+0.3
G103	24.26055	120.71809	-17.1	-15.4	-1.7
M326	24.25417	120.57509	-10.4	-9.5	-0.9
M428	24.32745	120.62201	-11.2	-10.2	-1.0
M904	24.29847	120.60678	-11.3	-10.9	-0.4
TECS	24.35633	120.65511	-7.1	-7.9	+0.8
WNTS	24.13813	120.58446	-9.4	-8.9	-0.5

4 InSAR 应用局限性分析与讨论

从第二讲中我们已经知道，雷达成像时天线发射的微波信号要穿越大气层且与地表交互作用后被反射回去再由传感器记录下来。已有研究表明，卫星

InSAR 在地表三维重建与形变探测应用中主要受到两大因素的制约^[5]，即时间失相关和大气影响。前者涉及到雷达波与地表的交互作用问题，而后者涉及到雷达波与大气的交互作用问题。

本质上, 时间失相关问题可以这样来理解。雷达成像时, 雷达脉冲与地表的交互作用引入附加的散射相位, 不同成像时间的散射机制随地表分辨元内的扰动或化学特性改变而改变(如植被生长或叶片随风摆动、农田翻耕与物体湿度有关的电离常数变化等)。对于两次成像来说, 各自的随机附加相位分量(噪声)不同或者说不相关, 在相位差分时间难以抵消, 从而导致不能接受的低信噪比, 这就意味着干涉图无明显条纹或条纹不连续, 相应的数据处理如相位整周模糊度求解(即相位解缠)变得困难。

对于时间相关性, 可借助计算所得到的相关系数图^[2]来分析, 我们对台湾实验区的二十个具有不同时间间隔(1天~几个月~5年)的ERS干涉对进行了相关计算与分析^[2]。结果表明:

●对于植被覆盖区和农业耕种区来说, 除了一天间隔的相关性较高外, 其它时间间隔的相关性均较低, 随着时间间隔的加大, 相关性趋于零。

●山区存在植被覆盖且起伏剧烈时, 失相关更加严重, 因为地形引入的几何畸变如阴影和叠掩可加大失相关的可能性, 例如, 车龙辅断层东侧(上盘区域)属于山区(见图1和3), 我们不能提取到可靠的地形与形变信号。

●城市地区的相关性总是较高, 例如, 即使三年的间隔, 台中市区的ERS干涉相关系数仍可达0.7左右。因城市建筑物和其它设施为硬目标, 目标表面一般不会随时间扰动, 即使长时间跨度, 雷达反射特性仍然很稳定, 故能维持较高的相关性。

因此, 对于地表三维重建来说, 应尽量使用短时间间隔的干涉像对(如ERS-1/2串接模式像对), 以减少时间失相关的负面影响。对于地震同震形变来说, 也应尽可能地选择震前和震后所获取的具有最短时间跨度的干涉像对来探测地表形变, 然而, 对于其它类型的形变, 如火山运动, 城市沉降、地震前和地震后形变, 一般须较长时间累积才能达到可探测的量级, 这就意味着必须使用长时间跨度(如年级以上)的两幅SAR图像形成干涉对来提取微小形变信息, 时间失相关所引起的相位噪声便可能掩盖形变信号, 致使长期累积形变探测变得相对困难。

另一方面, 易变的大气条件(气压、温度和相对湿度)可能会导致不同的相位延迟, 这种不一致既表现在时间尺度上, 也表现在空间尺度上, 严重的大气延迟会掩盖其它感兴趣的信号。特别地, 我国沿海地区相对湿度变化无常, 极端条件下, 气象延迟可导致数十米的高程误差和数厘米的形变误差^[6], 给这些地区的干涉应用带来很大的制约。尽管

上述干涉对实例没有遇到明显的大气影响, 然而, 我们从香港地区1996年ERS-1/2串接模式SAR数据的干涉DEM生成中发现了明显的大气延迟信号^[2]。因此, 在InSAR应用中, 我们也必须高度重视大气的负面影响。目前, 要从干涉结果中去除大气的负面影响较为困难, 因为我们很难获得与雷达成像同步且空间分辨率足够高的地面气象数据。

综观国内外参考文献, 系统解决雷达干涉时间失相关和大气影响的成熟方案并未出现, 这极大地制约了干涉技术的广泛应用和其应用领域的继续扩展。如要使InSAR在我国推广应用(特别是区域形变探测), 必须有效地解决这两个问题。

近年来, 顾及时间失相关和大气影响, 意大利人Ferretti等^[7]建议采取跟踪成像区域内部分反射稳定的硬目标(如房屋、桥梁、堤坝和岩石等), 形变分析仅围绕这些有效点展开, 大气影响参数和形变速率可归结为模型求解。因为即使对于多年时间间隔的干涉对, 这些硬目标仍可保持较高的相位相关性, 因而被称为永久反射器(permanent scatters, PS)。台湾实验区的相关性分析表明, 城市和植被区域内的PS在5年内还维持较好的相关性, 这给我们一个启示, 基于PS的差分干涉及其模型求解方法可能是一个解决时间失相关和大气影响的有效途径, 这正是目前国内外InSAR研究的核心和热点。

5 结束语

InSAR已在地球表面三维信息提取和形变探测等方面表现出极好的技术优势和应用前景。目前, InSAR技术中亟待解决的关键问题是: 雷达成像系统的最优化设计与新一代卫星SAR系统的实施、雷达信号的时间失相关以及大气相位延迟的影响。我们深信: 随着InSAR硬、软件系统的进一步发展与国内有关学者对InSAR理论与算法的深入研究, InSAR技术必将向着实用化的方向迈进, 为国内外地球科学研究和形变灾害监测与预报提供强有力的技术支持。

参考文献

- [1]刘国祥, 李志林. 用雷达干涉测量与雷达立体测量生产数字高程模型的试验[J]. 铁道勘察, 2004,30(1):10-15.
- [2]Liu, G.X., Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances [D]. Ph.D. thesis: Dept. of Land Surveying & Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, pp.250, 2003.
- [3]Yu S.B., L.C. Kuo Y.J. HSU et al., Preseismic deformation and coseismic displacements associated with the 1999

Chi-Chi, Taiwan Earthquake [J]. Bulletin of Seismological Society of America, Vol.91, pp.995-1012, 2001.

[4] Liu, G.X., X.L. Ding, Z.L. Li, Z.W. Li, Y.Q. Chen, SB Yu, Pre- and co-seismic ground deformations of the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake, measured with SAR interferometry [J]. Computers and Geosciences, Vol.30, pp.333-343, 2004.

[5] 刘国祥, 刘文熙, 黄丁发. InSAR 技术及其应用中的若干问题 [J]. 测绘通报, 2001, 8: 10-12.

[6] Li, Z.W., X.L. Ding and G.X. Liu, Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results [J]. Journal of

Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Vol.66, pp.907-917, 2004.

[7] Ferretti, A., P. Claudio and A. Rocca, Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.38, pp.2202-2212, 2000.

[收稿日期] 2005-07-02

[作者简介] 刘国祥(1968-), 男, 博士, 现任西南交通大学测量工程系教授, 主要从事遥感及 GIS 研究。本讲座得到了国家自然科学基金项目的资助(批准号: 40374003)。

(上接第 136 页)

倾斜率 $i = 6'40''$

倾斜方向 $\alpha_{P_1P_2} = 110^\circ 33' 21''$

倾斜度测量误差 $m_d = \pm 3.5mm$

4.2 实例 2

用同样的仪器同样的方法对烟囱底部中心坐标和顶部中心坐标各观测 10 次, 可以求出每次的纵向倾斜分量 δ_x 和横向倾斜分量 δ_y , 观测结果和精度分析如表 1

表 1 观测结果和精度分析 (单位: mm)

观测次数	δ_x	δ_y
1	-82	+31
2	-88	+37
3	-84	+34
4	-83	+39
5	-89	+32
6	-88	+35
7	-85	+38
8	-86	+32
9	-87	+32
10	-88	+30
样本均值	-86	+34
样本中误差	± 2.4	+3.0

将有关数据代入式 (10) 可得 10 次倾斜观测平

均值的中误差为: $m_\delta = \pm 2.4mm$

从以上数据可以看出, 多次观测的精度高于一次观测的精度, 但都可以达到毫米级。

5 结论

(1) 应用全站仪圆柱偏心测量程序功能测定圆形建筑物的倾斜度, 测量误差在毫米级以内, 可以达到十分理想的测量精度。

(2) 熟练运用这一功能, 不仅可以提高测量的速度和精度, 更重要的是不需爬到圆形建筑物的顶部, 也不需要量另测圆形建筑物的半径, 可以节省大量的人力、物力。

(3) 为了保证不同圆形建筑物对测量的精度要求, 应在建筑物不同方向上多次设站并重复观测取其平均值作为最后结果。

参考文献

[1] 焦明连. 全站仪圆柱偏心测量的原理和精度分析 [J]. 现代测绘, 2004, (增刊): 28-29.

[2] 焦明连. 全站仪自由设站应用于航道控制测量的图形研究 [J]. 海洋测绘, 2004, (6): 24-25.

[3] 周杨眉. 圆形建筑物倾斜观测的方法 [J]. 东北测绘, 2000, 23(1): 32-39.

[4] 陈伟清. 高耸建筑物倾斜观测方法探讨 [J]. 北京测绘, 2002, (3): 32-35.

[收稿日期] 2005-01-11

[作者简介] 焦明连(1964-), 男, 河南商丘人, 副教授, 主要从事精密工程测量的教学与研究。

(上接第 138 页)

参考文献

[1] 张新长等. 城市地理信息系统. 北京: 科学出版社, 2001.

[2] 郭朝勇等. AutoCAD R14(中文版)二次开发技术. 北京: 清华大学出版社, 1999.

[3] 二代龙震工作室. AutoCAD 2000 系列程序设计基础教程. 山东: 济南出版社, 2000.

[4] 李德龙等. 二次曲面移动拟合法在土方计算中的应用. 湖北: 城市勘测, 2004.

[收稿日期] 2004-09-13

[作者简介] 钱业宏(1975-), 男, 安徽舒城县人, 硕士生, 现在安徽铜陵市规划勘测设计研究院主要从事工程测量工作。