

文章编号: 0494-0911(2006)09-0009-05

中图分类号: P237

文献标识码: B

沿海地区 DInSAR 形变探测: 精度与可应用性分析

刘国祥¹, 晓利²

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 香港理工大学, 香港 九龙)

Detecting of Surface Deformation in Coastlands by DInSAR: Accuracy and Applicability Analysis

LIU Guo xiang, DING Xiao li

摘要: 卫星合成孔径雷达差分干涉在区域地表形变探测方面已表现出极好的应用前景。以我国沿海地区的 2 个典型实验区(即香港新机场和台湾西部地震区)作为研究对象, 使用卫星 ERS 1/2 所获取的多幅 SAR 影像来探测香港填海地基沉降和台湾地震形变, 与地面水准和 GPS 数据比较, 评价干涉结果的实际观测精度, 最后分析干涉雷达在沿海地区应用的局限性, 并指出潜在的解决途径。

关键词: 卫星合成孔径雷达差分干涉; 沉降; 地震形变; 精度; 应用局限性

一、引言

卫星合成孔径雷达干涉(interferometric synthetic aperture radar, 简称 InSAR) 是正在发展中的极具潜力的微波遥感新技术, 其诞生至今已近 30 年的时间。起初, 它主要应用于生成数字高程模型和制图, 后来很快被扩展为差分干涉技术(differential InSAR, 简称 DInSAR) 并应用于测量微小的地表形变, 已表现出高形变精度(毫米~厘米级)、高空间分辨率(数十米)、大范围、不依赖于天气条件等突出的技术优势^[1]。DInSAR 已在研究地震形变、火山运动、冰川漂移、城市沉降以及山体滑坡等方面表现出广阔的应用前景^[2]。

卫星 SAR 系统所获取的影像中每一像素既包含地面分辨元的雷达后向散射强度信息, 也包含与斜距(传感器到目标的距离)有关的相位信息。将覆盖同一地区的 2 幅雷达图像对应像素的相位值相减可得到一个相位差图, 即所谓干涉相位图(interferogram)。这些相位差信息是地形起伏和地表形变等因素的贡献和体现。差分干涉便是从干涉相位图中扣除地形及其他因素的影响, 并达到提取形变信息的目的, 已在文献[2]中较为详细地介绍了 DInSAR 的基本原理与数据处理方法, 本文就不再赘述。美国人 Peltzer 等^[3]和王超等^[4]已分别报道了西藏和河北张北-尚义地区的 DInSAR 实验结果, 这些实验区域均位于我国内陆范围。本文以我国沿海局部地

区(香港新机场和台湾西部集集地震区)为实验区域, 使用欧洲空间局卫星 ERS 1/2 于 1996~1999 年间所获取的多幅 C 波段 SAR 影像来提取香港机场填海地基沉降和台湾地震形变信息, 并分别以地面水准数据和 GPS 数据作参考来分析 DInSAR 结果的精度, 进而讨论干涉雷达在我国沿海地区应用的局限性, 并试图指出潜在的解决途径。

二、沿海地区差分干涉实验及形变精度分析

1. 实验干涉数据

本研究使用 2 幅 SAR 图像作干涉处理来探测香港新机场填海地基沉降, 使用 4 幅 SAR 图像来测量台湾西部集集大地震所引起的地表位移。这些 SAR 图像是由欧洲空间局卫星 ERS-1 或 ERS-2 的 SAR 传感器沿其下降轨道(从北到南飞行)以 23° 左右的雷达侧视角成像获得。表 1 列出了这些 SAR 影像的特征参数(包括卫星平台和成像日期)和干涉对特征参数(包括覆盖中心地理坐标、时间间隔、垂直基线长度 B_{\perp} 和用途说明)。SAR 影像在斜距和方位向的分辨率分别为 7.9 m 和 4.0 m, 每幅影像地面覆盖范围约为 100 km × 100 km, 像素信息以复数值来表达。时间间隔为 4.2 s 的 5 个轨道位置的状态矢量(3 维坐标和 3 维速度)数据也附在 SAR 影像文件头中, 这些轨道数据是随后差分干涉数据处理所需要的。

收稿日期: 2005-04-28

基金项目: 香港 RGC 基金项目(PolyU 5064/02E); 国家自然科学基金项目(40374003)

作者简介: 刘国祥(1968), 男, 湖南临澧人, 教授, 博士, 主要从事 InSAR 研究。

表 1 ERS SAR 影像及干涉对特征参数

实验区	SAR 影像参数			干涉对参数		
	卫星	成像日期	覆盖中心地理坐标	时间间隔/天	B_{\perp}/m	用途说明
香港	ERS-2	1998-12-29	经度: E114°20′	315	481.5	沉降
新机场	ERS-2	1999-11-09	纬度: N22°05′			
台湾	ERS-1	1996-05-15	经度: E120°31′	1	147.0	DEM
	ERS-2	1996-06-16	纬度: N24°01′			
西部	ERS-2	1999-05-06	经度: E120°31′	175	20.0	地震形变
	ERS-2	1999-10-28	纬度: N24°01′			

2. 香港新机场地表沉降

香港新机场位于大屿山北部, 于 1998 年 7 月启用, 它建立在一个人工岛上, 总面积为 12.48 km², 75% 为填海地基, 25% 为开挖平整 2 个小岛所得^[1, 2]。机场管理局一直在使用常规地面水准测量方法来监测填海地基的稳定性, 然而受空间分辨率限制, 机场平台细节的沉降分布却难以得到。使用 ERS-2 卫星分别于 1998 年 12 月 29 日和 1999 年 11 月 9 日在香港上空重复通过获取的 2 幅 C 波段 SAR 影像 ($B_{\perp} = 481.5 m$) 进行干涉分析 (见表 1), 试图探测机场平台在这 315 天所累积的沉降分布。图 1 显示了覆盖机场的雷达灰度影像, 根据香港地政署提供的数字地图, 被削平的 2 个小岛 (榄洲和赤腊角) 轮廓和位置被标识出来, 28 个水准点的位置 (由机场管理局提供) 也一并标示在此图像上。

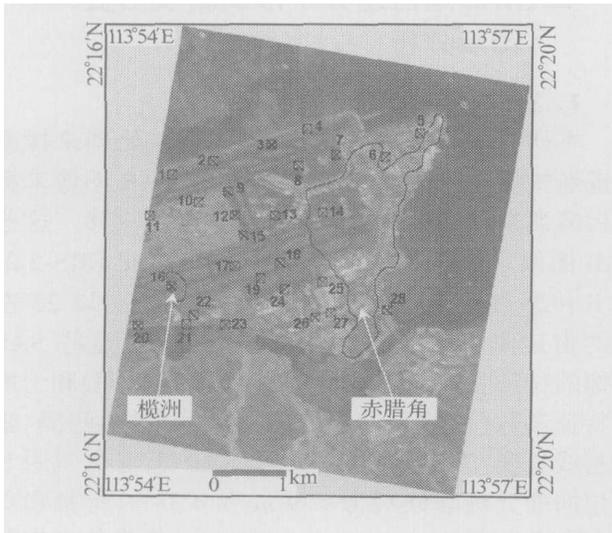


图 1 香港新机场 ERS-2 SAR 图像

由于该机场平台相当平坦且有香港地政署提供的数字高程模型 (高程精度为 1 m) 可利用, 因而两轨差分干涉方法被采用。首先将 2 幅 SAR 图像数据作空间配准且将一幅影像取样到另一幅影像空间, 再将对应像素作复数共扼相乘, 则得到初始干涉相位图, 差分处理的焦点集中在机场区域, 利用机场

已有的数字高程模型、卫星轨道数据和雷达系统参数计算地形相位, 再从初始干涉相位图中扣除地形的影响, 从而得到残余的干涉相位, 再经相位解缠, 计算斜距向位移且投影到竖直方向逐像素计算沉降量^[1, 2]。图 2 给出了所得到的机场沉降分布图 (HK80 格网坐标系)。

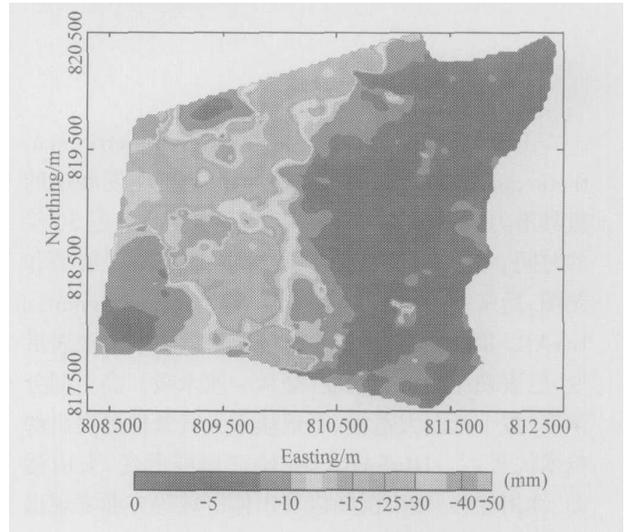


图 2 香港新机场 315 天内 DInSAR 沉降结果

理论上, 干涉形变结果的精度受轨道数据误差、地形数据误差和干涉相位误差等的影响。根据 Zebker 的误差分析方法可知^[5], $\pm 1.0 m$ 的数字高程模型误差引入的沉降观测误差为 1.3 mm, 而轨道数据不确定性引入的误差呈系统性, 对于这个小面积区域来说, 相对误差是可忽略的。为进一步证实干涉结果的可靠性, 对 28 个水准点上 DInSAR 和水准测量结果作了对比, 如表 2 所示。统计分析表明: 两类结果的总体相关系数为 0.89, 差异均值为 $-3.5 mm$, 差异的总体标准偏差为 5.6 mm。这表明大气延迟的影响对这个干涉对来说是可以忽略的, 同时也说明干涉沉降的总体测量精度优于 1 cm。因此, 从图 2 可以认为, 填海区域内, 在将近一年的时间里地表下沉量呈现 0~50 mm 的空间变化, 然而, 将图 2 与图 1 对比, 不难发现原 2 个小岛赤腊角

和榄洲几乎没有沉降发生,特别地,赤腊角岛的原轮廓大致地反映在沉降分布图中,这表明这些开挖所得到的地基(非填区)是相当稳固的,这也充分表明了 DInSAR 对地表形变是相当灵敏的。

表 2 28 个水准点上 DInSAR 和水准测量所得到的形变结果对比

点号	水准/mm	DInSAR/mm	差异/mm
1	- 20.0	- 15.1	- 4.9
2	- 10.0	- 10.3	0.3
3	- 32.0	- 22.4	- 9.6
4	- 36.0	- 24.2	- 11.8
5	- 5.0	- 3.2	- 1.8
6	- 5.0	- 1.8	- 3.2
7	- 3.0	- 0.4	- 2.6
8	- 15.0	- 11.0	- 4.0
9	- 55.0	- 37.4	- 17.6
10	- 32.0	- 36.1	4.1
11	- 20.0	- 26.0	6.0
12	- 21.0	- 22.1	1.1
13	- 13.0	- 10.1	- 2.9
14	- 1.0	- 0.8	- 0.2
15	- 27.0	- 15.3	- 11.7
16	- 1.0	- 4.6	3.6
17	- 32.0	- 25.0	- 7.0
18	- 6.0	- 8.5	2.5
19	- 23.0	- 13.0	- 10.0
20	- 26.0	- 19.4	- 6.6
21	- 30.0	- 19.2	- 10.8
22	- 17.0	- 18.5	1.5
23	- 20.0	- 13.1	- 6.9
24	- 11.0	- 8.7	- 2.3
25	- 3.0	- 3.0	0.0
26	- 10.0	- 10.8	0.8
27	- 9.0	- 10.1	1.1
28	- 6.0	- 2.5	- 3.5

干涉对($B_{\perp} = 147.0 \text{ m}$), 用于建立扣除地形影响所需的数字高程模型。图 3 给出了 ERS 雷达灰度影像, 车龙辅断层、震中和 19 个 GPS 点位置^[6] 被标识出来。

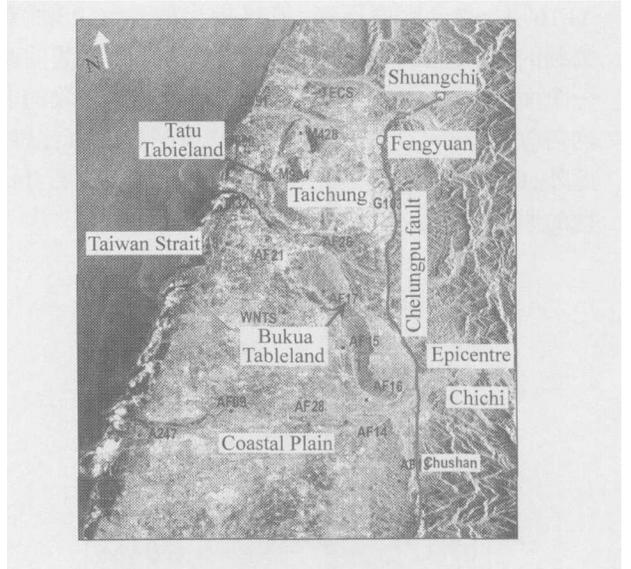


图 3 台湾集集地震影响区域的 ERS SAR 图像

图 4 显示了最后所生成的同震形变干涉图(覆盖范围约 1500 km^2), 每一干涉条纹代表 2.83 cm (雷达波长的一半) 的斜距向地表位移, 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 28.3 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他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 4 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^[6] 的 GPS 3 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 2 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冲市范围内(见图 3), 水平位移大致呈东南向, 介于 $70 \sim 140 \text{ cm}$, 城市下沉介于 $10 \sim 30 \text{ cm}$ 。

对图 4 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^[7]。以图 3 所示的 19 个 GPS 点上同震形变观测结果^[6] 作为比较标准, 来分析干涉形变测量结果的精度, 表 3 列出了这些 GPS 点上的 2 类观测结果比较情况, 注意表 3 已将 GPS 所测量的 3 维地表位移矢量投影到雷达视线方向上, 得到 GPS 1 维位移

3. 台湾集集地震形变

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^[6, 7]。基于四轨差分干涉方法, 使用 4 幅 ERS-1/2 SAR 图像探测该地震所引起的地表形变(见表 1), 其中, 1999 年 5 月 6 日和 1999 年 10 月 28 日由 ERS-2 获取的 2 幅图像形成地形形变干涉对($B_{\perp} = 20.0 \text{ m}$); 而 1996 年 5 月 15 和 16 日分别由 ERS-1 和 ERS-2 所获取的 2 幅图像形成一个地形

量。对2类结果差异作统计计算可知:2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量的综合精度为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所观测到的是一个单点的位移,而DInSAR所观测的是一个面上的均值位移,在这个面元内部过渡的非均匀位移分布会严重地影响2类观测量的可比性。此外,GPS有限的高程精度也是影响2类结果可比性的原因之一。

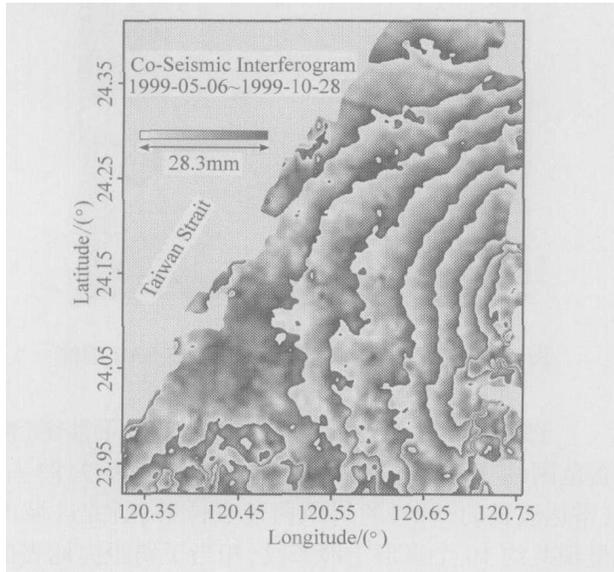


图4 1999年9月21日台湾集集地震形变干涉图

表3 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	24.020 44	120.407 78	- 8.3	- 8.1	- 0.2
AF09	24.037 31	120.514 28	- 9.5	- 8.8	- 0.7
AF13	23.946 53	120.697 67	- 16.5	- 15.9	- 0.6
AF14	24.015 02	120.643 24	- 17.4	- 17.2	- 0.2
AF15	24.094 26	120.647 75	- 12.2	- 15.2	+ 3.0
AF16	24.036 43	120.668 34	- 19.2	- 21.3	+ 2.1
AF17	24.156 59	120.631 85	- 13.7	- 15.4	+ 1.7
AF18	24.216 01	120.526 91	- 8.4	- 8.4	0.0
AF21	24.216 44	120.572 54	- 12.6	- 10.6	- 2.0
AF26	24.221 69	120.651 41	- 15.0	- 13.9	- 1.1
AF28	24.016 01	120.600 64	- 10.9	- 11.5	+ 0.6
G090	24.311 93	120.561 94	- 6.9	- 7.3	+ 0.4
G091	24.379 42	120.588 82	- 5.4	- 5.7	+ 0.3
G103	24.260 55	120.718 09	- 17.1	- 15.4	- 1.7
M326	24.254 17	120.575 09	- 10.4	- 9.5	- 0.9
M428	24.327 45	120.622 01	- 11.2	- 10.2	- 1.0
M904	24.298 47	120.606 78	- 11.3	- 10.9	- 0.4
TECS	24.356 33	120.655 11	- 7.1	- 7.9	+ 0.8
WNTS	24.138 13	120.584 46	- 9.4	- 8.9	- 0.5

三、沿海地区 DInSAR 的可应用性

本质上来说,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。对于SAR图像的每一像素来说,相位观测量主要包括三分量的分量:①传感器到地表分辨元的直线路径长度对应的相位;②非均匀大气介质引起的路径弯曲的附加相位;③微波信号与地表分辨元内诸目标交互作用后所引入的后向散射附加相位。已有研究表明,重复轨道差分干涉应用于区域形变监测主要受到两大因素的制约,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^[2,8],而后者涉及到雷达波与大气的交互作用问题^[1,9]。

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,对香港和台湾2个实验区的20个具有不同时间间隔(1天~几个月~5年,部分数据未列入表1中)的ERS干涉对进行了相关计算与分析^[2]。结果表明:①植被覆盖区和农业耕种区内除了一天间隔的相关性较高外,其他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;②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3),不能提取到可靠的形变信号;③城市地区的相关性总是较高,例如,即使3年的间隔,台冲市区的ERS干涉相关系数仍可达0.7左右。对于植被覆盖区和农业耕种区来说,地面分辨元内部很容易随时间产生随机扰动(如叶片生长和随风摆动、掉叶、农田翻耕)或化学特性改变(如与土壤湿度有关的电离常数改变),因此,对于不同时间获取的2幅SAR图像来说,各自的随机附加相位分量(噪声)不同或者说时间失相关(相关系数接近0),在相位差分难以抵消,过分的地表随机扰动会引起相位信号严重失相关,即非常低的信噪比,使干涉图无明显的条纹或条纹不连续,相位解缠将非常困难。对于城市地区来说,因建筑物和其他设施为硬目标,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。

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他感兴趣的信号。Li等^[9]对香港实验区的研究表明,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10 cm左右的形变误

差,给这些地区的干涉形变探测应用带来很大制约。尽管上节几个形变干涉对实例没有遇到明显的大气影响,然而,从香港地区1996年ERS-1/2 Tandem SAR数据的干涉DEM生成中发现了明显的大气延迟信号^[2],特别地,在机场区域内(参见图1)呈现将近2个干涉条纹的相位变化,因机场非常平坦且这一干涉对时间间隔仅为一天,所以不应该将这些条纹解释为地形或形变的贡献,参考香港天文台的气象记录,相信这些条纹正是由于大气在时间和空间尺度上的变化特别是相对湿度的变化引入的相位延迟。这表明,在沿海地区差分干涉应用中,大气的影响必须高度重视。目前,要从干涉结果中去除大气的影响较为困难,除非有足够高空间分辨率的地面气象数据可利用^[9]。

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。

四、结 论

地面沉降和地壳形变监测历来受到地学专家的重视,惯用的地面测量方法如水准和GPS测量具有空间分辨率低的技术局限性。新近出现的合成孔径雷达差分干涉技术具有高分辨率和能够捕捉微小地表形变的独特技术优势,这种基于面观测的方法可弥补基于点观测的大地测量技术低空间分辨率的局限性。本文选择我国沿海地区的典型区域——香港新机场填海地基沉降和台湾集集大地震形变为研究对象,使用ERS SAR数据进行了差分干涉处理的实验,对这两个研究区域所得到的干涉形变结果的精度分别参照地面水准或GPS测量数据进行了评价,基于相关分析对DInSAR在沿海地区的应用局限性进行了讨论。这些研究结果表明:

1. 尽管理想条件下DInSAR的理论精度可达到毫米级,但实际形变观测精度仅能达到厘米级,主要的误差来源包括轨道数据误差、地形数据误差和干涉相位误差。

2. 香港新机场沉降结果的精度优于台湾集集大地震形变结果的精度,前者为 ± 5.6 mm,后者为 ± 13 mm。虽然GPS有限的高程精度对地震形变结果精度评价产生一定的影响,但两种形变场精度差异的主要原因是具有 23° 侧视角的ERS成像模式对垂直位移比水平位移更敏感。

3. 因我国沿海地区植被覆盖率很高且农业耕种区域较大,应用DInSAR会受到时间失相关的影响,致使干涉相位噪声严重,特别是对长期累积形变

监测非常不利。与此相反,城市地区形变探测受时间失相关的影响要小得多。

4. 因我国沿海地区相对湿度变化无常,所引起的大气相位延迟会降低干涉结果的可靠性。

5. 基于永久反射器的差分干涉与模型求解可能是解决沿海地区时间失相关和大气影响的潜在途径,这也是我们进一步研究的重点。

参考文献:

- [1] DING Xiaoli, LIU Guoxiang, LI Zhiwei, *et al.* Ground Subsidence Monitoring in Hong Kong with Satellite SAR Interferometry [J]. *Photogrammetry Engineering & Remote Sensing*, 2004, 70(10): 1131-1137.
- [2] LIU Guoxiang. Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances [D]. Hong Kong: Publication of the Hong Kong Polytechnic University, 2003.
- [3] PELTZER G, CRAMPE F, KING G. Evidence of the Nonlinear Elasticity of the Crust from Mw7.6 Manyi (Tibet) Earthquake [J]. *Science*, 1999, 286: 272-276.
- [4] WANG Chao, LIU Zhi, ZHANG Hong, *et al.* Coseismic Displacement of Zhangbei Shangyi Earthquake Observed by Differential SAR Interferometry [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45: 2550-2553.
- [5] ZEBKER H A, WERNER C L, ROSEN P A, *et al.* Accuracy of Topographic Maps Derived from ERS-1 Interferometric Radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32: 823-836.
- [6] YU S B, KUO L C, HSU Y J, *et al.* Preseismic Deformation and Coseismic Displacements Associated with the 1999 Chi Chi, Taiwan Earthquake [J]. *Bulletin of Seismological Society of America*, 2001, 91(5): 995-1012.
- [7] LIU Guoxiang, DING Xiaoli, LI Zhiwei, *et al.* Pre and Coseismic Ground Deformations of the 1999 Chi Chi, Taiwan Earthquake, Measured with SAR Interferometry [J]. *Computers and Geosciences*, 2004, 30: 333-343.
- [8] 刘国祥. InSAR技术及其应用中的若干问题[J]. *测绘通报*, 2001, (2): 10-12.
- [9] LI Zhiwei, DING Xiaoli, LIU Guoxiang. Modelling Atmospheric Effects on InSAR with Meteorological and Continuous GPS Observations: Algorithms and Some Test Results [J]. *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 2004, 66: 907-917.
- [10] FERRETTI A, CLAUDIO P, ROCCA A. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38: 2202-2212.