

陈 强, 刘国祥, 丁晓利等. 永久散射体雷达差分干涉应用于区域地表沉降探测. 地球物理学报, 2007, 50(3): 737~ 743  
Chen Q, Liu G X, Ding X L, et al. Radar differential interferometry based on permanent scatterers and its application to detecting regional ground subsidence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3): 737~ 743

# 永久散射体雷达差分干涉应用于区域地表沉降探测

陈 强<sup>1</sup>, 刘国祥<sup>1</sup>, 晓利<sup>2</sup>, 李永树<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 西南交通大学测量工程系, 成都 610031

<sup>2</sup> 香港理工大学土地测量与地理资讯学系, 香港

**摘 要** 永久散射体干涉测量技术可以克服常规干涉方法在区域地表形变测量中的雷达信号失相关和大气延迟影响. 本文对基于永久散射体的干涉处理全过程进行了分析, 基于差分相位的两个主要特性: 沉降信号时序相关、地形相位与空间基线成比例, 提出构建 PS 网络, 并采用间接观测平差法估计沉降速度网和高程修正网的全局最优解. 实验选取上海地区近 10 年间的 ERS-1/2 卫星 C 波段 SAR 数据进行干涉处理, 在永久散射体上分离形变信号、高程修正和大气分量, 并最终提取上海地区高分辨率地面沉降速度场, PS 结果与地面精密观测成果吻合较好.

**关键词** 永久散射体网络, 合成孔径雷达差分干涉, 沉降探测, 信号失相关, 大气影响

文章编号 0001-5733(2007)03-0737-07 中图分类号 P227 收稿日期 2006-05-10, 2006-12-18 收修定稿

## Radar differential interferometry based on permanent scatterers and its application to detecting regional ground subsidence

CHEN Qiang<sup>1</sup>, LIU Guo-Xiang<sup>1</sup>, DING Xiao-Li<sup>2</sup>, LI Yong-Shu<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

<sup>2</sup> Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

**Abstract** Synthetic aperture radar differential interferometry (DInSAR) based on permanent scatterers (PS) may overcome or mitigate two main disadvantages, i. e., radar signal decorrelation and atmospheric delay influence, which often take place in the conventional DInSAR. This paper analyzes all the processing procedures involved in PS-based DInSAR. Considering that deformation is of temporal correlation and topographic phase is proportional to normal baseline, the method of generating PS network is proposed. A parametric adjustment method is adopted to estimate total optimum solutions of subsidence rates and elevation corrections in the PS network. With the proposed algorithm, the experiment is performed to extract subsidence information over Shanghai using ERS-1/2 C-band SAR images taken during the latest 10 years. Deformation, elevation correction and atmospheric phase on PS points are effectively separated and the subsidence rate field with high resolution is presented. The results obtained from PS network are in a good agreement with leveling measurements.

**Keywords** Permanent scatterers network, DInSAR, Subsidence detection, Decorrelation, Atmospheric influence

基金项目 国家自然科学基金项目(40374003)资助.

作者简介 陈 强, 男, 1974 年生, 讲师, 主要从事 InSAR 理论和应用研究. E-mail: swjtucq@sina.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

# 1 引言

星载合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动式微波成像传感器,其扩展的差分干涉技术(DInSAR)经过近20年的发展,凭借着独特的高形变敏感度、高空间分辨率、基于面观测和几乎不受云雨天气限制等技术优势,已在监测区域地表形变(如地震位移、火山运动、冰川漂移以及城市沉降等)方面表现出极大的潜力.大量的DInSAR区域地表形变探测试验表明<sup>[1-4]</sup>,多时相SAR影像在满足较高干涉相关性的前提下,DInSAR技术测量地表位移的精度与常规野外精密测量(如三角测量、水准和GPS测量等)结果相当.

然而,常规DInSAR应用目前却受到两个不利因素的制约<sup>[4,5]</sup>,一方面是时空失相关引起严重的相位噪声,沿重复轨道获取两幅SAR图像的时间间隔越长,地表变化(如植被生长、土壤湿度变化、农田翻耕等)所引起干涉相位噪声越严重,可导致形变测量(尤其在植被覆盖区)失败,这常称为时间失相关;获取两幅SAR图像的轨道间隔越大,干涉相位噪声水平也会越高,限制了有效干涉像对的可用数量,常称为空间失相关.另一方面是空间与时间尺度上不同的大气相位延迟降低形变测量结果的可靠性<sup>[5]</sup>,因缺乏与SAR成像时间同步的高分辨率地面气象数据,要从干涉结果中扣除大气的相当困难.所有这些无疑制约了DInSAR在区域地表形变探测方面的普及应用.

针对相位干涉失相关和大气延迟影响,Ferretti et al.<sup>[6,7]</sup>提出的仅仅跟踪成像区域内雷达散射特性较为稳定的目标而放弃那些失相关严重的分辨单元是间接克服上述问题的一条有效途径.这些目标

(如建筑物、桥梁和堤坝)几乎不受失相关噪声影响,即使在多年时间间隔的干涉对中仍能保持较高的干涉相关性,因而被称之为永久散射体(Permanent Scatterers, PS).Ferretti et al.基于足够数量的PS上的高信噪比相位数据,采用多参数整体迭代法求解(包括相位解缠)来区分形变和大气贡献,在一定范围内可以得到较理想的结果.虽然他们已初步提出PS-DInSAR实施的基本策略,但其建模和计算方法还有待进一步完善,特别是空间尺度建模和整体解算方面.

本文在Ferretti et al.的研究基础上<sup>[6-9]</sup>进一步发展PS网络建模算法和相位信号分离方法.不同于Ferretti et al.仅仅考虑相邻两PS点的干涉相位与差分模型的最佳匹配算法<sup>[7]</sup>,本文顾及到全体PS之间的沉降速度差和高程修正差的联系,提出利用选取的PS点组建不规则网络,形成天然的PS地面沉降监测网,借助经典大地测量理论中的间接平差方法,整体解算并分离PS点上的形变信号、高程修正和大气分量,进而内插出大面积的地表沉降速度场.本研究将选择典型沉降场——上海市地面作为实验对象,我们使用覆盖上海地区的26幅ERS-1/2卫星C波段SAR图像(时间跨度为1992~2002年)进行PS网络的差分建模、整体求解与结果分析.

## 2 PS差分干涉方法及处理流程

### 2.1 时序差分干涉

将覆盖同一地区的 $K+1$ 幅( $>25$ 幅)SAR影像按成像时间先后排序,选取其中一幅影像作为主影像,其余所有影像均为从影像.主影像的选取采用整体相关性测度确定<sup>[8]</sup>:

$$\rho^m = \begin{cases} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K c(B_{\perp}^{k,m}, 1200) \times c(T^{k,m}, 5) \times c(f_{DC}^{k,m}, 1380), & c(x, a) = 1 - \frac{|x|}{a}, \quad x < a, \\ 0, & x \geq a, \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\rho^m$ 为整体相关系数, $B_{\perp}^{k,m}$ 、 $T^{k,m}$ 和 $f_{DC}^{k,m}$ 分别为干涉对的有效空间基线、时间基线和多普勒质心频率差.按式(1)逐影像计算其与所有从影像的整体相关系数 $\rho$ ,选取 $\rho$ 为最大值时对应的影像为主影像.

以选取的主影像为基准,将其余所有影像都配

准并取样到主影像像素空间.这样同一地区的 $K+1$ 幅SAR影像总共可形成 $K$ 个干涉对.

将 $K$ 个干涉对逐一进行一次相位差分处理,得到 $K$ 幅初始干涉相位图.干涉图中每个像元的干涉相位包括5个分量:参考椭球面相位、地形起伏相位、地表形变相位、大气影响和噪声相位<sup>[4]</sup>.借助卫

星定轨得到的精密轨道参数和干涉几何, 可以从初始干涉相位中去除参考椭球面相位, 借助已有的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)可以部分去除(由于 DEM 可能存在高程误差)地形相位, 得到所谓的二次差分干涉相位  $\phi_{dint}^i$ , 其构成包括 4 个分量:

$$\phi_{dint}^i = \frac{4\pi \cdot B_{\perp}^i}{\lambda \cdot R_m \cdot \sin \theta} \delta_H + \frac{4\pi \cos \theta}{\lambda} h + \phi_{Am}^i + n^i, \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为雷达波长,  $R_m$  为雷达至地面目标的斜距,  $\theta$  为雷达波入射角,  $B_{\perp}^i$  为有效空间基线,  $\delta_H$  为 DEM 高程修正,  $h$  为可能的地表沉降量,  $\phi_{Am}^i$  为大气相位,  $n^i$  为噪声。

令  $K_1 = 4\pi(\lambda \cdot R_m \cdot \sin \theta)$ ,  $K_2 = 4\pi \cos \theta / \lambda$ , 设以时间为变量的地面线性沉降速度为  $v$ , 式(2)可化简为

$$\phi_{dint}^i = K_1 \cdot B_{\perp}^i \cdot \delta_H + K_2 \cdot T^i \cdot v + \phi_{res}, \quad (3)$$

式中  $T^i$  为干涉对的时间基线,  $\phi_{res}$  为残留相位, 包括大气影响、可能的非线性沉降和噪声。值得指出的是, 在干涉图中, 相位  $\phi_{dint}^i$  被缠绕在其主值  $[-\pi, \pi]$  范围内, 必须借助随后的相位解缠方法恢复其完整值。

## 2.2 PS 网的建立

### 2.2.1 PS 点的识别

干涉相位由多个分量组成, 在这些分量未被分离并提取的情况下, 不能直接利用时序相位标准差进行 PS 的识别, 必须借助其他非相位信息。据 Ferretti et al. 的理论研究证实<sup>[6]</sup>, 在高信噪比像元上, 相位噪声水平可以使用时序振幅离差指数等价衡量。离差指数为时序振幅标准差与均值的比值, 即

$$\sigma_v \cong \frac{\sigma_A}{m_A} = D_A, \quad (4)$$

式中  $\sigma_v$  为相位标准差,  $\sigma_A$  为时序振幅标准差,  $m_A$  为时序振幅均值,  $D_A$  被称为振幅离差指数。当像素的离差指数小于给定阈值时, 该像素被判别为 PS 点, 否则为非 PS 点。

### 2.2.2 PS 边的连接

二次差分干涉相位中仍包含有大气影响, 值得注意的是, 尽管各幅 SAR 影像的大气状态不一致, 但在同一幅影像区域内, 邻近点间的大气条件则表现出较高的相似性。地面点相距越近, 大气状态相关性就越高, 在水平距离 500 m 范围内, 可以认为

大气相位近似相等<sup>[5,8]</sup>。

基于同一影像内大气状态的自相关特性, 从空间尺度上对相邻两 PS 点的干涉相位再次差分, 则可在一定程度上减弱大气相位影响。从式(3)考查两相邻 PS 点的干涉相位差, 得到相位三次差分方程:

$$\Delta \phi_{dint}^i = K_1 \cdot B_{\perp}^i \cdot \Delta \delta_H + K_2 \cdot T^i \cdot \Delta v + \Delta \phi_{res}, \quad (5)$$

式中  $\Delta \phi_{dint}^i$  为相邻两 PS 的干涉相位差,  $\Delta \delta_H$  为高程修正差,  $\Delta v$  为线性沉降速度差,  $\Delta \phi_{res}$  为两 PS 的残留相位差。必须指出, 相邻 PS 点的相位差  $\Delta \phi_{dint}^i$  仍然被缠绕, 即使没有形变发生, 较小的高程修正差在长空间基线下也可能导致  $\Delta \phi_{dint}^i$  超过一个整周。例如在随后的实验中, 最长垂直基线为 1800 m, 对应的一个整周模糊高仅为 5 m。

再次强调, PS 点几乎不受干涉失相关噪声影响, 相位三次差分得到的残留相位差主要是由残留的大气影响、非线性沉降差和轻微噪声所贡献。由于邻近 PS 点上的大气影响和非线性沉降均表现为空间上高度相关<sup>[7,8]</sup>, 其残留相位差可以认为是一微小量, 满足  $|\Delta \phi_{res}| < \pi$ 。

在式(5)中, 若能正确估计  $\Delta \delta_H$  和  $\Delta v$ , 并顾及到  $|\Delta \phi_{res}| < \pi$ , 则能够得到  $\Delta \phi_{dint}^i$  的完整值。而  $\Delta \phi_{dint}^i$  是作为  $\phi_{dint}^i$  的梯度, 在梯度完整值已知前提下,  $\phi_{dint}^i$  可以得到解缠。关键是正确估计  $\Delta v$  和  $\Delta \delta_H$ 。

为正确估计相邻 PS 点间的沉降速度差  $\Delta v$  和高程修正差  $\Delta \delta_H$ , 我们可以为每一对 PS 点建立一个三次差分方程。为最大程度减弱大气相位贡献, 需要限制 PS 点间的距离, 如在 1 km 范围内可以认为大气影响经过三次差分可以得到极大减弱<sup>[5]</sup>。每两个满足距离条件的 PS 点均可以建立差异关系, 最终组成一个不规则网络。网络中的每一边相当于一个观测值, 联系了两 PS 点的线性沉降速度差  $\Delta v$  和高程修正差  $\Delta \delta_H$ 。

在空间尺度上我们可以为每一个 PS 点对建立一个三次差分方程, 从时间序列上若有  $K$  个干涉对, 则每对 PS 点总共可以写出  $K$  个方程。相邻 PS 点的  $\Delta v$  和  $\Delta \delta_H$  为待估参数, 在各干涉对中为固定值, 变化参数为各干涉对的时间基线和空间有效基线。基于此特性, 采用如下的目标函数<sup>[6,7]</sup>——总体复相关性测度  $\gamma$  估计未知参数  $\Delta v$  和  $\Delta \delta_H$ 。

$$\gamma = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (\cos \omega_i + j \sin \omega_i), \quad (6)$$

式中  $\omega_i = \Delta\phi_{\text{dir}} - (K_1 \cdot B_{\perp}^i \cdot \Delta\delta_{\text{H}} + K_2 \cdot T^i \cdot \Delta v)$ , 表示模型(5)的残留相位,  $v$  为像元的多干涉对复相关系数. 在所有解空间中搜寻一组解  $(\Delta v, \Delta\delta_{\text{H}})$  使得  $|\gamma|$  取得最大值, 则表示模型与观测相位吻合最好. 满足相关性最好的这组解  $(\Delta v, \Delta\delta_{\text{H}})$  为最佳的模型匹配参数. 逐对 PS 进行估计, 所有边上的  $\Delta v$  和  $\Delta\delta_{\text{H}}$  分别组成了一个网络.

### 2.3 PS 网平差

对 PS 网络各边上的  $\Delta v$  和  $\Delta\delta_{\text{H}}$  估计值还必须作进一步整体调整, 这是因为每条边上的观测值  $\Delta\delta_{\text{H}}$  和  $\Delta v$  都仅仅考虑了最佳适合于各对 PS 点自身的时序相位模型, 而对于全局网络来说, 不一定是最佳匹配. 事实上后续实验也表明, 网络中大量的闭合环(如三角形)出现闭合差不为 0 的情况, 需要对各边观测值进行调整, 找出全网最佳解.

以网络中的一个 PS 点作为参考点(即位置基准), 其余所有点的  $v$  和  $\delta_{\text{H}}$  为待估参数, 以每条边的总体相关系数  $|\gamma|$  定权, 采用经典的间接平差数据处理方法估计参数向量<sup>[8]</sup>. 以  $v$  为例, 写出所有边的误差方程式, 并法化求解, 得到网络中各 PS 点的线性沉降速度.

误差方程:

$$V = \hat{v}_j - \hat{v}_i - \Delta v_{ij}, \quad (7)$$

参数估计:

$$\hat{v} = (B^T P B)^{-1} (B^T P L), \quad (8)$$

式(7)和(8)中,  $\hat{v}$  为所有 PS 的沉降速度向量,  $B$  为误差方程的系数矩阵,  $P$  为权矩阵,  $L$  为误差方程的常数项矩阵.

通过对 PS 网进行平差处理, 可进一步消除噪声相位影响, 得到较为合理的 PS 点的线性沉降速度和高程修正.

### 2.4 大气相位和非线性沉降分量估计

将 PS 点上的沉降速度差  $\Delta\hat{v}$  和高程修正差  $\Delta\hat{\delta}_{\text{H}}$  代入方程式(5), 并顾及到  $|\Delta\phi_{\text{res}}| < \pi$ , 则可以得到邻近 PS 点间的残留相位差  $\Delta\phi_{\text{res}}$ , 对  $\Delta\phi_{\text{res}}$  积分可以得到所有 PS 点上的完整残留相位值  $\phi_{\text{res}}$ , 结合已估计得到的沉降速度  $\hat{v}$  和高程修正  $\hat{\delta}_{\text{H}}$ , 干涉相位的三个分量——式(3)被分离并提取, 至此, PS 点上的差分干涉相位得以解缠.

残留相位中的大气分量为从影像大气相位的综合影响, 从影像大气相位可被认为在时间上不相关, 对时序残留相位取均值并作空间平滑可

消除从影像大气贡献<sup>[7]</sup>, 得到主影像大气相位:

$$\phi_{\text{Atm}}^M = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \phi_{\text{res}}^j. \quad (9)$$

从空间尺度上平滑高通滤波后的时序残留相位, 可得到从影像大气相位. 去除大气相位总贡献后的剩余量即为 PS 的非线性沉降<sup>[7]</sup>, 即

$$h_{\text{Non-linear}}^i = \frac{\lambda}{4\pi} (\phi_{\text{res}}^i - \phi_{\text{Atm}}^M). \quad (10)$$

式(9)中的  $\phi_{\text{Atm}}^M$  为主影像大气相位, 式(10)中的  $h_{\text{Non-linear}}^i$  为 PS 点的非线性沉降量.

通过以上处理过程, 干涉相位的各个信号分量逐个被分离并提取, 根据离散 PS 点上的沉降速度和大气影响, 采用 Kriging 空间内插方法, 可计算成像区域内所有像素网格点的沉降速度、高程修正和大气影响.

## 3 实验数据与处理结果

### 3.1 实验区

为验证上述的 PS 干涉处理系统, 我们开展了基于 PS-DInSAR 技术的地面沉降探测实验. 选取典型的上海市地面沉降场作为研究对象, 由于过度的地下水抽取和近年来大规模的城市建设, 上海市地面沉降问题突出, 中心城区历史最大累计沉降超过 2.63 m, 因沉降问题引起的直接经济损失累计超过 50 亿元<sup>[10]</sup>. 地面沉降已给上海市带来了一系列严重后果, 如安全高程丧失、房屋建筑物破坏、洪涝灾害频繁等, 地面沉降被认为是上海市当前和将来面对的最主要地质灾害之一<sup>[11, 12]</sup>.

### 3.2 实验数据

采用欧洲空间局(European Space Agency, ESA) ERS-1/2 卫星的 C 波段(波长为 5.6 cm)雷达传感从 1992 年到 2002 年间重复飞越上海上空所获取的 26 幅 SAR 影像为源数据. 这些影像均为单视复数影像(Single Look Complex, SLC), 所有影像均是沿卫星降轨飞行轨道且以约 23° 的雷达侧视角成像获取. SAR 影像的斜距向和方位向分辨率分别为 7.9 m 和 4.0 m, 影像覆盖范围约为 100 km × 100 km, 影像中心经度为 121° 28' E, 中心纬度为 31° 10' N.

逐影像计算整体相关系数, 选取 ERS-2 卫星于 1996 年 6 月 4 日所获取的影像作为主影像, 其余 25 个影像为从影像, 这样形成 25 个干涉对. 表 1 列出了所有影像的卫星平台及轨道编号、成像日期以及主影像的空间基线长度  $B_n$  和时间间隔  $T_n$ .

表 1 上海地区 ERS-1/2 卫星 C 波段 SAR 影像数据和基线参数  
Table 1 ERS-1/2 C-band SAR images over Shanghai and baseline parameters

编号	卫星- 轨道	成像日期	$B_{\perp}$ (m)	$T$ (天)	编号	卫星- 轨道	成像日期	$B_{\perp}$ (m)	$T$ (天)
1	E1- 04657	1992- 06- 06	- 1249	- 1459	14	E2- 14887	1998- 02- 24	18	630
2	E1- 06160	1992- 09- 19	- 1139	- 1354	15	E2- 15388	1998- 03- 31	- 572	665
3	E1- 09166	1993- 04- 17	- 1189	- 1144	16	E2- 15889	1998- 05- 05	- 1086	700
4	E1- 10669	1993- 07- 31	- 1088	- 1039	17	E2- 20899	1999- 04- 20	- 1207	1050
5	E1- 12172	1993- 11- 13	- 568	- 934	18	E2- 23905	1999- 11- 16	- 736	1260
6	E1- 19530	1995- 04- 10	- 640	- 421	19	E2- 24406	1999- 12- 21	- 692	1295
7	E1- 22035	1995- 10- 02	- 1131	- 307	20	E2- 26410	2000- 05- 09	- 1444	1435
8	E1- 24039	1996- 02- 19	- 1445	- 106	21	E2- 26911	2000- 06- 13	- 620	1470
9	E1- 24540	1996- 03- 25	156	- 71	22	E2- 28414	2000- 09- 26	- 1206	1575
10	E2- 04867	1996- 03- 26	255	- 70	23	E2- 34426	2001- 11- 20	- 958	1995
11	E1- 25542	1996- 06- 03	- 84	- 1	24	E2- 37432	2002- 06- 18	- 1840	2205
12	E2- 05869	1996- 06- 04	0	0	25	E2- 37933	2002- 07- 23	- 1042	2240
13	E2- 13384	1997- 11- 11	- 328	525	26	E2- 38434	2002- 08- 27	- 66	2275

最长的时间间隔超过 6 年, 最大的空间基线超过 1800 m.

实验所需的 ERS-1/2 卫星精密轨道数据由荷兰 Delft 大学空间研究中心(DEOS) 提供, 轨道径向精度为 5~6 cm, 法向精度优于 20 cm, 能够满足干涉数据处理的精度要求<sup>[13, 14]</sup>.

上海地区的 DEM 数据由国家测绘局(SBSM) 提供, 其高程中误差为 2.5 m. 随后的基于 PS 时序差分干涉分析仅以上海市中心城区 8 km × 8 km 的范围作为考查区域, 主要跨越虹口、黄浦和浦东新区. 该区域地势平坦, 地面最大高程为 15 m, 最小高程为 0 m, 平均高程为 2 m.

### 3.3 PS 差分干涉和处理结果

对所有干涉对逐个进行干涉处理, 采用 DEOS 精密轨道数据和 SBSM DEM 数据分别去除参考相位和地形相位, 得到 25 幅差分干涉图. 图 1 显示了其中的一幅相位图, 时间间隔为 630 天(从影像获取时间为 1998 年 2 月 24 日), 有效空间基线为 18 m. 图 1 中的一个条纹对应于两次成像间沿雷达视线方向 2.8 cm 的斜距变化.

为识别该区域内的 PS 目标, 首先对主影像和配准后的从影像分别进行绝对辐射校正<sup>[15]</sup>, 然后以时序振幅离差指数阈值 0.35 进行判别, 总共提取了 743 个有效的 PS 单元(图 2 中的网络结点). 该过程得到的副产品为该区域高分辨率的时序振幅均值图(图 2 背景). 根据 PS 坐标, 从干涉图中仅仅提取 PS 点的相位时间序列用于随后的分析处理, 放弃了大量的非 PS 目标, 实验数据从起初的约 100 GB 减少为约 50 MB.

在离散 PS 点中搜寻距离小于 1 km 的 PS 点对

并将这些点对进行连接, 总共建立了 25696 条边, 对每条边上的两个 PS 点进行相位三次差分处理, 采用总体相关性测度估计相邻 PS 点间的沉降速度差和高程修正差, 由此构成一个 PS 监测网(图 2).

采用间接平差方法估计各 PS 点的沉降速度和高程修正, 并将 PS 点间的沉降速度差和高程修正差代入三差方程, 计算相邻 PS 点间的残留相位差, 再采取积分求和方法, 估计各 PS 点上的残留相位值. 根据式(9)和式(10), 在 PS 点上计算主影像大气相位贡献和时序非线性沉降.

在稀疏 PS 点上分离并提取各相位分量后, 采用 Kriging 内插方法, 以主影像像素格网为基准, 计算其余非 PS 目标的沉降速度和高程修正. 图 3 为最终提取的上海城区 1992 至 2002 年间的线性沉降速度场. 图 4 为内插出的主影像大气相位贡献, 最大绝对值为 0.6 rad, 标准差为 ±0.3 rad.

### 3.4 结果分析与验证

该研究范围内地表沉降呈现出区域微量差异分布(图 3), 以浦东新区和虹口区沉降较为显著, 其最大线性沉降量达到 20 mm/a, 沿江两岸的沉降速度也达到约 15 mm/a, 而在远离黄浦江的浦西内城区, 沉降量相对较小, 约为 8 mm/a, 整个研究范围内地面平均沉降速度为 12 mm/a. 结合上海市近 10 年间的地面空间发展格局<sup>[11, 12]</sup>, 实验结果能够得到一定的解释. 上海市的大规模城市建设对地面沉降影响较大. 在 1990~2000 年间, 各种高层建筑物施工的范围、规模和速度都是最大的. 这些大规模的城市建设大都集中在沿江两岸, 尤其以新兴的浦东为中心, 工程施工的开挖和排水以及城市地下水抽取等均易使土层遭受破坏而发生结构变动, 导致地

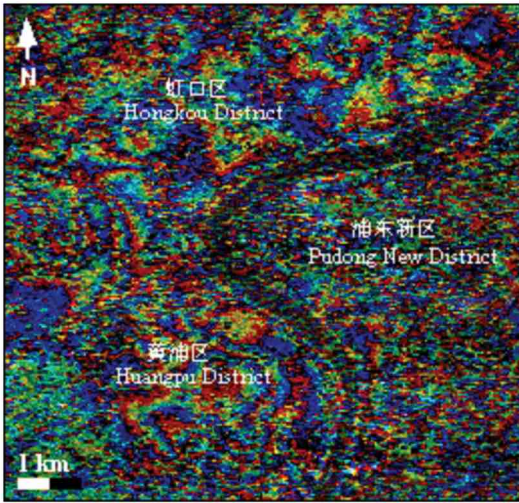


图 1 差分干涉相位图 (1996-06-04~1998-02-24)  
Fig. 1 Differential interferogram (1996-06-04~1998-02-24)

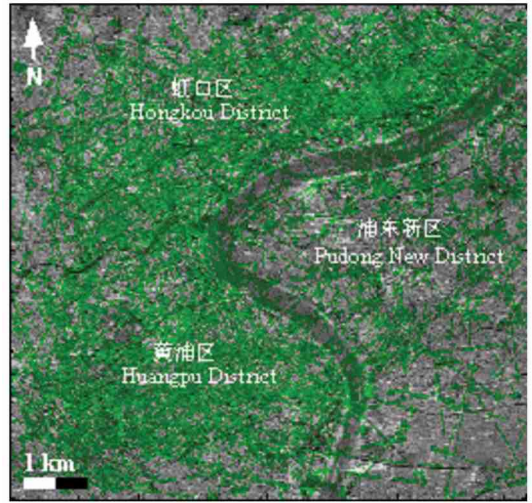


图 2 PS 监测网  
Fig. 2 PS monitoring network

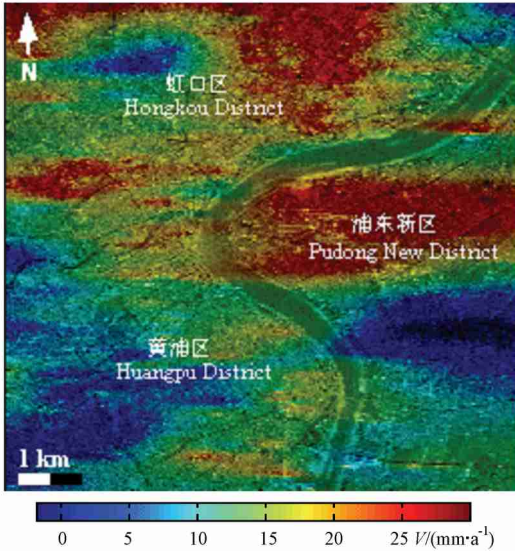


图 3 线性沉降速度场  
Fig. 3 Linear subsidence rate field

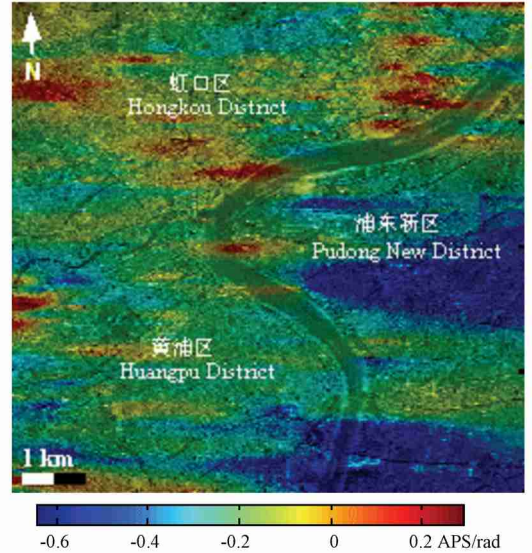


图 4 主影像大气相位贡献  
Fig. 4 APS of the master acquisition

面发生沉降。此外，全球海平面约以每年 1.5 mm 的速率上升，同时上海地区地壳每年以约 1 mm 速率下沉<sup>[11]</sup>，这些因素都是导致上海市地面发生沉降的原因。

从 1965 年至今，有关部门一直在使用地面精密水准测量方法，每年对中心城区的沉降监测点各进行一次一等和二等水准测量<sup>[11]</sup>。与同期观测数据比较，本实验所提取的沉降速度场与地面精密观测成果吻合较好，整体差异量约为  $\pm 4$  mm，证实了 PS 雷达差分干涉方法用于监测地表沉降的可靠性。

## 4 结 论

永久散射体雷达差分干涉技术能够间接克服 DInSAR 在区域地表形变监测应用中面临的时空失相关和大气效应负面影响，仅仅选取成像区域内雷达散射特性稳定的人工或自然地物而放弃大量的非稳定目标进行时序差分干涉处理，能够提取可靠的区域地表形变场。以上海市中心城区(8 km × 8 km)为研究对象，选取 1992~2002 年间的 ERS-1/2 卫

星所获取的 26 幅 SAR 影像, 进行了 PS 识别与沉降信号的提取工作, 得到了上海市中心城区 10 年间的地面沉降速度场, 区域平均沉降速度为 12 mm/年, 得到的沉降速度与地面精密测量成果具有一致性, 证实了 PS-DInSAR 技术用于探测地表形变的可靠性。

基于 PS 的时序差分雷达干涉技术在城市地区地表形变监测方面具有较好的应用前景, 其优点是城市地区 PS 密度大, 雷达影像空间分辨率高、覆盖范围广, PS 干涉处理自动化程度高, 这对于基于点观测的方法(如 GPS 测量、水准测量等)是一个极好的补充。地面精密观测方法可为 PS-DInSAR 技术提供少量控制数据, 而 PS-DInSAR 方法可为区域研究提供高空间分辨率成果, 两者的有效结合有望发展为城市地区地面沉降长期监测的一条新途径。

致 谢 欧洲空间局第一类数据使用资助项目(批准号: 1227) 提供 SAR 影像。

#### 参考文献(References)

[ 1 ] Wang Chao, Zhang Hong, Liu Zhi, et al. Satellite SAR interferometric observations of displacement associated with urban subsidence in Suzhou Eastern China. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(10): 798~ 801

[ 2 ] Liu Guoxiang, Ding Xiaoli, Chen Yongqi, et al. Ground settlement of Chek Lap Kok airport Hong Kong, detected by satellite synthetic aperture radar interferometry. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(21): 1778~ 1782

[ 3 ] 王 超, 张 红, 刘 智. 基于 D-InSAR 的 1993~ 1995 年苏州市地面沉降监测. *地球物理学报*, 2002, 45(增刊): 244~ 253

Wang C, Zhang H, Liu Z. Subsidence of Suzhou city (China) from 1993 to 1995 detected by ERS differential SAR interferometry. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2002, 45(Suppl.): 244~ 253

[ 4 ] Liu Guoxiang. Mapping of Earth Deformations with Satellite Radar Interferometry: A Study of Its Accuracy and Reliability Performances. Hong Kong: Publication of the Hong Kong Polytechnic University, 2003. 7~ 26

[ 5 ] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and

topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 7547 ~ 7563

- [ 6 ] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8~ 19
- [ 7 ] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 38(5): 2202~ 2212
- [ 8 ] Bert M, Nico A. Velocity field retrieval from long term coherent points in Radar interferometric stacks. Proc. IGARSS 2003, Toulouse, 2003, 2: 941~ 943
- [ 9 ] 王 艳, 廖明生, 李德仁等. 利用长时间序列相干目标获取地面沉降场. *地球物理学报*, 2007, 50(2): 598~ 604
- Wang Y, Liao M S, Li D R, et al. Subsidence velocity retrieval from long-term coherent targets in radar interferometric stacks. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(2): 598~ 604
- [ 10 ] 王 勇, 左 华. 上海市地面沉降的经济损失评估. *自然灾害学报*, 1993, 2(1): 16~ 23
- Wang Y, Zuo H. Evaluation of economical loss of land subsidence in Shanghai. *Journal of Natural Hazard* (in Chinese), 1993, 2(1): 16~ 23
- [ 11 ] 刘 毅, 张先林, 万贵富等. 上海市近期地面沉降形势与对策建议. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, 9(2): 13~ 17
- Liu Y, Zhang X L, Wan G F, et al. The situation of land subsidence and countermeasures in Shanghai for recent years. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control* (in Chinese), 1998, 9(2): 13~ 17
- [ 12 ] 刘 毅. 上海市地面沉降防治措施及其效果. *火山地质与矿产*, 2000, 21(2): 107~ 111
- Liu Y. Preventive measures for Shanghai land subsidence and their effects. *Volcanology & Mineral Resources* (in Chinese), 2000, 21(2): 107~ 111
- [ 13 ] Zhang Feipeng, Huang Cheng, Liao Xinhao, et al. Precision ERS-2 orbit determination combining multiple tracking techniques. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(20): 1756~ 1760
- [ 14 ] Scharroo R, Visser P. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, 1998, 103(C4): 8113~ 8127
- [ 15 ] Laur H, Bally P, Meadows P, et al. ERS SAR CALIBRATION: Derivation of the backscattering coefficient  $\sigma^0$  in ESA ERS SAR PRI. ESA Document No. ES-TN-RS-PM-HL09 (Issue 2, Rev. 5f): 2004. 24~ 26, 47~ 51

( 本文编辑 胡素芳 )