

文章编号: 1007-4619(2008)02-0270-07

永久散射体网络建模及地表形变与大气影响分析

罗小军, 刘国祥, 黄 赓, 陈 强

(西南交通大学 土木工程学院测量工程系, 四川 成都 610031)

摘 要: 为了更有效、更可靠地探测地表线性和非线性形变, 估计 SAR 成像时的大气影响, 本文提出了基于优化永久散射体网络的邻域差分建模方法, 详细讨论了 PS 组网、网络优化以及估计地表形变与大气影响等参数的数学模型与计算过程, 并基于 Matlab 环境编程实现了这一方法。最后以上海陆家嘴地区为例, 选取 26 幅 ERS-1/2 卫星 SAR 影像进行实验, 探测出实验区在 1992—2002 年间的线性形变速率、非线性形变量、总的区域形变场及各成像时刻的大气影响值, 与地面观测结果具有较高的一致性。实验结果表明, 本文提出的 PS 邻域差分建模方法是可行的, 相应的计算程序是可靠的。

关键词: 雷达差分干涉; 永久散射体; 建模; 形变; 大气影响

中图分类号: P407 **文献标识码:** A

1 引 言

常规合成孔径雷达差分干涉 (differential interferometric synthetic aperture radar, D InSAR) 技术在探测地表形变时往往存在严重的失相关和大气影响问题^[1]。为此, Ferretti^[2,3]提出了基于永久散射体 (permanent scatterer, PS) 的雷达差分干涉测量方法。该方法从同一研究区域内多幅 (≥ 25) 不同时相的雷达影像中, 提取具有稳定散射特性的地面目标作为 PS。这些 PS 的相位具有高信噪比特性, 可采用相应的相位模型及算法, 将地表形变信息、地形数据误差和大气延迟信号从中分离出来。汤益先^[4]等已利用该方法探测了苏州地面沉降。虽然 Ferretti 提出的永久散射体方法可克服差分干涉测量中的失相关和大气效应影响, 但是, 要用该方法更可靠、更有效地探测地表形变, 则相关模型及其参数的有效估计方法有待进一步改善, 这对探测微小地表形变来说是非常必要的。此外, 虽然汤益先等利用 PS 技术探测了苏州地面线性沉降, 但对于非线性形变的估计未作探讨。

为了利用永久散射体技术更有效、更可靠地

提取地表线性和非线性形变信息, 分析 SAR 成像时的大气影响, 本文考虑形变和大气影响的时空相关性, 将 PS 组成不规则三角网 (triangular irregular network, TIN), 建立 PS 邻域差分相位模型。为了提高模型参数估计的可靠性, 首先对 PS 的不规则三角网进行两次优化, 然后根据优化后的 PS 网络选取更加可靠的 PS 邻域差分相位, 采用网络平差法估计模型中的地表线性形变和高程误差参数。对于非线性形变和大气相位的估计, 提出了再次利用网络平差进行计算的方法。最后以上海陆家嘴沉降场为例, 选取 1992—2002 年间的 26 幅 ERS-1/2 卫星 SAR 影像进行实验, 以验证模型和算法的有效性。

2 雷达干涉 PS 建模与线性形变估计

2.1 PS 差分干涉相位分析

永久散射体雷达差分干涉测量, 是借助多幅不同时相的 SAR 影像反演时间序列上的地表形变, 其前提是获得研究区内的 PS 以及各 PS 的时序差分干涉相位。设研究区有 $N+1$ 幅不同时相的 SAR 影像, 选取其中一幅作主影像, 其余 N 幅为从影像分别与主影像配准, 得到 $N+1$ 幅配准

收稿日期: 2006-12-20 修订日期: 2007-02-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 40474003 40374008); 教育部优秀教师资助计划 (编号: 2003109)。

作者简介: 罗小军 (1974—), 男, 四川安岳人, 博士, 讲师。主要从事摄影测量与遥感、InSAR 理论及应用研究。Email: lxj@

home.swjtu.edu.cn

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的 SAR 影像和 N 个干涉对。对于 $N+1$ 幅配准的 SAR 影像, 采用合理的算法可从中探测出研究区内的 PS^[3,5]。对于 N 个干涉对, 借助已有的数字高程模型 (DEM), 进行两通差分干涉处理, 就可得到 N 幅差分干涉图, 从而得到 PS 点的时序差分干涉相位。

在探测出研究区足够数量的 PS 和获得相应的时序差分干涉相位后, 根据干涉相位组成原理^[6,7], 如果考虑地表形变 (线性和非线性叠加)、DEM 误差、大气延迟和失相关噪声, 则某 PS 点在第 k 幅差分干涉图中的相位就可看作是上述各因素贡献的和, 即:

$$\phi_i^k = C_h \cdot B_{\perp}^k \cdot \Delta h_i + C_v \cdot T^k \cdot v_i + \phi_{res_i}^k$$

$k=1, 2, 3, \dots, N$

(1)

式中, Δh 和 v 分别是 PS 点的高程误差和沿雷达视线方向的线性形变速率; ϕ_{res} 是该 PS 点在第 k 幅差分干涉图中的残余相位, 它是大气延迟、非线性形变和失相关噪声贡献之和; $B_{\perp}^k$ 和 T^k 分别是第 k 幅干涉对的空间和时间基线; $C_h = 4\pi / (\lambda \cdot R \cdot \sin\theta)$, $C_v = 4\pi / \lambda$, R 为雷达至地面目标的斜距, λ 为雷达波长, θ 为雷达波入射角。

由于只知道相位 ϕ_i^k 的缠绕值, 由式 (1) 构成的方程组求解就变成了一个复杂的非线性系统问题, 因此用传统的相位解缠方法直接求解是很困难的。

2.2 PS 邻域差分建模及 PS 网优化

鉴于模型式 (1) 难以直接求解, 可考虑 PS 相位中各分量的空间相关性, 通过建立 PS 网络邻域差分模型间接求解式 (1)。Ferretti^[3] 和 Colesanti^[8] 研究指出: 大气延迟、高程误差和地表形变在一定范围内存在空间自相关。因此, 将相邻 PS 的差分干涉相位进一步差分, 即建立 PS 邻域差分相位模型, 可降低大气延迟和失相关噪声的影响, 并用信号分析的方法从差分相位中提取出线性形变和高程误差信息。为此, 根据测量控制网的思想, 将所有 PS 组成不规则三角网, 如图 1。根据式 (1), 网中任一条边对应的两个相邻 PS 点在第 k 幅差分干涉图中的相位之差可表示如下:

$$\Delta\phi_{ij}^k = C_h \cdot B_{\perp}^k \cdot \nabla\Delta h_{ij} + C_v \cdot T^k \cdot \Delta v_{ij} + \Delta\phi_{res_ij}^k$$

$k=1, 2, 3, \dots, N$

(2)

式中, $\nabla\Delta h$ 与 Δv 分别为相邻 PS 点与的高程误差之差和线性形变速率之差; $\Delta\phi_{res_ij}^k$ 为两相邻 PS 的残余相位之差, Ferretti^[3] 和 Colesanti^[8] 根据形变和

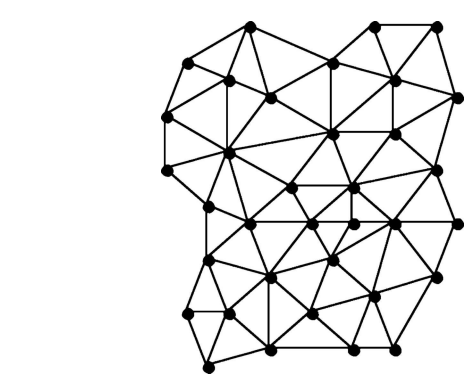


图 1 PS 构建的 TN 网示意图
Fig 1 Illustration of PS TN

大气影响的空间相关性分析指出, $|\Delta\phi_{res_ij}^k| < \pi$ 。对于 N 幅差分干涉图, TN 网中任意一条边对应的两个 PS 就可建立 N 个如式 (2) 的相位差分方程。

对于式 (2), 在 $|\Delta\phi_{res_ij}^k| < \pi$ 的条件下, 可利用二维频谱分析方法, 求得相邻 PS 的高程误差之差 $\nabla\Delta h$ 和线性形变速率之差 Δv 的最佳估计值^[2]。

在采用频谱分析法对相邻 PS 的 $\nabla\Delta h$ 和 Δv 进行估计时, 需要说明两点: 第一, 两相邻 PS 的残余相位之差 $|\Delta\phi_{res_ij}^k|$ 要尽量小 (即满足条件 $|\Delta\phi_{res_ij}^k| < \pi$), 使它不会影响相位信号 $\Delta\phi_{ij}^k$ 中的主要信息 $\nabla\Delta h$ 和 Δv 。这样估计的 $\nabla\Delta h$ 和 Δv 才可靠。为达到这个目的, 要求两 PS 点相距不能太远, 以使 PS 中的大气延迟相位、非线性形变相位和失相关噪声的影响通过邻域差分得以消除或削弱。为此, 可设定一个距离阈值 D_r (一般可取 $1\text{ km}^{[3]}$), 对 PS 的 TN 网进行优化, 去掉边长大于 D_r 的边。第二, 上述参数估计方法其实遵循的是最优估计法则, 它使模型估计相位与观测相位达到最佳拟合, 其拟合程度可用下式计算的参数 γ 衡量。

$$\gamma_{ij} = \left| \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^{j W_{ij}^k} \right|$$

(3)

式中, $W_{ij}^k = \Delta\phi_{ij}^k - (C_h \cdot B_{\perp}^k \cdot \nabla\Delta h_{ij} + C_v \cdot T^k \cdot \Delta v_{ij})$, 参数 γ 为多影像相位相干系数 (multi-image Phase coherence)^[3], 取值位于区间 $[0, 1]$ 。 γ 越大, 表示模型估计相位与观测相位拟合得越好, 也说明模型中相邻两 PS 点和的参数估计值 $\nabla\Delta h$ 和 Δv 越可靠。因此, 为了提高模型参数估计的可靠性, 可设置一个合适的 γ 阈值, 对 PS 的 TN 网再次进行优化, 去掉 γ_{ij} 小于给定阈值的边。

2.3 PS线性形变估计

获得优化后的 TN中所有边的高程误差之差 $\nabla \Delta h$ 和线性形变速率差 $\Delta \dot{v}$ 之后,借助水准网平差的思想,利用间接平差法计算优化后的 TN中各 PS的线性形变速率和高程误差。以求解 PS线性形变速率为例,设优化后的 PS连续网络中有 M个 PS点, L条边。选取其中一个已知形变信息的 PS点为基准点(如可取零形变区域的 PS点作为基准点),其余 M-1个 PS点的形变速率为待求参数。已知的 L个线性形变速率之差为观测值,相应的权为 γ_i ;则可列出如下的误差方程(矩阵形式):

$$V_i = B \cdot \dot{v} - \Delta v \quad i=1, 2, \dots, L \tag{4}$$

式中, V_i 为相邻 PS的线性形变速率差的改正数向量, $\dot{v}$ 为所有 PS的形变速率组成的向量, Δv 为相邻 PS线性形变速率差组成的向量, B是由 1和 -1组成的稀疏矩阵。根据上述误差方程,采用最小二乘原理,可求得各 PS点的线性形变速率如下:

$$\hat{\dot{v}} = (B^T \cdot P \cdot B)^{-1} (B^T \cdot P \cdot \Delta v) \tag{5}$$

式中, P为权阵,它是各边观测值(线性形变速率之差)对应的权 γ 组成的一个对角阵。按照上述同样的方法,可求得各 PS点的高程误差。

3 大气相位及非线性形变量提取

求得各 PS的线性形变速率和高程误差后,根据式(1)可求得所有 PS在 N幅差分干涉图中的残余相位 ϕ_{res} (是一个 $N \times M$ 矩阵),进一步可从中提取大气相位和非线性形变量。由于缺乏大气相位、非线性形变和失相关噪声的具体函数模型,因而不能用一般的模型求解方法从残余相位中分离大气相位和非线性形变相位。

对于大气延迟影响,一般认为它在时间上是不相关的,而在空间上却具有强相关性^[2-8],近似用一个复杂的三维曲面来拟合^[9]。从信号分析的角度来说,大气延迟相位在时间序列上表现为高频特性,而在空间分布上表现为低频特性。非线性形变在时间和空间上均具有相关性,也就是无论在时间序列还是空间分布上均表现为低频特性。而失相关噪声在时间和空间上均不相关,认为它是白噪声^[8-10]。因此,考虑大气延迟和非线性形变的时空相关性,可采用不同的滤波方法对残余相位 ϕ_{res} 在时间和时间序列上进行滤波,从而将大气信号和非

线性形变信号从残余相位中分离出来。

首先,将各 PS的残余相位进行时间序列上的高通滤波,其结果主要由包含于差分干涉相位中的大气相位和失相关噪声组成。再联合所有 PS在同一差分干涉图中的高通滤波结果进行空间上的低通滤波(如窗口平滑滤波),从而滤除相位中的失相关相位噪声,剩余相位就是各 PS在各差分干涉图中的大气相位,即

$$\phi_D^{am} = \{ [\phi_{res}]_{HP_Time} \}_{LP_Space} \tag{6}$$

式中, HP_Time 和 LP_Space 分别表示时间序列上的高通滤波和空间上的低通滤波, ϕ_D^{am} 是一个 $N \times M$ 矩阵。再根据 Ferret的思想,将各 PS的残余相位在时间序列上的平均值作为各 PS在主影像中的大气相位^[3],即

$$\phi_m^{am} = mean(\phi_{res}) \tag{7}$$

式中, $mean$ 为矩阵均值算子, ϕ_m^{am} 是 $1 \times M$ 向量,其元素就是各 PS在主影像中的大气相位。

求得所有 PS在各差分干涉图和主影像中的大气相位之后,可进一步计算 PS在各从影像中的大气相位,即:

$$\phi_s^{am} = \phi_m^{am} - \phi_D^{am} \tag{8}$$

上述求得的只是各离散 PS点在主影像、从影像和各干涉图中的大气相位,可进一步采用克立格插值法对上述各大气相位进行空间规则格网插值^[11],得到整个研究区各像素的各项大气相位。

分离出大气相位后,剩余成分就主要是非线性形变相位。为进一步提高非线性形变相位估计精度,考虑形变的时空相关性,对上述的剩余成分再进行空间上的低通滤波,即窗口平滑滤波,其结果就可作为非线性形变相位的估计值。即

$$\phi_{NL} = \{ \phi_{res} - [\phi_{res}]_{HP_Time} \}_{LP_Space} \tag{9}$$

由此可反演各 PS在各时间段内的非线性形变量,然后结合前面求得的各 PS线性形变速率,即可计算各 PS在各时间段内的实际总形变量。进一步采用克立格插值法对各 PS在各时间段内的实际总形变量进行空间规则格网插值,即得到研究区在各时间段内的形变场。

4 实验及结果分析

根据上述 PS网络邻域差分建模的思想,本文基于 Matlab环境编写了一套实现 PSDInSAR算法的程序,并以上海城市沉降为例进行实验,验证模

型及算法的有效性和程序的可靠性。实验数据为欧洲空间局 ERS1/2 卫星的 C 波段 (波长为 5.6 m)雷达在 1992—2002 年间获取的 26 幅上海地区 SAR 单视复数影像, 影像参数见表 1。实验主要选取上海陆家嘴地区作为实验区, 面积约 33 km²。图 2 白色方框内是研究区位置及范围, 图中北东—南西向的曲折灰色条带为黄浦江。

表 1 上海地区 ERS1/2 影像参数
Table 1 ERS1/2 Image Parameters for Shanghai Study Area

影像序号	卫星平台	成像日期
1	ERS1	1992-06-06
2	ERS1	1992-09-19
3	ERS1	1993-04-17
4	ERS1	1993-07-31
5	ERS1	1993-11-13
6	ERS1	1995-04-10
7	ERS1	1995-10-02
8	ERS1	1996-02-19
9	ERS1	1996-03-25
10	ERS2	1996-03-26
11	ERS1	1996-06-03
12	ERS2 (主)	1996-06-04
13	ERS2	1997-11-11
14	ERS2	1998-02-24
15	ERS2	1998-03-31
16	ERS2	1998-05-05
17	ERS2	1999-04-20
18	ERS2	1999-11-16
19	ERS2	1999-12-21
20	ERS2	2000-05-09
21	ERS2	2000-06-13
22	ERS2	2000-09-26
23	ERS2	2001-11-20
24	ERS2	2002-06-18
25	ERS2	2002-07-23
26	ERS2	2002-08-27

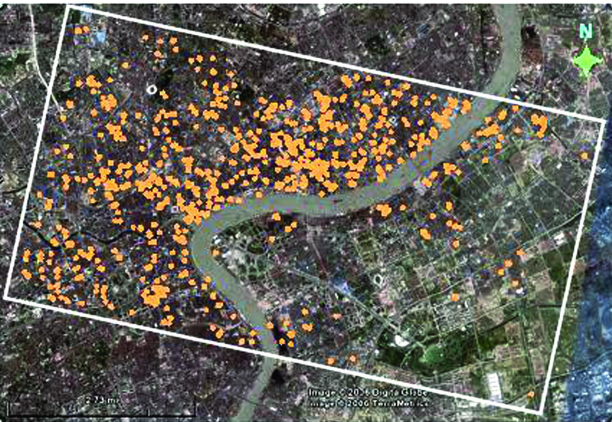


图 2 研究区位置及 PS 分布图

实验步骤及相关结果如下:

(1) 以 ERS2 卫星于 1996-06-04 获取的影像为主影像, 其余为从影像, 分别与主影像配准, 共生成 25 个干涉对。采用美国 NASA 提供的分辨率为 90 m 的 SRTM 数字高程模型和荷兰 Delft 大学空间研究中心提供的 ERS1/2 卫星精密轨道数据, 对各干涉对进行差分干涉处理, 得到 25 幅差分干涉图。作为示例, 图 3 给出了以 1996-03-26 的影像为从影像生成的差分干涉图, 图 4 周的绿色边为配准后的空白区。

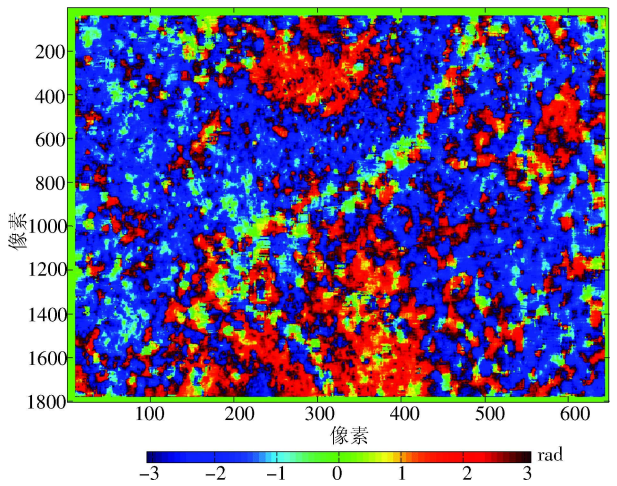


图 3 差分干涉图

Fig 3 Differential interferogram

(2) 采用双阈值法^[5]探测出研究区的 PS 目标, 并按地理坐标将它们投影在高分辨率遥感影像上 (文中遥感影像底图均来自 Google Earth), 见图 2。图中黄色圆点代表 PS。然后将这些 PS 构成 TN 网, 计算 TN 各边对应的高程误差之差和线性形变速率之差, 并对 TN 网进行优化。图 4 展示了经两次优化后的 PS 网 (按影像坐标构造)。

(3) 根据优化后的 TN 中各边对应的线性形变速率差和高程误差之差, 采用网络平差法计算各 PS 点的线性形变速率和高程误差。图 5 显示了各 PS 点的线性形变速率。

(4) 计算各 PS 点的残余相位, 从残余相位中提取所有 PS 的非线性形变量, 然后将各 PS 在时间序列上的非线性形变量累加, 即可得到各 PS 在 1992—2002 年间的非线性形变总量, 结果如图 6。

(5) 将各 PS 在 1992—2002 年间的线性形变总量与非线性形变总量相加, 并采用克立格方法插值, 最终得到研究区在 1992—2002 年间的形变场, 图 7 就是研究区在 10 年内的形变场。

Fig 2 Illustration of research site and PS distribution

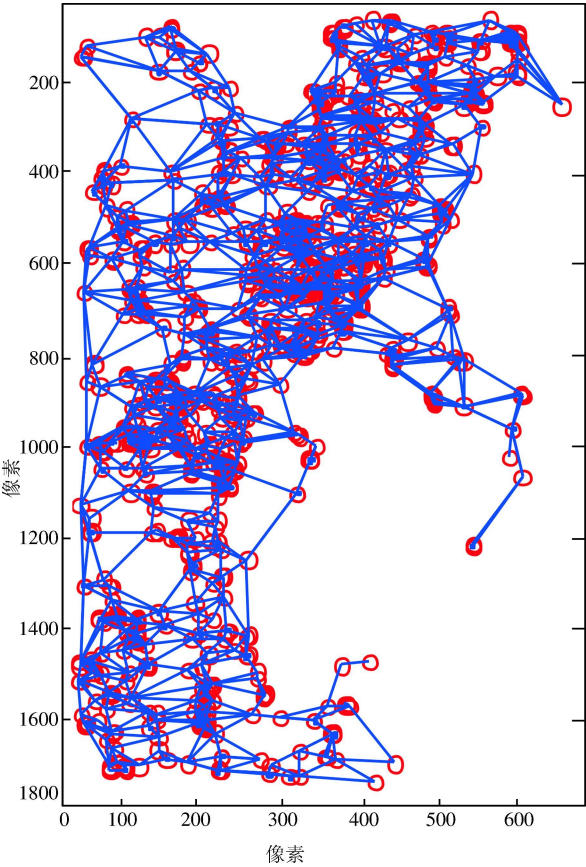


图 4 经两次优化后的 PS 网络
Fig 4 PS network twice optimized

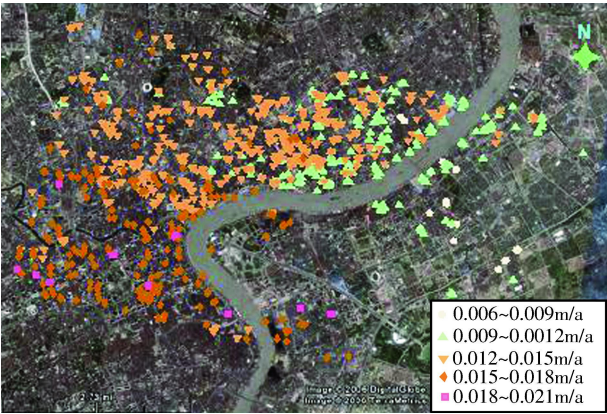


图 5 各 PS 线性形变速率分布
Fig 5 Distribution of PS linear motion velocities

(6) 最后再次利用残余相位, 计算各 PS 点在主影像、从影像和各干涉 (或差分干涉) 图中的大气相位, 并采用克里格插值法得到研究区各点的各项大气相位值。图 8 展示了主影像中的大气相位。

从图 3 可知, 图中没有出现连续、清晰的干涉条纹, 而且存在明显的斑点噪声。根据图示的差分干涉相位, 如采用常规差分干涉方法, 获得研究区在 1996-03-26—1996-06-04 间的地表形变量将至少

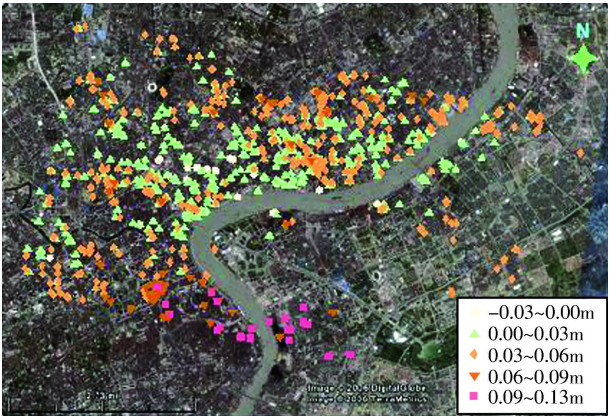


图 6 各 PS 在 1992—2002 年间的非线性形变总量分布
Fig 6 Distribution of PS total nonlinear deformations from 1992 to 2002

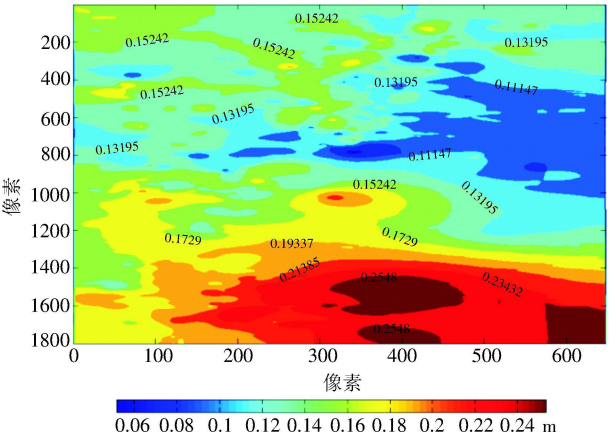


图 7 研究区在 1992—2002 年间的形变场
Fig 7 Deformation field of research area from 1992 to 2002

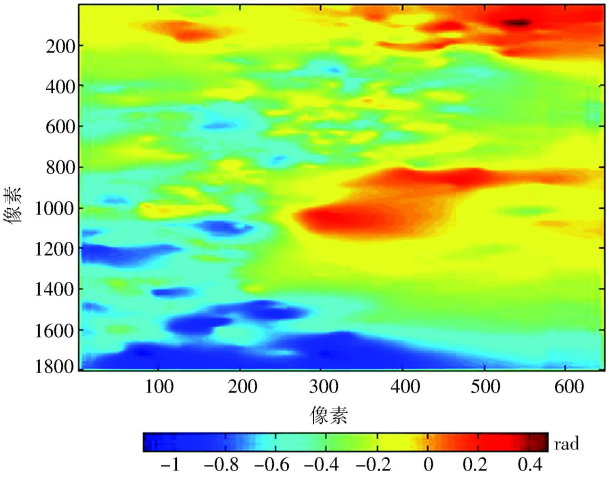


图 8 主影像大气相位
Fig 8 Atmospheric Phase of master image

达 2.8 mm, 显然不合实际。这说明图示的差分干涉相位除了地表形变因素影响外, 还受高程误差、失相关、大气延迟等因素的影响, 要精确获取地表形

变, 必须消除或降低这些因素的影响。

分析图 7 可知, 研究区在 1992—2002 年间的形变量均为正值。根据差分干涉反演地表形变的原理^[6,7], 形变量为正, 表示地面目标沿雷达视线方向移动, 这说明研究区在 1992—2002 年间总体发生沉降, 其最大沉降量为 0.2757m, 最小为 0.0643m。由北往南, 沉降量呈逐渐增加的趋势, 这一结果与图 5 展示的各 PS 的线性形变速率变化趋势一致。沉降最大的地区是黄浦江东边的新区, 与图 5 和图 6 显示的各 PS 的线性形变速率和非线性形变量的最大值分布位置一致。进一步根据各 PS 点的线性形变速率及其在 1992—2002 年间的总沉降量统计可知, 研究区在 1992—2002 年间的平均线性形变速率为 13.2mm/a; 加上非线性形变量后统计的总平均形变速率为 16.8mm/a。而上海市城市规划管理局的实测沉降资料证实: 20 世纪 90 年代后, 陆家嘴地区的沉降达 12—15mm/a 且无减缓趋势。与实测结果相比较, 无论是线性形变速率还是总平均形变速率, 与实测结果之间均只有毫米级的误差, 说明实验结果与实测结果具有很高的一致性。实验表明, 基于 PS 网络的邻域差分相位模型及其算法是有效的。

5 结 论

基于雷达差分干涉永久散射体技术, 对研究区内的 PS 构造不规则三角网, 建立 PS 网络邻域差分模型。对 PS 的不规则三角网进行两次优化后, 选取可靠的 PS 邻域差分相位, 采用间接平差法对模型参数进行估计, 不仅可有效提取 PS 上的线性形变速率, 还可分析各 PS 在时间序列上的非线性形变, 甚至分离出高程误差和大气延迟信号。本文详细分析了 PS 网络邻域差分建模、PS 网络优化及模型求解过程, 并基于 Matlab 环境编写了一套完整的计算程序, 实现了 PS-DInSAR 技术。最后以上海陆家嘴地区为例, 选取 1992—2002 年间的 26 幅 ERS-1/2 卫星 SAR 影像进行了实验。实验探测出了上海陆家嘴地区在 1992—2002 年间的线性形变速率、非线性形变量和区域形变场, 还获得了各成像时刻的大气影响值。根据获得的线性形变速率和非线性形变量统计, 研究区在 1992—2002 年间的平均线性形变速率为 13.2mm/a; 加上非线性形变量后

的总平均形变速率为 16.8mm/a; 二者与实测结果之间具有很高的一致性。实验结果表明: 本文提出的基于优化 PS 网络的邻域差分建模方法可有效探测地表线性形变、非线性形变、高程误差和各成像时刻的大气影响值, 相应的模型算法是有效的, 实现程序是可靠的。

参考文献 (References)

- [1] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Maps [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 103(B4): 7547—7563
- [2] 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(5): 2202—2212
- [3] Ferretti A, Claudio P, Rocca A. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8—20
- [4] Tang Y X, Zhang H, Wang C. Research on the Subsidence of Shuzhou Based on PS-InSAR [J]. Progress in Natural Science, 2006, 18(6): 1015—1020 [汤益先, 张红, 王超. 基于永久散射体雷达干涉测量的苏州地区沉降研究 [J]. 自然科学进展, 2006, 18(6): 1015—1020]
- [5] Chen Q, Liu G X, Li Y S, et al. Automated Detection of Permanent Scatterers in Radar Interferometry: A Formula and Testing Results [J]. ACTA Geodaetica et Cartographica Sinica, 2006, 35(2): 112—117. [陈强, 刘国祥, 李永树等. 干涉雷达永久散射体自动探测——算法与实验结果 [J]. 测绘学报, 2006, 35(2): 112—117]
- [6] Wang C, Zhang H, Liu Z, et al. Detecting the subsidence of Shuzhou with InSAR [J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(6): 621—625 [王超, 张红, 刘智等. 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 [J]. 自然科学进展, 2002, 12(6): 621—625]
- [7] Luo X J, Huang D F, Liu G X. Phase Decomposition of Interferometric Synthetic Aperture Radar and Relevant Application in DEM Formation and Research on Earthquake Deformation Field [J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(3): 204—209. [罗小军, 黄丁发, 刘国祥. InSAR 相位分解及其在生成 DEM 和研究地震形变场中的应用 [J]. 西北地震学报, 2006, 28(3): 204—209]
- [8] Colesanti C, Ferretti A, Prati C, et al. Monitoring Landslides and Tectonic Motions with the Permanent Scatterers Technique [J]. Engineering Geology, 2003, 68: 3—14.
- [9] Xiong Y L, Huang D F, Chen Y Q, et al. Research on the Modeling of Tropospheric Delay Based on Multi-Reference Stations [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005, 5: 55—57 [熊永良, 黄丁发, 陈永奇等. 基于多个 GPS 基准站的对流层延迟改正模型研究 [J]. 工程勘察, 2005, 5: 55—57]
- [10] Li Z W, Ding X L, Chen Y Q, et al. Assessment of Atmospheric

Effects on Repeat-Pass InSAR Measurements in Southern China

[J]. Journal of Geospatial Engineering, 2005, 7(1): 1—10

[11] Liu F. Application of Kriging Algorithm to Spatial Interpolation

of Weather Data [J]. Meteorological Science and Technology

2004, 32(2): 110—115 [刘峰. 应用 K riging 插值法实现气

象资料空间内插 [J]. 气象科技, 2004, 32(2): 110—115]

Modeling with Permanent Scatterer Network and Analysis of Ground Deformation and Atmospheric Influence

LUO Xiaojun, LU Guoxiang, HUANG Dingfa, CHEN Qiang

(Department of Surveying Engineering, Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract This paper proposes an approach of modeling with a permanent scatterer (PS) network (MPSN) based on the neighborhood differential idea, aiming at effectively and reliably detecting both linear and nonlinear ground deformations and estimating atmospheric effects by differential synthetic aperture radar interferometry with permanent scatterers (PS-DInSAR).

Firstly, the triangular irregular network (TN) of PSs is generated based on the PSs' image coordinates. Deformations are correlative both temporally and spatially, but atmospheric delays are only correlative spatially. Furthermore, the shorter the intervals of space and time series are, the more the correlations of deformations and atmospheric delays will strengthen. So the phase difference of neighboring PSs can depress the atmospheric influence. Then the neighboring differential phase model (NDPM) is constructed based on the neighborhood of PSs among the TN, and the corresponding set of neighboring differential phases is generated. What are unknown in NDPM are residual elevation difference $\nabla\Delta h_{ij}$ and mean velocity difference Δv_{ij} between two neighboring PSs i and j .

Secondly, the TN is twice optimized according to distance (< 1 km) and multi-image phase coherence (γ) between two neighboring PSs, and the neighboring differential phases hardly influenced by atmosphere delays are selected to resolve the NDPM by using a simple perpendicular, i.e., to estimate the residual elevation difference $\nabla\Delta h_{ij}$ and the mean velocity difference Δv_{ij} between two neighboring PSs i and j . After the estimation of $\nabla\Delta h_{ij}$ and Δv_{ij} , the elevation Δh and the mean velocity v of every PS are respectively calculated through network adjustment based on the optimized TN.

Finally, the PS's phase residue $\Delta\phi_{\text{res}}$ can be calculated. Then the temporal and spatial correlations of deformations and atmospheric delays are taken into account again, and the appropriate filters are selected to discriminate the following phases from phase residue $\Delta\phi_{\text{res}}$: (1) PS's atmospheric phases in differential interferograms; (2) PS's atmospheric phases in SAR images; (3) PS's nonlinear deformation phases.

A set of computer programs are developed in Matlab environment to implement the above approach. Lujiazui in Shanghai is selected as the study site, and the experiments are performed using 26 SAR images taken by ERS1/2 from 1992 to 2002 to estimate linear motion rate, nonlinear motion magnitude, total deformation distribution, and atmospheric delay for each SAR image. The obtained measurements are very consistent with the ground-based measurements.

Based on modeling with PSs' TN, the neighboring differential phases hardly influenced by atmosphere delays are selected to resolve the NDPM. The results are more reliable and precise. The experiment results show that the proposed modeling and methods are viable, and the computation software is reliable.

Key words DInSAR; permanent scatterer; modeling; deformation; atmospheric influence