

文章编号: 1007-4619(2007)04-0574-07

基于相干点目标的多基线 D-InSAR 技术与地表形变监测

葛大庆, 王 艳, 郭小方, 刘圣伟, 范景辉

(中国国土资源航空物探遥感中心, 遥感方法所, 北京 100083)

摘 要: 失相干 (Decorrelation) 与大气波动是影响重复轨差分干涉测量 (D-InSAR) 进行地表形变信息提取的主要因素。相干性降低使得干涉纹图在空间上表现为不连续, 难以完成相位解缠。重复观测时大气波动引起的相位延迟在空间域上的不均一分布则降低了 D-InSAR 提取形变信息, 特别是空间范围覆盖较大的形变场的精度。介绍了一种基于相干目标的多基线 D-InSAR 数据处理算法。该算法根据少量 SAR 数据构成多基线干涉纹图集, 分别利用点目标检测算法和相干系数均值作为相干目标提取的测度; 利用相位回归分析模型对干涉相位进行时间域迭代处理, 从干涉相位中提取线性形变速率和 DEM 误差改正, 通过迭代处理补偿高程误差, 解算线性地表形变速率。该算法提高了 D-InSAR 形变监测的时间采样率, 能准确获取每个观测时刻的形变累积量。以沧州地区 2004—2005 年的 SAR 数据为例, 获取了该地区地表沉降线性速率及其演变状况。

关键词: D-InSAR; 失相干; 大气波动; 线性形变速率; 干涉纹图集

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

Surface Deformation Monitoring with Multi-Baseline D-InSAR Based on Coherent Point Target

GE Daqing, WANG Yan, GUO Xiaofang, LU Shengwei, FAN Jinghui

(Institute of Remote Sensing Technique and Methodology, ACRS, Beijing 100083, China)

Abstract Decorrelation caused by temporal changes influences phase unwrapping of differential interferogram in repeat pass Differential SAR interferometry (D-InSAR). Phase delay due to atmosphere disturbance degrades the accuracy of D-InSAR for small deformation monitoring. In this paper, we present a Coherent Point Targets Interferometry approach to retrieval the phase history and estimate the linear deformation of a coherent scatterer. A multi-baseline interferograms algorithm based on discrete and temporarily natural or artificial reflectors is developed. In this algorithm, a multi-reference image strategy for interferograms generation is adopted to form the interferograms stack. A bi-threshold algorithm is used for coherent point targets identification. Those pixels preserving a good coherence level and presenting a point target character are identified from the whole set of interferograms. The phase regression model is used to estimate the linear deformation rate and DEM error of the coherent point targets. The method presents high flexibility with respect to the required number of images and baseline length. The technique has been tested with ENVISAT-ASAR data for land subsidence rate derivation of Cangzhou city.

Key words: D-InSAR; decorrelation; atmosphere disturbance; linear deformation rate; interferogram stack

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 中国地质调查局计划项目 (编号: 1212010560705, 1212010540905)

作者简介: 葛大庆 (1979—), 男, 2005年毕业于中国矿业大学 (北京校区) 摄影测量与遥感专业。现主要从事 InSAR 技术在地形测绘与灾害性地表形变监测中的方法技术研究, 已发表论文 5 篇。E-mail: surverx@sina.com; Surver79@yahoo.com.cn

1 引言

利用重复轨差分干涉测量 (D-InSAR) 技术进行地形测图与地表形变监测是当前 InSAR 技术研究和应用的主要形式和主要领域。由于对地表微小形变具有很强的敏感性, D-InSAR 技术在城市地面沉降、矿山地表塌陷、滑坡等灾害监测以及地震形变场获取和火山活动状况调查等方面得到了广泛的研究。由于受两次观测条件的变化, 包括雷达轨道偏差, 地物后向散射特性变化以及噪声等的影响, 使得两次获取雷达信号相干性降低, 甚至失相干, 难以得到二维平面上连续的干涉相位图。应用常规相位解缠算法难以完成空间离散分布的雷达目标的相位解缠。此外, 受两次观测时刻大气波动影响, 特别是对流层湿度和温度的变化引起相位延迟, 产生不同的相位延迟量, 在相位图上表现出延迟量的非均匀性^[1-4]。对于大尺度微小形变监测而言, 这种非均匀的相位延迟量作为误差引入到形变相位中, 影响了 D-InSAR 监测结果的精度。因而, 当前 D-InSAR 技术在地表形变监测应用中面临的主要问题为: (1) 低相干性条件下相位解缠方法; (2) 形变信号中大气延迟的抑制与去除。

针对上述问题, 当前主要的研究方法是基于具有稳定散射特性的相干点目标, 根据其干涉相位的构成及各分量之间的关系, 利用时间序列分析, 研究其相位随时间变化的关系, 逐步将非形变相位分离来获取地表形变信息, 并进行大气相位误差处理。这些方法包括永久性散射体干涉测量技术 (PSI)^[5-7]、短基线干涉测量法 (SB)^[8-9]、点目标干涉测量分析 (PTA)^[10-11] 以及角反射干涉测量方法^[12] 等。上述方法对数据量的要求较高, 特别是前三种方法, 一般需要 25 景甚至更多的 SAR 影像。当数据量较少时则难以开展上述方法的应用。

本文针对目前实际应用中面临的问题, 根据相干目标干涉相位的构成, 分析了相干性对干涉纹图的影响及大气波动引起的相位误差, 研究利用多基线差分干涉纹图组合进行相位回归分析, 获取相干目标的形变过程和演变趋势。该方法根据不同时刻获取的 SAR 影像进行干涉像对组合, 生成多基线差分干涉纹图集。利用点目标检测算法和相干系数均值法作为相干目标识别的测度, 对相干目标干涉相位进行时间序列分析, 通过相干目标干涉相位迭代回归分析, 解算形变量随观测时间的变化关系, 得

到每个观测时刻地表沉降的累积量, 从而提高形变信号的时间采样率, 获取线性形变速率。该算法利用形变模型约束条件, 将满足线性形变的相干目标作为研究对象, 利用时间域相位回归代替了空间域相位解缠, 提高了相位解缠的稳定性。

2 相干目标识别

在解算形变速率之前, 首先要进行相干目标像元识别。相干目标像元识别存在以下方法: (1) 基于像元强度的稳定性^[5, 6, 13]; (2) 基于空间相干性^[7]; (3) 点目标检测^[10, 11]。强度稳定性检测算法利用大量经过辐射校正的 SAR 图像, 根据像元强度均值与方差比计算强度稳定指数, 以此判断其散射特性的稳定程度。一般情况下, 要获得正确的统计结果, 需要 30 景以上的 SAR 影像。因而, 数据量少时难以识别出稳定的相干目标。利用空间相干系数 γ 可以获得干涉强度的最大相似估计^[6], 但受相干系数估算窗口的影响, 容易引入低相干目标。点目标属于相干目标^[10, 11, 14], 通过检测点目标可以确定相干目标。本文所用算法针对 SAR 数据量少这一条件限制, 利用相干系数和点目标检测算法识别相干目标, 将二者结果进行合并处理, 提高相干目标识别准确性, 增大相干目标的数量。

2.1 相干系数均值

利用窗口进行统计运算, 对于独立散射体而言, 其邻域像元值的变化会影响窗口统计结果。由于相干系数基于空间域窗口运算, 窗口大小对相干系数的影响较大, 低相干目标有可能被错误检测到, 同时也降低了解缠相位图的空间分辨率。利用累积影像干涉相干图生成平均相干图的方法如下:

$$\gamma_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \gamma_i \quad (1)$$

式中, N 为干涉纹图数。所有满足式 (1) 的像元将被选择出来作为相干目标候选点。本试验中取相干系数均值为 0.25。在后续处理中, 将会剔除部分不适合干涉模型的像元。计算相干系数的窗口的空间大小决定了形变图最终分辨率。经过试验证实, 平均大小 5×25 (距离向 \times 方位向) 的窗口对保持形变图最终的空间分辨率和计算相干性估计都是非常适合的。如果窗口尺寸太小, 相干性计算过低估计了相位质量, 部分候选像元在后续的处理中将会被剔除掉。

2.2 点目标检测

一个雷达分辨单元由若干个散射体构成, 其中对该分辨单元的后向散射强度起主导作用的散射体称为点目标。点目标的几何尺寸小于雷达分辨单元, 但由于其具有稳定的相位特征, 因而可将其视为相干目标。由于点目标稳定的后向散射特性, 因而在获取原始信号过程中各个子视图上必然表现出相似的散射特征^[14]。将 SLC 图像作反变换, 生成若干个子视图 (Sub-looks), 按照子视图作谱相关分析, 根据其相关性识别点目标^[10, 14, 15]。由于不受周围其他雷达目标散射强度的影响, 点目标识别算法保持了空间域相干目标可靠性, 同时也抑制了具有斑点噪声的扩展目标以及杂波等影响, 能有效识别点目标。

2.3 不规则三角网构建

在完成相干目标识别后, 利用 Delaunay 三角剖分方法使得所有相邻像元相关, 生成无重叠的三角网。相位迭代处理就是基于这些三角网络之间的相互联系而展开的^[13, 14, 16]。

3 多基线干涉相位模型

3.1 干涉相位模型

利用两景 SAR 影像生成干涉纹图时, 相邻像元间的相位变化量可表示如下:

$$\phi_{int} = \phi_{flat} + \phi_{topo} + \phi_{mov} + \phi_{am} + \phi_{noise} \quad (2)$$

式中, ϕ_{flat} 是与斜距有关的平地相位, ϕ_{topo} 是地形相位, ϕ_{mov} 是两次获取 SAR 图像时地表在视线向的移动引起的相位变化, ϕ_{am} 是与大气波动引起的相位变化, ϕ_{noise} 是噪声相位。其中:

$$\phi_{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{b \Delta r}{r \tan \theta} \quad (3)$$

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{b \Delta h}{r \sin \theta} \quad (4)$$

式中, λ 为雷达波长, r 是斜距, b 为垂直基线长, Δr 为像元间斜距增量; Δh 和 Δ 分别为像元间的斜距和高程增量。去除平地效应和地形相位后, 得到差分干涉相位如下:

$$\phi_{diff} = \phi_{mov} + \phi_{DPOerror} + \phi_{am} + \phi_{noise} \quad (5)$$

考虑到 DEM 含有高程误差, 可由高程误差引起的相位:

$$\phi_{DPOerror} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{b \Delta \epsilon}{r \sin \theta} \quad (6)$$

式中, $\Delta \epsilon$ 为高程误差。

若将雷达视线向形变量分为两部分, 即线性形变和非线性形变, 则可得下式:

$$\phi_{mov} = \phi_{linear} + \phi_{nonlinear} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta v \cdot T + \phi_{nonlinear} \quad (7)$$

式中, T 为两次获取 SAR 影像的时间基线, Δv 为线性形变速率。

若令非线性形变相位、大气波动和噪声相位为残余相位, 则有:

$$\phi_{residual} = \phi_{nonlinear} + \phi_{noise} + \phi_{am} \quad (8)$$

3.2 线性形变速率

由式 (6) 可知: 若相邻两个像元间高程误差一定, 则干涉相位与基线相关。高程误差随基线的变化如图 1 所示。如果利用一组同一地区的差分干涉纹图进行处理, 所有图像的地形误差和线性形变是相关的。

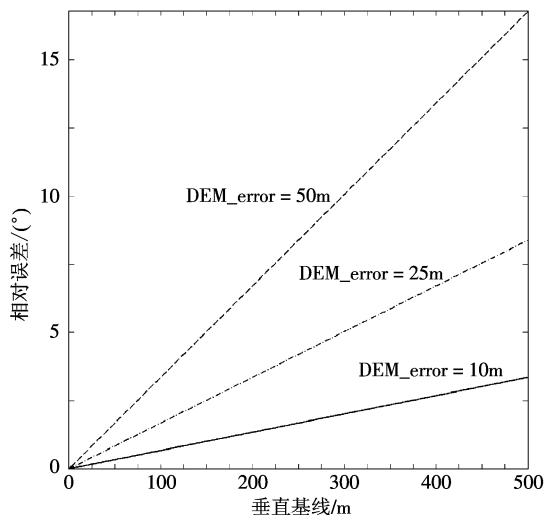


图 1 高程误差相位与垂直基线的关系
Fig 1 Relationship between DEM error and perpendicular baseline

对于相干目标, 由于差分干涉纹图中存在不同相位补偿, 单个像元的相位值在处理过程中并没有实际意义。在确定相位解缠参考点后, 任何一个相干目标 (x_n, y_n) 的干涉相位增量可以表示如下:

$$\begin{aligned} \phi_{diff}(x_n, y_n, T_i) = & \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot [\gamma(x_n, y_n)] + \\ & \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{b(T_i)}{r(T_i) \cdot \sin(\theta_i)} [\epsilon(x_n, y_n)] + \\ & \phi_{nonlinear}(x_n, y_n, T_i) + \phi_{am}(x_n, y_n, T_i) + \\ & \phi_{noise}(x_n, y_n, T_i) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, (x, y) 为像元在图像中的位置坐标; T_i 为第 i

景干涉纹图的时间基线; b 为第 i 景干涉纹图的垂直基线; θ 为雷达入射角; ϵ 为 DEM误差。

利用 Delaunay三角网连接相邻像元, 使每一个连接关系上的大气影响最小化。考虑到大气波动为空间域“低波数”信号, 对于相邻像元可以认为:

$$\alpha(x_n, y_n, T_i) \approx \alpha(x_h, y_h, T_i) \quad (10)$$

式(9)中的假设认为, 如果可以在三角形内连接任意两像元, 其允许的最大距离近似 1 km , 对于大气影响而言, 这是一个合理的相关距离^[3]。由于在整个干涉纹图集中线性速率和 DEM误差是一个常量, 通过解算多基线相位模型可以估计其补偿值:

$$\begin{aligned} \phi_{\text{model}}(x_n, y_n, x_h, y_h, T_i) = & \frac{4\pi}{\lambda} \cdot T_i \cdot [\gamma_{\text{model}}(x_n, y_n) - \\ & \gamma_{\text{model}}(x_h, y_h)] + \frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{b(T_i)}{r(T_i) \cdot \sin(\theta_i)} [\epsilon_{\text{model}}(x_n, y_n) - \\ & \epsilon_{\text{model}}(x_h, y_h)] \end{aligned} \quad (11)$$

由于不同时刻获取 SAR影像时大气状况的变化, 大气变化在时间域上表现为一个“白过程”^[3, 12]。可以把整个干涉纹图集中大气贡献和噪声看成时间失相干现象。由此, 根据不同空间基线的差分干涉相位得到线性形变速率和 DEM误差。

3.3 模型相干系数

假设非线性形变较小, 且残余相位满足如下条件^[4, 6]:

$$|\phi_{\text{residual}}| < \pi \quad (12)$$

通过求模型函数的极值可以估算出任意两点 (x_n, y_n) 和 (x_h, y_h) 间的线性形变速率和高程误差补偿值。由此, 可得模型相干系数为:

$$\begin{aligned} \gamma_{\text{model}}(x_n, y_n, x_h, y_h) = & \frac{1}{N} \cdot \left| \sum_{i=0}^N \exp \{ j \cdot (\phi_{\text{dif}}(x_n, y_n, x_h, y_h, T_i) - \right. \\ & \left. \phi_{\text{model}}(x_n, y_n, x_h, y_h, T_i)) \right| \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)的极值求解实际上是估算相位值复正弦函数的二维频率。对于利用 Delaunay三角形连接起来的相邻像元, 由于受时间和空间基线为 $\{b(T_i), T_i\}$ 的干涉像对的限制, 该正弦函数在任意一个不规则格网点上的值是已知的。由于线性速率和 DEM对模型产生相同的影响, 当干涉纹图个数较少时估算结果精度较低, 而干涉纹图的数量越多使得线性形变速率和高程误差补偿值多解的范围缩小, 估算结果越好。由此, 可根据模型相干系数 γ_{model} 对所有相邻像元连接关系进行筛选, 将模型干涉系数低于给定阈值的像元剔除。一般情况下取模型干涉系数为 0.7。干涉质量检测的结果是将不满足模型的部

分相干目标剔除。利用高程误差改正值重新计算差分干涉相位, 重复式(13)计算过程得到相干点目标的线性速率。图 2所示为该算法的数据处理流程。

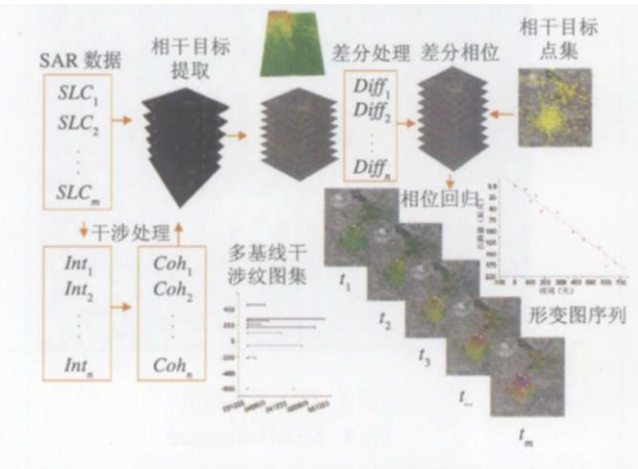


图 2 基于相干目标的多基线 D-InSAR数据处理流程
Fig 2 Data processing chain of multi-baseline D-InSAR

4 沧州地面沉降试验

根据沧州试验区 2004—2005年间的 12 景 SAR 数据, 选择不同的影像为参考影像, 进行多基线干涉像对组合, 生成 26 景差分干涉纹图, 如图 3所示。处理范围为 $1000 \text{ 像元} \times 1000 \text{ 像元}$, 面积约 $20 \text{ km}^2 \times 20 \text{ km}^2$ 。

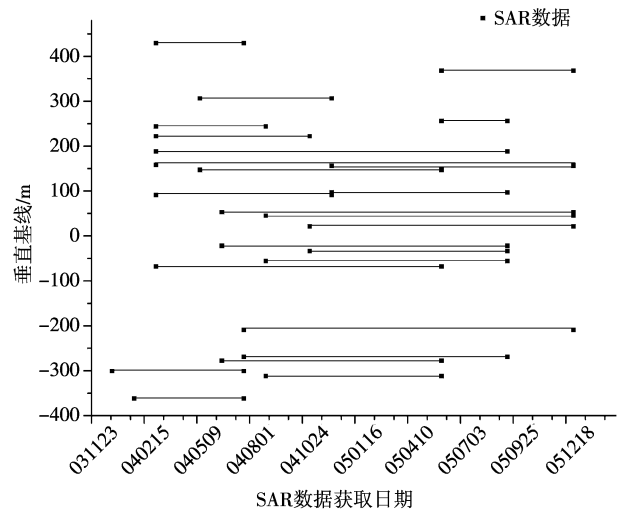


图 3 多基线干涉像对组合
Fig 3 Multi-Baseline interferometric Pair combination

图 4和图 5分别为利用点目标识别算法及相干系数均值法获取的相干目标, 图 6为相干目标的干涉纹图, 图 7为利用相干目标生成的 Delaunay三角网。

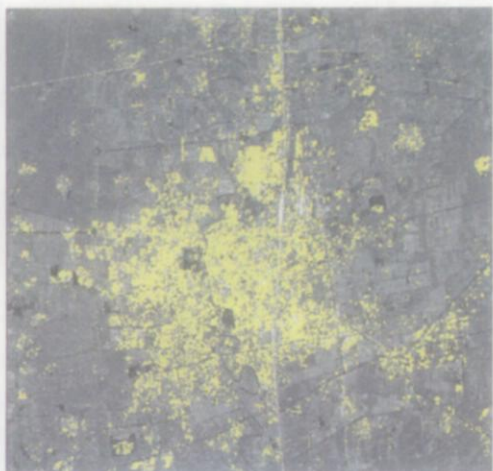


图 4 相干系数均值
Fig.4 Mean coherence

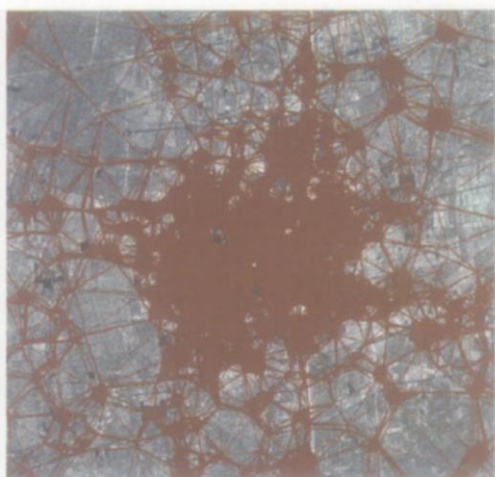


图 7 Delaunay三角网
Fig 7 Delaunay triangle net

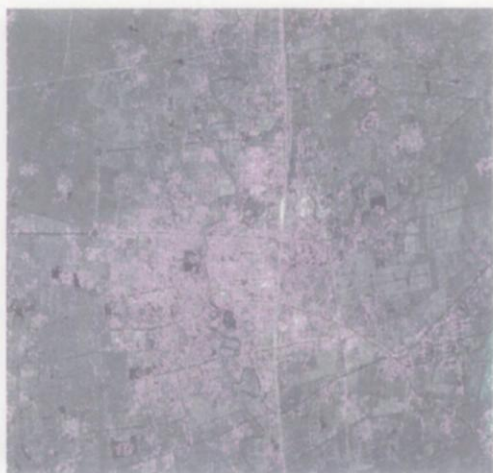


图 5 点目标检测
Fig.5 Point target detection

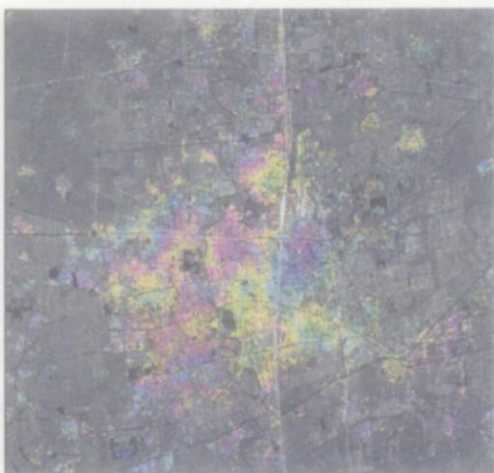


图 6 相干目标
Fig.6 Coherent targets

根据干涉相位随空间基线和时间基线的变化关系,按照线性速率模型回归相干目标干涉相位随时间的变化特征,完成高程误差改正后,经 3 次迭代使线性形变模型满足收敛条件。图 8 为一个相干目标的干涉相位经回归处理得到的高程误差改正及线性形变速率。

图 9 所示为一相干目标的形变特征。将相位回归处理得到的线性形变量由雷达视线向转换到垂直方向,得到了沧州地区 2004 年初至 2005 年底两年间的线性地表沉降速率,将处理结果叠加到雷达强图上,如图 10 所示。

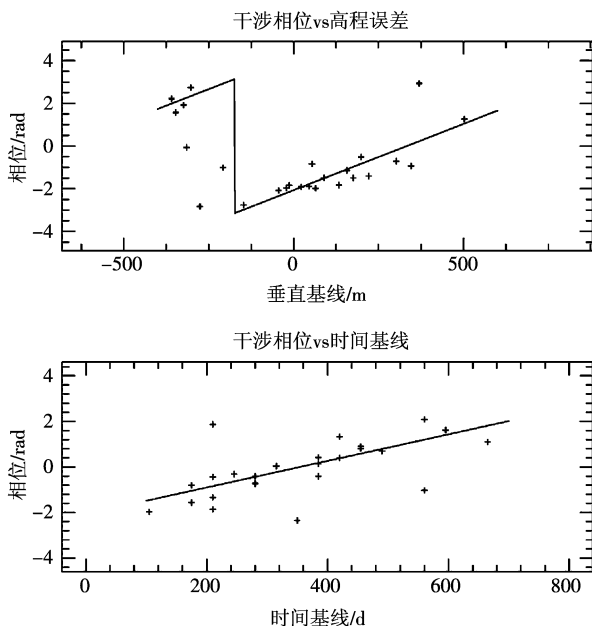


图 8 相位回归
Fig 8 Phase regression

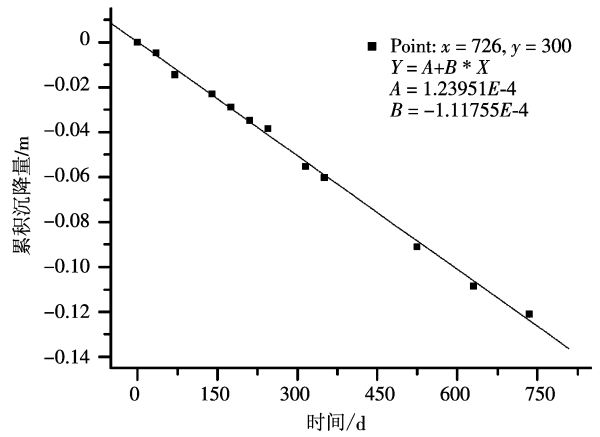
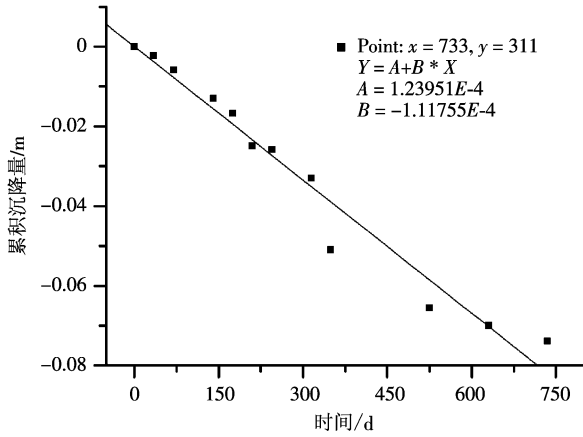


图 9 相干目标线性沉降量
Fig 9 Subsidence of coherent point

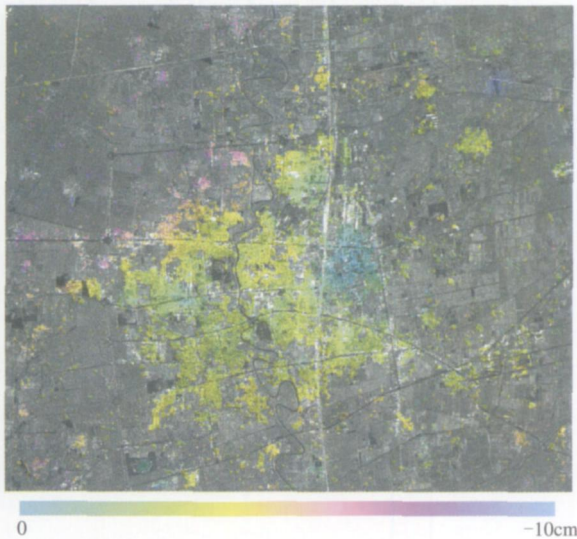


图 10 线性沉降速率 (040305-051230)
Fig 10 Linear subsidence rate

由图 10 可知, 沧州市主城区沉降量较小, 城区的西北和东南方向分别存在多处沉降较大的区域, 沉降速率最大处可达 10 cm。

5 结论与分析

本文介绍了基于相干目标的多基线差分干涉测量模型和数据处理算法。该算法将空间相位解缠问题转换为形变相位模型, 利用相干系数和点目标检测算法识别相干目标, 根据模型相干系数作为模型约束条件, 提取线性形变速率和高程误差改正。该方法利用少量数据进行多基线组合处理, 增大了观测值的数量, 能准确获取线性地表沉降速率。

由于受干涉相位模型约束, 若相干目标的非线性形变较大, 则难以获取其形变速率。此外, 本试验利用多参考影像而非同一参考影像, 因而难以有效反演出大气波动引起的相位延迟量, 而将大气波动相位视为误差加以处理, 没有获得每个观测时刻的大气延迟相位。因此, 下一步的工作将结合空间域相位解缠方法, 增强相位模型估算的稳健性, 利用更多的 SAR 影像提高形变信息提取的精度。

致谢 德国地球科学研究中心 (GFZ) 夏耶博士对实验过程中遇到的问题给予了解答, 瑞士 GAMMA 公司的 Charles Werner 博士对数据处理方法提出了改进意见, 在此一并感谢!

参考文献 (References)

- [1] Hanssen R F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric Effects in Interferometric Synthetic Aperture Radar Surface Deformation and Topographic Mapping[J]. Geophysical Research Letters, 1997, 102: 547-563.
- [3] Emadison T R, Simons M J, Webb F H. Neutral Atmospheric Delay in Interferometric Synthetic Aperture Radar Applications: Statistical Description and Mitigation[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 108(B5): 2231-2239.
- [4] Azañón A, Closa J, Hanssen R, et al. Development of Algorithms for the Exploitation of ERS-Envisat Using the Stable Points Network[R]. Altamira Information, Barcelona, Spain, 2004.
- [5] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2000.

- 38(5): 2202—2211
- [6] Kampes BM, Adam N. Velocity Field Retrieval from Long term Coherent Points in Radar Interferometric Stacks [A]. IGARSS03 Toulouse, France [C]. 2003
- [7] Mora Q, Mallorqui J J, Broquetas A. Linear and Nonlinear Terrain Deformation Maps from a Reduced Set of Interferometric SAR Images [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing 2003, 41(10): 2243—2253
- [8] Bernardino P, Fomaro G, Lanari R, et al. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing 2002, 40(11): 2375—2383
- [9] Usai S. A Least Squares Database Approach for SAR Interferometric Data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing 2003, 41(4): 753—760.
- [10] Wnmer C, Wegmuller U, Strozzi T, et al. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping [A]. IGARSS 03, Toulouse, France [C]. 21—25 July 2003.
- [11] Andreas W, Wemer C, Strozzi T, et al. Combination of Point and Extended Target Based Interferometric Techniques [A]. IGARSS' 04 Anchorage, Alaska, USA [C]. 20—24 Sep 2004.
- [12] Xia Y, Kaufmann H, Guo X, F. Landslide Monitoring in the Three Gorges Area Using D-InSAR and Corner Reflectors [A]. Advanced Workshop on InSAR for Measuring Topography and Deformation of the Earth Surface [C]. Dec 16—17, Hong Kong 2002
- [13] Gini K, Freck van L, Petar M, et al. Initial Point Selection and Validation in PS-InSAR Integrated Amplitude Calibration [A]. IGARSS 06, Denver Colorado, America [C]. July 31—August 04, 2006
- [14] Schneider R Z, Papaathanassiou K, Hajnsek I, et al. Analysis of Coherent Scatterers over Urban Areas [R]. http://www.earth.es.int/workshops/polinsar2005/Participants/124/Paper_Paper_PolInSAR_2005_Schneider.Pdf
- [15] Souyris J C, Henry C, Adragna F. On the Use of Complex SAR Image Spectral Analysis for Target Detection: Assessment of Polarimetry [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sensing 2003, 41(12): 2725—2734
- [16] Kampes BM, Hansen R F, Swart LM Th. Strategies for Non-Linear Deformation Estimation from Interferometric Stacks [A]. IGARSS 01, Sydney [C]. Australia, 9—13 July 2001.