

DOI:10.13203/j.whugis20140346



文章编号:1671-8860(2017)10-1394-06

基于平滑样条的 PSInSAR 大气效应分离研究

吴文豪^{1,2} 李 陶² 龙四春¹

1 湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湖南 湘潭, 411201

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘 要:永久散射体技术(permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar, PSInSAR)通过提取时间维高相干点,根据各类信息的时空统计特性实现 PS(persistent scatterers)点相位分量的分离,获得高精度地表形变监测结果。大气效应作为影响干涉测量精度的最主要误差源,可以通过经典滤波器分别在时间维和空间维滤波处理予以消除。在 StaMPS(stanford method for persistent scatterers)技术体系中,大气效应分离时还保有全部的沉降信息。当地表形变速率较大时,大气效应和沉降信息的频谱重合度较高,经典滤波器无法将二者有效分离。通过平滑样条滤波分离大气效应和形变信息,采用广义交叉验证方法获取形变信息的最优估计值,可抗拒解缠错误引起的相位跳变干扰。最后根据模拟数据和 ASAR(advanced synthetic aperture radar)数据对比分析高斯滤波和平滑样条滤波分离大气效应的效果,验证平滑样条方法的有效性。

关键词:PSInSAR;平滑样条;信息分离;大气效应;地表形变

中图法分类号:P228.6

文献标志码:A

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)对地表形变较为敏感,其监测精度可达到毫米级。雷达传感器发射的调频脉冲信号在穿过大气层时,由对流层含水量变化引起的折射延迟在干涉图中呈现出一种云斑状的纹路。大气效应是影响干涉测量精度的主要误差来源^[1],当天气发生急剧变化时,其对干涉图相位的扰动严重时可超过一个周期。大气效应具有较强的随机性,难以建立模型加以消除,研究表明大气效应在 1 km 空间范围内是强相关的,但在时间维却呈随机分布^[2-4]。时间序列处理是基于大气统计特性对影像进行滤波处理,用以消除大气效应的影响。

目前合成孔径雷达干涉测量时间序列分析方法主要包括永久散射体技术(permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar, PSInSAR)和短基线技术,其中以 PSInSAR 最为典型。该技术通过形变模型分离出主要形变信息,然后根据残余形变信息与大气效应所占据频带的不同,采用经典滤波器进行滤波处理实现大气效应与形变信息的分离^[5-7]。StaMPS(stanford method for persistent scatterers)技术不需要先

验形变模型分离出大部分形变信息,可直接通过经典滤波器对大气效应和形变信号进行分离处理。但是当研究区域形变速率较大时,二者频谱重叠度较高,经典滤波器不能将其正确分离。本文在 StaMPS 技术基础上采用平滑样条分离大气效应,针对每个 StaMPS 点选择合适的平滑参数,获得形变信息的最优估计值,即使噪声与信号数量级相差较大,也能实现二者的正确分离。

1 PSInSAR 基本原理

本文以 PSInSAR 为例,说明时间序列分析技术的理论和方法。差分干涉图相位由多种相位分量组成,干涉图中两点目标 p, q 的观测模型可表示为^[8]:

$$\Phi_{p,q}^{k,unw} = \varphi_{p,q}^{k,defo} + \varphi_{p,q}^{k,topo} + \varphi_{p,q}^{k,aps} + \varphi_{p,q}^{k,noise} + \varphi_{p,q}^{k,orb} \quad (1)$$

式中, $\Phi_{p,q}^{k,unw}$ 为解缠后的两点差分干涉相位; $\varphi_{p,q}^{k,defo}$ 为地面形变相位分量; $\varphi_{p,q}^{k,topo}$ 为数字高程模型(DEM)误差相位分量; $\varphi_{p,q}^{k,aps}$ 为大气扰动相位分量; $\varphi_{p,q}^{k,orb}$ 为轨道误差相位分量; $\varphi_{p,q}^{k,noise}$ 为失相关噪声相位分量,呈零均值高斯分布。PSInSAR 技术

收稿日期:2017-03-24

项目资助:国家自然科学基金(41474014,41674032,41274048);湖南科技大学煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室开放研究基金(E21502)。

第一作者:吴文豪,博士,主要从事合成孔径雷达干涉理论与应用研究。wuw@whu.edu.cn

条,后一项计算沉降模型的二阶导数平方和,其值最小时地表形变模型为线性。当 s 增大时,其结果接近直线;当 s 减小时,其结果接近内插样条曲线。为避免出现数据的过度平滑或平滑度不够,获取合适的 s 值至关重要。Schmidt^[15] 等在选择平滑参数时,根据残差平方和的变化梯度来确定平滑参数,但是对于数量庞大的 PS 点,该方法计算量巨大,计算效率无法保证。本文使用广义交叉验证(generalized cross validation, GCV)方法估计 s 值。首先按照求函数自由极值的方法将式(3)转换为线性运算,即:

$$(I_n + s \mathbf{D}^T \mathbf{D}) \Delta_{x_1}^{x_2} \varphi_{\text{def},i} = \Delta_{x_1}^{x_2} \varphi_{\text{uw},i} \quad (5)$$

$$s = \text{argmin}(\text{GCV}) \quad (6)$$

其中, I_n 为 n 阶单位矩阵;然后再按照式(6)循环迭代,取得 s 最优值。

该算法只依赖输入和输出信号,不需要估计噪声方差,直接通过最小化误差函数即可获得阈值的渐进最优值:

$$\text{GCV}(s) \equiv \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta_{x_1}^{x_2} \varphi_{\text{def},i} - \Delta_{x_1}^{x_2} \varphi_{\text{uw},i})^2 / n}{(1 - \text{tr}((I_n + s \mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1}) / n)^2} \quad (7)$$

式中, tr 表示矩阵的迹。为了加快 GCV 方法的运算速度^[16],可以通过离散余弦变化对矩阵 \mathbf{D} 进行正交分解,即 $\mathbf{D} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^T$ 。其中, \mathbf{U}^T 和 \mathbf{U} 是正交离散余弦变换矩阵; $\mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$; λ 为矩阵 \mathbf{D} 的特征值^[17]。此时 GCV 转换为:

$$\text{GCV}(s) = \frac{n \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{1 + s \lambda_i^2} \right)^2 \text{DCT}_i^2(\Delta_{x_1}^{x_2} \varphi_{\text{uw}})}{\left(n - \sum_{i=1}^n (1 + s \lambda_i^2)^{-1} \right)^2} \quad (8)$$

式中, DCT_i 表示离散余弦变换第 i 个系数。通过广义交叉验证计算出最优的 s 值,便可根据式(5)计算出平滑后的形变相位分量 $\Delta_{x_1}^{x_2} \varphi_{\text{def},i}$ 。平滑样条滤波根据 PS 点信息差异自动选择相应的平滑参数,可以更准确地估计大气效应。

3 实验验证

本文分别对模拟数据和合成孔径雷达(SAR)数据进行高斯滤波和平滑样条滤波处理。通过对两种滤波方法处理同一数据的结果比较分析,验证平滑样条滤波分离大气扰动分量的效果。

3.1 模拟实验

为了检验各种滤波器的性能,本文模拟 StaMPS 软件时间维低通滤波处理过程,对比分

析高斯滤波器和平滑样条分析的信号分离效果。该过程处理对象为相邻两 PS 点间的相位差,主要由形变相位分量和大气扰动相位分量组成,这些信息在空间上均具有强相关性。由于 1 km 空间范围内的大气扰动相位分量在干涉图中标准差为 0.3 rad,且呈零均值高斯随机分布^[18-19],所以相邻两 PS 点相位差的绝对值一般不大于 π 。基于上述理论,本文模拟实验结果如图 2 所示,横轴表示影像在时间维相对排序,以主影像为参考时间,其对应时间为零,纵轴表示相位值,以 rad 为单位。图 2 中绿色曲线表示模拟的地表形变相位分量,对其加上模拟大气效应分量(标准差为 0.3 rad 的零均值高斯随机噪声),便可获得模拟的观测相位差分值(红色圆点)。最后对模拟的观测相位差分值进行高斯滤波和平滑样条滤波处理,获得地表形变相位。蓝色点划线为高斯滤波处理结果,绿色虚线为平滑样条滤波处理结果。比较二者可以发现,平滑样条滤波后的地表形变相位更接近于模拟的地表形变相位,更真实地反映地表变化情况。影像中每个 PS 点的信息变化情况均不同,高斯滤波器采用固定的参数去处理所有的 PS 点显然不能如实地描述地表真实变化情况,而平滑样条滤波则是根据每一对 PS 点的差分相位统计特性,调整平滑参数 s ,具有很强的自适应性,因此采用平滑样条能更准确地分离大气效应和地表形变信号。

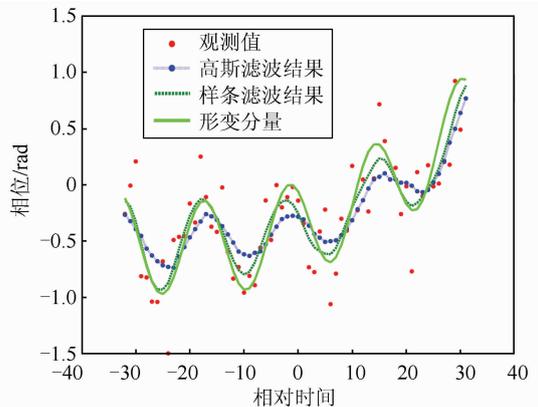


图 2 时间维低通滤波模拟实验

Fig. 2 Simulated Low-Pass Filter Experiment in Time Domain

当解缠结果出现错误时,无法保证相邻两 PS 点相位差的绝对值小于 π 。本文模拟解缠错误时相邻 PS 点的差分相位如图 3 所示,部分红色圆点相位值大于 π 。分别采用高斯滤波器和平滑样条对其进行处理,蓝色点划线为高斯滤波结果,绿色虚线为平滑样条滤波结果。受不稳定相位的干

扰,高斯滤波结果与模拟地面形变相位(绿色实线)相比,呈现较大的偏差,而平滑样条滤波结果依然与模拟地面形变相位接近。这说明即使无法保证缠绕结果完全正确,采用平滑样条依然可以准确分离大气和形变信号,而经典滤波器却无法避免 PS 点的相位跳变(粗差)干扰。

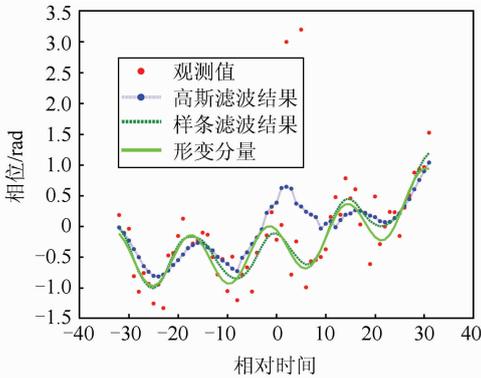


图 3 解缠错误时 PS 点时间维低通滤波效果
Fig. 3 Result of Low-pass Filter Operated in Time Dimension with PS Unwrapping Error

3.2 SAR 影像处理实验

为了验证平滑样条在大气滤波应用中的效果,本文选用天津大寺镇地区时间跨度为 2007 年 5 月~2009 年 6 月的 22 景降轨影像 ASAR(advanced synthetic aperture radar)作为实验数据,利用 StaMPS 软件按照图 1 所示的流程对实验数据进行处理。分别采用高斯滤波和平滑样条滤波在时间维度上进行低通滤波处理,以实现大气信息与沉降信息的分离,得到 SAR 影像的大气扰动相位示意图。图 4(a)和 4(b)分别为两种方法滤波后提取的 4 幅辅影像大气扰动相位分量示意图。图 4(a)表明高斯滤波获取的大气信息中混合了部分沉降信息,这是因为高斯滤波器采用固定的滤波参数,无法将大气效应和沉降信息有效分离。图 4(b)表明平滑样条滤波能自适应地选取最佳平滑系数,滤波后的大气效应在时间维呈随机分布状态。图 4(c)和图 4(d)分别为两种滤波器分离后的地面形变速率图。结果表明样条滤波能够较好地逼近形变相位分量,获得的地面形变速率明显大于高斯滤波处理后的地面形变速率。

为了进一步定量分析两种滤波器的差异,本文对大气信号的时间相关性进行对比分析^[20]。图 5 表明,沉降信号在时间维呈现强相关特性,而大气信号在时间维是随机的。图 6 表示平滑样条滤波获取的大气在时间维度上的相关特性,可以

看出大气信号在时间上的相关性基本为零。图 7 表明高斯滤波器获取的大气效应在时间维度呈现出一定的相关性,可推断大气信号中混有形变信息。

上述实验表明,当沉降速率较大时,PS 点之间所含信息成分差异较大,高斯滤波器无法保证这些信息的正确分离,而本文提出的平滑样条滤波可以有效提高信息分离的精度,并可抗拒粗差的干扰。

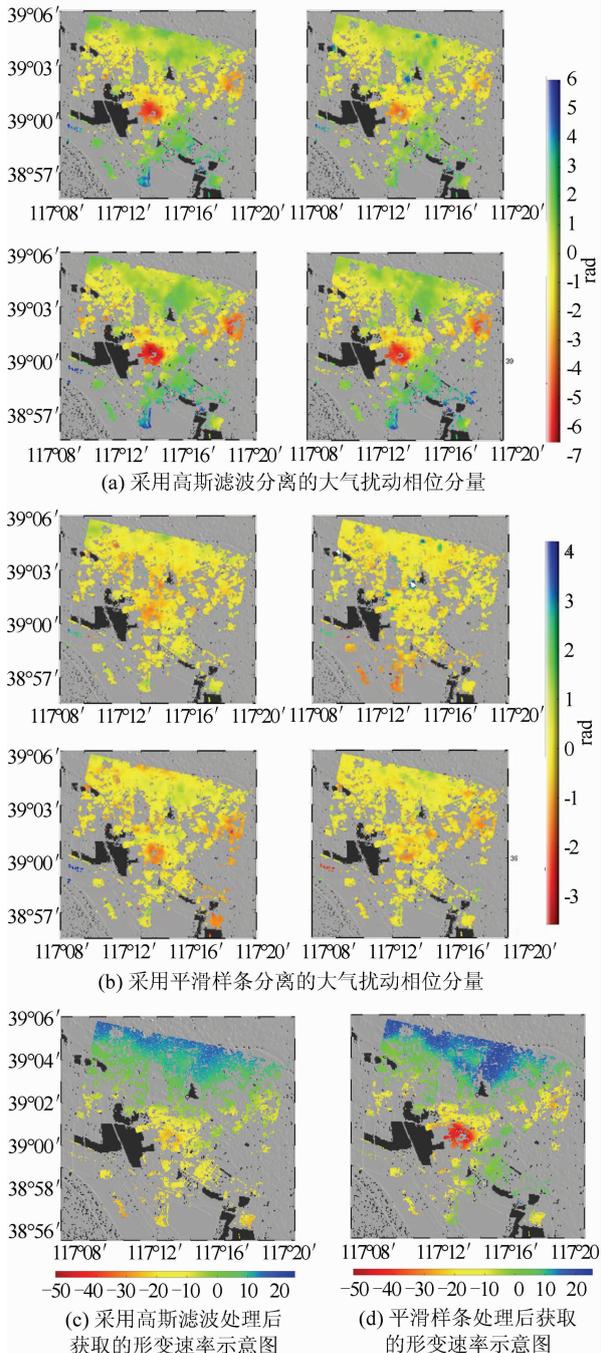


图 4 不同信息分离方法结果对比图
Fig. 4 Comparison of Different Separated Phase Components in Different Ways

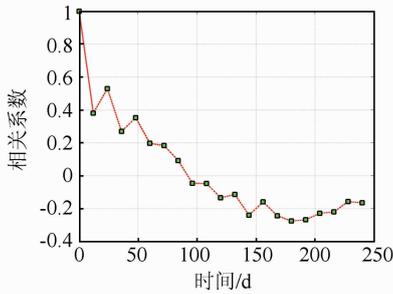


图5 形变信息时间相关特性

Fig. 5 Time Correlated Features of Deformation Signal

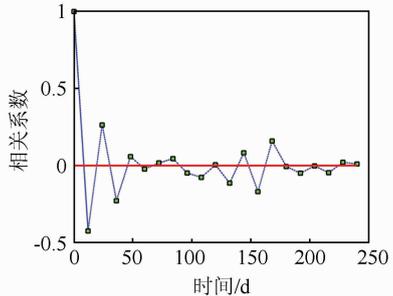


图6 平滑样条滤波获取的大气信号时间相关特性

Fig. 6 Time Correlated Features of Atmospheric Signal Estimated by Smoothing Spline

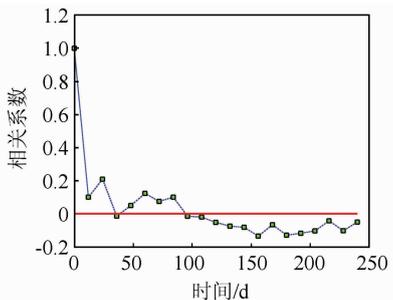


图7 高斯滤波器获取的大气信号时间相关特性

Fig. 7 Time Correlated Features of Atmospheric Signal Estimated by Gaussian Filter

4 结 语

StaMPS 技术在进行大气效应分离时,并没有采用先验模型提前分离主要的形变信息。当地表形变速率较大时,PS 点所含信息成分差异较大,高斯滤波器无法保证这些信息的正确分离。本文在 StaMPS 技术基础上应用平滑样条方法在时间维进行滤波处理,实验证明平滑样条可以提高 PS 点相位信息分离的准确性,确保形变监测结果的精度。

参 考 文 献

[1] Li Zhenhong, Pasquali P, Singleton A, et al.

MERIS Atmospheric Water Vapor Correction Model for Wide Swath Interferometric Synthetic Aperture Radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(2):257-261

[2] Sousa J J, Hooper A J, Hanssen R F, et al. Persistent Scatterer InSAR: A Comparison of Methodologies Based on a Model of Temporal Deformation vs Spatial Correlation Selection Criteria [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10):2 652-2 663

[3] Kampes B M. Displacement Parameter Estimation Using Permanent Scatterers Interferometry [D]. Delft; Delft University of Technology, 2005

[4] Yang Chensheng, Zhang Qin, Zhao Chaoying, et al. Small Baseline Subset InSAR Technology Used in Datong Basin Ground Subsidence, Fissure and Fault Zone Monitoring[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(8):945-950 (杨成生,张勤,赵超英,等. 短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8):945-950)

[5] Wegmuller U, Werner C. Mitigation of Thermal Expansion Phase in Persistent Scatterer Interferometry in an Urban Environment[C]. JURSE 2015, Lausanne, Switzerland, 2015

[6] Goel K, Gonzalez F R, Adam N, et al. Thermal Dilation Monitoring of Complex Urban Infrastructure Using High Resolution SAR Data [C]. IGRASS, Quebec, Canada, 2014

[7] Ketelaar V B H. Monitoring Surface Deformation Induced by Hydrocarbon Production Using Satellite Radar Interferometry[D]. Delft; Delft University of Technology, 2008

[8] Cuevas M, Monserrat O, Crosetto O, et al. A New Product from Persistent Scatterer Interferometry: The Thermal Dilation Maps[C]. JURSE 2011, Munich, Germany, 2011

[9] Freek V L. Persistent Scatterer Interferometry Based on Geodetic Estimation Theory[D]. Delft; Delft Institute of Earth Observation and Space Systems, 2014

[10] Hooper A, Zebker H A. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2007, 24(9): 2 737-2 747

[11] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2007, 112(B7):

- B07407
- [12] Sousa J, Hooper A, Hanssen R, et al. Persistent Scatterer InSAR: A Comparison of Methodologies Based on a Model of Temporal Deformation vs Spatial Correlation Selection Criteria[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10):2 652-2 663
- [13] Spaans K, Hooper A. InSAR Processing for Volcano Monitoring and Other Near-real Time Applications[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(4):2 947-2 960
- [14] Takezawa K. Introduction to Nonparametric Regression[M]. New York: Wiley-Interscience, 2006
- [15] Liebhart W, Adam N, Alessandro P. Least Squares Estimation of PSI Networks for Large Scenes with Multithreaded Singular Value Decomposition[C]. EUSAR 2010, Berlin, Germany, 2010
- [16] Garcia D. Robust Smoothing of Gridded Data in One and Higher Dimensions with Missing Values [J]. *Computational Statistics and Data Analysis*, 2010, 54(4):1 167-1 178
- [17] Strang G. The Discrete Cosine Transform[J]. *SIAM Review*, 1999, 41(1): 135-147
- [18] Guarnieri A M, Tebaldini S. Hybrid Cramer-Rao Bounds for Crustal Displacement Field Estimators in SAR Interferometry [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(12):1 012-1 015
- [19] Guarnieri A M, Tebaldini S. On the Exploitation of Targets Statistics for SAR Interferometry Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 14(12):1 012-1 015
- [20] Agram P, Simons M. A Noise Model for InSAR Time-series[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(4):2 752-2 771

Estimation of Atmospheric Phase Contributions Using Smoothing Spline in Persistent Scatterers Radar Interferometry

WU Wenhao^{1,2} LI Tao² LONG Sichun¹

1 Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411210, China

2 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The PSInSAR technique can achieve separation of PS phase components, by extracting the time-dimensional PS points based on various temporal and spatial statistical properties to get high-precision, surface deformation monitoring results. As the main error source in InSAR, atmospheric signals can be isolated from the other components of the residual phase by classical filters in the spatial and temporal domains. Optionally, after 3D unwrapping, high-pass filtering can be applied to unwrapped data in time followed by a low-pass filter in space in order to remove the remaining spatial correlated errors (atmosphere and orbit errors). Thus, when the deformation rate is large, the spectrum of various contributing factors will overlap, and the classic filter is powerless. This paper proposes methodologies which can automatically choose a smoothing parameter based on a fast robust version of a discrete smoothing spline instead of classic filter to effectively separate the phase components.

Key words: PSInSAR; smoothing spline; information separation; atmospheric phase screen; surface deformation

First author: WU Wenhao, PhD, specializes in the methods and application of InSAR. E-mail: wuw@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41474014, 41674032, 41274048; the Open Research Fund Program of Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, No. E21502.