

干涉雷达时间序列分析方法 在地面沉降监测中的应用

母景琴^{1,2}, 姚国清²

(1. 唐山师范学院, 唐山 066000; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083)

摘要: 地面沉降已经成为全球性问题, 传统的大地测量技术在日益严重的大范围地面沉降监测方面越来越显得难以胜任, 新兴的雷达干涉测量技术正好提供了一种大覆盖、高空间和高时间分辨率的地面沉降监测手段。本文以天津地区为实验区, 介绍并实现了利用 PS 点的 InSAR 时间序列分析方法, 取得了较好的实验结果。

关键词: 地面沉降; 干涉雷达; 差分干涉; 时间序列

中图分类号: TP 79 : P 642.26 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2007)03-0028-03

0 引言

地面沉降在全球范围内普遍发生, 已经成为一种全球性的灾害, 我国目前已有近 50 个城市发生了地面沉降。目前对地面沉降的监测手段都需要大量的人力、物力、资金和设备的投入, 并且对沉降的监测缺乏时间和空间上的连续性, 再加上我国的地面沉降正由城市区向大面积区域发展, 传统的大地测量技术已显得力不从心, 难以让我们对地面沉降有系统地了解和提出有效的遏制或防治对策。雷达干涉测量技术则可以提供低投入、大覆盖、高空间和高时间分辨率的地面沉降信息, 是一种在地面沉降监测领域极有发展潜力的新手段。

1 雷达干涉测量技术

干涉雷达遥感技术可以全天候利用传感器高度、雷达波长、波束视向及天线基线距之间的几何关系, 精确测量地表每一点的三维位置。当前, 其主要应用领域有高精度数字地形测量、地表微量形变监测以及与资源、环境调查有关的地物特征量化分析和识别等。

重复轨道差分干涉测量(D-InSAR)技术是雷达干涉测量应用的一个拓展, 雷达干涉图的差分可用于监测雷达视线方向厘米级或更微小的地球表面形变。自从 20 世纪 90 年代以来, D-InSAR 技术得到了大地测量界的广泛关注和研究。其基本原理如下:

雷达干涉图是由 2 幅单视复数影像对经过精确配准和共轭相乘得到的相位差影像图。影响干涉图相位值的参数很多, 主要有地形高度 H_k (m)、雷达视线方向形变 D_k (m)、视线方向的大气延迟(第一张像片) S_k^{t1} (m)、视线方向的大气延迟(第二张像片) S_k^{t2} (m) 及相位模糊度 $\omega_k^{[1,2]}$ 。

如果我们把干涉图每一个点的相位差值作为观测值空间 $\varphi \in R^m$, 把上述参数作为参数空间 $X \in R^n$ 的话, 那么差分测量研究的基础就是寻找 φ 和 X 之间的函数关系。通常我们把函数关系定义为 $\varphi = AX + \varepsilon$, ε 反映 φ 的随机误差。

根据研究目标不同, X 参数空间的个数也不同。为了求得地形形变参数, 常见的差分干涉模型有两轨差分、三轨差分 and 四轨差分 3 种^[1]。这 3 种传统的差分干涉得到了广泛应用, 但存在的缺点也很明显: 一是时间去相关因素的影响, 在植被覆盖区或分辨单元内地表特性随时间变化剧烈的地区, 时间去相关使得地形信息完全淹没在噪声中, 甚至无法得到能反映地形的干涉图; 二是大气相位延迟的影响, 目前也是差分干涉研究的热点问题。研究表明, 大气延迟会严重影响差分干涉的测量精度, 但目前还没有消除大气延迟的好方法, 因此, 这一问题成为制约差分干涉技术发展的瓶颈。

为了解决上述问题, Ferretti 与 Prati 等^[3]提出了永久散射体技术(Permanent Scatterers Technique, 简称 PS 技术), 该技术通过同一地区获取的多幅不同时相 SAR 图像, 从中选择具有稳定相位特性的

PS 点,来消除时间去相关因素的影响,而对于大气相位延迟因素,是通过把它作为差分干涉相位中的一个组成部分来加以考虑。PS 技术的成功应用需要 3 个条件:①图像信噪比要足够高;②对于图像上某一点,形变量和时间呈线性关系,也就是假定形变速率为常数;③大气相位可以用一个线性模型来近似。为了得到精确的形变监测结果,应用该方法必须保证有足够多的雷达图像,一方面使迭代过程收敛到一个稳定值,另一方面,从概率统计角度,足够多的图像能保证大气相位模型更接近真实的情况。一般情况下都需要 20~30 景以上的雷达数据,这是 PS 技术存在的最大问题。

然而,SAR 数据的获取需要很高的成本,如果利用较少的数据也能达到 PS 技术的测量精度,将使雷达差分干涉得到更普遍的应用。这就是我们进行研究的出发点。

2 时间序列分析方法

所谓时间序列分析,在本次研究中指对同一个区域一系列随时间基线连续变化雷达图像进行的分析。

2.1 计算模型

在函数关系式 $\varphi = AX + \varepsilon$ 中, $\varphi \in R^m$, $X \in R^n$, ε 为随机误差,通常可以假定 $E\{\varepsilon\} = 0$,所以,函数也可写成 $E\{\varphi\} = AX$ A 为 $m \times n$ 矩阵。为了使方程组有唯一解, A 矩阵要为满秩矩阵,也就是要 $m \geq n$ 。我们研究的基础建立在 $E\{\varphi\} = AX$ 上。一般情况下,在一张干涉图上每个 φ 值对应 X 的参数有 5 个,即地形高度 H 、地表形变 D 、干涉前两张雷达图像的大气延迟 S_k^1 、 S_k^2 以及相位模糊度 ω 。 A 是根据 X 设计的系数矩阵,如果我们能够去掉地形高度和大气延迟因素的影响,只剩下地表形变和地形相位模糊度,系数 A 就会变得简单,方程就容易求解。

本次实验使用空间上 2 个距离较近的 PS 点,求这 2 个点之间的相位差,如果考虑到 2 个点的空间位置,可以认为,较近 2 点的相位差值反映了地形高度差、线性形变速度、大气延迟或者是 3 者的综合。假设 2 个点足够近,其大气延迟差异可以忽略不计,而且我们采用精度较高的 DEM 进行了去平地效应处理,所以,可以把 2 个 PS 点的相位差 φ_j 描述为地表形变速率 ν_j 和相位模糊度 ω_j 的线性函数 ($j = 1 \dots i-1, i+1, \dots, n$)。具体做法如下:

假设有 N 幅雷达图像,首先选择一幅合适的图像(其时间尽可能位于所有图像的中间,图像的信噪比要高)为整幅图像,其它时间的图像为辅图像进

行干涉,形成 $n-1$ 幅时序为 $[t_1 \dots t_{i-1} t_{i+1} \dots t_n]$ 的干涉图。根据前述假定条件,就可以建立方程(1)。

$$E\left\{\begin{matrix} \varphi_1 \\ \vdots \\ \varphi_{i-1} \\ \varphi_{i+1} \\ \vdots \\ \varphi_n \\ \nu_{ps} \end{matrix}\right\} = \begin{bmatrix} k\Delta t_1 & -2\pi & & & \\ & \vdots & & & \\ & k\Delta t_{i-1} & & & \\ & k\Delta t_{i+1} & & & \\ & \vdots & & & \\ & k\Delta t_n & & -2\pi & \\ 1 & 0 & & 0 & \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \nu \\ \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_{i-1} \\ \omega_{i+1} \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)可简写为 $E\{\varphi\} = AX$ 。和传统差分干涉不同的是,这里的观测值 φ_i 不再是干涉图上某点的相位值,而是干涉图上 2 个较近 PS 点的相位差值^[4]。

为使系数矩阵 A 达到满秩,增加伪随机量 ν_{ps} 。这里 $k = -4\pi/\lambda$; $\Delta t_j = t_i - t_j$, (t 的单位为 a, λ 为雷达图像的波长)。问题就转变为求方程 1 中的 ν 和 ω_j , 其中 ω 为整型。

2.2 模型求解

利用高斯-马尔科夫模型定义求解方程的解。 $E\{\varphi\}$ 表示 φ 的均值特征,用 $D\{\varphi\}$ 表示 φ 的方差,定义 $D\{\varphi\} = C_\varphi = \sigma^2 Q_\varphi$, 其中 C_φ 为方差-协方差矩阵, σ^2 为最优方差因子,这里等于 1, Q_φ 是干涉图像中求得的方差矩阵,为正定的实对称矩阵。

首先,不考虑 ω 的整型特性,根据标准的最小二乘法,由公式(2)直接求得 ν 和 ω 的浮点解,并同时根据式(3)求得其协方差矩阵,即

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} \hat{\nu} \\ \hat{\omega} \end{bmatrix} = (A^T Q_\varphi^{-1} A)^{-1} A^T Q_\varphi^{-1} \varphi \quad (2)$$

$$C_{\hat{x}} = \begin{bmatrix} Q_{\hat{\nu}} & Q_{\hat{\nu}\hat{\omega}} \\ Q_{\hat{\omega}\hat{\nu}} & Q_{\hat{\omega}} \end{bmatrix} = \sigma^2 (A^T Q_\varphi^{-1} A)^{-1} \quad (3)$$

这里得到的 $\hat{\nu}$ 和 $\hat{\omega}$ 均为实数,但相位模糊度 ω 为整数。如何利用 $\hat{\omega}$ 得到最优的整数解是这个方法的关键。文献[6]在 2005 年通过对 LAMBDA 算法的研究,提出了改进的 LAMBDA 算法,可以更快速地求得整型解,设结果为 $\check{\omega}$, 根据公式(4)

$$\check{\nu} = \hat{\nu} - Q_{\hat{\nu}\hat{\omega}} Q_{\hat{\omega}}^{-1} (\hat{\omega} - \check{\omega}) \quad (4)$$

对速率进行修正,修正后得到的 $\check{\nu}$ 即为要求的形变速率。

3 方法实验

以天津地区作为实验区(图 1),将时间序列分析方法应用于地面沉降监测的试验。

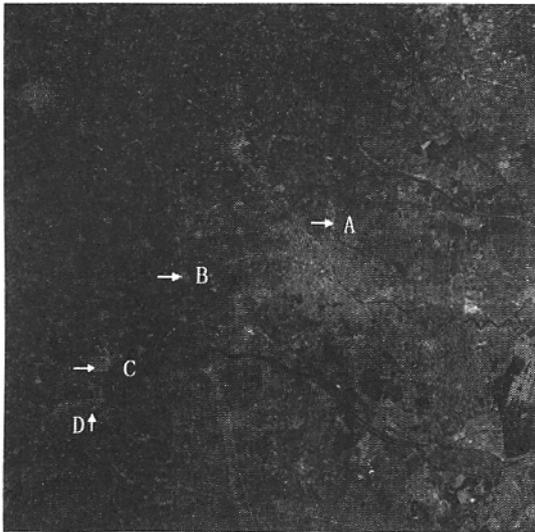


图 1 天津地区雷达影像图
(1:5 多视处理, A~D 表示监测位置)

3.1 实验步骤

选择 2004 年 1~8 月总计 7 景雷达图像。实验包括以下几个主要步骤：

(1) 在 7 景 SAR 图像中,以 5 月 14 日雷达图像为主图像作干涉处理,得到 6 幅干涉图,完成去平地效应,粗略地消除 DEM 误差。为了保证选用的 PS 点相位不受影响,不做滤波处理。

(2) 在沉降比较明显的 4 个局部区域(图 1 中 A、B、C、D 所示),选择 PS 点,进行沉降监测试验。

(3) 挑选合适的 PS 点对。2 个点的相位差除了受线性形变和相位模糊度的影响外,还有 2 点的高程差影响,如果选取的 2 个点的距离足够近,则可以认为下降速度相同,且 2 点的高程差引起的相位差可以忽略。

(4) 求 PS 点对相位差的特征值 $E\{\varphi\}$ 和 $D\{\varphi\}$ 。

(5) 求解 \hat{x} 和 C_x 。

(6) 利用改进的 LAMBDA 算法求解整型解,并进而求得形变速率 ν 的修正值。

3.2 PS 点的选择

时间序列分析方法是建立在 PS 点基础上的,所以 PS 点的选择至关重要。目前,有关干涉雷达处理中 PS 点选择的方法有很多,本次研究 PS 点的筛选分为 2 步：

(1) 初选 PS 点。利用时间域上的幅度离散性方法(简称 DA 方法)求干涉图上的 PS 点,公式为 $D_A = \sigma_A/m_A$, σ_A 代表某像素点幅度的标准差, m_A 代表某像素点幅度的均值。Alessandro Ferretti^[3]等研究得出,当 $D_A < 0.25$ 时,该点可当作 PS 点。一般来说, D_A 值越小,得到的 PS 点越稳定。实验中,我们选择的雷达图像有 7 景,根据 Hanssen 等人^[5]的研究,这种情况

下根据 D_A 选出的 PS 点成功率为 75% 以上。

(2) 筛选 PS 点。在实验中,为了提高 PS 点的正确性,我们根据初选出的 PS 点的幅度值对其进行进一步筛选。因为有些点的幅度平均值很低,但幅度偏差也很低,得到的 D_A 值就很小,但这些幅度小的点相干性很低,并不适合进行处理,应该除去。

3.3 PS 点对的组合

挑选 2 个合适的 PS 点组成一对,以完成时间序列分析,求出这 2 个点的地面沉降速率。PS 点对相位差的均值和方差是计算中必须的 2 个参数。挑选合适的 PS 点对会直接影响后续的计算过程。挑选的原则为,既要保证点对之间的距离,又要保证点对相位差受大气影响的差异可以忽略不计。其实,这 2 个方面相互矛盾,只能经过多次实验得出经验值。本次实验我们得出的经验值为:设两点 $P_1(x_1, y_1)$ 和 $P_2(x_2, y_2)$ 取 $|x_2 - x_1| \leq 25, |y_2 - y_1| \leq 5$; 定义面积 $S = (|x_1 - x_2| + 1)(|y_1 - y_2| + 1), S \in [10, 15]$ 。

3.4 实验结果

根据 2004 年天津周边地区地面实际沉降情况,研究中选择天津城区北部大毕庄镇、王庆坨、胜芳镇及左各庄镇等几个有明显沉降的区域(图 1),选择 PS 点,进行实际监测,得到的结果如表 1 所示。

表 1 时间序列分析地面沉降监测结果

监测位置	监测点		地面沉降/ (mm · a ⁻¹)
	PS 点 1(P_1)	PS 点 2(P_2)	
北大毕庄镇 (A)	9 853 1 860	9 854 1 856	24.339
	10 169 1 849	10 181 1 849	70.773
	10 301 1 936	10 303 1 940	36.98
	10 303 1 940	10 313 1 938	47.058
	10 302 1 936	10 312 1 938	23.144
王庆坨(B)	12 550 3 155	12 554 3 160	40.553
	12 408 3 196	12 414 3 195	68.933
胜芳镇(C)	12 726 3 016	12 734 3 013	53.304
	15 678 3 891	15 682 3 893	55.893
左各庄镇 (D)	16 050 3 871	16 059 3 871	140.112
	17 975 4 105	17 987 4 103	78.961
	17 975 4 106	17 983 4 102	89.733

实验结果显示,用时间序列方法得到的监测结果与该地区实际已知的地面沉降情况十分吻合,表明时间序列分析方法可以作为一种有效手段,快速监测地面沉降情况。

4 结论

本文主要研究的是时间序列分析方法在天津地区地面沉降监测中的应用,通过初步实验,取得了比较满意的结果。但在 PS 点的选取、地面沉降监测精度的提高,尤其是如何将本技术应用于大范围实际监测工作等问题上,仍然需要我们进一步研究。

(下转第 46 页)

色差效果明显等特点,已经集成到 CBERS - 02 卫星图像预处理系统中,并取得了良好的运行效果。随着调图工作的自动化, CBERS - 02 星预处理系统中人工调图的瓶颈得到解决,其运行效率得到较大提高。由于中巴地球资源一号系列卫星 CCD 具有相同的结构组成和成像方法,该方法不仅适用 CBERS - 02 星,同样适用于中巴地球资源一号系列的其它卫星。

致谢:本实验获得傅俏燕、潘志强、曾勇、龙小祥和刘国栋等同志的帮助,在此表示感谢!

参考文献

[1] 郭建宁,于晋,曾勇等. CBERS - 01/02 卫星 CCD 图像相对辐射校正研究[J]. 中国科学(E 辑) 2005 35(增刊 I) : 11 - 25.
 [2] 赵英时,等. 遥感应用分析原理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

A STUDY OF REMOVING ABERRATION IN CBERS CCD IMAGE

GUO Jian - ning , HUANG Shi - cun , MIN Xiang - jun , LI Xing - chao
 (China Center for Resources Satellite Data and Application , Beijing 100073 , China)

Abstract : This paper provides a new method for the automatic removing of aberration in the CBERS CCD image. Tests show that the new method can not only remove aberration efficiently and replace manual work but also improve obviously the speed of image - processing. This method has therefore established the foundation for the extensive application of the CBERS CCD image.

Key words : CCD ; Nearest neighbor ; Aberration

第一作者简介:郭建宁(1963 -)男,研究员,中国资源卫星应用中心主任,现主要从事中国陆地卫星地面处理系统工程建设工作。

(责任编辑:刁淑娟)

(上接第30页)

参考文献

[1] 舒宁. 雷达遥感原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1996.
 [2] Hanssen R F. Radar Interferometry : Data Interpretation and Error Analysis[M]. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers , 2001.
 [3] Ferretti A , Prati C , Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing , 2001 , 39(1) : 8 - 20.
 [4] Kampes B M , Hanssen R F. Ambiguity Resolution for Permanent

Scatterer Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing , 2004 , 42 (11) : 2446 - 2453.

[5] Hanssen R F , Teunissen P J G , Joosten P. Phase Ambiguity Resolution For Stacked Radar Interferometric Data[A]. International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy/Geomatics and Navigation[C]. Banff , Canada 2001.
 [6] Chang X W , Yang X , Zhou T. A Modified LAMBDA Method for Integer Least - squares Estimation[J]. Journal of Geodesy , 2005 , 79(9) : 552 - 565.

TIME SERIES RADAR INTERFEROMETRY METHOD FOR SURFACE DEFORMATION MONITORING

MU Jing - qin^{1,2} , YAO Guo - qing²

(1. Tangshan Teacher 's College , Tangshan 066000 , China ; 2. China University of Geosciences , Beijing 100083 , China)

Abstract : Surface deformation has become a global problem. The traditional geodetic technique is increasingly proved to be incapable of monitoring the large - scale and serious surface deformation. The new radar interferometry technique provides an effective tool for the large coverage area and a high spatial and temporal resolution for the monitoring. This paper describes the synthetic aperture radar (SAR) interferometry technique for surface deformation monitoring. The time series method based on the permanent scatterers technique is also discussed in detail with Tianjin as a test area. The result of the test shows that the time series method has a very good application value.

Key words : Surface deformation ; Radar interferometry ; D - InSAR ; Time series

第一作者简介:母景琴(1980 -)女,毕业于河北师范大学计算机科学技术系,现为中国地质大学(北京)硕士研究生,主要从事图像处理技术研究。

万方数据

(责任编辑:刁淑娟)