doi:10.3969/j.issn.1001-358X.2010.01.014

GPS 与 InSAR 结合技术在滑坡监测中的应用

方亿锋
(广东省惠州七五六地质测绘工程公司,广东 惠州 516300)

摘要:合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)应用于地面形变监测已经成为地质灾害研究热点。文中分析了 InSAR 技术在滑坡变形监测中的特点与技术优势,监测中 GPS 与 InSAR 的结合能够同时提高监测在空间域与时间域的分辨率;叙述了 GPS 与 InSAR 结合技术的理论与方法,说明利用干涉雷达结合 GPS 技术对滑坡进行监测是可行的,具有十分广阔的应用前景。

关键词: 合成孔径雷达干涉测量 (InSAR); 雷达差分干涉测量 (D-InSAR); 滑坡监测
中图分类号:P228.4 **文献标识码**:B **文章编号**:1001-358X(2010)01-0048-04

当前,GPS 技术和 InSAR 技术被应用于滑坡体监测,主要依赖于二者都可以向全球用户全天候地连续提供监测数据。然而,这两种技术各自的优缺点又十分明显,如:GPS 技术有很高的时间分辨率,但是其空间分辨率却很低;InSAR 有比较高的空间分辨率,但是其时间分辨率却不理想。为此,可以把这两种技术相结合,相互补偿,以达到较高的监测精度。

1 应用 GPS 技术监测滑坡体的可行性

变形监测通常要达到毫米级或亚毫米级的精度,而监测的边长一般为 300~1000 m。用一个基准点进行这样的模拟试验,利用 5hGPS 观测值求出监测点平面位移分量中误差约为 0.4 mm;利用 2hGPS 观测值求出监测点平面位移分量中误差约为 0.6 mm;利用 1hGPS 观测值求出监测点平面位移分量中误差约为 1.0 mm。若利用两个基准点,其监测精度可进一步提高。

滑坡体的地面垂直形变量 d 则表示为该点的两期正常高之差,而对于同一测站点,因 GPS 测量是在 WGS-84 地心坐标系中进行的,其提供的高程(大地高)与我们通常要用的正常高之间存在着高程异常,故地面垂直形变 d 也可表示为该点的两期大地高之差。根据武汉大学测绘学院的研究成果,GPS 的大地高差中误差约为 1.7 mm,完全满足了滑坡监测的需要。由此表明,只要采取一定的措施,利用 GPS 定位技术进行滑坡体监测是完全可行的。

2 InSAR 技术的变形监测应用

2.1 InSAR 技术的应用现状

自从 1969 年首次应用合成孔径雷达干涉技术以来,InSAR 技术得到发展。近 10 年来,欧美等发达国家已开始致力于研究使用该技术监测形变,特别是其形变探测精度可达 mm 级的潜能及连续空间覆盖的能力,已被认为是前所未有的新的空间观测技术。

InSAR(包括 D-InSAR)技术应用领域比较广泛,除了用于建立大规模的数字高程模型(DEM)和地形制图外,其他的应用领域还包括洋流,水文、极地研究、地震、火山灾害、地表沉降、森林研究和山体滑坡等。用 InSAR 技术对滑坡进行变形监测,国外研究比国内早一些,1996 年 Fruneau 等人对法国南部的 SaintEtiennedeTin 滑坡现象使用 D-InSAR 技术进行了监测,几十个干涉图使用 ERS-1/2 InSAR 数据序列生成并从中提取位移梯度图,利用它们模拟该地区的变形模型,处理结果与常规方法离散观测吻合程度很高。

国内方面,InSAR 技术对地面进行变形观测的研究和应用领域涉及地面沉降和地震形变。游新兆等在长江三峡工程库区首次利用欧空局提供的 1992 年 5 月至 2000 年 4 月间的 42 幅 ERS-1 与 ERS-2 的 SAR 数据表明,只要时间跨度不太大,地形起伏较大的山区亦能获得较为理想的干涉图像。在此基础上,游新兆等探讨了利用 InSAR 监测三峡工程蓄水过程的地表变形的可行性。李德仁等利用 ERS-1 和 ERS-2 相隔 1 天的重复轨道 SAR 数据,经过差分处理对天津市地面沉降进行研究,得到的结果与水准测量求得的地面沉降等值线具有明显的一致性和相似性。

在台湾 9.21 地震的一年后,相关部门利用

万方数据

GPS 测量了灾区上千个坐标控制点,从而描绘出整个地震所引起的重大地形变化。同时用 InSAR 技术测量地震引起的地形变化,对断层两侧重要地表地震前后的 DEM 进行描绘。由此从几个不同的数值地形变化中,寻找出整个地形变化全方位的改变形态。

2.2 InSAR 数据源及处理

雷达卫星运行周期一般从 24 天(RADARSAT)到 44 天(JERS - 1)。下面表 1 列出了目前使用较为广泛的几种商用星载 SAR 系统及其特征参数。

表 1　几种商用 SAR 系统及其特征参数

卫星 SAR 系统	发射时间	轨道高度	波长	激化方法	侧视角	割幅宽度
ERS - 1	1991.07.16	785 km	5.7 cm	VV	20 - 23	100 km
ERS - 2	1995.4.20	785 km	5.7cm	VV	20 - 23	100 km
EVISAT - 1	2000.11	799.8 km	5 种模式	VV 或 HH	15 - 45	100 - 405 km
JERS - 1	1992.2	570 km	23.5	HH	35 - 38	75 km
RADARSAT	1995.11.04	793 - 821 km	318 - 715cm	HH	20 - 59	45 - 500 km

在众多 SAR 系统中以欧洲空间局的 ERS - 1/2、日本的 JERS - 1 和加拿大的 RADASAT 等卫星的 SAR 图像为代表,而应用最普遍的是 ERS - 1/2 获取的 SAR 图像。ERS - 1/2 的影像幅宽 100 km,影像覆盖全国各地,但时间不一致,如果需要制定,则需要编程接收。每个干涉像对的处理(如干涉配准、噪声去除、像对解缠,生成 DEM,滑坡分析),价格大约在 2 万 ~3 万元左右。主要的处理软件有加拿大 Atlantis 研制的 InSAR Worksta - tion(PCI 软件),美国 ERDAS 公司开发的 IFSAR 软件,美国 AFS(Alaska SAR Facility)开发的 SAR、InSAR 处理软件(ASFSAR,ASF InSAR)和 SAR 数据查询软件(Desew)。

3 InSAR 滑坡监测技术分析

3.1 InSAR 技术特点

InSAR 使用卫星或飞机搭载的合成孔径雷达系统获取高分辨率地面反射复数影像,每一分辨元不仅含有灰度信息,而且还包含干涉所需的相位信号。通过获取地面同一地物的复影像对,提取干涉相位,进而获得其三维信息。利用一些特殊的数据处理方法(如:干涉配准、滤波、相位解缠等)和几何转化来获取数字高程模型或探测地表形变。此方法对于滑坡监测和灾情评估都是有非常大的作用。

与其他监测方法(如 GPS、大地常规测量等)相比,InSAR 的技术优势在于:(1)主动式遥感,全天候成像;(2)对地物几何形状、地球表面粗糙度敏感,对土壤和植物冠体具有一定的穿透力;(3)空间分辨率高;(4)覆盖范围大,方便迅速,可以获得某一地区连续的地表形变信息。滑坡的发生具有偶发性并伴有恶劣的天气条件,甚至发生在夜晚,利用 InSAR 技术在滑坡的监测中可以发挥不可替代的重要作用。

但 InSAR 用于滑坡监测的也有明显的缺点,如对于大气延迟误差、卫星轨道误差和地表覆盖的变化非常敏感;干涉像对之间空间基线和时间基线的挑选也受到一定的限制;高山地区成像时存在雷达波束迭掩和雷达阴影现象;在滑坡监测时,其存档数据的时间分辨率还满足不了要求等。而且虽然覆盖范围大,但在每一个点位变化量的精确程度不如由地面测量或 GPS 所得到的成果。针对这一问题,提出了 InSAR 和 GPS 技术相结合的解决方法。

3.2 InSAR 和 GPS 的技术互补性

在空间范围上,GPS 的监测范围仅仅局限于一定区域,而利用 InSAR 可以监测大范围的滑坡,能得出一个地表整体连续的变化趋势。

空间分辨率,InSAR 可以达到很高,就星载 InSAR 来说已达到 l0m 以内,采用 D - InSAR 技术对地观测的分辨率可达到 mm 级,且雷达差分干涉测量所得图像是连续覆盖的,由此得到的地面形变也是连续覆盖的,这对分析滑坡形变分布及发展规律是非常有用的。而 GPS 采集数据的空间分辨率则远不如遥感,GPS 连续运行站网当中,站点之间的间隔一般为几个 km 不等。而且需要事先建立监测网,会受到地理环境和运作成本等因素的限制,并且要有必要的测量成果点。所以对于建网困难或常规大地测量无法进行的地区,干涉雷达将发挥独到的作用。

时间分辨率,GPS 可以在很短的时间间隔(数十秒至几个小时)重复采集数据。如果建立了 GPS 连续运行站网,更可以提供连续的、区域性的大气层数

万方数据

据。目前世界上许多 CGPS(Continuous GPS network)网采用的采样间隔为30s,有些达到了采样频率几十个 Hz,故此 GPS 网已经达到了非常高的时间分辨率。而 InSAR 目前主要的商业数据还是来源于星载 SAR,雷达卫星运行的重复周期从24天到44天左右。在解译某些地学现象时,其时间分辨率还满足不了要求。

InSAR 以遥感成像方式获取数据,然后通过遥感影像处理的技术手段来达到量测的目的。但是对于大气参数的变化(对流层水汽含量和电离层)、卫星轨道参数的误差和地表覆盖的变化非常敏感,干涉像对之间空间基线和时间基线受一定限制。而 GPS 技术可以推算出对流层延迟和电离层延迟,这是校正 InSAR 数据产品误差的重要依据。GPS 技术也可以进行高精度的定位和变形监测,这些数据可以作为 InSAR 数据处理过程中的约束条件(控制点)。如果建立了 GPS 连续运行站网,更可以提供连续的、区域性的大气层数据。

由上所述,GPS 与 InSAR 具有很强的技术互补性。单纯依靠 InSAR 数据和 GPS 技术无法在同时满足时间和空间分辨率的前提下提供滑坡研究所需的数据,必须加入其他的辅助数据和必要的技术手段来加以改善。

4　InSAR 与 GPS 集成的技术路线

4.1　InSAR(包括 D-InSAR)应用于滑坡监测的处理过程

对于监测滑坡形变的 InSAR(包括 D-InSAR)处理思路如下:首先选择重复时间间隔尽量短(不含形变,重复间隔仅一天)的两个单视复数雷达(SLCSAR)图像,用于生成反映 DEM 的干涉相位图 φ_h;然后选择跨越变形发生时间段且覆盖同一地区的另外一对 SLCSAR 图像生成包含地形起伏和变形信息的相位图 φ_s,将 φ_h 从 φ_s 中减去便可得到净的反应形变的相位图 φ_d(对应于沿侧视方向由变形引起的斜距差改变量 δ_{rd});最后根据相应的基线参数及几何关系计算垂直位移量 δ_h 和水平位移量 δ_v。基于 SAR 图像序列的处理思想被称为差分雷达干涉方法(D-InSAR)。

SAR 幅度图像与 InSAR 条纹图的叠加即可发现细微的局部变化,根据变化的条纹可推算出变化值。值得注意的是:所有的 SAR 图像应配准到同一影像空间,另外,φ_h 不仅可以借助于两个 SAR 图像干涉生成,还可以利用已有的 DEM 和轨道参数模拟生成。未解缠干涉图的质量通过 SLCSAR 图像的相关性来衡量。

4.2　SAR 数据监测滑坡形变方案

监测滑坡变化对于非同时获取的 SAR 数据而言,滑坡微小变化也影响干涉图的相位。借助于多时态干涉 SAR 图像,可以发现滑坡的变化。微小滑坡相对运动产生的相位差分可表示为 $\Delta\phi_S=\frac{2\Delta_S}{\lambda}$。其中,$\Delta_S$ 表示沿斜距方向的相对位移,λ 为波长。所以,假如我们在不同时间获取 SAR 图像对,且给定基线 $B_n=nS$,如果在此期间发生微小滑坡运动时,则有等式:

$$\Delta\varphi=\Delta\phi_t+\Delta\varphi_S=\frac{4\pi B_n n_P}{\lambda r_0}+\frac{2\Delta_S}{\lambda}$$

为了发现滑坡相对运动,应将 $\Delta\varphi_t$ 和 $\Delta\varphi_S$ 进行分离。这种方法在法国和意大利做过实验,结果和用 GPS 测定的结果一致。可以看出,与传统方法相比,InSAR 提供了一种测定滑坡相对运动成本小得多的测量方式。

4.3　GPS 与 InSAR 技术的结合方案

(1)基于 GPS 量测的干涉数据几何校正

仅仅采用星载 SAR 数据本身提供的轨道参数进行定位,精度往往达不到应用的要求。GPS 技术在 InSAR 应用中直接的结合方式是对 InSAR 数据的处理结果进行精确的几何定位或地理编码。通常的步骤是事先设置角反射器,适当地安装角反射器,当 SAR 成像时将会强烈反射角反射器发射过来的电磁波,在影像中出现明显的特征点。或者找到类似于角反射器的永久性散射体,即对电磁波具有强反射的地物如裸露的岩石、灯塔等。用 GPS 精确测定角反射器或永久性散射体的三维坐标。准确地确定出这些点目标对应的几何位置关系,还可作为控制资料精确校正由 InSAR 数据得到的 DEM 和变形分布图,以消除大气影响、轨道参数的不确定性和其它系统性的误差。

(2)基于永久性散射体和角反射器的 D-InSAR

在植被茂盛的区域,例如我国的西南、华南等许多地区,干涉成像时相干性普遍很差。在这种类型的区域,InSAR 技术的应用难以遵循一般的途径实施。在进行滑坡观测时,采用永久性散射体是其中

万方数据

的一个选择。这样回避了在干涉质量不高的情形下对整个干涉图进行解缠等困难。只在一些离散分布的点上推算出相位的变化,从而估计滑坡的微小形变。这种方法需要在同一个成像区域累计许多幅 SAR 影像才能得到高精度的估计值。对于那些可能缺少裸露的人工地物,可采用布设角反射器阵列的方法。即使在空间基线较大、时间基线很长的条件下也可以实施。考虑到布设大量的角反射器的工程难度和成本,这种方法适用于监测小范围的滑坡稳定性。

(3)GPS 连续观测站网数据与 InSAR 的集成

利用 GPS 连续观测站网进行变形观测和 InSAR 的互补性特点,将两方面的数据结合起来,可以在空间分辨率和时间分辨率上更加细致地描述滑坡形变的分布和变化过程。实施过程大致可以按以下步骤进行:①由 GPS 连续观测站网获得有关的大气参数,校正 InSAR 数据中对流层折射和电离层折射的影响;②以 GPS 的定位结果作为 InSAR 数据处理的约束条件以消除卫星轨道误差的影响;③利用已经校正的 InSAR 数据处理结果,对连续观测站网的观测结果进行插值,增加 GPS 连续观测站网的空间观测密度;④基于每天或每小时或更高的时间密度的 GPS 观测数据,对上述结果进行时间域的插值,建立动态模型。

5 结　语

分析表明,InSAR 的诸多优点决定了它可以在滑坡监测与预报方面即将有广泛的应用。对于 InSAR 用于滑坡监测的缺点,如大气延迟误差、卫星轨道误差、空间基线和时间基线去相关以及存档数据的时间分辨率还满足不了要求等等,我们可以利用 GPS 和 InSAR 的互补性特点,二者结合,在一定程度上为解决 InSAR 对于大气参数的变化敏感,提高综合技术的时间分辨率和空间分辨率提供了途径。并且能有效完成建立在基于 GIS 平台上的滑坡监测专业的滑坡稳定性分析及评价分析。

差分干涉测量技术适合于绝大多数的滑坡监测,只要能够收集到合适的空间基线和时间基线的数据,都能得到满意的结果。对于需要布设角反射器的滑坡,监测太大的滑坡布设成本比较高,监测小一些的滑坡比较合适。但对于高陡峭地形内短期迅速发育,具有高形变梯度的滑坡,用雷达差分干涉测量技术监测并不适合。当前用于滑坡的监测方法还有很多,如大地测量法(常规测量)、埋设仪表法、陆地摄影测量法,外加现场宏观巡视调查等。所以需要根据滑体的特性和变形破坏机制以及所处不同的变形阶段,监测成本等,合理运用不同的监测方法或手段以达到最佳的监测效果。

参考文献:

[1] 范青松,汤翠莲,陈于,张晓东. GPS 与 InSAR 技术在滑坡监测中的应用研究[J]. 测绘科学,2006,09(5):60 - 62.

[2] 吴北平,李征航,徐绍铨. GPS 定位技术在三峡库区崩滑地质灾害监测中的试验分析[J]. 地球科学—中国地质大学学报. 武汉,2001,11(6):48 - 52.

[3] 匡桂荣. GPS 在滑坡体变形监测中的应用[J]. 西部探矿工程,2007(4):110 - 112

[4] 陈基伟. 利用 GPS - InSAR 合成方法进行地面沉降研究的现状与展望[J]. 测绘科学,2003,12(4):69 - 71.

[5] 黄芳等. 基于 GPS 时间同步的分布数据采集与监测系统研究[J]. 矿山测量,2004(1).

[6] 袁德宝. GPS 在线路控制测量中的应用[J]. 矿山测量,2005(4).

[7] 武百超等. GPS/INSAR 数据融合在大范围地表沉降监测中的应用[J]. 矿山测量,2006(1).

[8] 季灵运,李冲. GPS - InSAR 合成方法用于地面沉降监测的可行性展望[J]. 全球定位系统,2006,03(1):39 - 41.

[9] 陶秋香等. InSAR 成像原理工作模式及其发展趋势[J]. 矿山测量,2008(1).

[10] 汤凯煌等. 基于地形改正的 GPS 高程异常曲面的拟合[J]. 矿山测量,2008(1).

作者简介:方亿峰(1983 -),男,湖北省黄冈市人。2006 年毕业于河北理工大学交通与测绘工程系测绘工程专业,获测绘工程专业本科学历并取得学士学位。2007 年 8 月取得测绘助理工程师职称。毕业后就职于广东省地勘局七五六地质大队,从事测绘工作至今。

(收稿日期:2009 - 10 - 29)

万方数据

GPS与InSAR结合技术在滑坡监测中的应用

万方数据 WANFANG DATA 文献链接

作者： 方亿锋， Fang Yifeng
作者单位： 广东省惠州七五六地质测绘工程公司,广东,惠州,516300
刊名： 矿山测量
英文刊名： MINE SURVEYING
年，卷(期)： 2010(1)

参考文献(10条)

1. 范青松. 汤翠莲. 陈于. 张晓东 GPS与InSAR技术在滑坡监测中的应用研究[期刊论文]-测绘科学 2006(5)

2. 吴北平. 李征航. 徐绍铨 GPS定位技术在三峡库区崩滑地质灾害监测中的试验分析 2001(6)

3. 匡桂荣 GPS在滑坡体变形监测中的应用[期刊论文]-西部探矿工程 2007(4)

4. 陈基伟 利用GPS-InSAR合成方法进行地面沉降研究的现状与展望[期刊论文]-测绘科学 2003(4)

5. 黄芳 基于GPS时间同步的分布数据采集与监测系统研究 2004(1)

6. 袁德宝. 彭小沾. 郑栋. 杨寒光 GPS在线路控制测量中的应用[期刊论文]-矿山测量 2005(4)

7. 武百超. 邹徐文 GPS/INSAR数据融合在大范围地表沉降监测中的应用[期刊论文]-矿山测量 2006(1)

8. 季灵运. 李冲 GPS -InSAR合成方法用于地面沉降监测的可行性展望[期刊论文]-全球定位系统 2006(3)

9. 陶秋香 InsAR成像原理工作模式及其发展趋势 2008(1)

10. 汤凯煌 基于地形改正的GPS高程异常曲面的拟合[期刊论文]-矿山测量 2008(1)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_kscl201001014.aspx