

文章编号: 0494-0911(2012)03-0005-04

中图分类号: P208

文献标识码: B

# 基于 GDCORS 的广东省滑坡灾害动态监测系统

刘小丁<sup>1</sup>, 李成钢<sup>1</sup>, 魏平新<sup>2</sup>

(1. 广东省国土资源测绘院, 广东 广州 510500; 2. 广东省地质环境监测总站, 广东 广州 510510)

## GDCORS Based Slope Slide Real-time Monitoring System in Guangdong

LIU Xiaoding, LI Chenggang, WEI Pingxin

**摘要:**以 GDCORS 技术为核心,集成单频 GPS 接收机及 GMS 等低成本专业化 GPS 形变监测手段,通过对基于 CORS 的动态解算数学模型和形变参数自动探测和提取关键算法的研究,开展高精度滑坡灾害动态监测技术应用研究。通过系统设计与技术集成,建设基于 GDCORS 的广东省滑坡灾害动态监测系统,并基于该系统在省内开展位移形变模拟试验和四会中学等地质灾害隐患点滑坡地表形变远程动态监测示范,验证该技术在广东省滑坡灾害动态监测预警中的适用性。

**关键词:** GPS; 地质灾害; GDCORS; 形变监测; GMS

### 一、引言

GPS 技术具有高精度、全天候及连续观测能力等特点,已被广泛应用于全球板块运动和地壳运动的监测、火山活动的监测及大型工程建筑物(如大坝、特大型桥梁、超高层建筑物等)的动态监测中。2005 年底,广东省建成国内首个省级 GPS 连续运行参考站网络(Guangdong continuous operational reference system, GDCORS),该系统由 78 个 GNSS 永久性参考站组成,构成了覆盖全省范围的实时差分定位服务网络和省级空间定位参考框架。CORS 系统的建成,极大地提升了 GNSS 的应用能力,提高了 RTK 的使用效率,保证了 RTK 使用的稳定性和高精度。在地质灾害的地表位移形变的动态监测方面,该技术适用于斜坡体不同形变阶段的地表三维位移监测<sup>[1-2]</sup>。

本文基于 CORS 系统,通过对无线 Internet 通信技术和单频 GPS 接收机等低成本专业化 GPS 形变监测设备的集成,探讨了动态解算模型、形变参数的自动探测与提取技术等关键算法,并进行软硬件集成,开展了广东省高精度滑坡形变远程动态监测研究和应用的系列探索。

### 二、CORS 滑坡灾害监测系统关键技术

#### 1. 系统动态解算数学模型

CORS 动态解算模型方法及流程可概括为模糊度固定(包括双频模糊度估计、搜索、检核)和定位参

数求解两个过程。采用 CORS 准实时动态解算模型,可实现大区域统一算法平台下的位移形变动态监测<sup>[3-6]</sup>。GDCORS 网络的 GPS 位移形变模拟试验结果表明,该算法同时适用于 1 km 以内的短距离动态监测(单历元平面精度优于  $\pm 2$  mm)以及 40 km 以上中远距离动态监测(平面精度优于  $\pm 2$  cm)。

#### 2. 系统形变参数的自动探测与提取

基于高精度位移形变监测观测值,通过卡尔曼滤波除噪、自动阈值分类和假设检验的形变位移参数自动探测,提取出所有有效的位移形变特征点信息,将其分解为与灾害监测目标显著性形变相关的不同时间尺度的相对位移、速度及加速度等运动状态参数信息,并作为最终的地表位移形变监测数据用于滑坡状态分析、评价和预测。动态形变监测系统的目标是实现对监测目标四维时空的关键运动状态相关参数(包括位移参数、速度参数及加速度参数等)的监测。为实现系统自动化处理(即形变参数自动探测)需要 4 个过程。

##### (1) 粗差探测(或称奇异值检验)

对于动态监测系统,其观测数据(即 GPS 监测结果)中会存在粗差,形变分析前必须将这些粗差或者奇异值剔除。对于地质灾害位移形变而言,由于监测目标处于“假设运动”状态,因此,传统的通过观测值序列本身直接用“ $3\sigma$  准则”进行粗差检验的方法不再适用。本文主要采用基于卡尔曼滤波残差等外部信息进行粗差剔除的方法,即

$$v_k = l_k - A_k \bar{x}_k \quad (1)$$

收稿日期: 2012-01-10

基金项目: 广东省科技计划(2010A032000001); 2011 年广东省战略性新兴产业发展专项资金(2011168031)

作者简介: 刘小丁(1969—),男,湖南新化人,高级工程师,主要从事 GPS 精密定位和 3S 集成应用研究工作。

式中,  $v_k$  为残差项;  $l_k$  为观测值;  $A_k \bar{x}_k$  为系统估计值。设观测数据的先验中误差为  $m$  (取长期观测资料统计值或经验数据值), 进行粗差检验, 当  $|v_k| > 3m$  时, 认为是奇异值, 予以舍弃。

### (2) 自适应分类

在自适应分类算法基础上, 采用统计学假设检验方法, 设计与实际情况相对应的检验量, 从而实现特定历元是否发生形变的判定。为达到通过假设检验实现程序化自动判定是否发生形变的目的, 需建立符合统计规律的假设检验量及序列, 主要采用 T 检验及 F 检验进行。

#### ① T 检验方法

$$\left. \begin{aligned} d_i^h &= h_i - h_0 \\ T_i^h &= \frac{\bar{d}_i^h}{S/\sqrt{n}} \sim T(n-1) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $h$  为形变监测量;  $d$  为区间内相对形变量, 符合  $N(0, \sigma^2)$  分布;  $\bar{d}_i^h = \sum_{k=1}^n d_k$  为该时段内形变平均值;

$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  为样本标准差。如果  $S$  值由历史数据的先验精度信息设定, 则检验量变为 Z 检验方法。

#### ② F 检验方法

$$\left. \begin{aligned} d_i^h &= h_i - h_0 \\ F_i^h &= \frac{\delta_i^{h2}}{S^2} \sim F(n-1, n-1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中  $h$  为形变监测量;  $d$  为区间内相对形变量, 符合  $N(0, \sigma^2)$  分布;  $\delta_i^{h2}$  为已测卡尔曼滤波残差项序列平方项;

$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$  为样本标准差。

### (3) 形变探测

当发现形变后, 需记录该形变时段起始时刻及形变量。时段起始时刻为  $t_{s1} = \{t_0, t_i\}$ ; 形变量为  $D_{ts} = d_i^h$  标记为 true。本循环判断完毕后, 进入下一个循环判断, 即起始时刻及参考位移量变为下一个历元

$$\left. \begin{aligned} t_{sj} &= \{t_{i+1}, t_j\}s \\ d_j^h &= h_j - h_{i+1} \\ i &\geq j \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### (4) 参数估计

通过卡尔曼滤波算法, 将形变监测结果转化为表征监测目标运动状态的四维时空运动状态参数, 包括位移参数、速度参数及加速度参数, 实现最终形变分析结果的输出。

## 三、GDCORS 系统在滑坡灾害动态监测中的应用

与 CORS 系统控制中心软件主要支持标准的空间定位服务不同, 滑坡灾害动态监测系统中心软件主要支持地质灾害系统远程终端的数据采集、形变监测数据处理、在线监测、形变探测、灾变规律分析 (如诱发因子分析等)、预测预警等地质灾害专业类的需求, 共有以下 5 个基本功能模块。监测数据流程如图 1 所示。

1) 远程数据的采集。主要功能是通过与实时数据采集设备 (目前已集成 GPS 一机多天线形变监测系统和地下水、降雨采集仪等) 连接, 获取实时数据, 确保 GIS 数据库的时效性。数据更新子系统以 Windows 服务 (Windows 服务是可长时间运行的应用程序, 随计算机启动自动独立运行) 的形式运行, 实时自动下载 GPS 和降雨数据, 无需人为操作。采集系统具体情况可见参考文献 [6]。

2) 隐患点信息在线监测。该模块主要实现隐患点实时信息查询, 包括以下几个功能模块:

a. 隐患点与防治信息查询。地质水文环境、灾情报告、稳定性、群测群防信息、影响因素等隐患点信息查询。

b. GPS 地表位移在线监测。实时显示 GPS 监测点位移变化曲线。

c. 位移平面分布矢量图查询。以二维矢量图实时显示 GPS 监测位移变化矢量。

d. 位移变化动态追踪。以时间动画序列显示地表 GPS 监测站的移动过程。

3) 位移形变参数自动探测。形变自动探测模块对 GPS 位移实时监测数据进行自动实时处理, 主要处理过程为:

a. 剔除 GPS 监测数据的粗差, 用基线解算的残差项进行粗差剔除, 按 3 倍中误差的原则剔除。

b. 用假设检验方法作形变探测, 主要目的是在观测精度范围内确定各观测时段的形变量。

c. 监测数据重采样, 由于监测数据是非等间隔的, 为便于计算, 用 6 次拉格朗日插值法对监测数据重采样, 得到等间隔的时间序列。

d. 用卡尔曼滤波方法进行参数估计, 从一系列包含噪声的监测序列中, 估计实际的位移变化状态。

4) 灾害诱发因子分析。主要分析降雨量与地表位移相关的显著性, 首先计算降雨量与地表位移的相关系数, 然后用假设检验方法 (F 检验) 检验相关显著与否, 并以此判断降雨量与地表位移是否有

显著相关性。

5) 预测预警分析处理。基于已有的监测位移数据作预测,包括多项式拟合位移预测模型、生物生长位移预测模型、指数回归预测模型及以上几种

模型的加权组合预测模型等。当灾害体专业监测位移速度超过预测阈值,就会及时发出灾害预警,并实时显示预警隐患点的详细信息。

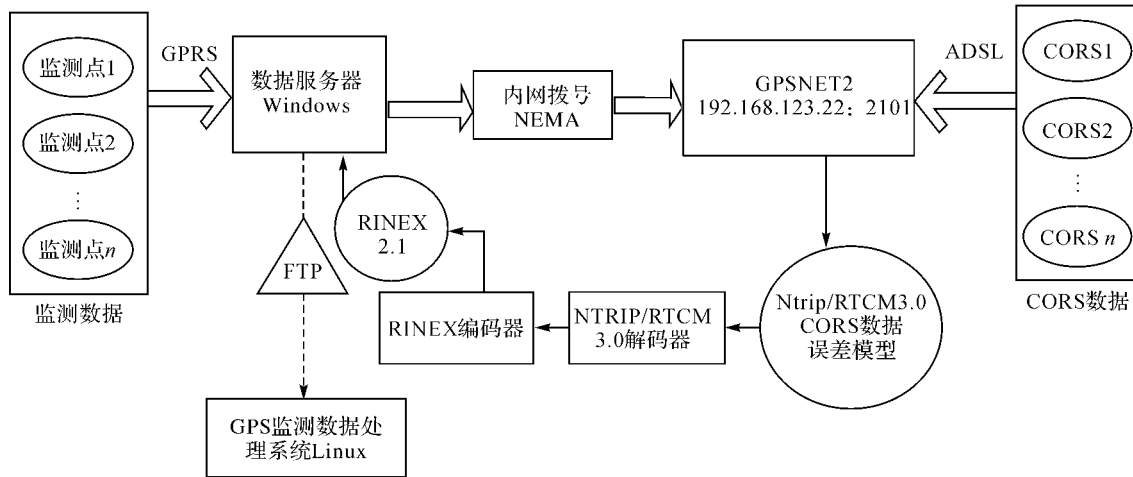


图1 滑坡灾害监测数据流程图

### 四、系统应用测试分析

#### 1. 模拟试验

为检验本方法的数学模型的正确性,笔者建设了位移形变模拟试验场,并基于 GDCORS 试验网络进行了位移形变模拟试验。在实验室楼顶建设位移模拟试验场,监测点位于基线监测墩(带强制对中器)并配备南方双频 GPS 接收机及 Choke Ring 天线(站编号 SOUT)将 GPS 天线安置在位移改正基座上,通过调整基座的测微鼓轮装置,天线中心可在互相垂直的水平导轨上精确位移,其精度为 ±0.01 mm。试验中设置采样频率 1 s,每 15 min 人为调整天线中心东西方向位移量,模拟监测点高精度位移形变。

由图 2 可以看出,监测结果很好地反映了各测段位移量发生的时刻及绝对位移量,监测值围绕真值保持 5 mm 以内的上下波动。采用移动平滑滤波除噪后(平滑窗口 60 历元)监测误差得到明显削弱,整个测段内监测结果误差呈现 5 mm 以内均匀的上下波动和明显无序的随机误差性质。这表明监测结果主要受多路径和观测噪声的影响,且证明在准实时监测中完全可达到水平方向 ±2.00 mm 以内的监测精度。

#### 2. 滑坡监测示范点

笔者选择距数据中心 100 km 外的肇庆市四会高级中学滑坡隐患点作 CORS 远程形变动态监测,该隐患点位于浈江(西江的一级支流)北岸河流阶地上。受河水位升降的浸泡和牵引作用,实验楼西南侧出现宽 2~10 cm,长约 23 m 的边坡拉裂缝,威

胁到了教学楼基础的安全,正被实施工程治理。结合治理工程施工,在隐患点不同部位布设 3 个监测点,对整个施工过程中滑坡隐患点的形变情况实施 CORS 远程动态监测,监测采样频率为 30 min,治理施工过程中各监测点位置和采集到的形变数据如图 3 所示。

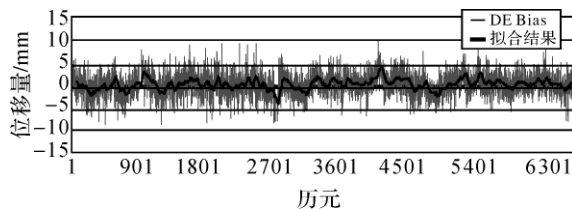
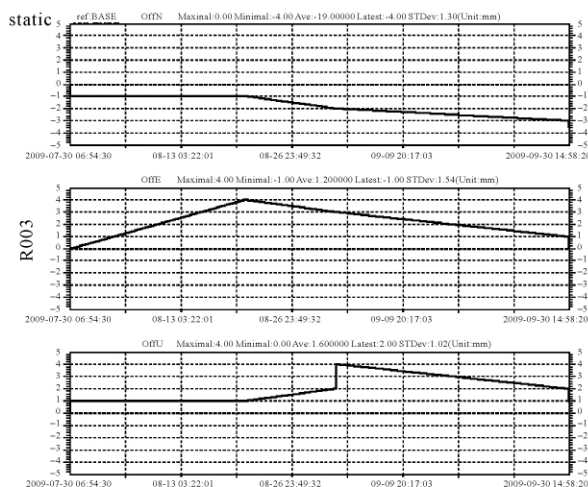


图2 监测残差图



(a) P<sub>1</sub>点地表位移形变曲线

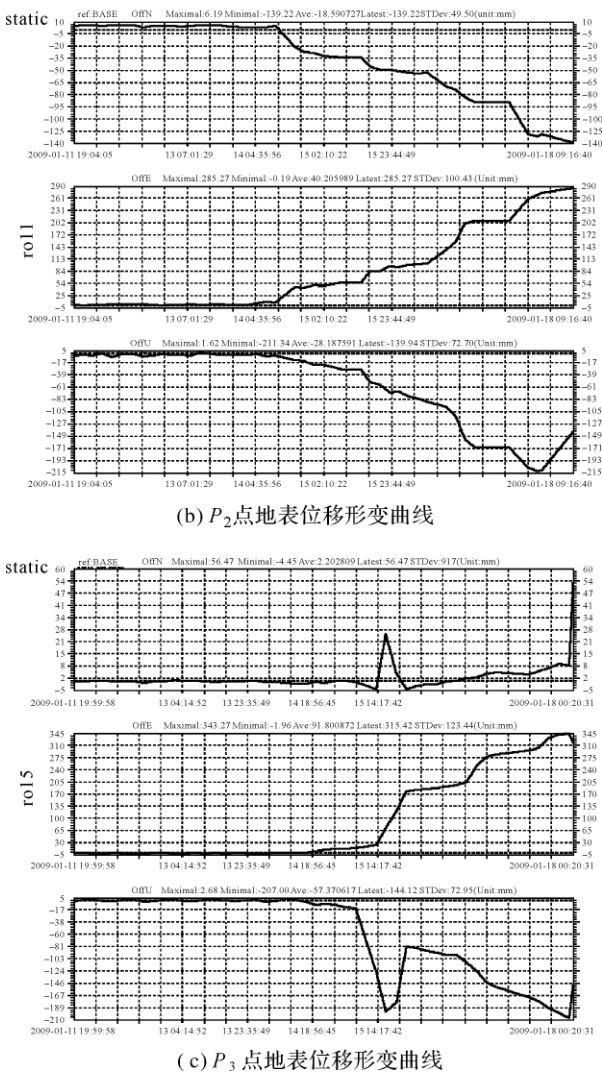


图3 各监测点地表形变曲线

按式(1)~式(4)算法对 $P_2$ 点数据进行形变量自动探测与提取,发现 $P_2$ 点在北、东、高3个方向发生了位移形变,在480个历元(即约10天左右时间)内分别向北、东、高3个方向移位了13.1 cm、21.6 cm和27.0 cm,属较大地质灾害险情。该隐患点目前通过治理工程施工,已清除过载滑坡体,有效排除了地质灾害隐患。

通过一系列高精度滑坡地表形变远程动态监测的科学试验和试点,证明了基于GDCORS技术及GPS一机多天线(GMS)低成本设备集成实现地质灾害高精度监测具有重要的理论基础和实际应用价值。针对广东省地质隐患点多面广、灾害受台风强降雨影响明显等特点,只需对全省各重要地质灾害隐患点埋设永久性监测桩,建立监测点基本属性数据库,并根据需要,结合气象预测,在强降雨来临前或台风登陆前对可能影响区域内的重要隐患点临时布设天线,安装调试设备,就可实施临灾运程

监测。这样既保证了监测设备的安全,又可实现一套设备多处隐患点循环使用,用少量的监测设备实现了全省范围内的灾害应急监测工作,进一步节省了监测成本。

### 五、结论

本文基于GDCORS的GPS定位技术,集成单频GPS接收机及GMS等低成本专业化GPS形变监测手段,基于新型的算法模型,开展高精度的滑坡形变远程动态监测研究。模拟试验表明,GDCORS系统应用在滑坡监测中具有以下技术特点和优势:

- 1) 监测精度高。可达到水平方向 $\pm 2.00$  mm以内的监测精度。
- 2) 成本低。单频设备的应用使监测设备成本投入大幅度降低。一套设备集成成本可控制在10万元以下,并可实现一套设备多处隐患点循环使用,具备数据通信方案简单、通信维持费用低等特点。
- 3) 系统可靠性高。采用CORS网络的动态基准计算代替传统的基准稳定性检核,使监测基准更为可靠,CORS算法的集成使监测成果可靠性更高。
- 4) 自动化程度高。全天候连续观测能力强,软硬件集成使监测数据采集、入库、数据预处理、形变探测等工作无需人工参与,实现了高度自动化,整个地质灾害监测业务流程更加简单快捷。

### 参考文献:

[1] RIZOS C, HAN S. Reference Station Network Based RTK Systems-Concepts & Progress [J]. Wuhan University Journal of Nature Sciences, 2003, 8(2B): 566-574.

[2] BENNET R A, WERNICKE B P, DAVIS J L. Continuous GPS Measurements of Contemporary Deformation across the Northern Basin and Range Province [J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(4): 563-566.

[3] 周乐韬, 黄丁发, 李成钢, 等. 一种参考站间双差模糊度快速解算策略 [J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(4): 34-40.

[4] 李成钢, 唐力明, 石晓春, 等. GPS/CORS地质灾害动态监测技术及其误差分析 [J]. 测绘通报, 2009(9): 7-10.

[5] HUANG Dingfa, DING Xiaoli, CHEN Yongqi. A New GPS System for Continuous Deformation Monitoring [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000(2): 169-176.

[6] 唐力明, 李成钢, 张建国, 等. GPS/CORS精密区域地表位移动态监测技术研究 [J]. 测绘通报, 2010(5): 6-9.

(下转第15页)

2) 与接收器相关的误差。以圆柱型接收器为例,其表面并不是光滑连续的,而是由多片平面型光电接收器组合而成。所以需要标定每台接收器的实际直径及平面型光电接收器偏离值,设其直径为1 cm,则该误差的标准不确定度为0.03 mm。

3) 环境误差。在室外使用时,阳光中的红外光会产生干扰,距离越长该误差越显著,所以系统一般用于室内。温度和气压会对光学系统产生影响,所以要尽量避免剧烈的温度梯度。温度和气压变化的影响可以通过四路观测减弱,并增加气象传感器以提高精度,但无法完全消除。

4) 建站误差。系统建立过程中的误差可参考经纬仪测量系统相关部分,其不确定度包括0.030 mm的固定误差和0.8"的比例误差。

通过上述误差分析可以看出,旋转误差是主要的误差源,根据平均测量的经验,如果取100次观测数据,则旋转误差提升至0.51"。目前,iGPS的标称扩展不确定度公式为

$$U_{95} = 2 \sqrt{40^2 + 14L^2}$$

式中,不确定度单位为 $\mu\text{m}$ ;  $L$ 为测量距离,单位为m。设测量范围为30 m,并且考虑4台发射器建站的情况,则由固定误差及角度误差合成的标准不确定度为0.12 mm( $1\sigma$ )和0.25 mm( $2\sigma$ )。

除了上述几个影响测量误差的因素外,iGPS的测量精度还和下面两个因素密切相关:

1) 随着激光发射器台数的增加,交会图形条件增强,测量精度会进一步提高。试验数据表明,3台发射器相对于2台发射器其测量精度可提高50%,4台发射器相对于3台发射器其测量精度可提高30%,5台发射器相对于4台发射器其测量精度可提高10%~15%。

2) 标准基准尺的测量精度。

## 六、结束语

iGPS既可建立固定的测量空间,也可以作为便携式精密工业测量系统,与其他测量手段相比,iGPS在大尺寸工业测量中具有以下优势:

1) 测量精度较高。在10 m范围内,采用4台发射器,点位测量精度可以达到 $\pm 0.1$  mm。

2) 支持多任务同时测量。和GPS相似,在测量区域内,iGPS支持多个测量传感器可以同时工作,可以同时完成多个测量任务,并且传感器的个数几乎不受限制。

3) 测量范围可以扩充。iGPS系统随着发射器台数的增加,测量范围可以呈线性增加,只要空间交会的图形条件足够强,点位测量的精度几乎不受测量范围的影响。

4) 适用于高精度动态测量。iGPS接收器的采样频率达到20~50 Hz,可以满足中低速度的动态测量要求,并且该模式下的单点测量精度没有明显降低。

正是由于上述各点,iGPS系统在航空制造与检测、汽车设计与制造、船舶设计与制造、焊接与变形检测、动态跟踪测量、逆向工程等领域都有着广泛的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 李广云,李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社,2011.
- [2] 王晏民,洪立波,过静珺,等. 现代工程测量技术发展和应用[J]. 测绘通报,2007(4):1-5.
- [3] 黄桂平,李广云. 电子经纬仪工业测量系统定向及坐标解算算法研究[J]. 测绘学报,2003,32(3):256-260.

(上接第8页)

- [7] 李成钢,黄丁发,袁林果,等. GPS参考站网络的电离层延迟建模技术[J]. 西南交通大学学报,2005,40(5):610-615.
- [8] 李成钢,黄丁发,周乐韬,等. GPS/VRS参考站网络的电离层误差建模技术研究[J]. 测绘科学,2007,32(4):29-31.
- [9] 黄丁发,李成钢,吴耀强,等. GPS/VRS实时网络改正

数生成算法研究[J]. 测绘学报,2007,36(3):256-261,339.

- [10] LI Chenggang, SHI Xiaochun, TANG Liming, et al. Real-time Geological Disaster Monitoring with Deformation Parameters Auto-detection Technique[C]//Monitoring and Assessment of Ground Subsidence and Earthquakes. Chengdu, China: SPIE, 2009.