

# 基于 GPS 技术的滑坡动态变形 监测试验结果与分析

王 利<sup>1</sup> 张 勤<sup>1</sup> 管建安<sup>2</sup> 孔令杰<sup>3</sup>

(1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安市雁塔路 126 号, 710054)

(2 铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津市岷江路 10 号, 300251)

(3 兰州理工大学土木工程学院, 兰州市兰工坪路 287 号, 730050)

**摘 要:**结合某类滑坡的大型物理模型试验,在滑坡体上布设了若干监测点,并用 GPS 单历元定位技术和 RTK 技术对该滑坡体进行了连续实时监测。通过对该滑坡从开始滑动至产生破坏全过程监测数据的处理与分析,以及将 GPS 监测结果与全站仪三维监测结果的对比,发现在观测条件较好和基线较短时,基于 Track 模块 GPS 单历元定位技术监测滑坡变形的平面精度在 5 mm 左右,高程精度约为 9 mm;RTK 定位技术的平面精度在 11 mm 左右,高程精度约为 17 mm;而用小波变换等方法进行滤波后的精度还会更高。

**关键词:**GPS; 滑坡; 动态; 变形监测; 单历元; RTK

**中图法分类号:**P228.42; P258

自 20 世纪 90 年代以来, GPS 技术在滑坡、崩塌、泥石流、地面沉降和地裂缝等各种地质灾害和重大工程建筑物的变形监测中得到了广泛应用<sup>[1-8]</sup>,取得了较好的效果。我国第一个全自动 GPS 监测系统——湖北清江隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统<sup>[6]</sup>,显示了 GPS 技术用于变形监测的巨大优势。但是,为了保证观测精度,目前 GPS 用于变形监测的一些成功应用主要采用静态相对定位方法。而静态定位一般需要几十分钟甚至更长时间才能获得一次形变信息,在灾害体变形速度较快时就满足不了真正实时或准实时监测的要求。因此,如何根据 GPS 观测数据快速、准确、实时地获取高精度的形变信息,是整个 GPS 监测系统是否成功的关键,也是目前研究的热点。对于这一问题的研究,国内外学者们已取得了一些成果,研究较多的是 GPS 单历元动态定位技术和方法<sup>[9-21]</sup>。

由于 GPS 单历元定位技术能实时、快速地获取高精度的变形值,能够对灾害体的变形及发展情况及时准确地作出判断,因而更加适用于滑坡、崩塌、泥石流等突发性地质灾害的变形监测和预报。

## 1 滑坡动态变形监测试验方案

本次滑坡的大型物理模型试验场设在长安大学渭水校区,主要研究黄土型滑坡在自然状态下发生变形的的基本参数。本试验中滑坡物理模型的尺寸为:滑坡体底部长度为 22 m,宽 20 m;顶部长度为 10 m,宽度为 10 m,前后缘高差 5 m,用黄土填筑,滑面采用人工预制,主滑方向为正北。滑坡物理模型的剖面及平面布置图如图 1、图 2 所示。

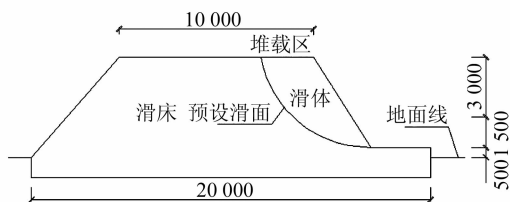


图 1 滑坡物理模型布置剖面图

Fig. 1 Section Plane Map of the Landslide's Physics Model

本次滑坡变形监测试验共布设监测点 5 个 (WJ01, WJ02, WJ03, WJ04, WJ05),全部位于堆

载区上方,其上分别安置了 4 台 GPS 接收机和 1 台全站仪的目标棱镜。其中,XJ05 是全站仪目标棱镜所在监测点,XJ02 是 RTK GPS 接收机所在监测点,XJ01、XJ03 和 XJ04 监测点上也分别放置了 GPS 接收机天线作连续观测。滑坡监测基准点则布设在距离滑坡体约 30 m 以外的稳定区域。本次试验共设置了 3 个基准点(WA01,WA02,WA03),其上分别架设 GPS 接收机(为动态变形监测提供基准)、RTK 基准站 GPS 接收机和全站仪。监测点和基准点的分布如图 3 所示。

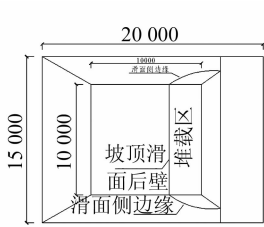


图 2 滑坡物理模型布置平面图  
Fig. 2 Ground Plan of the Landslide's Physics Model

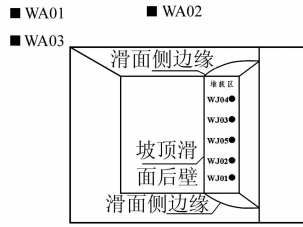


图 3 滑坡监测的基准点和监测点分布图  
Fig. 3 Distribution Map of Datum Points and Monitoring Points

本次监测试验从早晨 9 点开始,一直持续到下午 4 点滑坡产生完全破坏不再变形为止。监测时,基准点、监测点上的 GPS 接收机和 RTK GPS 接收机的数据采样率均为 1 s,完全能够捕获滑坡快速变形的三维位移信息。全站仪则采用人工操作,数据采样率不太均匀,约为 30 s。

## 2 试验结果及分析

从试验开始后的 2 h 内,滑坡体基本处于稳定状态,而后逐渐开始下滑,但滑动速度较慢,且呈整体下滑状态。从下午 1 点开始,对滑坡体的坡脚进行卸载之后,整个滑坡体开始产生明显的变形和裂缝,并逐渐开始滑动。最先滑塌的部分是监测点 WJ01 和 WJ02(其上安放 RTK GPS 接收机)所在位置,垮塌方向为北东向。以下就以监测点 WJ02 的在滑坡开始产生快速变形后的监测结果为例进行计算和分析。

用 Track 模块对 WJ02 点进行单历元定位解算的结果和 WJ02 点(WJ02 点,共 5 801 个历元,单位:mm)上的 RTK 定位结果如图 4 所示,这两种方法的内符合精度统计结果分别见表 1 和表 2。

从图 4 中可以看出,GPS 单历元定位技术和 RTK 技术均可以较好地获取该滑坡体上 WJ02

表 1 GPS 单历元监测结果的内符合精度

Tab. 1 Precision of Monitoring Results by GPS Single Epoch Positioning

方向	最小值	最大值	中值	平均值
平面	4.74	5.75	4.88	5.08
高程	7.6	11.0	8.5	8.91

表 2 RTK 监测结果的内符合精度

Tab. 2 Precision of Monitoring Results by RTK

方向	最小值	最大值	中值	平均值
平面	9.0	14.0	11.0	11.33
高程	15.0	25.0	16.0	17.09

监测点从滑坡开始滑动直至破坏的三维位移信息;在试验过程中,该滑坡体的垂直位移非常明显,到滑坡破坏时,累计垂直变形量已达 260 mm 左右,但其平面位移相对较小,仅有 10~30 mm,其中东方向最大变形量达到 20 mm 左右,北方向最大变形量达到 10 mm 左右;由于该滑坡体滑塌时倾向于偏东方向,故其东方向的位移量略大于北方向。同时,由表 1 和表 2 中的数据也可看出,由于本次试验的基准站与监测站之间的基线较短,用 Track 模块得到的单历元定位结果的内符合精度远高于 RTK 定位结果的内符合精度,其平面精度在 5 mm 左右,高程精度在 9 mm 左右;而 RTK 监测结果的精度与该类仪器的标称精度基本一致,平面方向的精度在 11 mm 左右,高程方向的精度在 17 mm 左右。

由于 GPS 单历元定位技术和 RTK 技术的采样频率一致,为了衡量这两种技术定位结果的差异,将 WJ02 点上对应历元的 RTK 与 GPS 单历元定位结果的差值绘制成曲线图(图 5(a)),并将差值的统计结果列于表 3。小波滤波前,共计 5 801 个历元,单位为 mm。

表 3 WJ02 点上 RTK 与单历元监测结果之差

Tab. 3 Statistic Data of the Differences on Monitoring Results of Point WJ02 Between RTK and GPS

方向	最小值	最大值	中值	平均值
N	-10.3	7.6	0	-0.1
E	-10.3	8.8	0.8	0.6
U	-45.4	7.1	-15	-15.56

从图 5(a)和表 3 中可以看出,WJ02 点上 RTK 与 GPS 单历元定位结果的差值在平面方向上的平均值在 1 mm 左右,最大值在 15 mm 左右,而在高程方向上的平均值在 15 mm 左右,最大值可达 45 mm 左右。两种定位技术监测结果在平面方向上吻合较好,其差异在 1 mm 左右,而在高程方向上则有 15 mm 左右的系统性差异,这可能与两种定位技术采用的定位算法有关,其原

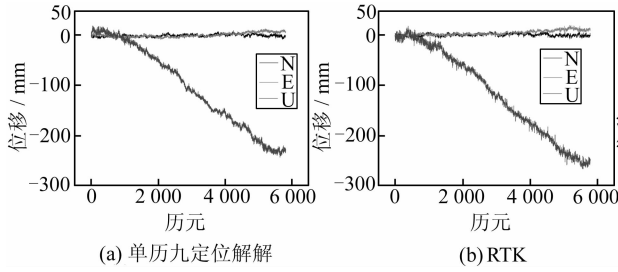


图4 GPS单历元定位技术和RTK技术监测某滑坡三维变形的试验结果(WJ02监测点)  
Fig. 4 Results on Point WJ02 of Deformation Monitoring in Three Directions on One Landslide by GPS Single Epoch Positioning and RTK

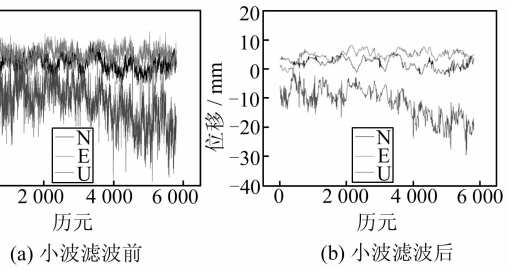


图5 WJ02监测点上RTK与GPS单历元定位结果的差值  
Fig. 5 Differences of Monitoring Results on Point WJ02

因还有待深入分析。

为了消除监测结果中高频噪声的影响,还对WJ02点上RTK与GPS单历元定位结果进行了滤波处理。由于小波变换比传统滤波方法具有更好的去噪性能,因此本文采用了db10小波(小波分解层次 $N$ 也为10)对监测结果进行滤波处理。滤波后对应历元的RTK与GPS单历元定位结果差值的曲线图和统计结果分别见图5(b)和表4。

表4 WJ02点上RTK与单历元监测结果之差

Tab. 4 Statistic Data of the Differences on Monitoring Results of Point WJ02 Between RTK and GPS

方向	最小值	最大值	中值	平均值
N	-2.8	5.7	2.0	1.9
E	-1.3	8.0	4.8	4.6
U	-29.7	0.3	-10.5	-11.5

从表4中可以看出,经滤波处理后,WJ02点上RTK与GPS单历元定位结果的差值在平面方向上的平均值在5 mm左右,最大值在10 mm左右,而在高程方向上差值的平均值在11 mm左右,最大值在30 mm左右。尽管在高程方向上仍然存在系统差异,但整体精度比滤波前有较大幅度的提高,且高程方向上的精度提高幅度更加明显。

另外,为了检验WJ02点上GPS单历元定位技术和RTK技术测量结果的可靠性,还用全站仪三维测量技术连续跟踪监测了该滑坡上监测点WJ05的全部变形过程,其测量结果如图7所示。

从图4和图6中可以看出,由于全站仪测量的采样频率较低(约30 s),而且全站仪所监测的目标点(WJ05)与GPS监测点(WJ02)的位置相差2 m左右,故无法将其变形量与单历元定位结果或RTK监测结果进行准确的比较和统计分析。但从其变形趋势和量级来看,GPS单历元技术和RTK技术的监测结果与全站仪测量结果的变形趋势和变形量级非常一致,说明GPS单历元

定位技术和RTK技术的测量结果是可靠的。

同时,通过图7中所示的监测点WJ01上GPS单历元定位结果与图4、图6中WJ02、WJ05监测点上监测结果的对比可以看出,尽管图7与图4、图6所示的不是同一个监测点上的监测结果,但由于这几个监测点的距离很近,GPS单历元定位技术在WJ01点上的监测结果与全站仪测量结果(WJ05点)和RTK监测结果(WJ02点)的量级和变形趋势也具有相当好的一致性。特别是在垂直方向(U方向)上,由于该滑坡体是整体向下滑移直至破坏,其垂直位移幅度较大,故两者在垂直位移方向具有较好的一致性;而在水平方向上,由于滑坡开始变形时表面有多条裂缝产生,故不同位置上监测点在水平方向上的变形趋势和方向均有所不同。从图7中也可看出,在5800历元之后,由于WJ01点上的接收机天线随着滑坡体东北角的垮塌而倾倒,其变形量突然变大,已无法在图中完全显示。而在其他两个GPS监测点上(WJ03和WJ04),也有类似的结果和结论。

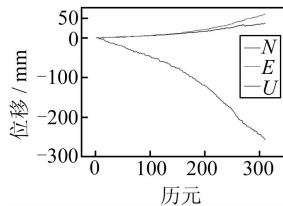


图6 全站仪监测的试验结果(WJ05监测点)  
Fig. 6 Results of Deformation Monitoring

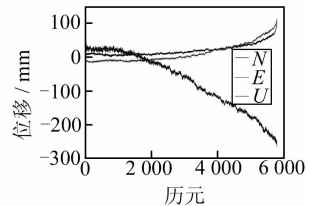


图7 GPS单历元定位技术监测试验结果(WJ01监测点)  
Fig. 7 Test Results of Deformation Monitoring

### 3 结 语

从本次试验结果及其分析可以看出,采用GPS单历元定位技术和GPS RTK技术监测滑坡快速变形时,在观测条件较好和基线较短时,基于

Track 模块的 GPS 单历元定位技术监测滑坡变形的平面精度在 5 mm 左右,高程精度约为 9 mm;RTK 定位技术的平面精度在 11 mm 左右,高程精度约为 17 mm;而用小波变换方法进行滤波后的精度还会更高。同时,试验结果还显示,同一观测历元的 GPS 单历元定位结果和 RTK 定位结果在平面方向上的差异平均值约为 5 mm,而高程方向上的差异平均值在 11 mm 左右,说明这两种技术的监测结果具有较好的一致性,完全可用于这类滑坡快速变形的动态监测。

由于本次试验的滑坡类型和试验条件所限,以上得出的仅仅是一些初步的结论,对于 GPS 单历元定位技术和 RTK 技术监测滑坡变形的范围、可靠性、观测条件等技术参数的确定,以及这两种技术在高程方向上存在的系统性差异等问题,还需进行更多的试验和研究。

致谢:感谢美国 MIT 授权使用 GAMIT/GLOBK 软件,感谢 MIT 的 King 等在数据处理方面给予的热情指导和帮助!

### 参 考 文 献

[1] 陆业海,吴定洪. GPS 空间测量新技术在岩崩滑坡中的应用[J]. 大坝观测与土工测试,1995,19(6): 33-36

[2] Lovse J W, Teskey W F, Lachapelle G, et al. Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structures Using GPS Technology[J]. Journal of Surveying Engineering, 1995,121(1):35-40

[3] Kondo H, Sugiyama A, Elizabeth Cannon M. Precise Carrier Phase GPS and Its Application to Real-Time Landslide Detection [J]. IEEE TENCON-Digital Signal Processing Application, 1996, 1(2): 906-911

[4] 过静琚,商瑞斌,葛胜杰,等. 利用 GPS 监测高大建筑物动态位移法研究[J]. 工程勘察,1997(3):48-51

[5] Ashkenazi V, Bingley R, Dodson A, et al. GPS Monitoring of Vertical Land Movements in the UK [C]. The 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the U. S. Institute of Navigation, Nashville, Tennessee, 1998

[6] 徐绍铨,李征航,柳太康,等. 隔河岩大坝外观变形 GPS 自动化监测系统的建立[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(增刊):1-4

[7] Saleh B, Al-Bayari O. Geodetic Monitoring of a Landslide Using Conventional Surveys and GPS Techniques[J]. Survey Review, 2007, 39(305): 252-260

[8] 张勤,黄观文,王利,等. GPS 在西安市地面沉降与地裂缝监测中的应用研究[J]. 工程地质学报,2007, 15(6):828-833

[9] Corbett S J, Cross P A. GPS Single Epoch Ambiguity Resolution [J]. Survey Review, 1995, 33(257): 149-160

[10] Teunissen P J G. The Least-squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: a Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. Journal of Geodesy, 1995, 70: 65-82

[11] 陈永奇, Lutes J. 单历元 GPS 变形监测数据处理方法的研究[J]. 武汉测绘科技大学学报,1998,23(4):324-328

[12] Chen Gang. GPS Kinematic Positioning for the Airborne Laser Altimetry at Long Valley, California [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1998

[13] Han Shaowei, Rizos C. Single-epoch Ambiguity Resolution for Real-time GPS Attitude Determination with the Aid of One-dimensional Optical Fiber Gyro[J]. GPS Solution, 1999,3(1): 5-12

[14] Bock Y, Nikolaidis R M, de Jonge P J, et al. Instantaneous Geodetic Positioning at Medium Distances with the Global Positioning System [J]. J Geophys Res, 2000, 105(B12): 28 223-28 253

[15] 熊永良,黄丁发,张献洲. 一种可靠的含约束条件的 GPS 变形监测单历元求解算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2001,26(1):51-57

[16] 余学祥,徐绍铨,吕伟才. GPS 变形监测信息的单历元解算方法研究[J]. 测绘学报,2002,31(2): 124-127

[17] 李征航,张小红,朱智勤. 利用 GPS 进行高精度变形监测的新模型[J]. 测绘学报,2002,31(3):206-210

[18] 邱卫宁,陈永奇. 用载波相位宽巷组合高精度确定大数值变形[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2004,29(10):889-892

[19] 刘根友,朱耀仲,周蓉生. GPS 单历元定位新算法用于滑坡监测[J]. 地震学报,2005,27(4):402-408

[20] 戴吾蛟,朱建军,丁晓利,等. GPS 建筑物振动变形监测中的单历元算法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2007,32(3):234-237

[22] Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual-GPS Analysis at MIT [C]. Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, 2009

[23] Geoweb. Mit [OL]. <http://geoweb.mit.edu/~simon/gt/gk/help/track.hlp.htm>,2010

## Experiment Results and Analysis of the Dynamic Deformation Monitoring of a Kind of Landslide Based on GPS Technology

WANG Li<sup>1</sup> ZHANG Qin<sup>1</sup> GUAN Jian'an<sup>2</sup> KONG Lingjie<sup>3</sup>

(1 College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, 126 Yanta Road, Xi'an 710054, China)

(2 The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, 10 Minjiang Road, Tianjin 300251, China)

(3 School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, 287 Langongping Road, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Some monitoring points were set on the landslide body and GPS single epoch positioning and RTK methods were used to monitor the landslide with real time combined the big physics model experiment of one kind of landslide. Through the processing and analysis on monitoring data of the landslide from start slipping to breaking down and the contrast of monitoring results of GPS and total station, it is detected that the precision on plane and height of GPS single epoch positioning based on Track is about 5 mm and 9 mm, the precision of RTK is about 11mm and 17mm when the observation conditions are favorable and the base-line is short, and the results after filtered by wavelet transformation or other methods are more higher. At the same time, the experiment data are also displayed that the mean differences of monitoring results obtained by GPS single epoch positioning and RTK on the same epoch are 5mm and 11mm respectively in the direction of plane and height. Those phenomena showed that the monitoring results of GPS single epoch positioning and RTK are accordant preferably, and they all can be used to monitor the dynamic and real time deformation of this kind landslide. The key parameters obtained by this experiment can provide important technique references for the study on deformation monitoring and forecast of this kind landslide.

**Key words:** GPS; landslide; dynamic; deformation monitoring; single epoch; RTK

---

**About the first author:** WANG Li, associate professor, Ph. D candidate, majors in the theory and application of GPS precise positioning and deformation monitoring.

E-mail: wangli@chd.edu.cn

---

(上接第 421 页)

## Phase-and-rate Feedback Loops for Weak GNSS Signals Tracking

JIN Li<sup>1</sup> CUI Xiaowei<sup>1</sup> LU Mingquan<sup>1</sup> FENG Zhenming<sup>1</sup>

(1 Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the transfer function of rate-only feedback loop and phase-and-rate feedback loop, the relationship between loop stability and the product of pre-correlation time and equivalent noise bandwidth will be analyzed. Then realizable phase-and-rate feedback loops for software and hardware receivers will be introduced. Finally, some tracking results of real signals will be given. Simulation results show that software receivers perform well with phase-and-rate feedback loops and longer pre-correlation time when carrier-to-noise ratio (CNR) of received signals is approach to 15 dB×Hz.

**Key words:** GNSS; rate-only feedback loop; phase-and-rate feedback loop; weak signal tracking; normalized noise bandwidth

---

**About the first author:** JIN Li, Ph. D candidate. His research focuses on baseband signal processing algorithms of new generation global navigation satellite system receivers.

E-mail: jinlifrester@gmail.com