

doi: 10.6046/gtzyyg.2014.02.13

引用格式: 林昊, 范景辉, 洪友堂, 等. 单频静态 GPS 在滑坡监测中的高程精度分析[J]. 国土资源遥感, 2014, 26(2): 74-79.
(Lin H, Fan J H, Hong Y T, et al. An analysis of height precision in applying single frequency static GPS to landslide monitoring[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(2): 74-79.)

单频静态 GPS 在滑坡监测中的高程精度分析

林昊¹, 范景辉², 洪友堂¹, 涂鹏飞³, 郭小方²

(1. 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 三峡大学土木与建筑学院, 宜昌 443002)

摘要: GPS 给测绘工作带来了极大的便利, 其平面测量精度已达到亚 mm 级。但由于受电离层、多路径效应、几何精度因子和天线高量取等因素影响, GPS 测得的高程数据很少被精密测量工作者采用。在三峡库区树坪滑坡合理布设形变监测网的基础上, 经长期监测得出大量水准和 GPS 实测数据; 以水准测量数据为基准, 分析单频静态 GPS 测量高程在滑坡垂向形变监测中的应用精度。结果表明, 单频静态 GPS 的垂向形变监测精度为 ± 2 cm; 依照滑坡监测规范, 形变监测精度应大于其测量周期内形变量的 1/5, 因而可以得出单频静态 GPS 适用于监测周期内垂向形变在 10 cm 以上的滑坡的结论。对于树坪滑坡, 第 2 期到第 3 期的垂向形变达到 30 cm, GPS 测量可以很好地提供监测数据, 但不适用于其他处于缓变状态监测周期的滑坡。

关键词: 三峡库区; 滑坡监测; GPS 测量; 高程; 精度分析

中图法分类号: TP 79; P 228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2014)02-0074-06

0 引言

长江三峡水利枢纽是举世瞩目的特大型工程, 坝顶高程为 185 m, 水库蓄水位最高 175 m, 干流库长 660 km, 总库容量约 393 亿 m^3 。库区内地质灾害频发, 截止到 2003 年 11 月, 整个库区的崩塌和滑坡体数目达 4 688 处^[1]。三峡大坝蓄水后, 湖北省秭归县境内平均水位比原来上升 100 m, 非汛期水位保持在 145 m, 汛期水位保持在 145 ~ 175 m, 水位落差最高达 30 m。库区水位及地下水水位的交替升降会对三峡库区两岸边坡的稳定性产生破坏和影响^[2]。

近年来, 对如何有效地进行滑坡形变监测和预报, 已经有较多的研究^[3-5]。精密水准仪测量是最常用、测量结果最可靠的方法, 但受到通视要求较高、单站测量距离短、测量高差小和人力消耗大等因素影响, 其测量效率极低; 全站仪三角高程测量^[6]和全站仪双向观测法^[7]可以提高单次测量视线距离和测量高差, 但受测量环境苛刻、精度较低等因素影响, 依然给高程测量带来不便。GPS 具有全天候、精度高、易操作、高效率等优点, 尤其是对大范围、地形复杂地区进行测量具有显著优势; 在很多测量领

域, GPS 已完全取代了传统测量方法, 成为一种可靠的点位测量手段^[8]。GPS 在滑坡监测中已有不少应用, 只要合理布设网图、选择合适的解算和改正模型, 就能得出较为可信的结果。尽管如此, 由于 GPS 测量高程易受天线高、卫星分布、基线起算点的坐标误差和多路径效应等因素的影响, 导致其测量高程存在较大的误差。在要求精度较高的形变监测中, GPS 测量的高程往往不被采纳。

本文在三峡库区树坪滑坡合理布设形变监测网, 经长期监测获得大量水准和 GPS 测量数据; 通过精确解算, 以水准测量数据为基准, 结合滑坡监测规范, 探讨单频静态 GPS 垂向形变测量的精度与适用性, 以期为 GPS 形变监测提供指导。

1 实验区概况

本文研究的树坪滑坡位于三峡库区湖北省秭归县沙镇溪镇树坪村(图 1), 长江南岸岸坡, 下距三峡工程大坝坝址约 47 km, 地理坐标在 E 110°37'00", N 30°59'37"; 属古崩滑堆积体, 三峡大坝建成蓄水后, 此滑坡呈加剧变形态势, 给长江航道带来不可估量的威胁。

收稿日期: 2013-04-16; 修订日期: 2013-05-30

基金项目: 国家国际科技合作专项(编号: 2010DFB23380)及中国地质调查局青年地质英才计划共同资助。

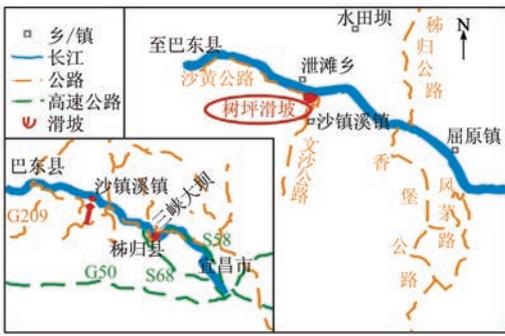


图 1 实验区地理位置简图

Fig. 1 Location of experimental area

树坪滑坡滑体 SN 向纵长约 800 m,EW 向宽约 700 m。中国国土资源航空物探遥感中心的研究人员根据该滑坡的地质特征,在滑坡体上布设了人工反射体,用于辅助差分干涉合成孔径雷达(differential interferometric synthetic aperture Radar, DInSAR)形变监测。人工反射体的主要作用是形成时序 SAR 图像上的高相干点,配合地面实测数据为 DInSAR 测量结果提供精度检验基准。所布设的人工反射体共有三角锥形和长方锥形 2 种类型,有关反射体制作和布设方法的详细介绍见文献[9-10]。

本文将利用建立在反射体上的水准和 GPS 监测点测量得到的 10 期 GPS 和水准数据^[11-12],综合分析 GPS 测量高程和水准测量高程,研究单频 GPS 接收机在滑坡监测中的应用和用 GPS 高程代替水准高程的可行性。

2 GPS 点位布设与测算

2.1 基准网方案设计

本次测量中滑坡监测区域的面积不到 1 km²,而且笔者又在滑坡体附近找到了一个稳定的三峡库区二级国家 GPS 基准点(SPJ1)(图 2),因此本文只在滑坡体周围的稳定基岩上布设了 2 个稳定点(W1 和 W2),这 3 个点分别相距 0.5~1.0 km,共同构成滑坡监测区的基准网^[13](图 2)。基准网由 3 条基

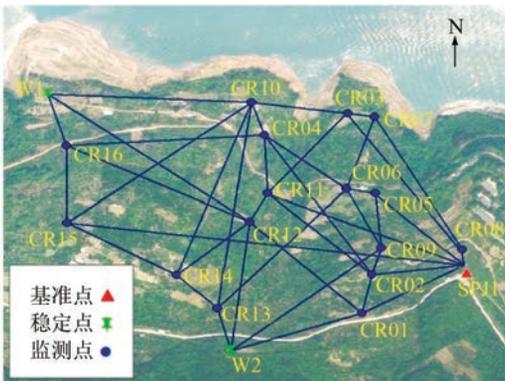


图 2 GPS 监测网示意图

Fig. 2 GPS monitoring network

线组成,每条基线观测 2 个时段,每个时段为 5 h。采用 3 台 Trimble - 4600LS 单频接收机进行采样,采样间隔 15 s,截止角 15°。

2.2 监测网方案设计

本文研究基于由 18 个反射体组成的 GPS 观测网(图 2)。在每一个反射体的角上,安装有 GPS 强制对中装置,用于 GPS 测量;在其水泥基座底部安装有水准测量点位,用于水准高程测量(图 3)。



图 3 三角锥形反射体及水准和 GPS 测量点位

Fig. 3 Pyramidal corner reflector and level and GPS measurement points

如果 GPS 高程测量准确,则在此反射体上的 GPS 测量高程形变结果可基本反映水准监测点的测量形变。根据滑坡现状和 SAR 卫星成像干涉规律的需求,在每月相同时间各进行 GPS 测量和水准测量 1 次,这为本文验证 GPS 高程精度提供了大量的基础数据。本文选取三峡大学 2009 年 4 月—2010 年 1 月在树坪滑坡测量的 10 期水准测量和 GPS 测量数据进行 GPS 高程精度的分析和研究。

2.3 基准网数据处理

基准网的稳定性在很大程度上会影响到监测点形变值的准确性。基准网解算时,固定 SPJ1 为起算点。为了提高解算精度,采用了 IGS 精密星历(提供卫星精确的轨道位置的精密星历);基线解算合格后,固定 SPJ1 点的 WGS - 84 坐标,进行三维无约束平差。由于滑坡监测的目的是监测形变点的变形量,因此不需要地方坐标系,只要将在各基准点得出的 WGS - 84 坐标以该区域的中央子午线为基准投影到平面坐标。经过 3 期共 3 个月的监测(表 1),基准点没有显著变形,2 个稳定点(W1 和 W2)可以作为基准点。

表 1 基准点稳定性检验

Tab. 1 Stability test of reference points (mm)

期次	W1 坐标差			W2 坐标差		
	ΔX	ΔY	ΔH	ΔX	ΔY	ΔH
2 期减 1 期	0.0	1.1	3.2	2.0	2.5	0.5
3 期减 2 期	3.0	2.0	0.1	4.0	1.5	0.8

2.4 监测点数据处理

GPS 形变点监测共使用 6 台 Ashtech - lousc 单频接收机、7 台 Trimble - 4600LS 单频接收机, 采样间隔 15 s, 截止角 15°; 共进行 2 个时段的同时观测, 每 1 个时段连续观测至少 2 h, 观测时尽量选择卫星平均分布于天顶 4 个象限的时段; 图形强度因子 $GDOP < 6$, 并且至少接收 6 颗以上卫星的数据。1 台接收机放置于基准点, 2 台放置于稳定点, 另外 9 台分 2 次轮流放置于监测点, 进行同步组网观测。

GPS 数据处理采用中海达 HDS - 2003 静态 GPS 处理软件进行 D 级控制网的解算。在基线解算过程中, 为保证基线解算精度, 要求每一条基线的 $Ratio > 90$, 同步环、异步环均达到要求。

在对各期观测数据进行静态平差处理时, 本文选定上述基准点作为共同的位置基准进行 GPS 网的空间三维无约束平差^[14-15], 以 GPS 测量解算中误差作为判断各点精度和可信度的指标。通过自由网平差得出水平面上的中误差最大为 1.5 mm。为了便于滑坡监测分析, 将 WGS - 84 坐标按相近的中央子午线投影到平面坐标进行后续分析。

在对 GPS 监测网的平差计算和变形分析时, 以基线向量的三维坐标差 ($\Delta x, \Delta y, \Delta z$) 作为观测值, 利用稳定基准点作为位置基准, 但没有考虑 GPS 网的尺度基准和方位基准, 认为在多期观测中它们是没有变化的。由于实际工作中选取数据的 GPS 监测网是每 1 个月 1 次分期监测的, 各次观测中电离层折射和卫星星历等误差的影响也会给监测结果带来系统性的误差^[16]。为了实现各期观测成果的基准统一, 利用监测网中的 1 个基准点和 2 个稳定点, 采用布尔莎 (Bursa) 七参数模型^[17]进行坐标转换。

设 GPS 监测网首期平差坐标为 X_i^0 , 第 k 期平差坐标为 X_i^k , 则布尔莎模型为

$$X_i^k = \Delta X + (1 + \mu)R(\varepsilon_z)R(\varepsilon_y)R(\varepsilon_x)X_i^k, \quad (1)$$

式中: $\Delta X = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$, 为第 k 期转换到首期的 3 个平移参数; μ 为尺度参数; $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 为 3 个旋转参数。并有

$$\left\{ \begin{aligned} R(\varepsilon_z) &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_z & \sin \varepsilon_z & 0 \\ -\sin \varepsilon_z & \cos \varepsilon_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ R(\varepsilon_y) &= \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_y & 0 & -\sin \varepsilon_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon_y & 0 & \cos \varepsilon_y \end{bmatrix} \\ R(\varepsilon_x) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varepsilon_x & \sin \varepsilon_x \\ 0 & -\sin \varepsilon_x & \cos \varepsilon_x \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

所以, 通常将 $\Delta x, \Delta y, \Delta z, \mu, \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ 称为坐标系间的 7 个转换参数^[12]。

由于采用了统一的位置基准, 则利用式 (1) 进行转换时, 3 个平移参数为已知, 此时的转换参数为 3 个旋转参数和 1 个尺度参数; 因而可利用已知稳定点, 通过各期成果对首期成果的转换参数的计算, 实现各期观测坐标的基准统一, 然后进行形变分析。

3 水准网布设与测算

由于水准点全部布设在反射体的基座上, 因此水准网的布设与 GPS 监测网 (图 2) 相同。为了减少滑坡短期形变对 GPS 高程测量和水准高程测量对比分析的影响, 在进行 GPS 静态观测的同时, 还进行了水准观测。笔者在测区附近找到了 1 个采用黄海高程面的一等水准基准点, 以此为起点进行了 18 个点的水准联测。为了保证用于参照基准的水准测量的高程精度, 使用测量中误差为 ± 0.7 mm 的瑞士 WINDN3 精密水准仪进行了二等水准测量。采用中丝读数法进行往返观测, 形成闭合环^[18]。视点位情况, 将若干点纳入 1 条闭合水准路线测量, 或分别进行单个点的水准测量, 形成闭合路线或水准网。测量结果用平差 (power adjust, PA) 软件进行解算和精度评定。

4 GPS 高程精度分析

对于滑坡监测, 本文更加关心相对于以往滑坡体的形变量。经过上述对测量数据的解算, 已经拥有 10 期水准和 GPS 的高程数据, 通过对比二者之间的关系分析 GPS 高程在形变监测中的可行性。

假定水准和 GPS 的第一次高程测量结果为初始基准, 以此分别求取 GPS 各期次观测中的累计高程形变量和二等水准测量的累计高程形变值, 并分析两者之间的差值。即

$$H_{n-1} = H_n - H_1, \quad (3)$$

$$h_{n-1} = h_n - h_1, \quad (4)$$

$$\Delta S_{n-1} = H_{n-1} - h_{n-1}。 \quad (5)$$

式 (3) — (5) 中: H_{n-1} 和 h_{n-1} 分别为水准测量和 GPS 测量第 n 期高程减去第 1 期高程的高程累计形变值; ΔS_{n-1} 为累计高程形变值差值。

上述测量和解算结果的对比情况见表 2。

表 2 水准累计高程形变与 GPS 累计高程形变的差值
Tab.2 Bias between vertical deformation from level and GPS (cm)

点号	ΔS_1	ΔS_2	ΔS_3	ΔS_4	ΔS_5	ΔS_6	ΔS_7	ΔS_8	ΔS_9
CH01	0.32	-0.52	-1.19	-0.84	-0.86	-0.21	-2.26	-0.90	-1.66
CH02	0.62	0.49	-0.43	-0.64	1.14	0.62	0.13	1.71	-0.83
CH03	-0.08	-0.21	-0.96	-0.98	-1.30	-0.66	-1.28	-0.10	-0.47
CH04	-0.56	0.02	-0.56	-1.03	0.21	-0.39	-1.11	0.85	-0.60
CH05	0.14	-2.02	-1.79	-1.78	-0.07	-0.06	-0.23	1.00	-1.62
CH06	0.81	1.26	0.28	1.04	0.27	-0.29	-0.61	1.57	0.40
CH07	-0.26	-0.46	-2.36	-1.45	-0.15	-0.37	-0.67	1.43	0.32
CH08	1.23	1.30	0.50	-0.45	0.04	-0.69	0.64	0.90	0.93
CH09	-0.28	0.63	0.74	-0.70	-0.02	-0.30	-0.25	0.78	-1.98
CH10	0.71	-0.52	-0.98	-0.18	-0.24	-0.36	-2.41	0.69	-1.28
CH11	-0.56	0.16	-0.52	-1.38	0.29	-0.06	-0.37	-0.08	-1.15
CH12	-0.19	0.53	0.29	-0.81	0.15	0.06	-0.58	2.94	1.24
CH13	0.00	-0.86	-0.76	-1.85	-1.27	-1.84	-0.80	-1.47	0.73
CH14	1.19	0.78	1.62	0.85	0.01	0.24	-0.04	1.18	-0.96
CH15	0.38	0.82	0.92	0.47	0.46	0.47	1.48	1.77	-0.69
CH16	0.29	1.19	0.64	0.09	0.19	0.47	1.24	2.00	0.47

根据数据统计得出, $|\Delta S_i| > 2.5$ cm 的数据有 1 个; $2.0 \text{ cm} \leq |\Delta S_i| < 2.5$ cm 的数据 5 个, 占总测量数据的 4%; 误差绝对值 $1.0 \text{ cm} \leq |\Delta S_i| < 2.0$ cm 的数据 40 个, 占总测量数据量的 28%; 误差绝对值 $|\Delta S_i| < 1$ cm 的数据 104 个, 占总测量数据的 72%, 其中 $|\Delta S_i| \leq 0.5$ cm 的数据 58 个, 占总测量数据的 40%。

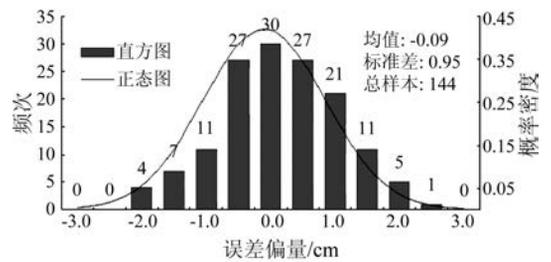


图 4 误差分布直方图和正态密度曲线
Fig.4 Error distribution histogram and normal density curve

5 问题与讨论

1) 适用性。在累计 10 个月的观测中, GPS 高程监测形变最大误差为 2.36 cm, 大部分测量点位高程误差在 1 cm 以内。其中 6 个形变值大于 2 cm 的测点, 经实地勘察后发现该处地面出现较大滑动, 其附近地面出现大量裂缝, 导致反射体不均匀沉降, 发生侧倾。由于水准点位和高程点位不在同一平面 (高差 2 m 左右), 则不均匀沉降为

$$\Delta h = 2(1 - \cos\theta), \quad (6)$$

式中 θ 为垂线与倾斜方向的度数。由此, 当 $\theta \geq 8^\circ$ 时, $\Delta h \geq 2$ cm, 导致 GPS 高程测量和水准测量存在较大误差。

为评估 GPS 高程误差的精度, 利用表 2 中数据, 使用 Excel 中的 NORMDIST 函数返回, 即根据样本的算术平均值、标准偏差、统计区间得到概率密度, 即

$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left[\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]}, \quad (7)$$

式中: μ 为算术平均值; σ 为标准偏差; x 为误差偏差。得到误差分布直方图和正态密度曲线 (图 4)。

由图 4 可以看出, GPS 用于滑坡监测的高程形变值误差近似正态分布, 均值为 -0.09 cm, 标准差为 0.95 cm, 由统计计算可得出 95% 的置信区间为 $[-1.97 \text{ cm}, 1.79 \text{ cm}]$ 。由此得出“单频 GPS 用于滑坡监测的高程形变值的精度在 2 cm 以内是可靠的”结论。

2) 局限性。滑坡监测规范^[19]指出, 滑坡监测精度应高于滑坡监测周期形变量的 1/5。据此, 本文测量方法得到的 GPS 高程数据仅适用于监测周期内垂直形变值在 10 cm 以上的滑坡。对于监测周期内垂直形变量在 2 ~ 10 cm 内的滑坡, 具有较强的参考意义; 对监测周期内垂直形变量小于 2 cm 的滑坡, 则无法应用。

3) 规范性。利用与本文相同的 GPS 和水准实测数据, 夏耶等^[20]在利用高分辨率雷达数据监测树坪滑坡形变时, 对 08 号和 09 号反射体的水准、GPS 和 InSAR 测量结果进行了对比分析。为了更为清晰地显示树坪滑坡的形变特征, 本文将文献[20]中 08 号和 09 号反射体的 GPS 和水准垂直形变量提取出来编辑成图 (图 5)。

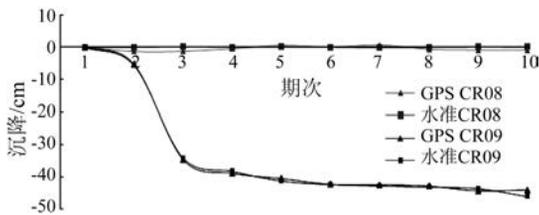


图5 08号和09号反射体10期水准和GPS垂直形变测量结果比较

Fig.5 Comparison between 10 times level and GPS vertical deformation measurement results about No. 8 and No. 9 reflector

由图5可见,在08和09号点处,树坪滑坡最大年沉降量在50 cm左右。利用本文测量方法得到的GPS高程数据研究树坪滑坡的年度垂直形变是符合规范要求的。

尤其值得注意的是,在图5所示的第2期和第3期之间的时段内,树坪滑坡呈现显著的非线性突变,量级达到近30 cm。在发生这样的滑坡突变时,本文使用的GPS测量方法能够有效提供监测数据。但在除从第2期到第3期之外的其他最短监测周期内,树坪滑坡的垂向形变远达不到10 cm,本文使用的GPS测量方法无法达到滑坡监测规范的要求。

4) 存在问题。本文研究工作中存在的2个主要问题是:①由于在测量中使用单频GPS接收机不能有效地去除电离层延迟影响,因而会对不同时间的测量结果造成影响;②虽然在每一个反射器上都进行了二等水准监测,但是由于水准和GPS监测点不在同一个位置,且两者相对位置不固定,所以不能有效利用已知的水准数据进行GPS高程拟合平差,得出更加精准的GPS高程结果。

6 结论

1) 直接将单频静态GPS测量高程用于滑坡形变监测具有其独特的适用性和局限性,应根据滑坡形变特征谨慎评估。

2) 在树坪滑坡上,单频静态GPS测量高程可用于年度形变监测;在形变量剧增的特定月度,也可使用单频静态GPS测量高程。

3) 建议在以后的连续监测中使用双频GPS接收机,尽量多地联测已知GPS国家基准点和监测点位处的水准高程,以进一步提高GPS在滑坡监测中垂向位移的精度。

参考文献(References):

[1] 廖明生,唐婧,王腾,等.高分辨率SAR数据在三峡库区滑坡监测中的应用[J].中国科学:地球科学,2012,42(2):217-229.

Liao M S, Tang J, Wang T, et al. Landslide monitoring with high-

resolution SAR data in the Three Gorges Region[J]. Scientia Sinica Terrae, 2012, 42(2): 217-229.

[2] 刘根友,薛怀平,郝晓光,等.三峡库区秭归GPS滑坡监测网数据分析[J].大地测量与地球动力学,2009,29(3):70-73.

Liu G Y, Xue H P, Hao X G, et al. Data analysis of GPS slide monitoring network in Zigui Zone of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(3): 70-73.

[3] 薛志宏,卫建东,金新平. GPS在雅砻江卡拉电站滑坡监测中的应用[J].测绘工程,2007,16(2):65-68.

Xue Z H, Wei J D, Jin X P. The landslide monitoring using GPS in Kala reservoir area[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, 16(2): 65-68.

[4] 熊先才,岳仁宾,彭军怀,等. GPS技术在万州明镜滩滑坡监测中的应用[J].测绘科学,2008,33(3):145,149-150.

Xiong X C, Yue R B, Peng J H, et al. Application of GPS technique in Wanzhou Mingjingtan slope deformation monitoring[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(3): 145, 149-150.

[5] 陈红卫,杨红生. GPS技术在滑坡监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2012,35(1):145-147,153.

Chen W H, Yang H S. The application of GPS in the landslide monitoring[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2012, 35(1): 145-147, 153.

[6] 贾中甫,杨郁,冯启俊.精密三角高程代替二等水准测量的研究与实践[J].测绘信息与工程,2012,37(1):15-17.

Jia Z F, Yang Y, Feng Q J. Research and practice on precise trigonometric leveling to replace second-class leveling survey in Erdos City[J]. Journal of Geomatics, 2012, 37(1): 15-17.

[7] 孙玉玲,王辉,李德钢.利用全站仪双向观测法进行高程测量[J].电大理工,2006(1):12-13.

Sun Y L, Wang H, Li D G. Using the total station bidirectional observation method for height measurement[J]. Study of Science and Engineering at RTVU, 2006(1): 12-13.

[8] Liu G Y, Liu L T, Chai Y J. Reference frame for GPS deformation analysis[C]//GPS/GNSS2005, December 8-10. HongKong: A9, 2005: 1-12.

[9] Fan J, Zhao H, Tu P, et al. CRInSAR for landslide deformation monitoring: A case in Three Gorge Area [C]//Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Honolulu, HI: IEEE, 2010: 3956-3959.

[10] Fan J H, Tu P, Guo X F, et al. Monitoring the deformation of a landslide with differential SAR interferometry using corner reflectors[C]//The 6th International Symposium on Digital Earth. International Society for Optics and Photonics, 2009: 78411I-78411I-7.

[11] 范景辉,李梅,郭小方,等.基于PSInSAR方法和ASAR数据监测天津地面沉降的试验研究[J].国土资源遥感,2007,19(4):23-27.

Fan J H, Li M, Guo X F, et al. A preliminary study of the subsidence in Tianjin area using ASAR images based on PSInSAR technique[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2007, 19(4): 23-27.

[12] 范景辉,郭华东,郭小方,等.基于相干目标的干涉图叠加方法监测天津地区地面沉降[J].遥感学报,2008,12(1):111-118.

Fan J H, Guo H D, Guo X F, et al. Monitoring subsidence in Tianjin Area using interferogram stacking based on Coherent Targets [J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(1): 111-118.

[13] 薛怀平,刘根友,郝晓光,等.三峡库区秭归GPS-CR滑坡监

- 测网的建立[C]//第三届湖北科技论坛优秀论文集. 武汉:湖北省科学技术协会,2005.
- Xue H P, Liu G Y, Hao X G, et al. The establishment of GPS - CR landslide monitoring network in Zigui Zone of Three Gorges Reservoir Area [C]//3rd Excellent Symposium on Hubei Science and Technology Forum. Wuhan: Hubei Association for Science and Technology, 2005.
- [14] 黄声享,尹晖,蒋征. 变形监测数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2010:103 - 106.
- Huang S X, Yin H, Jiang Z. Deformation monitoring data processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2010:103 - 106.
- [15] 李征航,黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005:128 - 132.
- Li Z H, Huang J S. GPS measurement and data processing [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2005:128 - 132.
- [16] 何秀凤,桑文刚,贾东振. 基于GPS的高边坡形变监测方法[J]. 水利学报,2006,37(6):746 - 750.
- He X F, Sang W G, Jia D Z. Deformation monitoring of steep rock slopes by means of GPS [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(6):746 - 750.
- [17] 陈义. 区域形变监测中的位移估计的方法[J]. 同济大学学报,2003,31(1):64 - 68.
- Chen Y. Method of displacement estimation in regional deformation monitoring [J]. Journal of Tongji University, 2003,31(1):64 - 68.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局,中国国家标准化管理委员会. GB/T12897—2006 国家一、二等水准测量规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China(AQSIQ), Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T12897—2006 Specifications for the first and second order leveling [S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫局,中国国家标准化管理委员会. DZ/T 0221—2006 崩塌、滑坡、泥石流监测规范[S]. 北京:中国标准出版社,2006.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China(AQSIQ), Standardization Administration of the People's Republic of China. DZ/T 0221—2006 Monitoring code of rockfall, landslide and debris flow [S]. Beijing: China Standards Press, 2006.
- [20] 夏耶,范景辉,李曼,等. 高分辨率雷达数据三峡库区滑坡监测技术[C]//第十八届中国遥感大会论文集,2012:161 - 169.
- Xa Y, Fan J H, Li M, et al. Monitoring technique of Shuping landslide with high - resolution Radar images in Three Gorges Reservoir area, in China [C]//18th China symposium on Remote Sensing, 2012:161 - 169.

An analysis of height precision in applying single frequency static GPS to landslide monitoring

LIN Hao¹, FAN Jinghui², HONG Youtang¹, TU Pengfei³, GUO Xiaofang²

(1. School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. China Aero Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: As we all know, GPS has brought great convenience to surveying and mapping work. Its horizontal accuracy has reached sub - millimeter. However, due to the influences of such factors as the effects of ionosphere, multipath effect, GDOP (geometric dilution of precision) and height of antenna, the vertical deformation measurements from GPS are seldomly used by precision survey workers. Based on the reasonable layout of deformation monitoring network of Shuping landslide in the Three Gorges Reservoir Area, the authors obtained a large number of leveling and GPS data from long - term monitoring, and used leveling data as the reference to analyze the height precision of single - frequency static GPS in landslide vertical deformation monitoring. The results show that the vertical deformation monitoring precision of single - frequency static GPS is ± 2 cm, that the deformation monitoring accuracy should be greater than 1/5 of deformation in the measurement period according to the monitoring code of landslide, and that single frequency static GPS is suitable for the landslide whose vertical deformation is above 10 cm in its monitoring period. For the Shuping landslide, GPS measurement can provide good monitoring data in the second to third period whose vertical deformation is up to 30 cm, but it is unsuitable for other monitoring periods in slow state.

Key words: Three Gorges Reservoir Area; landslide monitoring; GPS survey; height; precision analysis

第一作者简介: 林昊(1988 -),男,中国地质大学(北京)测绘工程专业在读硕士研究生,主要研究方向为3S集成与理论。Email: linhao_0406@126.com。

通信作者: 范景辉(1978 -),男,博士。Email: jhfan2004@gmail.com。

(责任编辑: 李瑜)