

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.06.016

GPS/BDS 精密单点定位技术在滑坡 变形监测中的应用研究

彭凤友, 聂桂根, 薛长虎, 武曙光, 李海洋, 汪晶, 刘文轩

(武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079)

摘要: 分别探讨了 GPS 精密单点定位技术、GPS/BDS 精密单点定位技术及 BDS 精密单点定位技术在地形较为陡峭、有部分卫星被遮挡的滑坡体特殊环境中的应用能力。选用四川西山村 8 个监测站, 总时长跨度 16 个月的观测数据进行试验及分析, 结果表明: 西山村滑坡体整体正以平均 9.2mm/月的速度向南滑动, 并伴随着垂向上的整体下沉。精度区间统计结果显示, 平均 5.93h 时长的 GPS 精密单点定位的解算精度基本能达到较高水平且相对稳定, 可以有效监测变形较缓慢的滑坡体。GPS/BDS 的解算结果的精度接近于单 GPS 的水平, 但由于 BDS 的数据可利用率整体上不稳定, 拉低了 GPS/BDS 的解算结果的整体精度, 表明了当前的单 BDS 精密单点定位的精度受地形等外界环境变化的影响更大。利用观测时长及数据的可利用率指标加权处理解算结果, 降低了观测质量不高的结果对整体结果的贡献比, 提高了定位结果的精度和容错率。

关键词: GPS/BDS; 精密单点定位(PPP); 滑坡监测; 可利用率

中图分类号: P228.4 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2019)06-0103-10



Application of GPS/BDS Precise Point Positioning Technology in Landslide Deformation Monitoring

PENG Feng-you, NIE Gui-gen, XUE Chang-hu, WU Shu-guang, LI Hai-yang, WANG Jing, LIU Wen-xuan

(GNSS Research Center of Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In this paper, the application ability of GPS PPP, GPS/BDS PPP and BDS PPP technology in the special environment of steep terrain with part of satellites blocked is discussed. Eight monitoring stations in Xishan village, Sichuan province are selected for the experiment and analysis with the observation data of a total span of 16 months, the results show that the overall slope of Xishan village is sliding southwards at an average speed of 9.2mm/month, accompanied by an overall vertical subsidence. The results of precision interval statistics show that the precision of GPS precise point positioning with an average length of 5.93 hours can basically reach a high level and be relatively stable, and it can effectively monitor the slope body with slow deformation. Although the results of GPS/BDS are close to the level of single GPS, with the instability of the data availability of overall BDS precise point positioning, the overall accuracy of GPS/BDS solution

收稿日期: 2018-12-18; 修订日期: 2019-03-28

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2013CB733205); 国家自然科学基金(41074023)

作者简介: 彭凤友(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事高精度 GNSS 数据处理及应用方面的研究。

E-mail: pengfengyou@whu.edu.cn

通信作者: 聂桂根(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事卫星大地测量方面的研究。E-mail: ggnie@whu.edu.cn

is reduced, which indicates that the accuracy of BDS precise point positioning can be more affected by the change of external environment such as terrain. Using observation duration and data availability index to weight process results of calculation, the contribution ratio of low observation quality results to the overall results is reduced, and the accuracy and fault tolerance rate of positioning results are improved.

Key words: GPS/BDS; Precision Point Positioning (PPP); Landslide monitoring; Availability

0 引言

2008年的汶川5.12大地震,直接造成7万余人死亡^[1],累计造成经济损失8000多亿元人民币。汶川地震结束以后,该区域频繁发生一系列次生灾害,2017年8月九寨沟发生了7.0级地震;大致在同一时期,西山村西部的一处坡体—黄泥坝子,在经历了绵绵雨季之后发生了滑坡,造成山腰中居住的一户人家房屋全部受损,所幸的是滑坡发生在白天,并没有造成人员伤亡,图1所示为现场拍摄的照片。因此,寻找一种易于操作且有效的监测手段,对这些潜在或是正在滑动的滑坡体进行监测,避免其大面积滑坡时造成严重的损失就显得尤为重要。全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)利用接收上空的卫星信号实现定位,静态测量精度能达到厘米级甚至毫米级,在复杂山区具有独特的优势。



图1 西山村黄泥坝子坡体灾害图及受损房屋
Fig.1 Disaster map and damaged house on the Huangnibazi slope of Xishan village

GNSS技术的出现几乎革新了传统的监测技术,在单全球定位系统(Global Positioning System, GPS)时代,已经有很多GPS技术在滑坡监测中的应用案例,尤其是在相对定位模式下。过静珺等以基于基准站的静态相对定位模式,在四川雅安峡口

滑坡示范区进行了测量试验,监测结果表明,GPS滑坡监测的精度达到毫米级^[2]。徐爱功等使用PANDA软件的精密单点定位模块,分析了中国境内的10个国际GNSS服务(International GNSS Service, IGS)站连续7d的单天解,研究结果表明:无论是利用IGS精密产品还是快速产品,均实现了1cm精度的精密单点定位^[3]。

北斗导航系统(BeiDou Navigation System, BDS)自2012年向亚太区域提供定位服务以来,学者们逐步展开北斗定位系统的研究。韩静通过BDS实测数据进行相对定位解算,结果表明:在短基线条件下,BDS相对定位精度达到厘米级;并得出了GPS/BDS定位精度在水平和垂直方向上均优于单系统,单BDS和单GPS的定位精度基本一致,BDS相对定位技术在短基线条件下可独立应用于滑坡监测中的结论^[4]。王阅兵等探讨了BDS精密单点定位技术在地壳运动监测中的能力,运用7个台站,跨度在2年以上的GPS/BDS双模连续观测数据,研究结果表明:BDS在水平向的定位精度约为1.7cm,垂向约为4cm,GPS分别为优于1cm和约1.4cm,BDS精密单点定位精度要低于GPS,但仍然可以应用于监测变形量较大的地区地壳运动^[5]。

以上学者的研究表明,基于基准站的GPS静态相对定位技术已经达到了较高的精度并成功应用于滑坡监测中。同时BDS基于基准站的模式也能独立应用于滑坡监测中。而在静态精密单点定位方面,无论是GPS、BDS还是GPS/BDS,很多学者研究较多的都是各个系统相互间的、时间跨度比较长且连续的模式,而较少探讨基于周期性监测的较短观测时长的模式。本文的研究区域处于地震断裂带,由于现实的地质条件、交通、电力和通信的原因而不宜布设基准站,故采用精密单点定位技术进行监测,以相对较短的观测时长、具体的观测期数和具体的地形区域来探讨GPS和BDS精密单点定位技术的应用情况,希望能为以后类似的应用场景研究提供相关参考和依据。

1 试验区概况及数据采集

本次监测的滑坡区域位于四川理县西山村,属亚热带季风气候,它位于杂谷脑河左岸,属于中高山峡谷地形的深层堆积体滑坡^[6]。滑坡坡度总体为 25°~45°,前部和后部地势较缓,中部坡度较大,纵向呈缓-陡-缓的不均匀坡度地形^[7],该滑坡位于地震活动性很强的龙门山断裂带^[8]。区内地层发育比较完整,河谷下切,构造运动非常活跃,造成地层发生强烈褶皱和断裂,使岩石易破碎,完整性差^[9]。该滑坡体离 5.12 汶川地震震中仅 65km,滑坡大体朝南北向延伸,滑动方位角为 201°;该滑坡为一个大型滑坡,南北向跨度约 3800m,东西向跨度约 680~980m,坡体平均厚度为 55m;大多数地方地形陡峭,地质条件恶劣,地质运动剧烈^[10],滑坡体前缘为杂谷脑河,南邻汶马高速和 317 国道。变形体上下面都有居民点,属于滑坡易发区。境内的雨水充沛,集中在 5~9 月,滑坡体在雨水的冲蚀下,造成滑坡变形趋势进一步加大,因此对该地区进行滑坡监测具有重要的意义。

根据西山村滑坡体的现场调查及相关的勘查资料分析发现,滑坡变形区域主要分布在滑坡体的中下部。试验区域如图 2 所示,数据采集时间范围是 2016 年 7 月~2017 年 10 月,观测方法为周期性观测,观测周期大约为 4 个月,观测模式基于静态 PPP 技术,单个站点观测时段长度为 5~9h。在整个变形滑坡区域内按 200~300m 的间距垂直于主滑方向均匀布设 8 个监测站,如图 2 所示的蓝色点位,XS01 最上,XS08 最下,并在埋设有强制对中装置的观测墩上进行观测。



图 2 西山村滑坡体卫星图及正视图

Fig. 2 Satellite map and front-view map of Xishan village landslide

由于条件有限,不能同时在所有的观测墩上安放接收机,因此同一期的数据采集分天开展,所有

站点的观测在相邻几天内完成,所有站点均重复观测了 2 次,部分点达到了 3 次。使用的接收机类型为双频 Trimble Net R9,天线类型为 Zephyr Geodetic2,数据采样频率为 1Hz。

2 数据处理及成果分析

本文采用武汉大学自主研发的 PANDA 软件的精密单点定位模块分别处理单 GPS 数据、单 BDS 数据和 GPS/BDS 数据,得到了三种模式下的结果,并对解算结果进行了相应处理和分析。

2.1 精度评定与精度区间统计

在周期性变形监测中,只有当定位误差小于实际的变形量时才实际反映出变形量。本文通过计算坐标解算结果重复性的均方差,这里简称为点位中误差来反映坐标的精度。点位中误差各分量的计算公式如下

$$\sigma_x = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X^i - \bar{X})^2}}{n-1}, \sigma_y = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y^i - \bar{Y})^2}}{n-1},$$

$$\sigma_z = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Z^i - \bar{Z})^2}}{n-1} \quad (1)$$

式中, σ 为该点点位中误差, X^i 、 Y^i 、 Z^i 为该点第 i 次($i=1,2,3,\dots,n$) 观测得到的坐标值的 3 个分量, \bar{X} 、 \bar{Y} 、 \bar{Z} 则为该点所有时段内的坐标分量的均值, n 为该观测点的总观测次数。点位中误差可以反映数据的离散程度,即内符合精度,其值越大则数据集越离散,精度越差。

计算出各点的点位中误差后,统计 8 个监测点的全部观测频数(从试验开始到试验结束对全部监测点的全部观测次数,本次试验在监测区域内共监测了 68 频次)在 GPS、GPS/BDS 和 BDS 三种模式下的点位中误差在不同精度区间内的分布情况,结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,GPS 模式下,精度优于 1cm 的频率是 37%,精度优于 2cm 的频率是 59%,优于 3cm 的频率是 66%,优于 5cm 的频率是 84%,超过 5cm 的频率为 16%;GPS/BDS 组合模式下,精度优于 1cm 的频率为 21%,较单 GPS 模式,占比下降了近 50%,精度优于 2cm 的频率是 53%,与单 GPS 相当,精度优于 3cm 的频率为 78%,高于单 GPS 12%,优于 5cm 的频率为 89%,略高于单 GPS 模式,超过 5cm 的频率为 11%,略低于 GPS 模式;

对于单 BDS 模式,其点位精度优于 1cm 的频率仅为 11%,为 GPS 的 1/3 左右,为 GPS/BDS 的 1/2 左右,精度优于 2cm 的频率为 32%,相较 GPS 和

GPS/BDS,占比略多于他们各自的一半,优于 5cm 的频率为 50%,远低于 GPS 和 GPS/BDS,超过 5cm 的频率为 50%,超过 8cm 的频率为 36%。

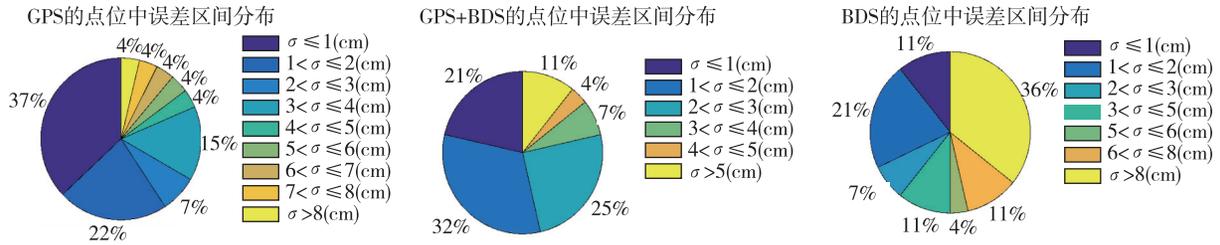


图 3 GPS,GPS/BDS,BDS 点位中误差精度区间统计

Fig. 3 Point medium errors interval statistics of GPS,GPS/BDS,BDS

综合以上的精度区间的分布情况统计,在全部的 68 次观测中,GPS 模式下过半的观测次数的点位中误差是优于 2cm 的,优于 1cm 的占比最多,而同一精度区间的 GPS/BDS 模式下,依然是过半的观测次数的点位中误差优于 2cm;区别在于 GPS/BDS 在 2~3cm 区间内比重要高于 GPS,整体表现为 GPS/BDS 的精度主要集中在 2cm 左右,而 GPS 主要集中在 1cm 左右,GPS 的高精度区间略高于 GPS/BDS 的高精度区间,整体来看二者精度相当。再看 BDS,BDS 优于 1cm 的频率只有 11%,优于 2cm 的占比仅有 32%,高精度区间占比太少,有 50% 的观测次数点位中误差超过了 5cm,整体精度较差。

2.2 影响因素探究及成果分析

BDS 的点位精度相比 GPS 较低,可能由这几个因素引起:1)观测值的质量较差;2)BDS 的地球同步轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星的可观测性较差和轨道精度更低;3)BDS 卫星整体的精密轨道和精密钟差的精度较差;4)BDS 的相位中心偏差(Phase Center Offset, PCO)和相位中心变化参数(Phase Center Variation, PCV)模型的精度不高。以上四种因素均可能共同或由某一因素占主要因素造成了较低的 BDS 点位精度。

当前 IGS 提供的 ANTEX 文件改正了 GPS 卫星端和接收机端的 PCO 和 PCV,BDS 仅进行卫星端的 PCO 改正,因此无法对 BDS 进行精确的天线相位中心改正^[12],导致其 PCO 和 PCV 模型精度不高;同时 BDS 二代的跟踪站数量有限导致 BDS 的精密轨道和钟差产品精度较低^[14],低于 GPS。BDS 特殊的同步轨道卫星设置使其 5 颗 C01~C05 号同步卫星,因为较差的可观测性导致卫星轨道精度低

于倾斜轨道卫星和中轨卫星的轨道精度,如果不使用同步轨道卫星,则导致当前二代的 BDS 实际可观测到的卫星数太少,一般只有 3~4 颗,难以实现可靠和有效定位。因此本文主要对比分析了 BDS 与 GPS 的观测值的质量即第一个因素,来探究这一因素是否是造成 BDS 点位中误差高于 GPS 的主要因素。影响观测值的质量主要有三方面因素,分别是数据的可利用率及观测时长、数据的剔除率和多路径误差。

(1) 观测时长及数据可利用率

图 4 所示为所有监测点的全部观测频次所对应的观测时长图,每个频次上的平均观测时长为 5.93h,最长为 9.69h,最短为 1.39h。

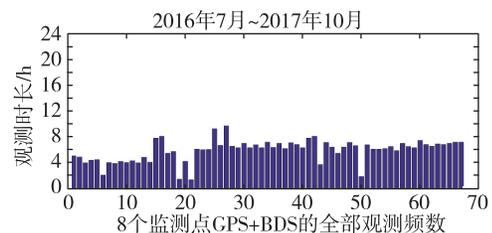


图 4 各观测频次对应的观测时长统计

Fig. 4 Statistics of observation duration corresponding to each observation frequency

可利用率为实际观测到的卫星数大于 4 颗的数据的历元数与理论上应接收到的数据的历元数的百分比,即式(2)

$$R_u = \frac{D_u}{D_e} \times 100\% \quad (2)$$

在指定截止高度角后, D_e 为当前测站利用广播星历计算的可见卫星理论上应接收到的观测历元数, D_u 为当前测站接收机实际接收到的且卫星

数多于或等于 4 颗的观测历元数。该指标表征了监测站的有效观测值,在观测时长一定的情况下,可利用率越高,说明监测站观测环境较好,数据质量、连续性和完整性均越好。图 5 所示为 GPS 和 BDS 在全部观测频数下的数据可利用率统计图。

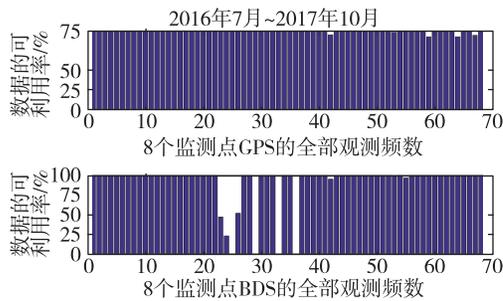


图 5 各观测频次下数据可利用率统计
Fig. 5 Statistics of data availability under each observation frequency

从图 5 可以看出,GPS 的数据可利用率在所有观测频数上均接近于 100%,数据的整体质量较好;

BDS 的数据可利用率在第 22~第 36 频次之间(也即 2017 年 3 月期间),部分频次上的数据的可利用率低于 50%,最低为 0%,其他观测频次上的数据的可利用率超过了 95%。不难发现,整体上 GPS 的数据可利用率要高于 BDS,说明当前在西山村复杂的地形环境中,GPS 观测数据质量更好。综合统计可利用率低于 90%或点位精度超过 5cm 的点位,得到如表 1 所示的统计结果。部分点如第 66d 的 XS01 和 XS04 的数据可利用率只有 50%,但由于观测时长较长,点位中误差低于 5cm,整体上当观测时长与可利用率之乘积小于 4 时,点位中误差基本都超过了 5cm,可以看出观测时长和数据的可利用率是影响最终点位精度的主要因素。除此外,如第 66d 的 XS02 和第 199d 的 XS05 和 XS08 的点位中误差异常,是因为没有观测到 BDS 卫星或观测到的 BDS 卫星载波相位频数不全;第 172d、173d 和 175d 的 XS02、XS04 和 XS06 号点观测时长和可利用率均在正常水平,但点位中误差却偏高,可能由北斗的轨道或钟差精度等因素引起。

表 1 部分观测频次下数据可利用率,观测时长及点位中误差统计

Tab. 1 Statistics of data availability, observation time and point medium errors under partial observation frequency

	XS03198	XS04199	XS05199	XS08199	XS08310	XS01066	XS02066
可利用率/%	100.0	99.9	100	99.9	100	47.1	0.0
观测时长/h	4.39	2.13	3.93	4.02	1.4	6.1	6.03
点位中误差/cm	5.8	28.4	330.8	499.3	8.7	2.5	164.1
	XS03066	XS04066	XS06069	XS07067	XS07068	XS02172	XS02173
可利用率/%	22.9	51.8	0.1	0.2	0.3	99.8	95.3
观测时长/h	9.23	9.7	6.8	6.32	7.19	6.82	6.32
点位中误差/cm	116.1	2.4	170.2	51.2	51.2	11.1	11.1
	XS04172	XS04173	XS06173	XS06175	XS08173		
可利用率/%	100	99.9	99.9	99.9	99.9		
观测时长/h	8.1	3.73	5.47	6.41	1.88		
点位中误差/cm	6.3	6.3	12.3	12.3	22.8		

(2)数据的剔除率

剔除率为所有的周跳和中断总数与实际观测到的卫星数大于 4 颗的数据的历元数的百分比,即式(3)

$$R_i = \frac{csAll}{D_u} \quad (3)$$

式中 $csAll$ 为因历元缺失、卫星不可用、卫星信号不可用、周跳等原因导致的总中断数, D_u 为当前测站接收机实际接收到的且卫星数多于或等于 4 颗的观测历元数,该指标表征了数据的完整性和连续

性。特别地,当数据的可利用率为 0%时,中断率记为 100%;剔除率越低,表明数据越连续完整,数据质量整体越好。从图 6 可以看出,GPS 和 BDS 的数据剔除率整体相当,中断率低于 3%,表明了数据可利用率相同且高于 90%的情况下,总的中断对两类卫星的影响几乎一致。但 BDS 在某些频次上的数据连续性较差,中断率达到了 100%,这与数据可利用率 0%时是相对应的,观测时长固定,数据可利用率越低,导致点位中误差较高,得到的结果也

就越不准确。

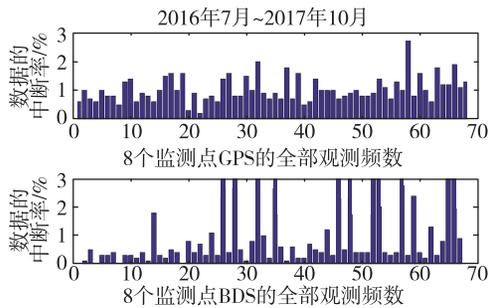


图6 各观测频次下数据的中断率统计

Fig. 6 Statistics of data interruption rate under each observation frequency

(3) 多路径误差

多路径误差对伪距和载波的影响量级不一样,最大可造成 $1/4$ 周载波相位波长的距离误差,如GPS的L1波长为19.2cm,则载波多路径误差最大为4.8cm^[12]。多路径对伪距的影响主要分三种情况^[13]:

- 1) 大面积散射,如信号通过金属环境,可导致伪距误差达10m;
- 2) 水面反射引起低频影响,可导致伪距误差达10m;
- 3) 近距离规则物体的反射,可导致伪距误差达2~6m;

由上述分析可知,多路径误差对载波的影响为厘米级至毫米级,对伪距的影响比载波大很多。图7所示为GPS和BDS的伪距多路径分析结果,可以看出,伪距多路径均值误差的影响在分米量级,并未对观测数据造成严重影响;同时GPS和BDS的多路径均值相当,GPS略高于BDS,多路径对GPS和BDS的影响大致相同,说明了多路径误差并不是引起GPS和BDS点位中误差差异的主要因素。

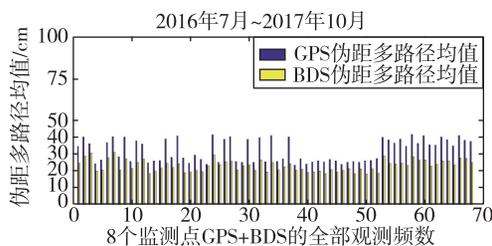


图7 各观测频次下伪距多路径均值统计

Fig. 7 Statistics of pseudo-range multipath means at each observation frequency

通过统计点位中误差的精度区间分布情况发

现,BDS的点位中误差的分布情况明显不如GPS和GPS/BDS;同时GPS/BDS的精度区间分布整体上与GPS相当,并没有比GPS更好,甚至优于1cm的比例低于GPS。因此,探究了造成GPS和BDS点位中误差差异的因素,并着重对观测值的质量进行了对比分析,最终确定了观测时长和数据的可利用率是最终影响点位精度的主要因素。精度评定后,按照观测时长和数据的可利用率指标加权处理定位结果,降低了观测质量较差的结果对最终结果的贡献,提高了定位结果的精度和容错率。通过三种模式的解算可以进行结果之间的相互检核矫正,便于发现异常的结果后进行降权处理或直接剔除。解算结果经过加权处理后,将空间直角坐标转换为法线站心坐标,以第1期的数据作为首期观测值,分别用后4期的观测数据与之相减,得到了平面和垂直方向上的坐标累计变化量(其中2017年10月的XS04点观测数据丢失)。

图8的GPS结果显示,在2016年7月~2017年10月的观测周期内,在N方向上,8个点均整体向南滑动,整体平均滑动速率为0.92cm/月,向南最大累计滑动量为XS06的20.9cm,最小为XS08的11.3cm;E方向上滑动幅度不大,基本保持平稳;U方向上,整体平均滑动速率为0.61cm/月,前期增长幅度高于南北向但后期低于南北向,XS01~XS07号点在观测周期内几乎均匀地随时间滑动,位于滑坡体底部的XS08点在观测时期内位移序列基本平稳,最大累计滑动量为XS06的16.6cm,最小为XS08的1.3cm。从滑动方向来看,XS01~XS06号点向东南方向滑动,XS07和XS08点向西南方向滑动;从滑动速率上来看,坡体中部的点位(XS04,XS05,XS06)的滑动速率最快,坡体顶部的点位(XS01,XS02,XS03)和坡体底部的点位(XS07和XS08)相对较慢,呈现出整片区域的点位从上往下的速率逐步增加再减小的趋势,表明了该监测区域内的点与点之间发生相对滑动,且滑动量的大小并不相等,中西部滑动速度最快,上部次之,下部最慢,即XS04~XS06号点与XS07~XS08号点之间的相对距离不断缩小,说明在整体向南滑动的过程中二者可能会发生挤压,造成前者所处的区域相对于后者之上发生滑动。XS01~XS03点的位移量小于XS04~XS06点,即滑坡体上部变形速率比中部慢,因此,在二者的中间连接区域可能会因为滑动速度不均匀而形成裂缝。

图 9 的 GPS/BDS 结果显示,N、E 方向的累计变化趋势基本与 GPS 一致,N 向 8 个点整体向南滑动,平均滑动速率为 0.925cm/月,最大累计滑动量为 XS06 的 22.6cm,最小为 XS08 的 10.5cm,这与 GPS 模式解算出的结果完全一致;E 向上滑动幅度不大,与 GPS 相当;U 向上结果略差于 GPS 结果。

图 10 的 BDS 结果显示,虽然依据点位中误差

的精度区间分布情况对最终的坐标进行了加权处理,但是由于精度超过 5cm 的频数达到了一半,导致很大一部分点的精度低于滑坡体变形的实际允许精度,因此无法全面且准确反映滑坡体的真实走向,仅平面的 N、E 向能反映出跟 GPS 和 GPS/BDS 基本一样的趋势,U 向结果不能反映点位的实际变化趋势。

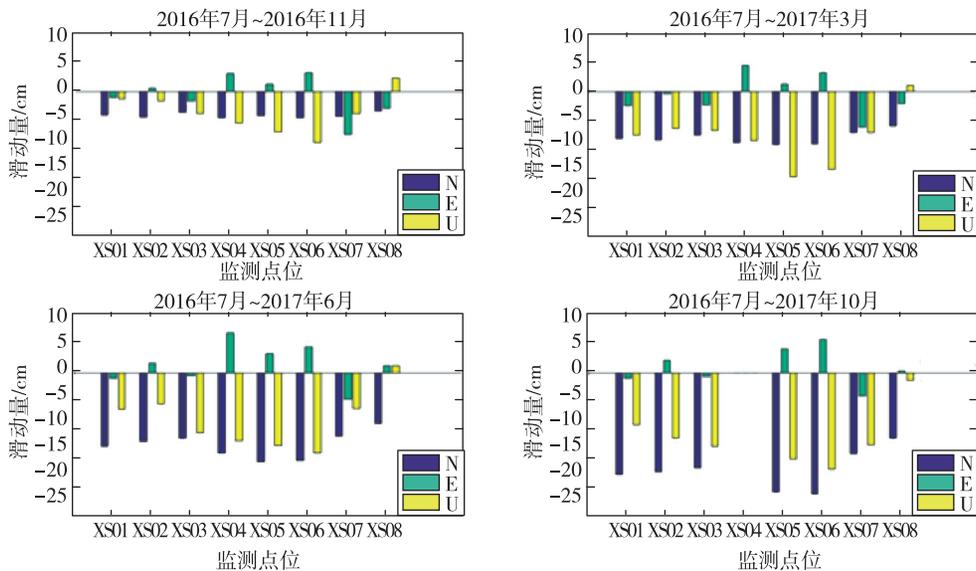


图 8 GPS 模式下各监测点坐标累计变化量

Fig. 8 Accumulative variation of coordinates of monitoring points under GPS mode

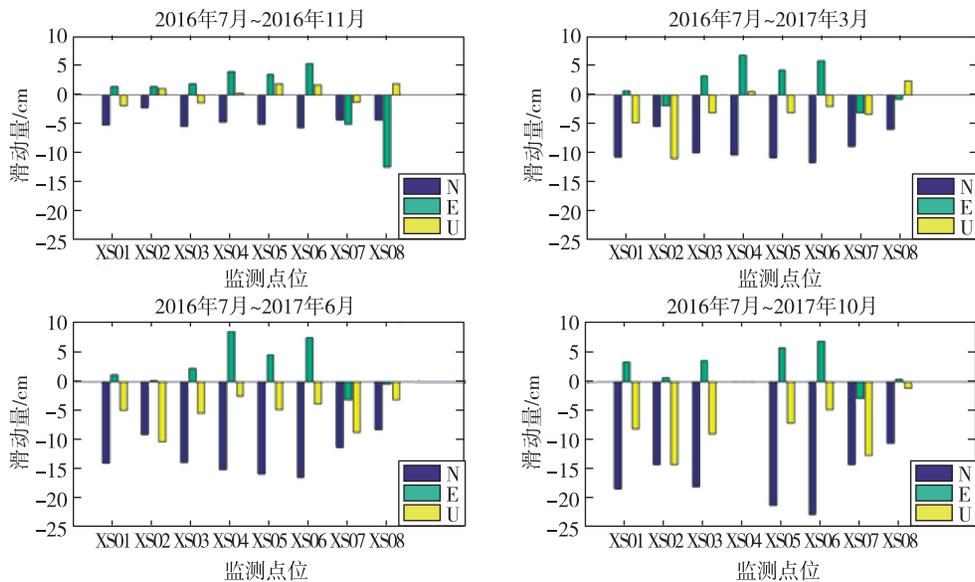


图 9 GPS/BDS 模式下各监测点坐标累计变化量

Fig. 9 Accumulative variation of coordinates of monitoring points under GPS/BDS mode

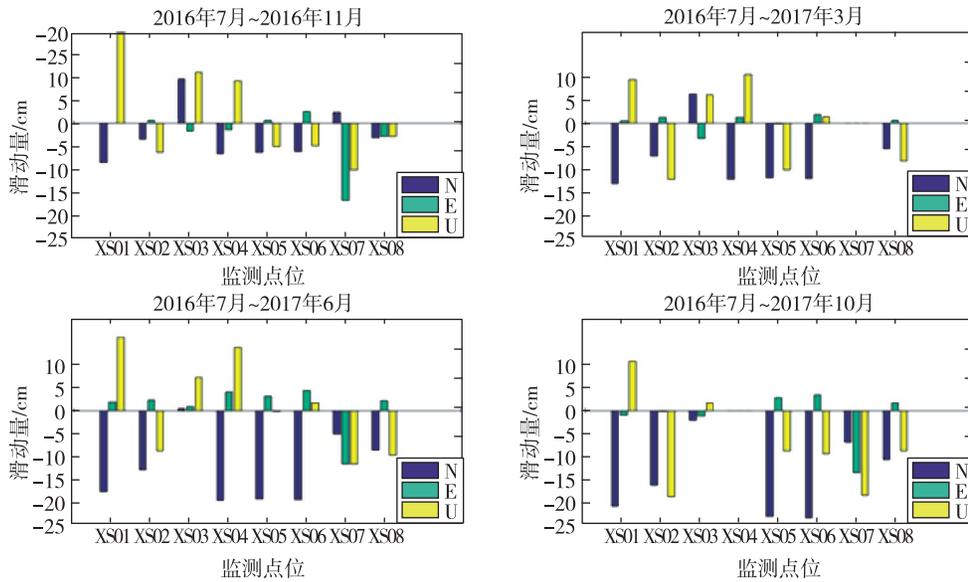


图 10 BDS 模式下各监测点坐标累计变化量

Fig. 10 Accumulative variation of coordinates of monitoring points under BDS mode

为更好地直观展示和分析监测点的总滑动趋势,图 11 显示了 GPS 模式下 8 个点水平方向上的分期坐标变化矢量图。

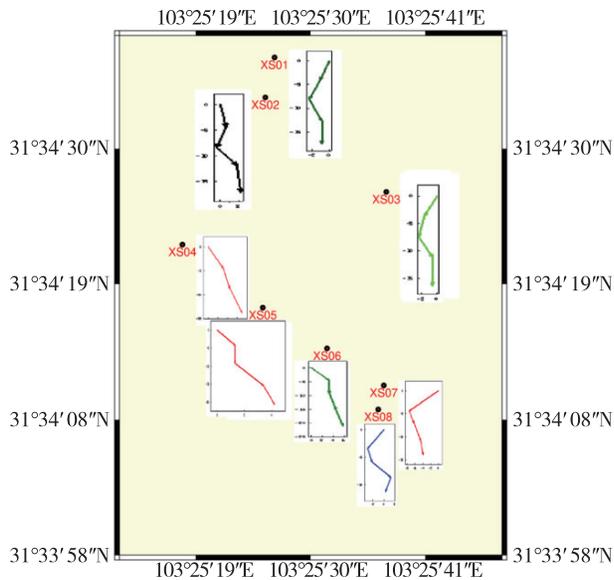


图 11 GPS 模式下各监测点平面坐标矢量变化

Fig. 11 Variation of plane coordinate vectors of monitoring points under GPS mode

2.3 小结

在此次的滑坡监测试验中,平均静态观测时长为 5.93h,精度区间统计结果表明 5.93h 左右的观测时长基本能保证 GPS 和 GPS/BDS 两种模式下的精密单点定位技术满足滑坡体滑动的精度,能有

效监测变形较缓慢的滑坡体。GPS/BDS 结果与 GPS 相当,单 BDS 精密单点定位结果的精度区间表现不稳定,部分点的精度可以达到与 GPS 精度一致,但整体中误差大,并且存在明显的粗差,BDS 精密单点定位精度在类似于西山村场景的滑坡监测中受地形、卫星等外界环境变化的影响较大。由于 BDS 的点位中误差的区间分布情况明显不如 GPS 和 GPS/BDS,因此本文探究了造成 GPS 和 BDS 点位中误差差异的因素,确定了观测时长和数据的可利用性是影响最终点位精度的主要因素。除此外,部分点的观测时长和可利用率均在正常水平,但点位中误差却偏高,可能受 BDS 本身 GEO 卫星精度、BDS 整体的精密轨道和精密钟差产品精度,以及 PCO 和 PCV 模型精度的影响,需做进一步的研究。适当延长观测时长,选择质量更佳的接收机将有助于提高数据的可利用率和最终的点位精度。

3 结论

综上,GNSS 精密单点定位技术能作为山区滑坡监测领域的一种有效手段,监测结果可以作为滑坡预警的重要依据,在不宜架设基准站的偏远山区具有重要的应用价值。5.93h 左右的观测时长基本能使 GPS 精密单点定位的精度达到较高水平,基本满足 1~2cm 精度的滑坡监测的需要,能有效监测变形较缓慢的滑坡体;GPS/BDS 的结果与 GPS 相当,引入 BDS 后并未有效改善定位精度;因为当前的 BDS 二代精密单点定位技术的定位精度和稳定

性均稍差于单GPS,所以还不能独立应用于类似本文场景的滑坡监测中;此外,观测时长和数据的可利用性是直接影响GPS或BDS定位精度的一个主要因素。伴随着北斗三代的全面组网完成并逐步投入使用,BDS的各项模型和产品精度、卫星选择率和几何分布将得到极大改善,GPS/BDS组合将成为一种主流的定位方式,将在国民生产生活的方方面面中广泛发挥作用。

参考文献

- [1] 张培震,徐锡伟,闻学泽,等. 2008年汶川8.0级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066-1073.
Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, et al. Slip rates, recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone and tectonic implications for the mechanism of May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1066-1073 (in Chinese).
- [2] 过静珺,杨久龙,丁志刚,等. GPS在滑坡监测中的应用研究—以四川雅安峡口滑坡为例[J]. 地质力学学报, 2004, 10(1): 65-70.
Guo Jingjun, Yang Jiulong, Ding Zhigang, et al. Application of GPS in landslide monitoring—taking Xiaokou landslide in Ya'an county, Sichuan province as an example[J]. Journal of Geomechanics, 2004, 10(1): 65-70(in Chinese).
- [3] 徐爱功,赵亮,周阳. 基于PANDA软件的GPS静态精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报, 2013(10): 5-7.
Xu Aigong, Zhao Liang, Zhou Yang. Static precise point positioning accuracy analysis based on PANDA software[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(10): 5-7(in Chinese).
- [4] 韩静. BDS/GPS相对定位算法研究及其在滑坡监测中的应用[D]. 西安:长安大学, 2017.
Han Jing. Research on BDS/GPS relative positioning algorithm and its application in landslide monitoring [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017(in Chinese).
- [5] 王阅兵,甘卫军,陈为涛,等. 北斗导航系统精密单点定位在地壳运动监测中的应用分析[J]. 测绘学报, 2018(1): 48-56.
Wang Yuebing, Gan Weijun, Chen Weitao, et al. The analysis of precision point positioning of Beidou navigation satellite system application in crustal motion monitoring [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018(1): 48-56(in Chinese).
- [6] 罗剑. 理县西山村滑坡复活变形机理及关键致灾因子研究[D]. 成都:成都理工大学, 2015.
Luo Jian. Research on deformation mechanism and disastrous factors in Xishan landslide, Li county, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015(in Chinese).
- [7] 林强. 理县西山村滑坡结构分析及稳定性评价[D]. 成都:成都理工大学, 2016.
Lin Qiang. Research on structure analysis and stability evaluation of Xishan landslide in Li county, Sichuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2016(in Chinese).
- [8] 邓起东,陈社发,赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 1994, 16(4): 389-403.
Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. Structure, seismic movement and dynamics in longmenshan and its adjacent[J]. Seismology and Geology, 1994, 16(4): 389-403(in Chinese).
- [9] 张春山,孙炜锋,谭成轩,等. 汶川地震重灾区地质灾害风险评价的重要意义和方法[J]. 四川行政学院学报, 2010(3): 54-58.
Zhang Chunshan, Sun Weifeng, Tan Chengxuan, et al. Significance and method of geological hazard risk assessment in Wenchuan earthquake-stricken area[J]. Journal of Sichuan Administration College, 2010(3): 54-58(in Chinese).
- [10] 盛敏汉,储日升,危自根,等. 四川省理县西山村滑坡运动变形过程中的微震研究[J]. 地球物理学报, 2018(1): 171-182.
Sheng Minhan, Chu Risheng, Wei Zigen, et al. Study of microseismicity caused by Xishancun landslide deformation in Li county, Sichuan province [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018(1): 171-182(in Chinese).
- [11] 张小红,左翔,李盼,等. BDS/GPS精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256.
Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan, et al. Convergence time and positioning accuracy comparison between BDS and GPS precise point positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(3): 250-256(in Chinese).
- [12] 袁兵,熊寻安,龚春龙,等. 顾及多路径误差改正的GNSS大坝形变监测研究[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(1).
Yuan Bing, Xiong Xun'an, Gong Chunlong, et al. Study on GNSS deformation monitoring of dam con-

- sidering multipath error correction[J]. *Navigation, Positioning and Timing*, 2016, 3(1): 53-59(in Chinese).
- [13] 黄丁发, 丁晓利, 陈永奇, 等. GPS多路径效应影响与结构振动的小波滤波筛分研究[J]. *测绘学报*, 2001, 30(1): 36-41.
Huang Dingfa, Ding Xiaoli, Chen Yongqi, et al. Wavelet filters based separation of GPS multi-path effects and engineering structure vibrations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2001, 30(1): 36-41(in Chinese).
- [14] Pan L, Xiaohong Z, Fei G. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(1): 25-40.