

# 超高频 GPS 记录地震位移信号的能力评估： 一个人工爆破震源的实验<sup>\*</sup>

李祖宁, 林 树, 陈超贤, 陈 光, 关玉梅, 王紫燕

(福建省地震局, 福建 福州 350003)

**摘要:** 利用2014年6月福建省地震局进行的人工爆破实验的50 Hz超高频GPS观测数据, 采用快速预报星历以及事后精密星历, 对观测的数据分别进行准实时和事后精密处理。结果显示高频GPS在差分处理模式下, 其水平向噪声大致为5 mm, 垂直向大致为10 mm。高频GPS差分单历元解在采用快速预报星历与事后精密星历得到的结果基本一致, 因此采用快速预报星历进行高频GPS实时解算的结果具有很高的可靠性。同时, 通过比较并址的高频GPS和强震仪信号的波形和频率成分发现, 差异主要是由于高频GPS和强震仪记录对于不同频率震动信号的响应不同, 两者在重叠的频段上有较好的一致性, 而这种差异本身体现了一种互补的特征。因此, 高频GPS数据的实时处理结果具备监测地表震动的能力, 可应用于地震烈度速报与地震预警, 成为地表震动和地震研究的良好补充。

**关键词:** 超高频GPS观测; 人工爆破; 观测精度; 地震预警

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2016)04-0587-11

## 0 引言

传统的GPS大地测量学和地震学的研究目标区别在于研究地壳形变谱的频段不同, 前者主要研究较长周期(几天到几十年)的变化, 后者主要研究瞬时(小于1 s到几小时)地壳运动的特征。随着高频(1 Hz)和超高频(20~50 Hz)GPS接收机的出现以及高频GPS数据处理算法的成熟, 使得GPS的观测精度和对形变谱的敏感性朝着测量地壳动态瞬时变化的方向不断改进(Avallone *et al.*, 2011; Blewitt *et al.*, 2006; Lou *et al.*, 2013), 目前已经出现大地测量和地震学观测谱范围逐渐合并的趋势。由于高频GPS不仅可以观测到周期小于1 s的位移量, 而且可以检测到超长周期的地壳运动, 没有限幅的约束, 因此, 采用高频GPS接收机一方面可观测到大动态的静态位移, 另一方面可以观测到大震震时动态位移, 为研究地震的破裂过程、地壳介质的非均匀特性和地震前后地壳形变短期变化过程提供了多窗口检测的工具(Yehuda *et al.*, 2000; Choi *et al.*, 2004;

Elósegui *et al.*, 2006)。

利用高频GPS作为长周期地震仪器的设想和方法最早由Miyazaki等(1997)在1997年AGU秋季会议上提出, 他们基于GEONET观测网1 Hz采样率记录, 分析1996年Hyuga Nada $M_w$ 6.7级地震的观测数据, 清楚地得到了P波和S波的到时, 通过与理论和强震仪记录的波形数据对比, P波和S波到时符合得很好(Ge, 1999)。而最具有代表性的研究工作是Larson等(2003, 2009)和Gomberg等(2004)利用1 Hz GPS资料研究2002年Denali 7.9级地震的地壳变形特征(Bilich *et al.*, 2008), 得到了近场和远场地面运动位移的时间序列, 与地震仪记录结果比较, 两者具有较好的一致性。由于高频GPS观测能够得到地震动态波形, 利用高频GPS资料反演震源破裂过程的代表性研究有对2003年Tokachi-Oki地震的研究, 利用1 Hz的观测资料, 对震源滑动分布进行反演研究, 不仅得到了空间滑动总量分布特征, 也得到了空间破裂速度。

由于GPS测量所受的影响因素比较多。如大气、电离层扰动等, GPS的观测噪声来源很广, 而

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-01-04.

基金项目: 福建省地震局陆海联测项目和大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2014-4-1-E)共同资助.

且高频 GPS 的观测精度相对于地震仪的观测精度相差较大,导致其对地震信号观测精度比地震仪低很多。在垂直方向,目前 GPS 的精度在厘米级,而地震仪的精度高于微米级。高频 GPS 所观测到的信号到底是噪声还是真正的位移信号,一些学者还存在疑问和争论 (Li *et al.*, 2015; Geng *et al.*, 2015)。同时,对于超高频 GPS 数据的稳定性以及可靠性也存在着不同的意见和说法。因此,定量评估高频 GPS 的噪声水平以及监测地震位移信号的能力,对于确定高频 GPS 在地震研究中的应用具有重要意义。

近些年来,随着一些快速定位方法的出现,快速解算 GPS 位移逐渐成为可能,如单点定位方法 (PPP 方法)、双差定位方法等。但是这些快速解算方法的精度如何、能否满足地震研究的需要,仍需要定量的分析和标定。因此,如何确定高频和超高频 GPS 的解算精度,特别是利用快速预测星历确定 GPS 位移的解算精度,对于地震快速响应以及地震预警等工作具有极为重要的意义。

由于地震大小和空间分布具有不确定性,如果能够采用人工源或者可控震源进行研究和标定,其结果和可靠性会高得多。从 2010 年开始,福建地震局开始实施了人工源爆破试验,这为定量评估高频 GPS 探测地震信号的能力提供了理想的实验条件。因此,本文将利用超高频 GPS (50 Hz) 对人工爆破引起的位移信号进行测量,探究超高频 GPS 数据在实际观测中的可靠性及捕获位移信号的能力及精度。

## 1 数据及处理方法

### 1.1 实验观测及数据分布

福建省地震局自 2010 年开始实施的“跨越台湾海峡人工爆破观测”项目旨在通过多次人工爆破激震的方式,探测海峡地震的深部构造和孕震环境 (李祖宁等, 2007; 丁学仁等, 2007)。2014 年 6 月,该项目在福建省多个区域进行了 4 次不同当量的人工爆破实验。为了更好地获取观测资料的对比性,笔者选取了其中观测条件最好的 2 个爆破点进行高频 GPS 观测,同时在部分高频 GPS 观测点进行了并址的强震仪观测,如图 1 所示。观测的仪器采用了天宝 R9 型高精度大地测量 GNSS 接收机,配备标准的扼流圈天线,同时记录 50 Hz 的

观测数据;强震仪器采用的是 Grulap 强震仪。

为了定量评估高频 GPS 接收机得到的位移信号随震中距的衰减情况,2014 年 6 月 16 日在南靖试验场按照距离远近一共布设了 8 台 (套) NetR9 GPS 接收机,台站布局如图 1a,其中黄色线段为炮点,红色圆圈为 GPS 点,7 号点并址布设 MEMS 强震仪和 Grulap 强震仪。各点离炮点的距离为:1 号点约 5 m,2、3 号点约 13 m,4、5 号点约 20 m,6 号点约 25 m,7 号点约 50 m,8 号点约 100 m。为了进一步验证高频 GPS 确实能够捕捉到近场爆破引起的地壳振动信号,2014 年 6 月 23 日在漳州华安实施人工爆破前,在爆破点附近布置了 3 台 NetR9 GPS 接收机,点位分布图如图 1b 所示,其中黄色线段为炮点,红色圆圈为 GPS 点,粉红色为 MEMS 强震仪和 Grulap 强震仪位置,由于观测条件比较复杂,考虑仪器安全,没有进行严格的并址观测,但是两者的距离都很近。各点离炮点



图 1 人工爆破点示意图

(a) 南靖站点; (b) 华安站点

Fig. 1 Sketch map of artificial blasting points

(a) Nanjing site; (b) Huaan site

的距离为：1 号点 8 m，2 号点 15 m，3 号点 25 m。

表 1 人工爆破激发炮点信息  
Tab. 1 Information of artificial blasting point

炮点编号	爆破时间	药量/T	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	参考地名
HX102	2014-06-16 01:10:14.293	2.0	24.58	117.41	南靖县 双明村
HX061	2014-06-23 01:00:17.537	2.5	24.80	117.57	华安县 下樟村

1.2 GPS 数据处理方法

为了获取高采样率高精度的结果，本文采用短基线差分处理模式，选择离炮点最近的福建 GNSS 基准站（>30 km）为参考站，由于爆破源的能量衰减得非常快，在参考站附近由于爆破源

引起的位移基本为零。利用动态历元差分方法对 1~8 号点的 50 Hz 高频 GPS 数据进行解算，所采用的软件为 GAMIT/GLOBK 程序中的 track 模块（King, Bock, 2002）。

为了探究实时高频 GPS 解算结果的可靠性，采用 IGS 快速预报星历来进行准实时解算，采用事后精密星历进行事后精密解算。解算结果如图 2 所示，选取南靖 1 号点的高程方向的结果进行展示，图中红色实线表示采用事后精密星历处理的结果，而蓝色虚线表示采用快速预报星历处理的结果，不难看出，两者吻合得非常好。因此，高频 GPS 差分单历元解在采用快速预报星历与事后精密星历得到的结果基本一致，这也说明采用快速预报星历进行高频 GPS 实时解算结果的可靠性。

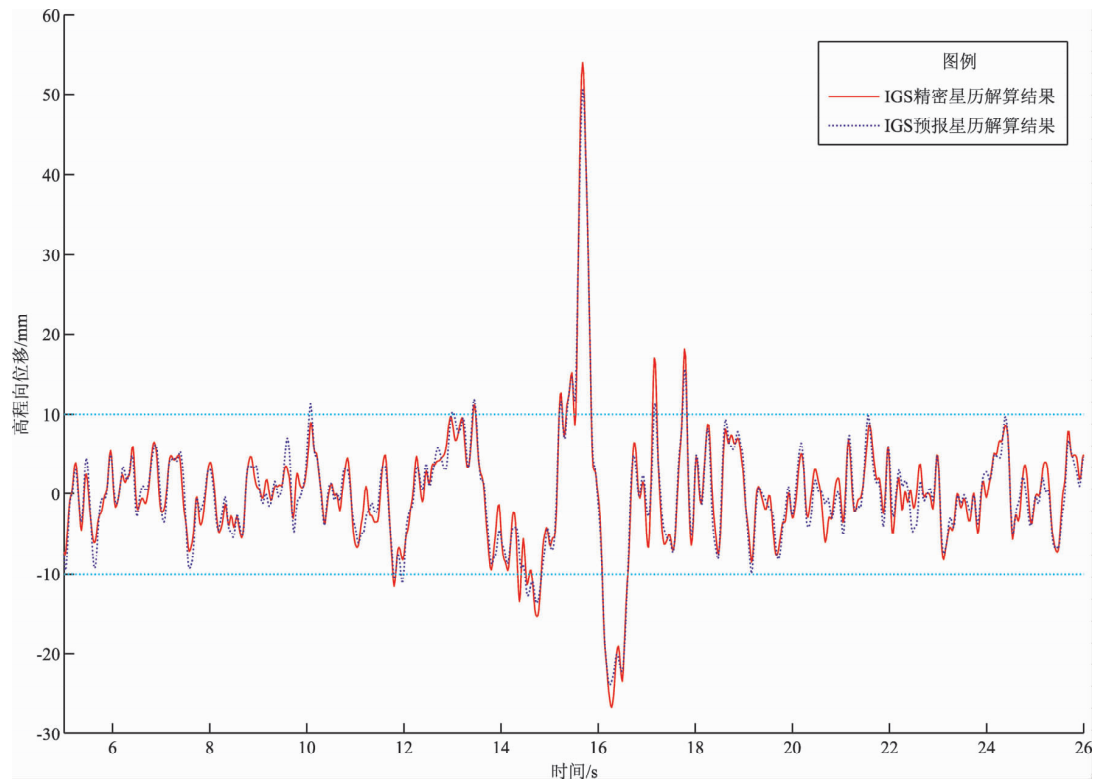


图 2 南靖人工爆破 1 号点高程方向不同星历解算结果对比

Fig. 2 Comparison of different ephemeris solution results of artificial blasting point of No. 1 in Nanjing at different elevation

由于 GPS 测量所受的干扰信号源比较复杂，为了获取更准确的时间信号信息，对解算结果进行带通滤波来去掉不需要的噪声信号。为了能准确地进行噪声滤波，首先对原始的观测记录进行频谱分析，找出爆破信号所集中的频率范围，然后再基于这个频率范围对原始结果进行带通滤波来消除其他

噪声信号。

如图 3 所示，对离爆破点最近的 1 号点的高程方向原始信号进行频谱分析，蓝色、紫色和绿色分别为爆破前、爆破时和爆破后的信号频谱曲线。不难发现，高频 GPS 接收到的由爆破激发的地壳介质震动能量主要集中在 0.2~2 Hz，2 Hz 以后信号

的能量与震前、震后噪声基本叠加一致，因此，将对所有的观测数据以 0.2 ~ 2 Hz 频带范围进行带通滤波来获取更好的信号信息。

2 数据结果及讨论

通过以上的观测，分别得到了南靖和华安 2 个区域多个观测点的记录并对其进行分析，从而定量给出超高频 GPS 接收能力的评估。

2.1 南靖区域高频 GPS 实验结果

南靖 1 号点布置在山体的石壁上，离炮点很近，其结果如图 4 所示，可以看出南北和东西向的

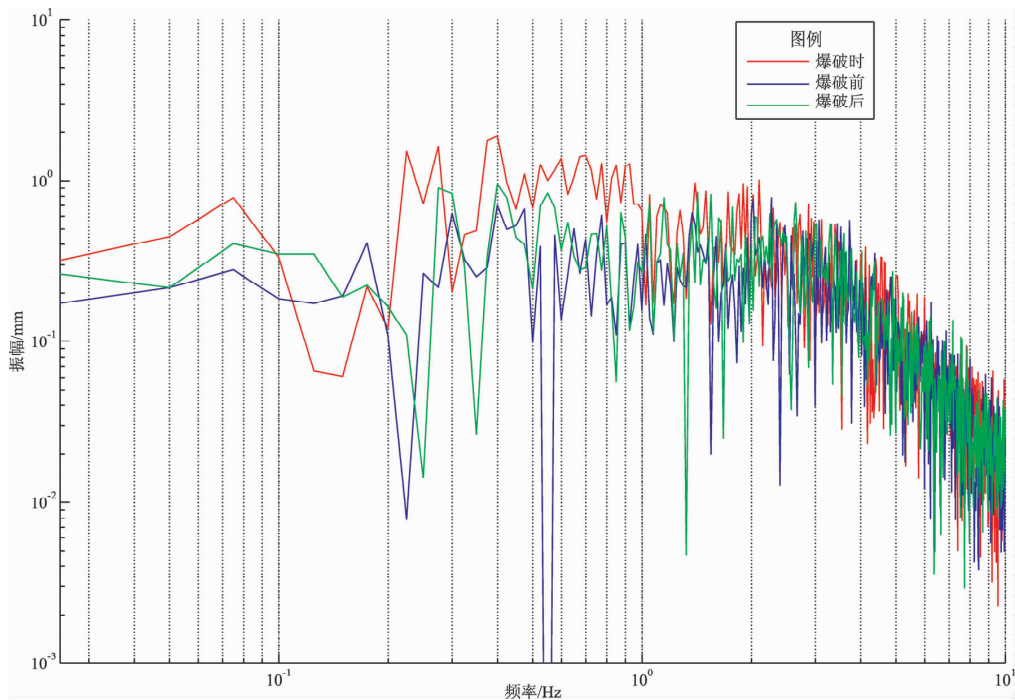


图 3 南靖人工爆破 1 号点高程向频谱图

Fig. 3 Spectrum of artificial blasting point of No. 1 in Nanjing at elevation direction

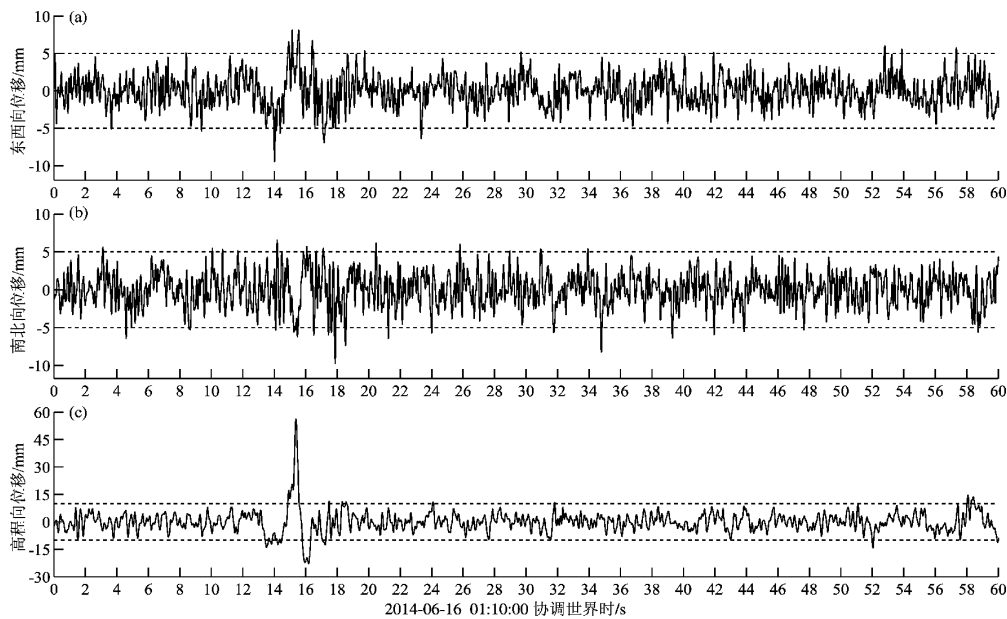


图 4 南靖人工爆破 1 号点高频 GPS 数据

(a) 东西方向; (b) 南北方向; (c) 高程方向

Fig. 4 High frequency GPS observation data of artificial blasting point of No. 1 in Nanjing

(a) EW direction; (b) NS direction; (d) elevation direction



位移不明显，高程向的位移很明显，接近 60 mm，图中虚线是噪声水平线，东西和南北方向为 5 mm，高程向为 10 mm。对 1 号点高程向位移进行详细分析如图 5 所示，可以发现高程位移从 14 s 开始有一个脉冲，与并址布置的简易强震仪和 Guralp 高精度强震仪捕捉到的波形时间点是能够对应的，

简易强震仪和 Guralp 高精度强震仪的记录数据如图 6 所示，其中 SM-104 和 SM-58 为两台简易强震仪，Guralp-104 为高精度强震仪。

通过对其他点的处理结果我们可以发现，3~5 号点的位移波形在 1 时 10 分 14 秒都有所反应，有的水平向比较明显，有的高程向比较明显，如图 7~8

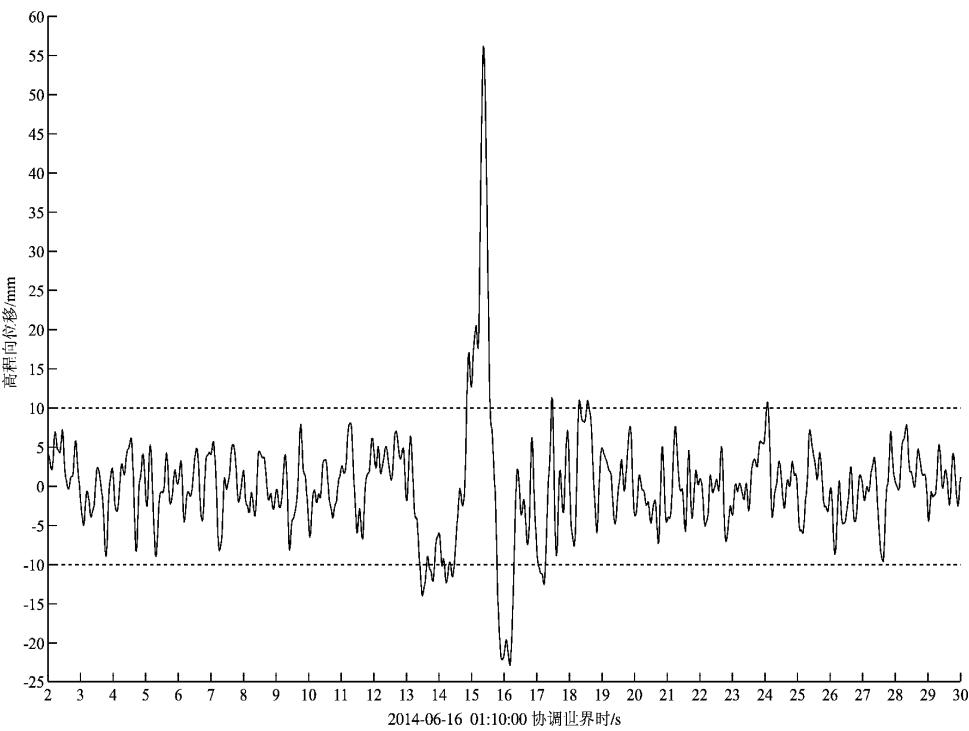


图 5 南靖人工爆破 1 号点高程向高频 GPS 数据

Fig. 5 High frequency elevation GPS observation data of artificial blasting point of No. 1 in Nanjing

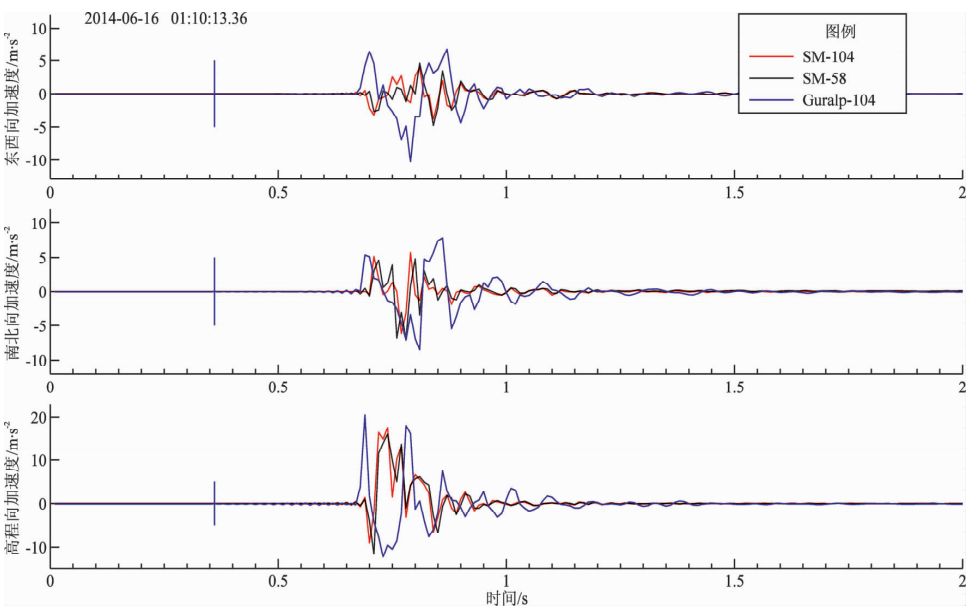


图 6 南靖人工爆破 3 号点 MEMS 强震仪数据

Fig. 6 Observation data recorded by MEMS strong motion seismograph at artificial blasting point of No. 3 in Nanjing

所示, 6~8 号点由于距炮点比较远, 信号并不明显, 但我们能基本看到这些点的水平噪声水平基本在 5 mm 左右, 而高程方向的噪声水平则达到 10 mm。

## 2.2 华安区域高频 GPS 实验结果

采用南靖试验相同的数据处理方式对华安地区的高频 GPS 观测结果进行了分析, 同时, 也对原始数据进行 0.2~2 Hz 频带范围的带通滤波。从华安 1 号点和 2 号点的处理结果图中可以看到, 起

爆点的时间大概为 1 时 00 分 17 秒 (图 9~10), 与强震仪加速度波形捕捉到的起爆时刻是能够对应的 (图 13~14), 1 号点振动时间比较长, 持续了近 4 s, 幅度南北向达到了 12 mm, 高程向接近 16 mm。而从 2 号点的南北向位移更明显接近 16 mm, 高程向位移达到了 14 mm, 对 2 号点的南北位移进行了放大 (图 11), 从图 11 中可以很明显地看出高频 GPS 确实捕捉到了爆破瞬间的波形 (17~20 s), 而 3 号点的处理结果并不明显 (图 12),

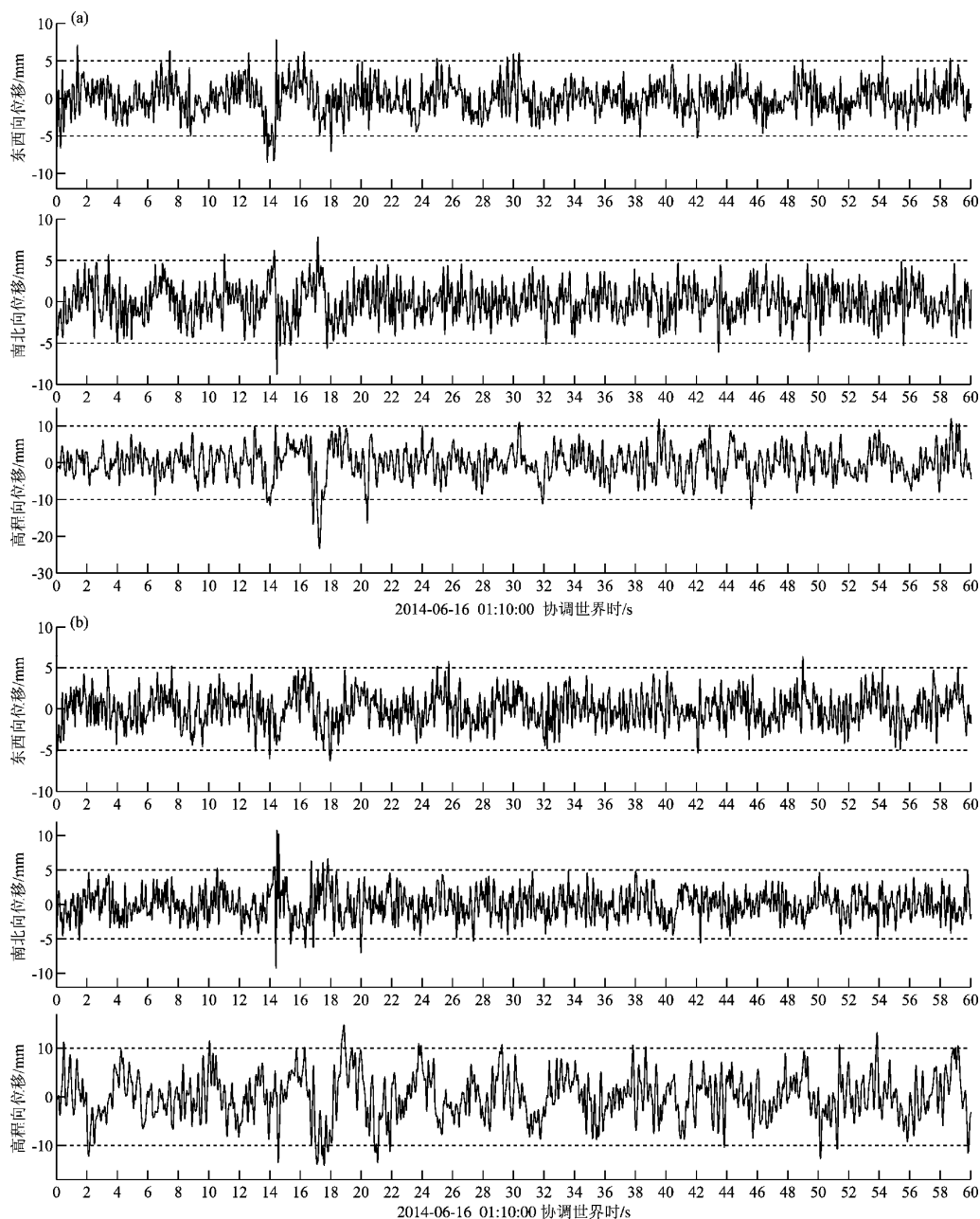


图 7 南靖人工爆破 3 号 (a)、4 号 (b) 点高频 GPS 数据

Fig. 7 High frequency GPS observation data of artificial blasting point of No. 3 (a) and No. 4 (b) in Nanjing

但是从这些结果可以看出，无论是离爆破点近的还是远的，高频 GPS 记录到的信号的噪声水平在水平方向基本是 5 mm 左右的水平，高程方向则为 10 mm 水平，这与第一次的实验结果也是一致的。

3 结论

本文利用 2014 年 6 月福建省地震局进行的人

工爆破实验获得的 50 Hz 超高频 GPS 观测数据，并采用快速预报星历以及事后精密星历，对观测数据分别进行准实时和事后精密处理。通过近场的 2 次人工爆破高频 GPS 实验的数据分析，结果表明：

(1) 高频 GPS 在差分处理模式下，其水平向噪声大致为 5 mm，垂直向大致为 10 mm，如果地壳的振动幅度超过高频 GPS 噪声水平，高频 GPS

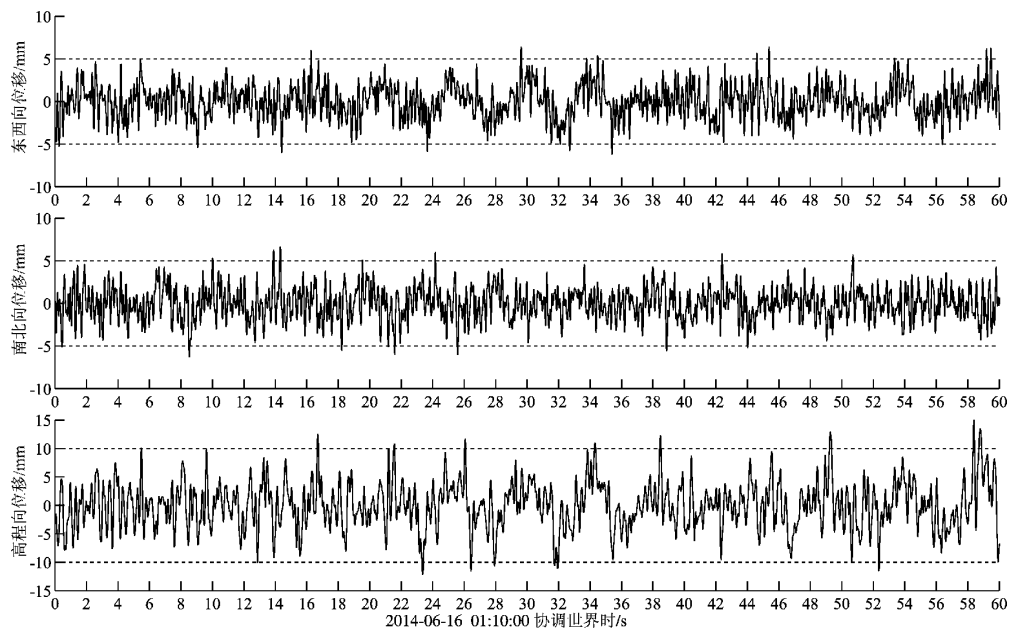


图 8 南靖人工爆破 5 号点高频 GPS 数据

Fig. 8 High frequency GPS observation data of artificial blasting point of No. 5 in Nanjing

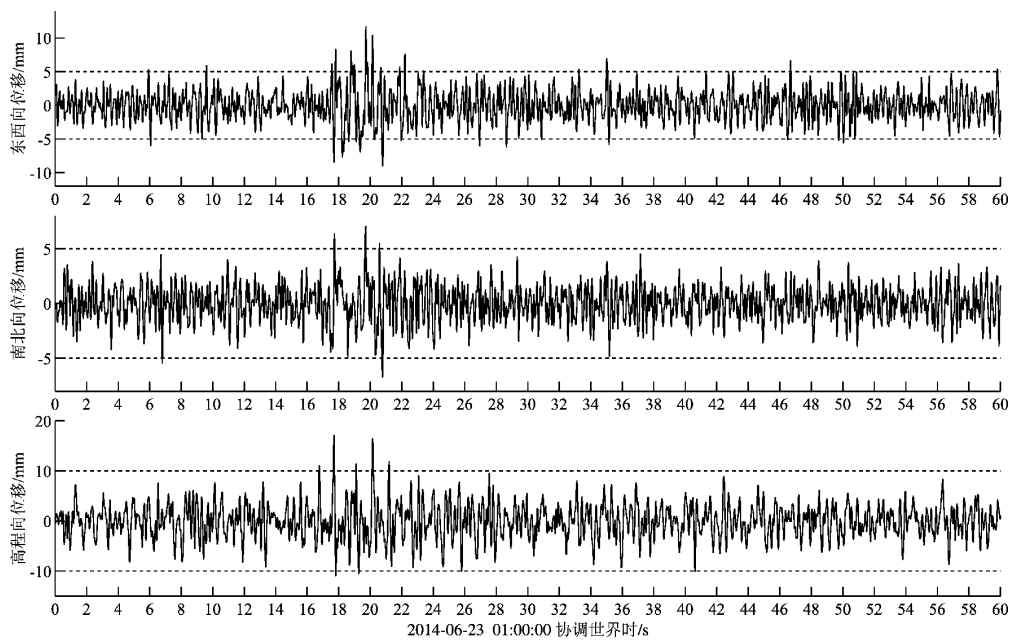


图 9 华安人工爆破 1 号点高频 GPS 数据

Fig. 9 High frequency GPS observation data of artificial blasting point of No. 1 in Huanan

能够捕捉到近场地震引起的位移信号。

(2) 高频 GPS 差分单历元解在采用快速预报星历与事后精密星历得到的结果基本一致,这也说明采用快速预报星历进行高频 GPS 实时解算的结果的可靠性。

综合高频 GPS 的监测能力,以及其基线漂移小,观测稳定的特点,高频 GPS 记录可以作为有效的“地震位移计”,对以记录速度和加速度的地震仪起到很重要的补充作用,使得“GPS 地震学”这一交叉学科具有很好的发展前景。特别是近场

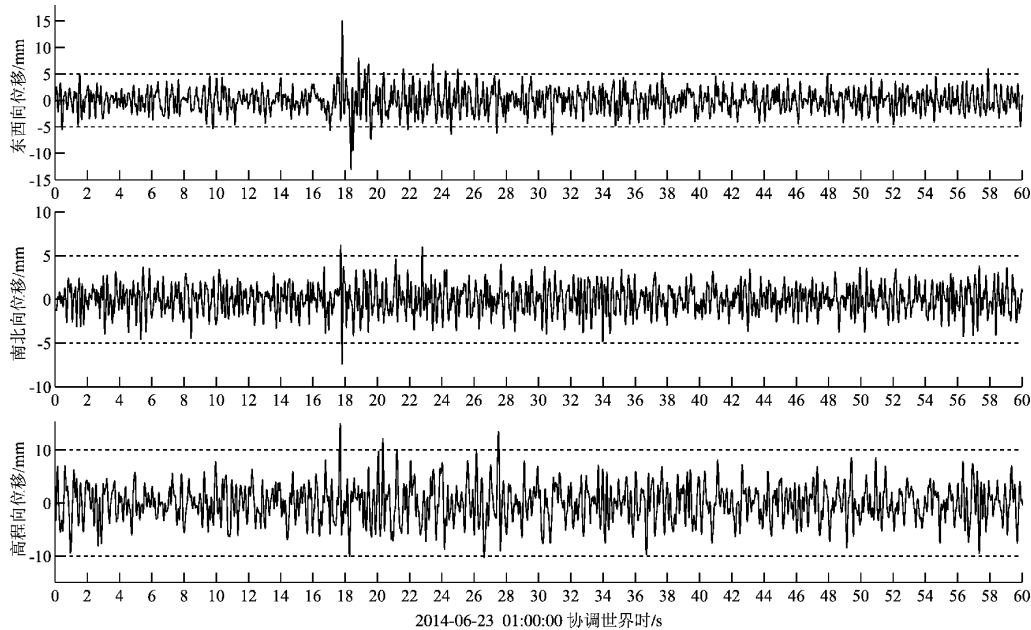


图 10 华安人工爆破 2 号点高频 GPS 数据

Fig. 10 High frequency GPS observation data of artificial blasting point of No. 2 in Huaan

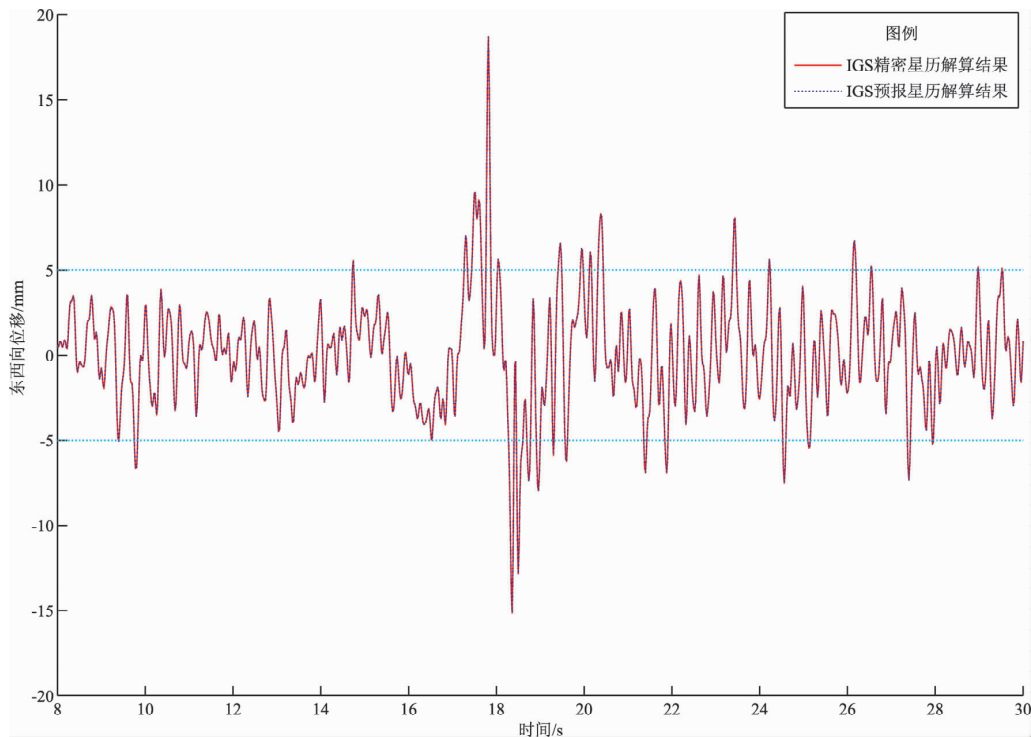


图 11 华安人工爆破 2 号点东西向高频 GPS 数据

Fig. 11 High frequency west – east GPS observation data of artificial blasting point of No. 2 in Huaan



强震仪由于地表倾斜的原因，其得到的水平向加速度通常都带有地表倾斜的特征，从而导致积分后得到的位移出现严重的基线漂移，这给利用强震仪信号研究地震震源性质产生了严重影响。相比而言，高频 GPS 由于记录的本身就是位移信号，因此，基线漂移比较小。如果将高频 GPS 和强震

仪进行并址观测，采用高频 GPS 校正强震仪信号的基线，那么就能够得到无基线漂移的地表位移情况。另外，高频 GPS 通常能够接收到低频甚至静态位移信息，而强震仪的记录则对高频信号敏感。两者之间存在明显的互补性。综合两者的优点，进行联合观测，就能够得到无基线漂移的宽

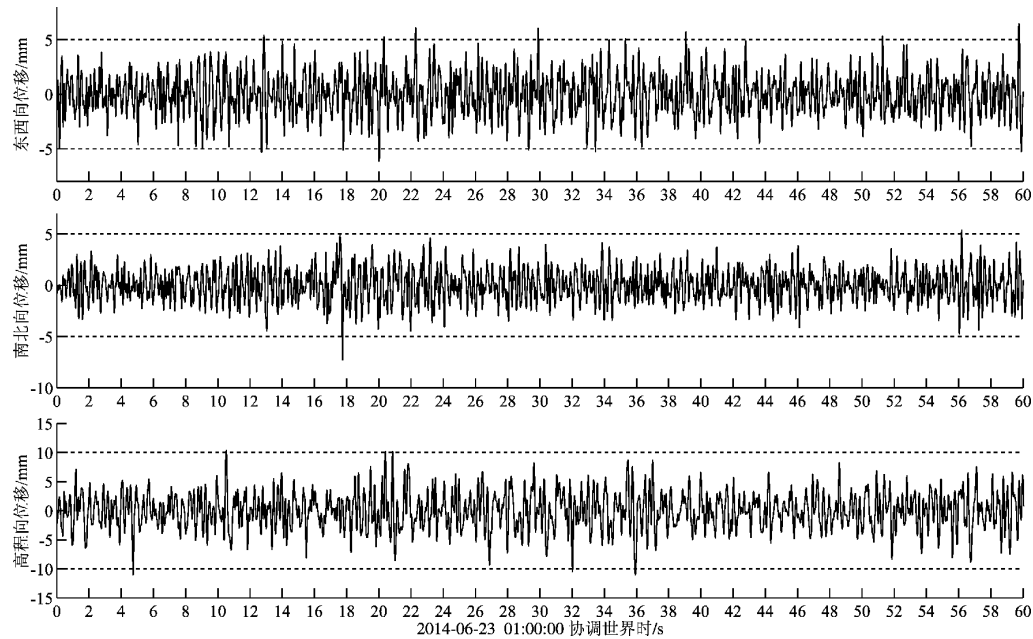


图 12 华安人工爆破 3 号点高频 GPS 数据

Fig. 12 High frequency GPS observation data of artificial blasting point of No. 3 in Huaan

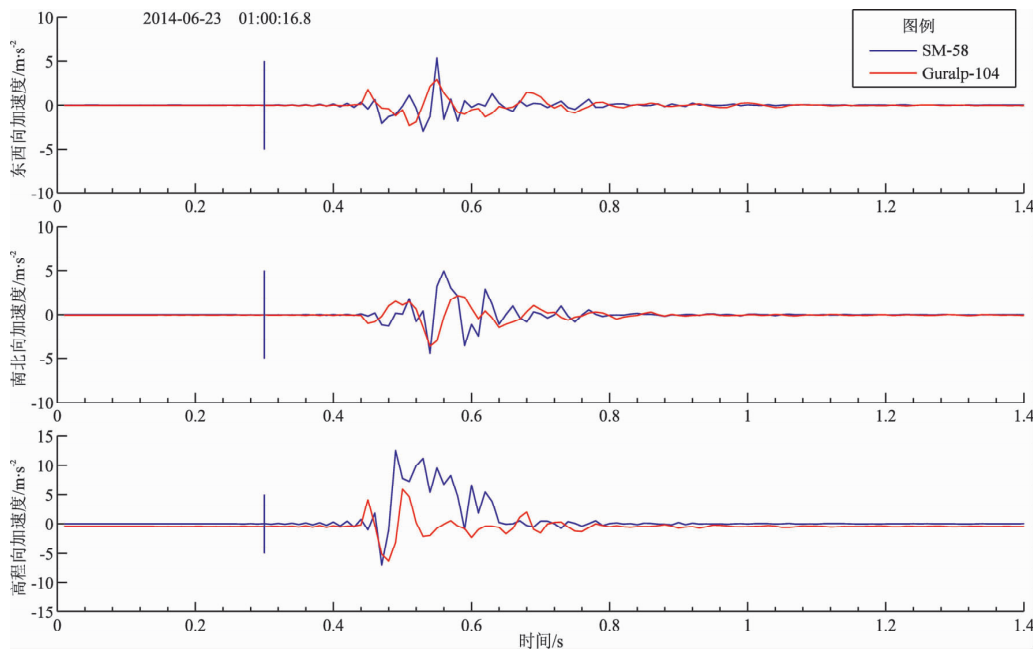


图 13 华安人工爆破 G104 强震仪数据

Fig. 13 Observation data recorded by G104 strong motion seismograph obtained by artificial blasting experiment in Huaan

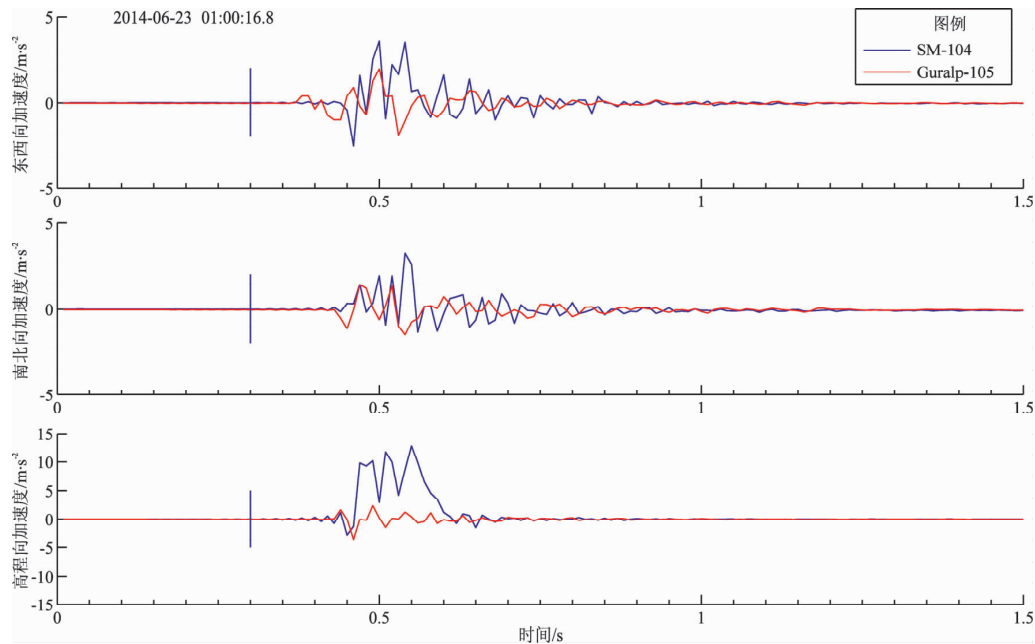


图 14 华安人工爆破 G105 强震仪数据

Fig. 14 Observation data recorded by G105 strong motion seismograph obtained by artificial blasting experiment in Huaan

频带地震信息,从而大大提高对于地震震源性质的研究。另外,高频 GPS 数据的实时处理结果,结合烈度计的记录,将能够在很大程度上提高地震烈度速报与地震预警的能力。因此,高频 GPS 将能够在未来的地震研究、地震预警方面发挥重要的作用。

感谢中国科学院测量与地球物理研究所的郑勇研究员、李军副研究员在本工作中的指导和帮助。

#### 参考文献:

- 丁学仁,吴绍祖,陈光. 2007. 福建省 GPS 台网观测的位移时间序列特征的初步研究[J]. 华南地震,29(2):8-14.
- 李祖宁,刘序俨,吴绍祖等. 2007. 台湾海峡两岸地壳相对运动分析[J]. 大地测量与地球动力学,27(5):68-72.
- Avallone A, Marzario M, Cirella A, *et al.* 2011. Very high rate(10Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the  $M_w 6.3$  L'Aquila (central Italy) event [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 116 (B2), doi:10.1029/2010JB007834.
- Bilich A, Cassidy J, Larson K M. 2008. GPS seismology: application to the 2002  $M_w = 7.9$  Denali Fault earthquake [J]. *Bull Seism Soc Am*, 98 (2):593-606.
- Blewitt G, C Kreemer J, Hammond W C, *et al.* 2006. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems [J]. *Geophysical Research Letters*, 33(11):4-5.
- Choi K, Bilich A, Larson K M, *et al.* 2004. Modified sidereal filtering: Implications for high-rate GPS positioning [J]. *Geophysical Research Letters*, 31(22):178-198.
- Elósegui P, Davis J L, Oberler D, *et al.* 2006. Accuracy of high-rate GPS for seismology [J]. *Geophysical Research Letters*, 33 (11), doi:10.1029/2006GL026065.
- Ge L. 1999. GPS Seismometer and its Signal Extraction BIOGRAPHY [C]//Proceedings of 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 41-52.
- Geng T, Xie X, Fang R X, *et al.* 2015. Real-time capture of seismic waves using high-rate multi-GNSS observations: Application to the 2015  $M_w 7.8$  Nepal earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 43 (1):161-167.
- Gomberg J, Bodin P, Larson K, *et al.* 2004. Earthquake nucleation by transient deformations caused by the  $M 7.9$  Denali, Alaska, earthquake [J]. *Nature*, 427 (6975):621-624.
- King R W, Bock Y. 2002. Documentation for the GAMIT GPS Analysis Software [M]. America: Mass Inst of Technol, Cambridge, Mass.
- Larson K M, Boden P, Gomberg J. 2003. Using 1-Hz GPS data to measure deformations caused by the Denali fault earthquake [J]. *Science*, 300 (5624):1421-1424.
- Larson K M. 2009. GPS seismology [J]. *J Geod*, 83 (3-4):227-233.
- Li Y Y, Xu C J, Yi L. 2015. Denoising effect of multiscale multiway analysis on high-rate GPS observations [J]. *GPS Solutions*, (4):1-11.
- Lou Y, Zhang W, Shi C, *et al.* 2013. High-rate (1-Hz and 50-Hz) GPS Seismology: application to the 2013  $M_w 6.6$  Lushan earthquake [J]. *J Asian Earth Sci*, 79 (A):426-431.
- Yehuda B, Nikolaidis R M, Jonge P J, *et al.* 2000. Instantaneous geodetic positioning at medium distances with the Global Positioning System [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105 (B12):28223-28254.

## Capacity Evaluation of Seismic Displacement Signals Recorded by Ultra – high Frequency GPS: An Artificial Blasting Source Experiment

LI Zuning, LIN Shu, CHEN Chaoxian, CHEN Guang, GUAN Yumei, WANG Ziyan  
(*Earthquake Administration of Fujian Province, Fuzhou 350003, Fujian, China*)

### Abstract

An artificial blasting experiment with different equivalent has carried out by Fujian Earthquake Administration in Fujian Province in Jun. ,2014. The ultra – high frequency GPS observation data with 50 Hz are employed to near field observations. With quick forecasting ephemeris and post precise ephemeris, the observation data have been treated by quasi real – time and post precision processing respectively. It is resulted that in the differential mode, the horizontal noise of the high frequency GPS is about 5 mm, and the vertical noise is about 10 mm. The solutions of single epoch – differential high rate GPS observation are basically the same by the algorithm of fast forecasting ephemeris and post precise ephemeris respectively. So the result of high frequency GPS real – time decoding is strongly reliability by using quick forecasting ephemeris algorithm. Meanwhile, we find that there exits some difference in waveforms between high frequency GPS and the signal of strong motion seismograph in the same site. After comparing the frequency component, we find that this difference is mainly from the different frequency signal recorded by high frequency GPS and strong motion seismograph respectively. It is shown that the results of high frequency GPS data real – time processing have the ability to monitor the ground shaking, so it could be applied to the seismic intensity rapid reporting and earthquake early warning, it' also could be the good supplement to studying the ground motion and earthquake.

**Key words:** ultra-high frequency; artificial blasting; observation accuracy; earthquake early warning