

龚俊,汪贞杰,曾利萍,2020. 高频 GPS 形变波与地震波在日本 M_w 9.0 地震中的对比研究. 中国地震,36(4):945~952.

高频 GPS 形变波与地震波在日本 M_w 9.0 地震中的对比研究

龚俊 汪贞杰 曾利萍

浙江省地震局,杭州 310013

摘要 高频 GPS 动态监测可快速准实时解算地表位移,其在地震参数快速确定、地壳形变短期变化过程、震源破裂过程和震级标度研究等方面成为传统地震学的补充。针对浙江省内的 1Hz 的 GPS 数据,本文采用 GAMIT 的 TRACK 模块,获得了日本 2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 地震的位移时间序列,并将其与浙江省地震台网并址观测的地震计获得的位移信号进行对比。结果显示,高频 GPS 与地震计获得的峰值地动位移之间差异在 GPS 的观测误差范围内。相对于原始波形,两者在 0.005~0.1Hz 频段上的水平方向相关系数提高了 50% 以上,高程方向相关系数提高了 2 倍以上。研究表明,高频 GPS 与宽频带地震计的观测结果在时序和频谱上有相互重合的区域,GPS 和地震仪可以共同覆盖地震地表位移的全部可能范围。

关键词: 日本 M_w 9.0 地震 高频 GPS TRACK 峰值地动位移

[文章编号] 1001-4683(2020)04-0945-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

GPS 技术自诞生之初就在地壳形变观测方面显示出巨大潜力,20 世纪 80 年代早期,科学家使用单频大地测量型接收机在短程(100m)距离上实现了 1mm 精度的相对定位(Teunissen et al,1998)。近十几年来,高频 GPS 技术获得了飞速的发展,高频 GPS 接收机在进行中强地震监测时可以不失真地记录地表运动,且没有限幅的约束(单新建等,2019)。高频 GPS 在地震发生前后的地震参数快速确定(尹昊等,2018)、地壳形变短期变化过程(黄勇等,2017)、震源破裂过程(刘刚等,2017)和震级标度研究(陈锋等,2019)等方面,成为传统地震学的补充。

在传统的地震观测中,对于不同震级的地震,需要使用不同观测周期的仪器进行观测。近十几年来,随着宽频带和甚宽频带测震仪器的广泛应用,测震仪的观测频率已经覆盖到 120s 以上,地震震级越大,其能量就越集中在低频部分。同时,GNSS 观测的周期范围可以从 1s 到数小时、数月、数年,并可以获取长周期的地表位移信息。本文采用 1Hz 的 GPS 数据,对日本 2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 地震发生后浙江省内 GPS 形变波与浙江省地震台网记录地震波的共性和特点进行研究。

[收稿日期] 2020-04-17; [修定日期] 2020-09-29

[项目类别] 浙江省地震局科技项目(2020zjj05)资助

[作者简介] 龚俊,男,1981 年生,工程师,主要从事 GNSS 数据处理与分析工作。E-mail:garygongjun@163.com

1 高频 GPS 观测及处理

本次研究处理的 GPS 数据分别来自 IGS(International GNSS Service)、浙江省地壳形变观测网络和中国大陆构造环境监测网络工程二期。浙江省地壳形变观测网络和中国大陆构造环境监测网络二期分别自 2008 年和 2010 年开始观测,2011 年 3 月 11 日当天,各台站 GPS 观测数据的完整率均大于 99%,测距观测质量 MP1 和 MP2 值均小于 0.39m,观测环境无干扰,观测质量均优于规范要求(李强等,2013)。使用 GAMIT 自带的 TRACK 模块处理 GPS 连续站的 1Hz 观测数据,TRACK 模块版本为 1.31。

TRACK 采用双差定位模式计算震时动态变化,即通过一个已知固定站,单历元解算其他测站的坐标。由于大地震发生后会造成大范围(甚至全球)的地表运动,并不存在真正不动的站点,因此选择固定站成为最关键的问题。在本研究中,浙江省内的 GPS 台站有中国大陆构造环境监测网络的建德台(ZJJD)、温州台(ZJWZ)以及浙江省地壳形变观测网络的嘉兴台(JIAX)、湖州台(HZJZ)和景宁台(JNJZ),选择 IGS 的 PIMO 台作为固定站(图 1)。其中,浙江省内的 GPS 台站距日本 M_w 9.0 地震震中最近约 2420km,PIMO 台距离震中约 3350km,两者震中距相差约 900km。地震波中的 S 波是造成地表水平运动的主要原因,其在地壳中的传播速率为 3.2~4.0km/s,如果以 4.0km/s 计算,浙江省内的 GPS 台站与 IGS 的 PIMO 台地震波的到时差达到 225s,该到时差可以避免固定站的同震效应影响(殷海涛等,2012)。

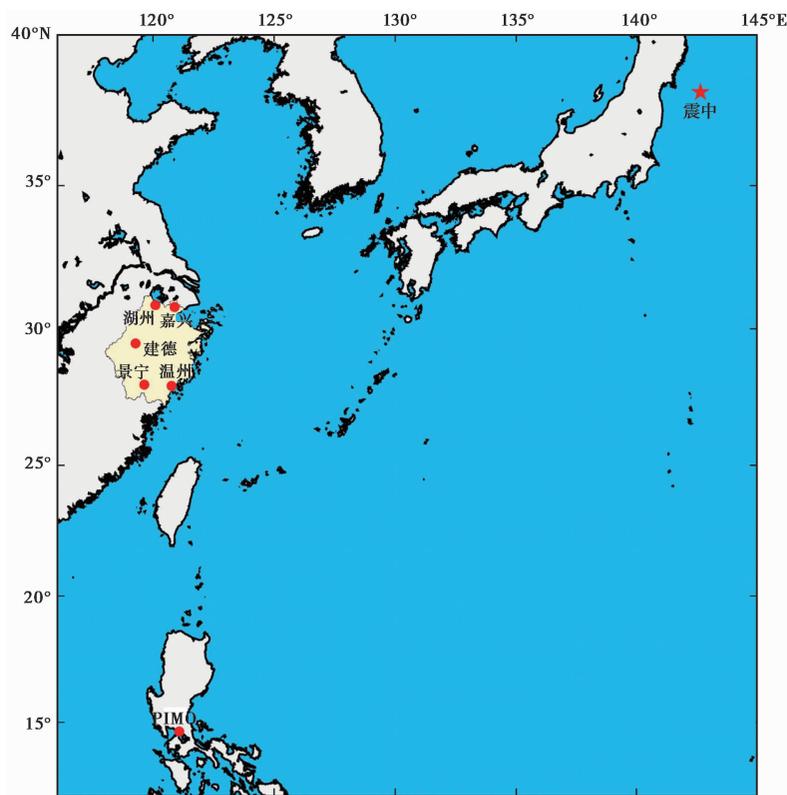


图 1 日本 M_w 9.0 地震震中及 1Hz GPS 台站分布

由于浙江省内的 GPS 台站距固定站(PIMO 台)较远,因此卫星星历采用 IGS 发布的精密轨道,以载波 L1 和 L2 的线性组合 LC 为观测,消除电离层一阶项的折射影响,对流层天顶延迟改正采用 GPT 模型、映射函数采用 GMT 模型、模糊度解算采用 MW-WL 组合模型,在数据处理中采用卡尔曼滤波平滑算法,并引入电离层文件。

2 测震数据处理

根据日本 M_w 9.0 地震时浙江省地震台网的分布情况,选择了 5 个测震台的观测数据,测震台站信息如表 1 所示。其中,景宁台为短周期地震计,其他 4 个测震台为宽频带地震计。对 5 个测震台站地震计的原始数字信号在频率域去除仪器相应,实现速度的积分而获得地表位移。

表 1 测震台站信息

台站名	仪器型号	频带范围	采样率/Hz	与对应 GPS 台站的距离/m
嘉兴	BBVS-60	60s~40Hz	100	34
湖州	CTS-1	120s~50Hz	100	134
温州	CTS-1	120s~50Hz	100	9400
建德	BBVS-60	60s~40Hz	100	840
景宁	FSS-3DBH	1~40Hz	50	900

3 GPS 形变波与地震波对比分析

在本研究选取的 GPS 台站与对比观测的测震台站中,距离最近的为嘉兴测震台与 GPS 台,两者相差 34m;距离最远的为温州测震台与 GPS 台,两者相差达 9400m。尽管温州的 2 个台站距离达到 9400m,但由于本次研究的是约 2300km 的远震,9km 左右的差距相对于震中距很小,地震方位角差异可以忽略不计,同时两者台址情况类似,均为花岗岩,因此得到的结果依然具有参考价值。5 个 GPS 台与对应测震台的位移时间序列如图 2 所示。

图 2 横坐标的原点为发震时刻,纵坐标根据震中距的增加,排列各台 GPS 和测震观测在东西、南北和高程 3 个方向的位移时间序列。由图 2 可以看出,嘉兴台的 GPS 和测震观测在 410s 时开始晃动,而景宁台的 GPS 和测震观测在 500s 后开始晃动,各台站随着震中距的增加依次产生同震位移,同震位移的幅度在 10cm 左右,在 800s 后地表恢复平静,晃动的时间持续约 3min。同时可以看出,虽然高程方向观测精度低,但也记录到同震位移。对比各台站的 GPS 和测站位移时间序列,除频带范围在 1~40Hz 的景宁测震台(表 1)的 3 个方向及嘉兴测震台的 EW 方向外,GPS 和测震位移的幅度和波形在 3 个方向均有较好的一致性。但两者位移时间序列存在 12~15s 的差异,其原因可能是受宽频带地震仪频带(120s~50Hz)的限制,对于日本 M_w 9.0 地震使用带通低频截止引起波形相位超前,导致测震与 GPS 位移时间序列波形产生 10% 的相位差异。

为了更好地研究各台 GPS 和测震观测的位移时间序列,使用快速傅里叶变换方法对各台的 GPS 与测震的位移时间序列进行频谱分析。限于篇幅,以湖州台的频谱分析结果进行说明。

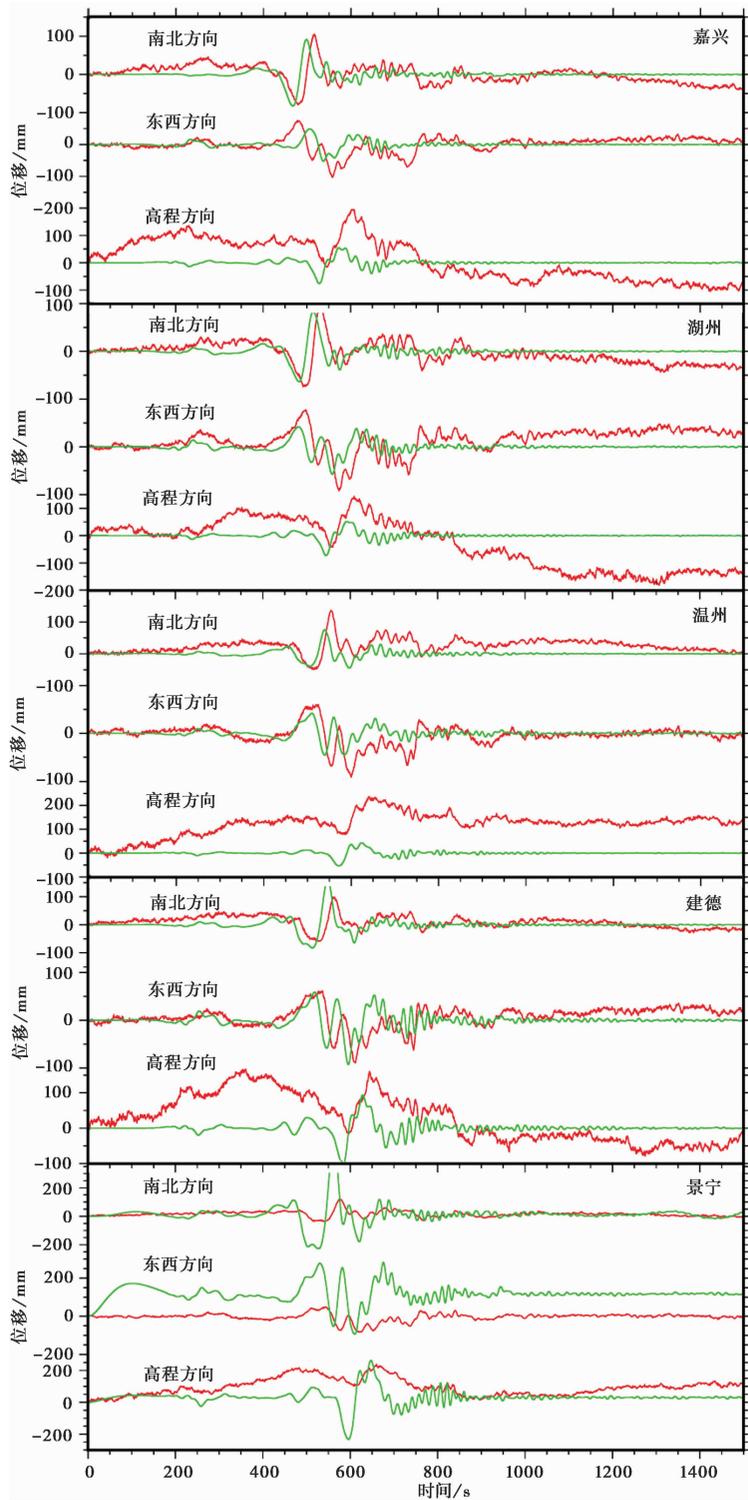


图2 各台 GPS 与测震的位移时间序列对比
 红色为 GPS 台;绿色为测震台

湖州台 GPS 与测震位移频谱对比如图 3 所示。高频 1Hz 采样的 GPS 信号奈奎斯特频率为 0.5Hz,湖州台测震计的频带范围在 120s~50Hz 之间。可以看出,在相对低频范围(小于 0.005Hz),测震计会受到仪器频带范围限制,而 GPS 依然保持着良好的振幅,说明 GPS 不仅可以观测到周期小于 1Hz 的位移量,还可以检测到超长周期的地壳运动信号,且没有限幅。在相对高频范围(大于 0.1Hz),GPS 位移时间序列的噪声水平高于测震计。两者在 0.005~0.1Hz 频带内幅度和噪声水平较为一致,因此使用 0.005~0.1Hz 的带通滤波对 GPS 和测震的位移时间序列进行处理,为方便对比,将测震位移时间序列整体延迟了 14s,最终得到带通滤波后的位移时间序列对比,如图 4 所示。

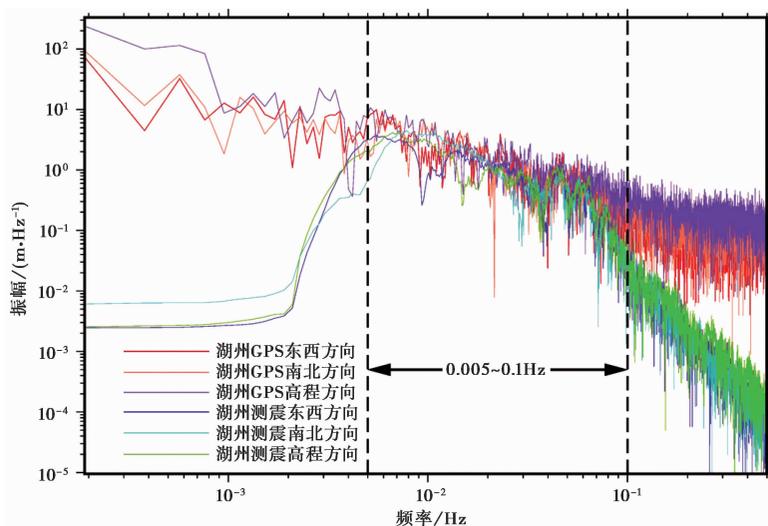


图 3 湖州台 GPS 与测震位移频谱对比

由图4可以看出,经过带通滤波后,各台的 GPS 位移时间序列均可反映地表位移特性,这说明虽然 GPS 测量受对流层、电离层等扰动的影响,观测噪声来源广泛,但使用合适的带通滤波可以去掉不需要的噪声信号。短周期的景宁台测震计依然无法真实反映地表长周期的位移,而嘉兴台测震计的 EW 方向位移时间序列在长周期与 GPS 结果符合情况依然不好,可以判断嘉兴台测震计 EW 方向对长周期地震波的仪器响应存在故障。

对滤波前后 GPS 与测震台的时间序列进行计算,得到时间序列相关系数,见表 2。

由表 2 可以看出,除嘉兴台 EW 方向外,各台站 3 个方向的相关系数均有明显提高。其中,水平方向相关系数提高了 50%以上,高程方向相关系数大多也提高了 2 倍以上,其原因是高频 GPS 高程解算的稳定性不好,原始曲线长周期的漂移很明显,通过滤波将影响相关系数最大的漂移项去掉,由此提高了相关系数。

由于 GPS 和测震 2 种手段 3 个方向的振幅并不总是在同一时刻达到最大幅度,因此使用下式对 GPS 和测震位移数据的三分向位移时间序列提取峰值地动位移(PGD)

$$PGD = \max \left\{ \left[\max(N(t))^2 + \max(E(t))^2 + \max(U(t))^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (1)$$

其中, $\max(N(t))$ 、 $\max(E(t))$ 和 $\max(U(t))$ 分别表示 SN 向、EW 向和垂直向位移的最大值。

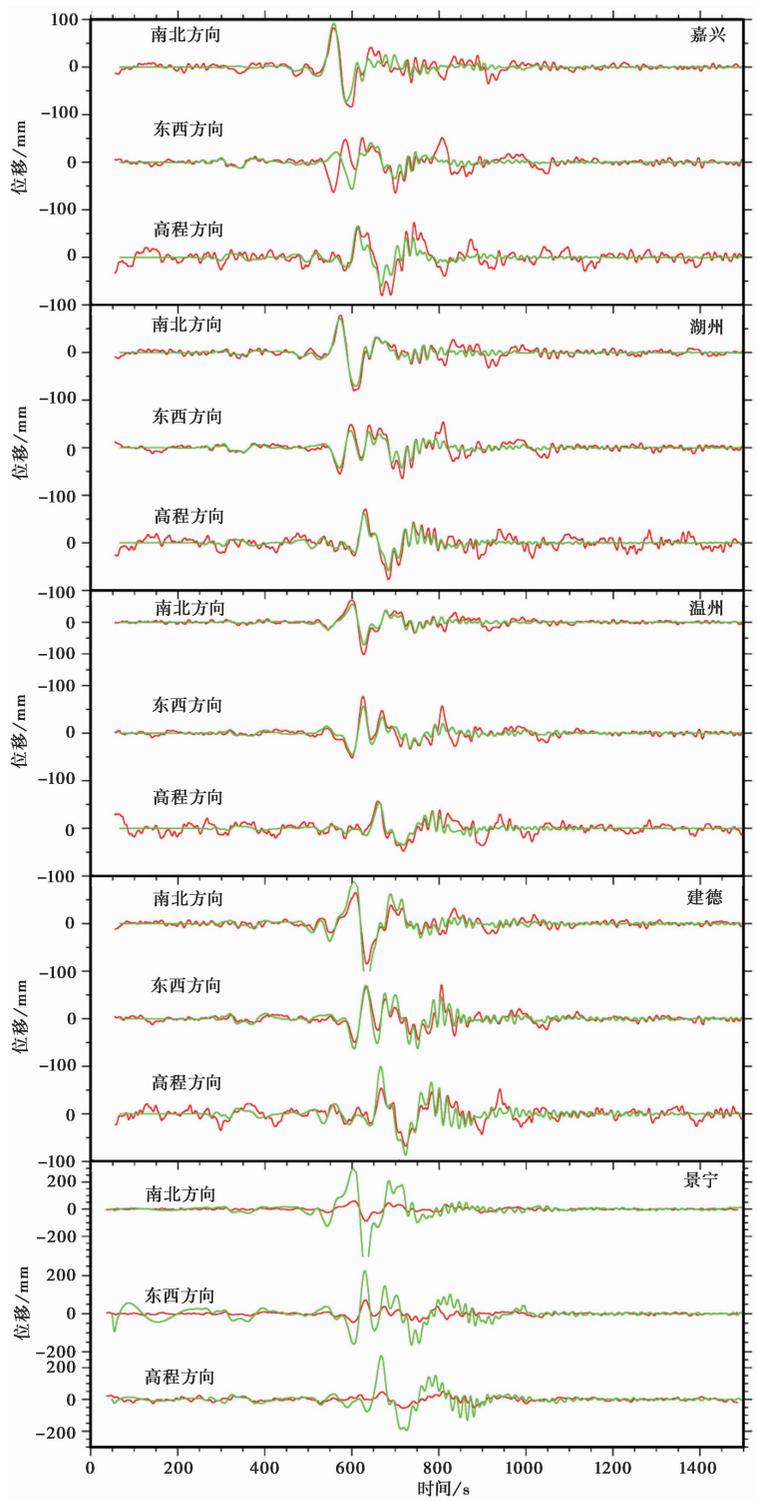


图 4 各台 GPS 与测震带通滤波后的位移时间序列对比
红色为 GPS 台;绿色为测震台

表 2 滤波前后 GPS 台与测震台时间序列相关系数

台站名	SN 方向		EW 方向		高程方向	
	原始系数	滤波后系数	原始系数	滤波后系数	原始系数	滤波后系数
嘉兴	0.58	0.82	0.28	0.29	0.22	0.75
湖州	0.64	0.89	0.63	0.86	0.18	0.78
温州	0.7	0.91	0.65	0.83	0.25	0.7
建德	0.66	0.91	0.62	0.81	0.21	0.71
景宁	0.77	0.9	0.57	0.76	0.26	0.69

使用 TRACK 计算得到的 GPS 东西和南北方向的误差分别约为 1.5cm, 高程为 4cm。由误差传播定律, GPS 位移的误差约为 4.5cm, 由 GPS 和测震的峰值地动位移(表 3)可以看出, 除景宁台由于测震仪器的限制外, 其余 4 个台站 GPS 和测震的 PGD 大致在 GPS 的观测误差范围内, 说明就日本 M_w 9.0 地震来说, GPS 和测震位移监测在 0.005~0.1Hz 频率内有较好的一致性。同时, 由于高频 GPS 方法具有量程无限制、误差不累计的优势, 能够弥补大震后地表位移监测的不足。

表 3 各台 GPS 和测震峰值地动位移 (PGD) 对比

台站名	PGD/cm		
	GPS	测震	两者差异
嘉兴	12	12	0
湖州	13	10	3
温州	12	10	2
建德	11	16	5
景宁	11	48	37

4 结论

本文使用 GAMIT 的 TRACK 模块对日本 2011 年 3 月 11 日 M_w 9.0 地震后浙江省内 5 个 GPS 和测震的并址台站进行分析, 除频带范围 1~40Hz 的景宁测震台及嘉兴测震台的 EW 向外, GPS 和测震位移的幅度和波形在东西、南北和高程 3 个方向均有较好的一致性。其次, 使用快速傅里叶变化对 5 个台站的 GPS 和测震位移时间序列进行频谱分析, 得出 GPS 和测震观测在 0.005~0.1Hz 频率较为一致, 因此使用 0.005~0.1Hz 的带通滤波对 GPS 和测震仪位移时间序列进行处理, 并进行相关系数和峰值地动位移的计算, 滤波后两者的相关系数均有较大提高, 除景宁台由于测震仪器的限制, 其余 4 个台站 GPS 和测震的 PGD 差异大致在 GPS 的观测误差范围内, 说明就本次地震来说, GPS 和测震位移监测在 0.005~0.1Hz 频率内具有一致性。

从观测特点上看, GPS 和地震学的观测跨越了地表最广泛的位移频率范围, 假设没有仪器漂移或倾斜, 在位移方面典型的地震仪比 GPS 仪器敏感许多数量级。通过本研究可以看出, 高频 GPS 观测噪声水平足够低, 能够记录远距离大事件的大部分表面波频谱; 在低频 (1Hz) 时, GPS 噪声水平大致与宽频带地震仪动态范围的上限一致。由于高频 GPS 可以较好地克服地震仪在大地震发生后的仪器限幅问题以及强震记录的旋转分量和基线漂移等问题, 具有量程无限制、误差不累计的优势, 能够弥补大震后地表位移监测的不足, GPS 和地震仪可以共同覆盖地震地表位移的整个可能范围。因此, 在地震日常观测中引入高频 GPS 和长期的 GPS 观测是非常必要的。

由于日本 M_w 9.0 地震属于巨大远震,对于中强地震中 GPS 与测震仪位移时间序列的对比还需要更多震例的研究。

致谢:本文图件使用开源软件 GMT 绘制,感谢中国大陆构造环境监测网络工程提供 GPS 观测数据。

参考文献

- 陈锋,杨建思,王伟平等,2019. 基于高频 GPS 峰值地动位移的震级标度探讨. 中国地震,35(1):25~37.
- 黄勇,杨少敏,乔学军,等,2017. 高频 GPS 测定的尼泊尔 M_w 7.8 和 M_w 7.3 地震震时地表动态变形过程. 大地测量与地球动力学,37(3):221~223,229.
- 李强,陈鑫连,张祖胜,等,2013. 地壳运动监测技术规程. 地壳运动监测工程研究中心,北京:中国环境出版社.
- 刘刚,杨少敏,师宏波,等,2017. 2015 年尼泊尔地震破裂过程的统一模型. 地球物理学报,60(7):2663~2679.
- 单新建,尹昊,刘晓东,等,2019. 高频 GNSS 实时地震学与地震预警研究现状. 地球物理学报,62(8):3043~3052.
- 殷海涛,肖根如,张磊,等,2012. TRACK 高频 GPS 定位中震时参考站的选取方法. 大地测量与地球动力学,32(4):15~19.
- 尹昊,单新建,张迎峰,等,2018. 高频 GPS 和强震仪数据在汶川地震参数快速确定中的初步应用. 地球物理学报,61(5):1806~1816.
- Teunissen P J G, Kleusberg A, 1998. GPS for Geodesy. 2nd ed. Berlin:Springer.

Comparison between High Frequency GPS Deformation Wave and Seismic Wave of Japan Great Earthquake

Gong Jun Wang Zhenjie Zeng Liping

Zhejiang Earthquake Agency, Hangzhou 310013, China

Abstract High frequency GPS dynamic monitoring is capable of quickly calculating the surface displacement in quasi real time, which is helpful in supplement to the traditional seismology in the aspects of rapid determination of seismic parameters, short-term variation process of crustal deformation, focal rupture process and magnitude scaling. Based on the 1Hz GPS data in Zhejiang Province, we obtained the displacement time series of the M_w 9.0 earthquake in Japan on March 11, 2011 by using the track module of GAMIT. Then we compared the displacement signals obtained by the seismometers observed by the seismic network of Zhejiang Province with that from the displacement time series of GPS data. The results show that the difference between the peak ground motion displacement obtained by high frequency GPS and seismometer is within the range of GPS observation error. In the frequency range of 0.005~0.1Hz, the correlation coefficient of the two waveforms in horizontal direction is increased by more than 50%, and that in elevation direction is increased by more than 2 times. The results suggest that the observation of high frequency GPS and broadband seismometer overlaps each other in time sequence and frequency spectrum, and GPS and seismograph can cover the whole possible range of earthquake surface displacement.

Keywords: Japan M_w 9.0 earthquake; High frequency GPS; TRACK; Peak ground motion displacement