



北斗三号与超高频 GNSS 同震形变监测:以 2021年青海玛多 Mw 7.4地震为例

柴海山¹ 陈克杰¹ 魏国光¹ 方荣新² 邹蓉³ 祝会忠⁴

1 南方科技大学地球与空间科学系,广东 深圳,518055

2 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

3 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉,430074

4 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院,辽宁 阜新,123000

摘要:随着北斗三号完成全球组网以及硬件技术发展,地壳形变监测网络的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机正朝着多系统、超高频(≥ 50 Hz)更新升级。基于陆态网络和中国青海省连续运行参考站的GNSS观测数据,获取2021年青海玛多Mw 7.4地震的同震位移波,并进行了震前精度统计和功率谱密度分析。结果表明,北斗三号在本次地震中的位移拾取精度比全球定位系统(global positioning system, GPS)更优;采样率提高到50 Hz对削弱位移时间序列混叠效应作用不显著,在10 Hz左右达到饱和;对50 Hz同震位移波差分获取到的速度和加速度序列噪声较大,难以利用。综合应用场景和成本考虑,GNSS地震监测的采样率最高设置在5~10 Hz即可。

关键词:北斗三号;超高频GNSS;同震形变;玛多地震

中图分类号:P237

文献标志码:A

实时高频(≥ 1 Hz)的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)可以克服地震仪饱和效应和强震仪基线偏差^[1-2],在同震形变监测领域得到广泛应用^[3-7],因此GNSS地震学这一交叉学科应运而生^[8]。由于全球定位系统(global positioning system, GPS)建成时间最早、使用最广泛、表现最成熟,GNSS地震学在一段时间内多特指GPS。随着GLONASS、北斗三号、Galileo的建设发展^[9-10],GNSS多系统组合在同震形变监测中精度更高、稳定性更好、震源参数反演更可靠^[11-14]。2020年6月,北斗三号完成全球组网,文献[15]使用振动平台进行了一系列模拟实验,证实了北斗三号和Galileo对地震位移拾取的积极作用,但北斗三号在天然地震中的应用报道尚不多见。

随着硬件和储存技术的发展,当前GNSS接收机采样率已越来越接近地震仪和强震仪,可达到50~100 Hz^[16-18](本文称之为超高频),中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网络)的GNSS

测站也已普遍升级,可提供50 Hz的观测记录^[19]。但是目前仍有许多国家的GNSS同震形变观测网以1 Hz、5 Hz为主流,如美国的板块边界观测网络(plate boundary observatory, PBO),仅部分站可达10 Hz^[20]。虽然提高采样率有利于削弱位移时间序列的混叠效应^[20-21],也存在获得超高采样率的速度、加速度序列的可能性^[22-23],使GNSS接收机实现类似强震仪、地震仪的作用,但同时也极大地增加了数据储存、管理、计算的成本。

北京时间2021-05-22T02:04:11青海玛多发生了Mw 7.4地震(<https://news.ceic.ac.cn/>),其同震过程被附近的陆态网络和当地的连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)记录^[24-27]。本文以此次地震为例,研究多系统组合同震位移拾取的精度,分析北斗三号的地表位移拾取性能,并且针对GNSS地震监测采样率设置存在的一些争议^[8,20,28],测试超高频数据获取同震位移、速度、加速度的性能,分析是否有必要将采样率提升至50 Hz。

收稿日期:2022-05-17

项目资助:国家自然科学基金(42074024);中国科协青年人才托举工程。

第一作者:柴海山,硕士生,主要研究方向为GNSS数据处理及其应用。12032535@mail.sustech.edu.cn

通讯作者:陈克杰,博士,助理教授。chenkj@sustech.edu.cn

1 数据和方法

1.1 GNSS 数据与处理方法

本文选取了震中附近 7 个陆态网络参考站(平均距离约 280 km),获取 2021 年玛多 Mw 7.4 地震的 1 Hz 同震位移进行分析,如图 1 所示。其中 G 表示 GPS, R 表示 GLONASS, E 表示 Galileo, C2 表示北斗二号, C3 表示北斗三号, C2+3 表示北斗二号和北斗三号组合,其他字母组合含义类似。图 1(b)中的位移波从上到下按照测站到震中的距离排序,均可见明显同震信号。现阶段陆

态网络中绝大部分参考站支持 GRC2 三系统,部分参考站支持 GREC2 四系统。2021 年玛多地震发生时,陆态网络附近参考站尚不支持北斗三号,为了开展相关研究,本文选取了中国青海省 CORS 站中的 QSHZ 站观测数据,该站可观测包括北斗三号在内的四大卫星导航系统,其观测数据详细的信息见表 1。本文所涉及的 GNSS 数据均采用 PANDA 软件^[29-31]进行计算,其精密单点定位(precise point positioning, PPP)功能可以处理高达 50 Hz 的数据^[32],处理策略和参数设置见表 2。

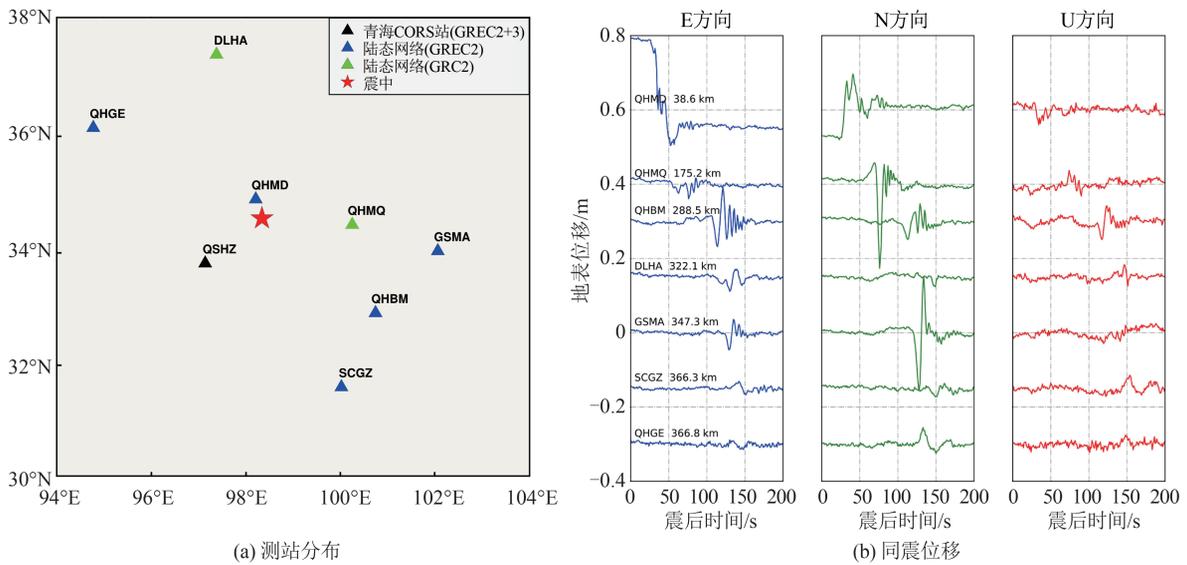


图 1 2021 年玛多 Mw 7.4 地震的测站分布及同震位移

Fig. 1 Distribution of GNSS Stations and Coseismic Displacement of the 2021 Maduo Mw 7.4 Earthquake

表 1 GNSS 数据信息

Tab.1 Information of GNSS Data

数据来源	测站个数	GNSS 采样率/Hz	接收机型号	卫星系统
陆态网络参考站	7	1,50	Trimble NetR9	GRC2, GREC2
青海省 QSHZ 站	1	1	中海达 VNet8	GREC2+3

表 2 PPP 处理策略和参数设置

Tab.2 Processing Strategy and Parameters Setting of PPP

策略与参数	具体描述
组合方式	无电离层组合
截止高度角/(°)	7
观测值定权	高度角加权, 伪距、载波先验误差: 0.6 m、0.01 周
系统定权	G:R:E:C2:C3=1.5:1:1.5:1:1.5
估计方式	最小二乘
天线改正	IGS14.atx
周跳探测	Turboedit
地球自转参数	IGS EOP
对流层估计	Saastamoinen 模型+分段线性估计
精密星历/钟差	CODE: 30 s 钟差, 15 min 轨道(GREC2+3)

在处理陆态网络和青海省 QSHZ 站 1 Hz 数据时,考虑到卫星钟差在 30 s 范围内高频抖动并不剧烈,对于 1 s 采样率的 GNSS 数据,使用 5 s 间隔钟差与 30 s 间隔钟差获得的精度基本一致^[33],故选择欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)提供的 30 s 钟差和 15 min 精密星历产品。

通过 PPP 获取位移时间序列后,对其进行一阶离散差分便可获得速度序列,再对速度差分可获得加速度序列,计算式为:

$$v_i = \frac{s_{i+1} - s_{i-1}}{2t} \quad (1)$$

$$a_i = \frac{v_{i+1} - v_{i-1}}{2t} \quad (2)$$

式中, s 、 v 、 a 分别表示位移、速度、加速度; i 表示历元; t 表示时间间隔。

1.2 强震仪数据与处理方法

为了研究超高频 GNSS 差分获取速度和加速度的能力,本文选择 QHMQ 站及其附近 2 km 内的一个强震仪测站 DAW63 进行比较,

DAW63 与 QHMQ 具有高度相关性,可提供采样率为 200 Hz 的加速度序列。通过对原始加速度序列积分可获得速度序列,但由于基线偏差的存在,此时的速度序列包含线性漂移,以 4 阶巴特沃斯高通滤波的方式去除速度序列中频率在 0.02 Hz 以下的低频信号,再次积分即可得到地表形变。以上数据处理过程与经验基线自动校正方法^[34]有一定区别,会对静态同震位移造成一定的削弱,但考虑到本文重点关注高频同震位移波且 QHMQ 站静态同震位移较小,上述处理方法是合理的。

2 结果和分析

2.1 北斗二号/GNSS 高频同震位移拾取

为了分析陆态网络测站 1 Hz 数据同震位移拾取精度,计算 2021-05-21T13:00—18:00 共计 5 h 震前时间序列与功率谱密度,出于篇幅考虑,图 2 仅展示 SCGZ 单站的时间序列和各测站的平均功率谱密度。

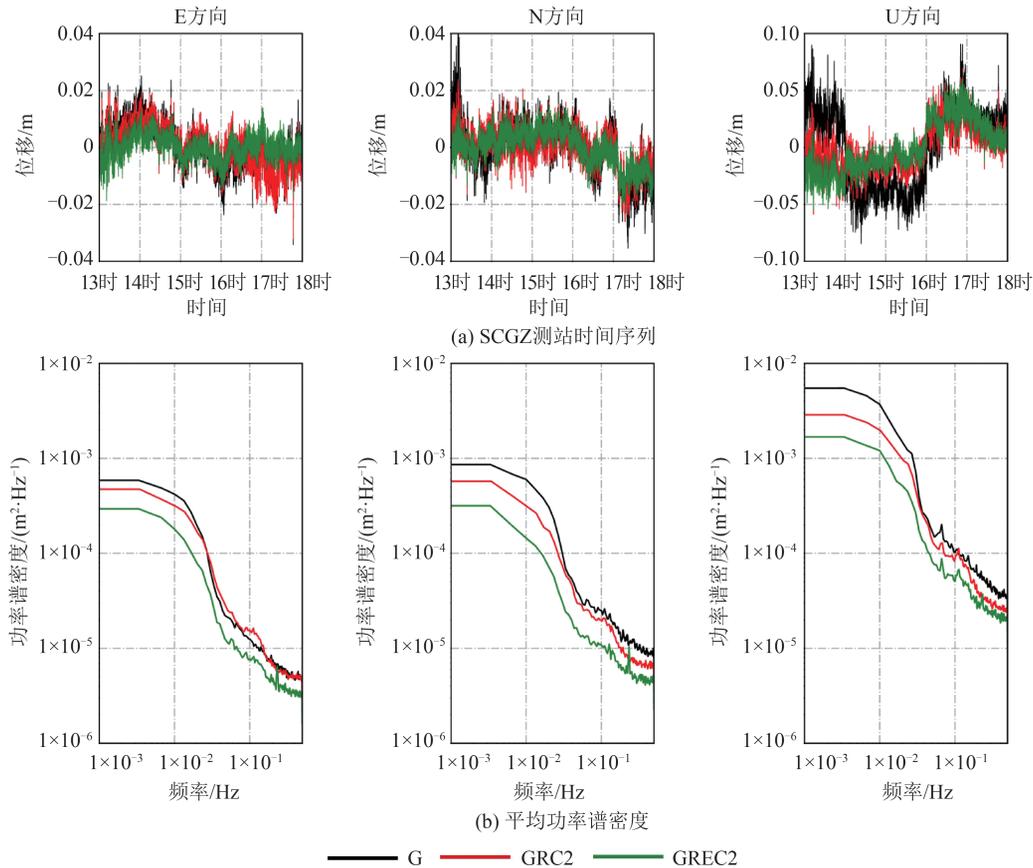


图2 SCGZ测站时间序列和各测站平均功率谱密度

Fig.2 Time Series at SCGZ Station and Average Power Spectrum Density of All Stations

由图 2(a)可以直观看出,SCGZ 单站的多系统组合(GRC2)相较于单系统 G 能够在一定程度

上削弱低频噪声和跳变,使地表形变拾取更加稳健可靠。由图 2(b)可以看出,各测站的 U 方向功

率谱密度较大,在任意频段均要高于 E、N 方向。随着系统数目的增加,各频段噪声普遍明显减弱,GREC2 相比 GRC2 效果更好。单系统 G 在 E 方向噪声与 GRC2 差异不大,甚至部分频段噪声更低,但 GREC2 仍然表现最好。高频段出现个别峰值的原因在于位移时间序列存在一定的跳变,而这些跳变可能是由精密钟差的高频钟跳所导致。

计算不同系统时间序列的标准差并作站间平均,结果见表 3。单系统 G 在 E、N 方向的标准差均值约为 1 cm,U 方向约为 4 cm,主要是因为受卫星几何构型和多路径效应等影响,U 方向误差较大。GRC2 三系统组合相比于单系统 G,在 E、N、U 方向上的精度分别提升了 14%、42%、56%,GREC2 四系统组合相比于单系统 G,在 E、N、U 方向上的精度分别提升了 17%、47%、57%,印证了多系统组合的优越性。

表 3 不同系统时间序列的标准差均值 /mm

Tab.3 Average Standard Deviation of Time Series of Different Systems /mm

系统	E 方向	N 方向	U 方向
G	9.4	12.4	39.1
GRC2	8.1	7.1	17.0
GREC2	7.8	6.5	16.8

2.2 北斗三号/GNSS 高频同震位移拾取

北斗二号虽然在亚太地区卫星数与 GPS 相当,但其包含若干颗地球同步轨道(geosynchronous earth orbit,GEO)卫星,几何构型较差,对定位精度提升有限,单独采用北斗二号并不能取得良好的同震位移拾取效果。随着北斗三号的全面建成,这一情况得到了极大改善。

对青海省 QSHZ 站进行 PPP 解算,截取与 §2.1 相同的时段进行时间序列分析,并计算了不同系统组合时间序列的标准差,结果见表 4。QSHZ 站震前时间序列的功率谱密度如图 3 所示。

表 4 QSHZ 测站不同系统时间序列标准差 /mm

Tab.4 Standard Deviation of Time Series of Different Systems at QSHZ Station /mm

系统	E 方向	N 方向	U 方向
G	9.2	9.5	43.6
E	7.5	10.4	19.6
C2+3	5.3	5.4	18.1
GREC2	4.8	5.4	16.2
GREC2+3	3.4	4.7	12.4

由图 3(a)可以看出,附加北斗三号的四系统组合精度最高,相较于单 GPS 定位结果,其在 E、N、U 方向上的精度均有显著提高。单 GPS 结果受到几何构型、多路径效应等影响,难以单独提供稳定的时间序列,尤其是在 N 方向末段和 U 方向上结果较差,此部分误差和 SCGZ 测站较为相似,说明误差的起因更多在于卫星几何构型较差。就单系统而言,随着北斗三号的建成,北斗系统不仅可以单独实现同震位移监测,而且在单系统中效果最佳,其原因在于地震发生在亚太地区,北斗可观测卫星数更多,几何结构更好,且北斗三号搭载的原子钟更稳定,随着北斗三号系统的加入,同震形变的噪声能进一步得到削弱,提高了拾取精度和可靠性;从此时段结果来看,Galileo 高频噪声较大,但低频噪声要低于 GPS。由此可知,单系统受制于卫星几何构型等因素,其时间序列不如多系统稳健,采用多系统组合的方式对同震位移拾取有重要意义。

由图 3(b)可以看出,QSHZ 测站震前时间序列的功率谱密度的基本特征与陆态网络平均功率谱密度一致。单系统之间相比,北斗在各频段的噪声均为最低;Galileo 次之,且在 0.1 Hz 频段及以上噪声略大;GPS 低频噪声水平最大,不够稳定,对应了图 3(a)中 N 方向末段和 U 方向的结果,四系统组合的噪声水平相比于单系统 GPS 在任意频段均有大幅削弱。以上结果表明,北斗不仅能单独实现高精度定位,且相比于 GPS 和 Galileo 噪声更小;在加入北斗三号后,GREC2+3 的噪声相对于 GREC2(代表现阶段陆态网络的普遍配置)在各个频段均有明显降低,时间序列稳定性进一步上升,说明北斗三号可以对同震位移拾取做出重要贡献。

2.3 陆态网络超高频位移/速度/加速度拾取

以 QHMQ 和 DAW63 为例,设置一系列采样率(1 Hz、2 Hz、5 Hz、10 Hz、25 Hz、50 Hz),获得相应的同震位移、速度和加速度序列。考虑到 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震为走滑型地震,以 E、N 方向的位移为主导,且 GNSS 在 U 方向的精度较差,本文重点研究 E 方向和 N 方向,GNSS 与强震仪结果比较如图 4 所示。为保证超高频处理结果的可靠性,将钟差间隔提升至 5 s,选用武汉大学提供的 5 s 钟差以及 15 min 轨道计算,GRC2 三系统参与运算,其余策略和表 2 一致。

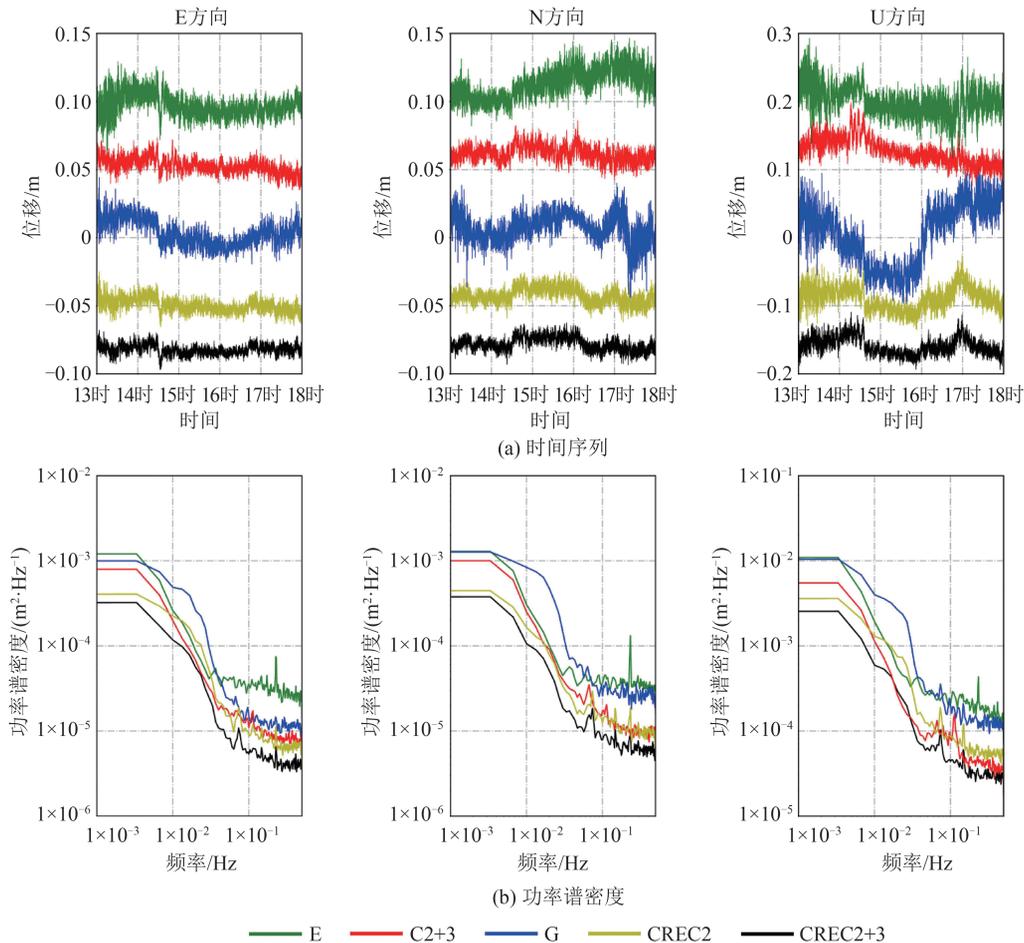


图3 QSHZ测站的时间序列和功率谱密度

Fig.3 Time Series and Power Spectrum Density at QSHZ Station

对图4进行分析可得如下结论:

1)就位移拾取而言,GNSS和强震仪在E、N方向上的位移拾取保持高度一致性;混叠效应随采样率提升而削弱,在5~10 Hz处达到饱和;N方向相比于E方向振幅更大,混叠效应整体较弱,50 Hz和1 Hz相比结果无明显改善。

2)就速度拾取而言,差分噪声随着采样率的提升而增强,但同时混叠效应减弱;GNSS在N方向的2~5 Hz与强震仪保持了较好的一致性,但在E方向效果一般,原因在于N方向比E方向振幅更大,故速度序列噪声整体要更小;速度差分效果随振幅增大而改善,这表明GNSS更适合于近场以及大型地震监测。

3)就加速度拾取而言,通过二次差分获得的结果始终未取得良好效果;在10 Hz时达到了强震仪的量级,但符合程度较差;随着采样率提升,噪声水平持续增强,有效信号被掩盖。

对于其他震级的地震是否能得出类似结论有待进一步研究,值得注意的是,受限于定位精度,GNSS对中小型地震同震位移的拾取能力较

弱,需要缩短测站与震中距离以实现更好的观测效果。

为了进一步研究超高频数据对时间序列存在的混叠效应的削弱,选择3个与震中距离不同且具有代表性的测站QHMD(38 km)、QHMQ(175 km)和QHGE(366 km)进行功率谱密度分析,分析时段为2021-05-21T17:00—20:00(包含同震形变),结果如图5所示。由图5可以看出,随着采样率提升,高频段的混叠效应逐渐被削弱,在采样率达到10 Hz时饱和;继续提高采样率并不能进一步削弱混叠效应,这一特点在E、N方向上一致,在距震源远近不同的测站也表现一致;同震形变反映在0.01~0.1 Hz处的峰值,N方向较E方向形变更大,故功率谱密度的峰值更高。

综上所述,50 Hz超高频数据未能显著削弱时间序列存在的混叠效应,其效果与5 Hz、10 Hz接近;在振幅达到分米级时,通过差分的方式可以获得较高精度的速度序列;二次差分获取加速度较为困难,难以取得良好的效果。

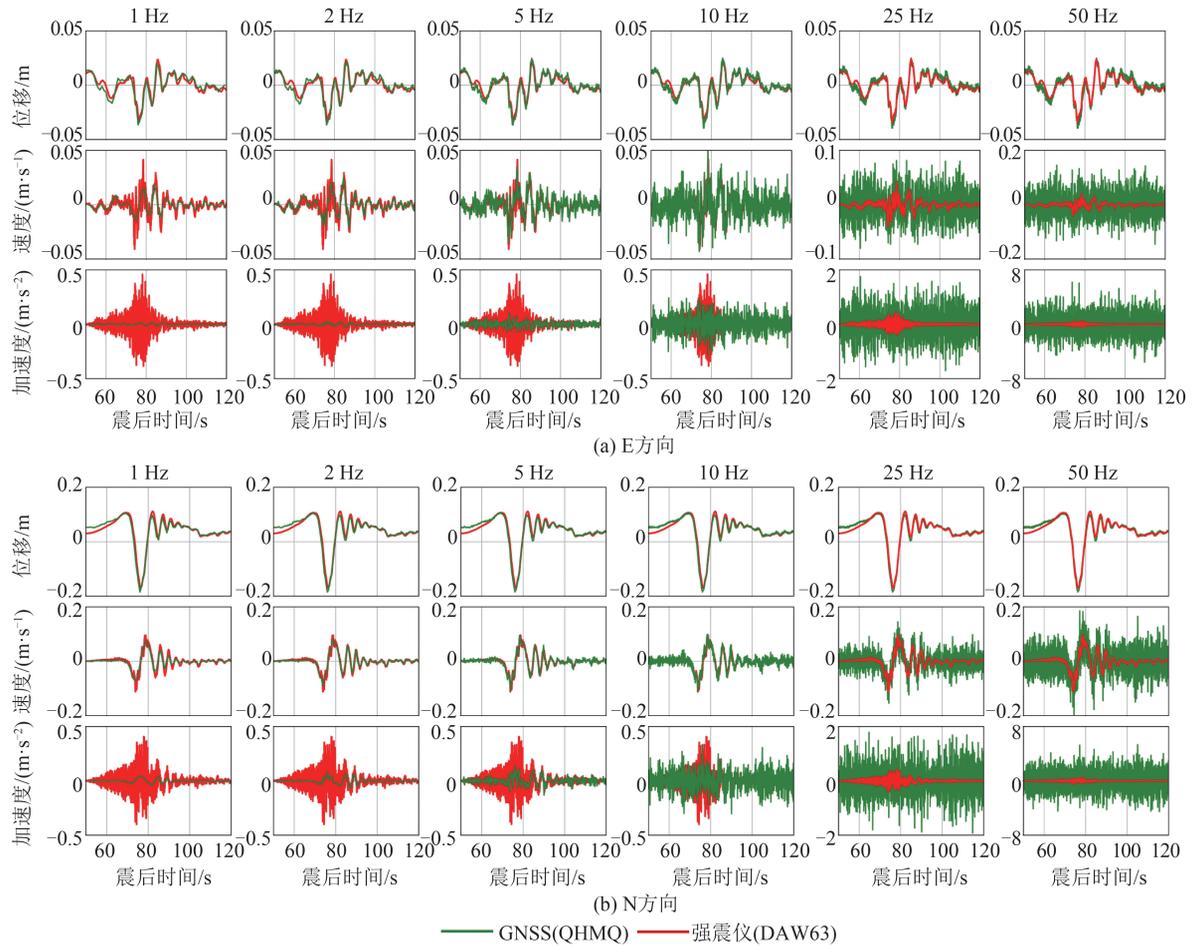


图 4 QHMQ 站与 DAW63 站的同震位移、速度和加速度

Fig.4 Coseismic Deformation, Velocity and Acceleration at QHMQ and DAW63 Stations

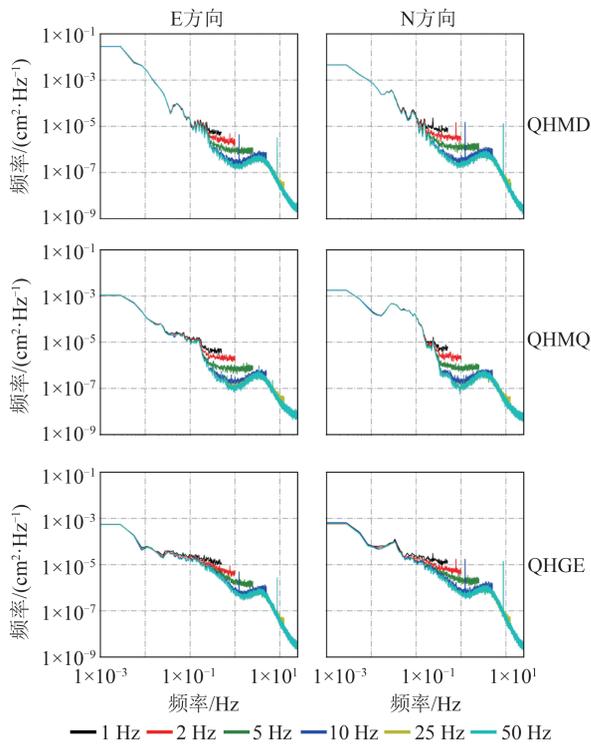


图 5 各采样率的时间序列功率谱密度

Fig.5 Power Spectrum Density of Time Series with Different Sampling Rates

3 结 语

本文以 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震为例,研究了 GNSS 多系统组合,尤其是北斗三号对地表位移拾取精度的提升,还分析了 50 Hz 超高频数据拾取位移、速度、加速度的能力,得到如下结论:

1) 多系统组合对于削弱低频多路径噪声、提高位移拾取稳定性有显著作用。融入了北斗三号的 GREC2+3 四系统组合效果最优,在 E、N、U 方向上的精度分别达到了 3.4 mm、4.7 mm、12.4 mm,相较于 GREC2 的组合方式分别提高了 29%、13%、23%。

2) 对 2021 年玛多地震设置 1~50 Hz 内多个采样率,位移序列混叠效应的削弱在 5~10 Hz 时达到饱和;采样率在 5 Hz 时差分速度序列效果最佳;在 1~50 Hz,通过二次差分获取加速度的效果均不理想;超高频 GNSS 在同震位移监测中的作用需要进一步挖掘。

3) 将采样率提升到 50 Hz,增大了数据运算、

储存、管理的成本(数据量约20 GB/站/天),既未能显著削弱混叠效应,也难以提供有效的超高频速度、加速度序列。5~10 Hz已经能满足大部分场景的需求,加密基准站或升级原有接收机使其可观测北斗三号卫星,将会取得更好的同震形变监测效果。

致谢:感谢陆态网络和青海省 CORS 站提供 GNSS 数据,中国地震局工程力学研究所提供强震仪数据,欧洲定轨中心(<https://www.aiub.unibe.ch/>)和武汉大学 IGS 分析中心(<http://www.igs.gnsswhu.cn/>)提供精密轨道钟差产品;感谢柏林工业大学的纪润博士在 PANDA 软件使用方面给予指导;本文在数据预处理过程中使用了 GFZRNX 程序。

参 考 文 献

- [1] Bock Y, Prawirodirdjo L, Melbourne T I. Detection of Arbitrarily Large Dynamic Ground Motions with a Dense High-Rate GPS Network [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(6): 1-4
- [2] Trifunac M D, Todorovska M I. Evolution of Accelerographs, Data Processing, Strong Motion Arrays and Amplitude and Spatial Resolution in Recording Strong Earthquake Motion [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 21(6): 537-555
- [3] Bock Y, Melgar D, Crowell B W. Real-Time Strong-Motion Broadband Displacements from Collocated GPS and Accelerometers [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(6): 2904-2925
- [4] Chen K J, Ge M R, Babeyko A, et al. Retrieving Real-Time Co-Seismic Displacements Using GPS/GLONASS: A Preliminary Report from the September 2015 Mw 8.3 Illapel Earthquake in Chile [J]. *Geophysical Journal International*, 2016, 206(2): 941-953
- [5] Li X X, Ge M R, Zhang X H, et al. Real-Time High-Rate Co-Seismic Displacement from Ambiguity-Fixed Precise Point Positioning: Application to Earthquake Early Warning [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(2): 295-300
- [6] Avallone A, Marzario M, Cirella A, et al. Very High Rate (10 Hz) GPS Seismology for Moderate-Magnitude Earthquakes: The Case of the Mw 6.3 L'Aquila (Central Italy) Event [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B2): B02305
- [7] Geng T, Xie X, Fang R X, et al. Real-Time Capture of Seismic Waves Using High-Rate Multi-GNSS Observations: Application to the 2015 Mw 7.8 Nepal Earthquake [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(1): 161-167
- [8] Larson K M. GPS Seismology [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(3/4): 227-233
- [9] Yang Y X, Mao Y, Sun B J. Basic Performance and Future Developments of BeiDou Global Navigation Satellite System [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 1
- [10] Wu W W, Guo F, Zheng J Z. Analysis of Galileo Signal-in-Space Range Error and Positioning Performance During 2015-2018 [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 6
- [11] Geng J H, Jiang P, Liu J N. Integrating GPS with GLONASS for High-Rate Seismogeodesy [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(7): 3139-3146
- [12] Li X X, Zheng K, Li X, et al. Real-Time Capturing of Seismic Waveforms Using High-Rate BDS, GPS and GLONASS Observations: The 2017 Mw 6.5 Jiuzhaigou Earthquake in China [J]. *GPS Solutions*, 2018, 23(1): 1-12
- [13] Xu P L, Shu Y M, Niu X J, et al. High-Rate Multi-GNSS Attitude Determination: Experiments, Comparisons with Inertial Measurement Units and Applications of GNSS Rotational Seismology to the 2011 Tohoku Mw 9.0 Earthquake [J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(2): 024003
- [14] Geng J, Pan Y, Li X, et al. Noise Characteristics of High-Rate Multi-GNSS for Subdaily Crustal Deformation Monitoring [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2018, 123(2): 1987-2002
- [15] Fang R X, Lv H H, Shu Y M, et al. Improved Performance of GNSS Precise Point Positioning for High-Rate Seismogeodesy with Recent BDS-3 and Galileo [J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(8): 3255-3267
- [16] Genrich J F, Bock Y. Instantaneous Geodetic Positioning with 10-50 Hz GPS Measurements: Noise Characteristics and Implications for Monitoring Networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2006, 111(B3): 1-12
- [17] Yi T H, Li H N, Gu M. Experimental Assessment of High-Rate GPS Receivers for Deformation Monitoring of Bridge [J]. *Measurement*, 2013, 46(1): 420-432
- [18] Xu P L, Shi C, Fang R X, et al. High-Rate Precise Point Positioning (PPP) to Measure Seismic Wave Motions: An Experimental Comparison of GPS PPP with Inertial Measurement Units [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4): 361-372

- [19] Fang Rongxin. High-Rate GPS Data Non-Difference Precise Processing and Its Application on Seismology [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010 (方荣新. 高采样率 GPS 数据非差精密处理方法及其在地震学中的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010)
- [20] Smalley R. High-Rate GPS: How High do We Need to Go? [J]. *Seismological Research Letters*, 2009, 80(6): 1054-1061
- [21] Liu Gang, Nie Zhaosheng, Jia Zhige, et al. Simulation Experiment on the Aliasing of High Rate GNSS Used for Earthquake Monitoring[J]. *Journal of Seismological Research*, 2017, 40(2): 186-192 (刘刚, 聂兆生, 贾治革, 等. 高频 GNSS 地震监测中频率混叠现象的仿真实验研究[J]. 地震研究, 2017, 40(2): 186-192)
- [22] Li M, Huang D F, Yan L, et al. Quasi-Real Time Determination of 2013 Lushan Mw 6.6 Earthquake Epicenter, Trigger Time and Magnitude Using 50 Hz GPS Observations[C]// China Satellite Navigation Conference (CSNC), Nanjing, China, 2014
- [23] Xu P L, Du F, Shu Y M, et al. Regularized Reconstruction of Peak Ground Velocity and Acceleration from very High-Rate GNSS Precise Point Positioning with Applications to the 2013 Lushan Mw 6.6 Earthquake[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(1): 1-22
- [24] Li Zhicai, Ding Kaihua, Zhang Peng, et al. Coseismic Deformation and Slip Distribution of 2021 Mw 7.4 Madoi Earthquake from GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1489-1497 (李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS 观测的 2021 年青海玛多地震 (Mw 7.4) 同震形变及其滑动分布[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(10): 1489-1497)
- [25] Jiang Weiping, Xu Caijun, Li Zhiwei, et al. Using Space Observation Techniques to Study Temporal and Spatial Characteristics of Seismogenic Process, Occurrence and Deformation of the Qinghai Madoi Mw 7.4 Earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 495-508 (姜卫平, 许才军, 李志伟, 等. 利用空间观测技术研究青海玛多 7.4 级地震孕育发生变形时空特征[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 495-508)
- [26] Wang Dijin, Wang Dongzhen, Zhao Bin, et al. 2021 Qinghai Madoi Mw 7.4 Earthquake Coseismic Deformation Field and Fault-Slip Distribution Using GNSS Observations [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 537-551 (王迪晋, 王东振, 赵斌, 等. 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震 GNSS 同震形变场及其断层滑动分布[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 537-551)
- [27] Yu Pengfei, Xiong Wei, Chen Wei, et al. Slip Model of the 2021 Ms 7.4 Madoi Earthquake Constrained by GNSS and InSAR Coseismic Deformation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2): 509-522 (余鹏飞, 熊维, 陈威, 等. 基于 GNSS 和 InSAR 约束的 2021 年玛多 Ms 7.4 地震同震滑动分布及应用[J]. 地球物理学报, 2022, 65(2): 509-522)
- [28] Lou Y D, Zhang W X, Shi C, et al. High-Rate (1-Hz and 50-Hz) GPS Seismology: Application to the 2013 Mw 6.6 Lushan Earthquake [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 79: 426-431
- [29] Shi C, Zhao Q L, Geng J H, et al. Recent Development of PANDA Software in GNSS Data Processing [C]// International Conference on Earth Observation Data Processing and Analysis (ICEODPA), Wuhan, China, 2008
- [30] Geng Tao, Zhao Qile, Liu Jingnan, et al. Real-Time Precise Point Positioning Based on PANDA Software [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(4): 312-315 (耿涛, 赵齐乐, 刘经南, 等. 基于 PANDA 软件的实时精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 312-315)
- [31] Fang Rongxin, Shi Chuang, Song Weiwei, et al. Real-Time GNSS Seismometer and Its Accuracy [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(2): 450-458 (方荣新, 施闯, 宋伟伟, 等. 实时 GNSS 地震仪系统实现及精度分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(2): 450-458)
- [32] Fang Rongxin, Shi Chuang, Chen Kejie, et al. GPS Seismometer: PANDA Software Testing Results and Validation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 453-456 (方荣新, 施闯, 陈克杰, 等. GPS 地震仪: PANDA 软件测试结果与验证[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(4): 453-456)
- [33] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Xingxing. Impact of Sample Rate of IGS Satellite Clock on Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(2): 152-155 (张小红, 郭斐, 李星星. IGS 卫星钟差产品采样间隔对 PPP 精度的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(2): 152-155)
- [34] Wang R, Schurr B, Milkereit C, et al. An Improved Automatic Scheme for Empirical Baseline Correction of Digital Strong-Motion Records [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(5): 2029-2044

Coseismic Deformation Monitoring Using BDS-3 and Ultra-High Rate GNSS: A Case Study of the 2021 Maduo Mw 7.4 Earthquake

CHAI Haishan¹ CHEN Kejie¹ WEI Guoguang¹ FANG Rongxin²
ZOU Rong³ ZHU Huizhong⁴

¹ Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

² Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China

³ Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences(Wuhan), Wuhan 430074, China

⁴ School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: Objectives: With the completion of BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3) and the development of hardware technology, global navigation satellite system (GNSS) receivers in crustal deformation monitoring network are upgraded towards multi-system and ultra-high rate (≥ 50 Hz). We aim to study the contribution of BDS-3 and multi-GNSS to coseismic deformation collection and the potential of ultra-high rate GNSS to attenuate the aliasing effect and obtain velocity and acceleration series by using difference methods. **Methods:** Based on GNSS observation data from the crustal movement observation network of China and continuously operating reference stations in Qinghai Province, we study the 2021 Maduo Mw 7.4 earthquake and obtain coseismic deformation at the nearby stations through kinematic precise point positioning (PPP). Time series before the earthquake are analyzed by time-domain and frequency-domain, namely standard deviation and power spectrum density (PSD). **Results:** The results show that the accuracy of BDS-3 is about 5 mm horizontally and 18 mm vertically. The accuracy of the multi-GNSS, including GPS, GLONASS, Galileo, BDS-2 and BDS-3, can reach 4 mm horizontally and 12 mm vertically. The results of PSD show that multi-GNSS can contribute to attenuate noise at most frequency and BDS have the lowest noise among all the four systems. Velocity series perform the best at a range of 5–10 Hz, while no acceleration is available at any rate. **Conclusions:** The accuracy of displacement obtained by BDS including BDS-3 is better than that of GPS in this earthquake. The observation of 50 Hz cannot significantly weaken the aliasing effect which reaches saturation at about 10 Hz. The ultra-high rate velocity and acceleration series obtained by difference method are too noisy for usage. The maximum sampling rate of GNSS seismic monitoring can be set at 5–10 Hz which represents a good trade-off between effect and cost.

Key words: BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3); ultra-high rate GNSS; coseismic deformation; Maduo earthquake

First author: CHAI Haishan, postgraduate, specializes in GNSS data processing and geoscience application. E-mail: 12032535@mail.sustech.edu.cn

Corresponding author: CHEN Kejie, PhD, assistant professor. E-mail: chenkj@sustech.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42074024); the Young Talent Promotion Project of China Association for Science and Technology.

引文格式: CHAI Haishan, CHEN Kejie, WEI Guoguang, et al. Coseismic Deformation Monitoring Using BDS-3 and Ultra-High Rate GNSS: A Case Study of the 2021 Maduo Mw 7.4 Earthquake[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(6):946-954. DOI:10.13203/j.whugis20220140(柴海山, 陈克杰, 魏国光, 等. 北斗三号与超高频 GNSS 同震形变监测: 以 2021 年青海玛多 Mw 7.4 地震为例[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(6):946-954. DOI:10.13203/j.whugis20220140)