

张怀, 聂兆生, 刘刚, 等. 2023. 高频 BDS/GPS 融合 PPP 确定 2021 年玛多 M_w 7.4 地震三要素[J]. 地震研究, 46(2): 216–225, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0026.

Zhang H, Nie Z S, Liu G, et al. 2023. Determination of three parameters of the 2021 Maduo M_w 7.4 earthquake using high-rate BDS/GPS[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(2): 216–225, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0026.

高频 BDS/GPS 融合 PPP 确定 2021 年 玛多 M_w 7.4 地震三要素*

张怀¹, 聂兆生^{1♣}, 刘刚¹, 熊维¹, 倪乙鹏¹, 黄军²

(1. 中国地震局地震研究所, 湖北武汉 430071; 2. 黑龙江省地质矿产实验测试研究中心, 黑龙江哈尔滨 150036)

摘要: 基于 GREAT 程序, 利用 GPS 和 BDS/GPS 融合 PPP (精密单点定位) 获取了 2021 年玛多 M_w 7.4 地震 10 个高频 GNSS 测站的地震时间序列, 并通过历元间差分法获得了震前 30 min 的速度时间序列。分析发现, 相对于 GPS, BDS/GPS 速度时间序列在东西、北南、垂直 3 个方向的精度分别提高了 14.8%、15.2% 和 3.5%。利用 STA/LTA (短时窗平均/长时窗平均) 方法, 从各测站 GPS 和 BDS/GPS 时间序列中提取了地震波初至时刻; 利用 2 种时间序列计算得到的震中位置和发震时刻分别为 (34.6°N, 98.54°E), 18:04:28.8 和 (34.63°N, 98.51°E), 18:04:29.2 (UTC); 利用 GPS 和 BDS/GPS 峰值地面位移, 根据经验公式反演了玛多地震震级分别为 M_w 7.34 和 M_w 7.36, BDS/GPS 震级与 GCMT 公布的结果 (M_w 7.4) 更为接近。结果表明: BDS/GPS 融合 PPP 解算可提高时间序列稳定性并降低噪声, 更真实地描述震时地表位移变化, 从而提高震级解算准确性, 更好地为地震预警、地震应急救援等工作提供数据支持。

关键词: BDS/GPS; 精密单点定位; 地壳形变监测; 地震三要素; 玛多地震

中图分类号: P315.725 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2023)02-0216-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0026

0 引言

发震时刻、震中位置和震级大小称为地震三要素, 是地震最重要、最基础的 3 个属性。准确的地震三要素可为地震应急救援、地震危险性研究等工作提供数据支持, 其计算的准确性与地表位移的观测精度紧密相关。在地震学观测中, 一般采用强震仪和微震仪等传统仪器记录地震波信号。在较大地震发生时, 强震仪和微震仪均会出现量程饱和现象 (Blewitt et al., 2006), 导致观测值偏

小。另外, 由于人为或地震导致的仪器倾斜会在地表位移解算中出现基线偏差 (Shu et al., 2018), 且通过强震仪和微震仪观测值 (加速度和速度) 计算地表位移时会放大噪声 (Blich et al., 2008)。以上因素均会导致地震三要素计算失准。

近年来, 众多研究表明 GNSS 作为一种记录地震信号的强有力工具, 可应用于地震地表形变监测、恢复地震波和地震预警等研究 (Gao et al., 2022; 李良发, 2019; 刘刚等, 2014)。GNSS 的观测值为位移, 可直接监测并记录地震产生的地表位置变化, 不会因观测值转化产生误差, 在发

* 收稿日期: 2022-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42074015, 41874018); 中国地震局星火计划攻关项目 (XH20038); 科技部研发专项 (2018YFE0206100)。

第一作者简介: 张怀 (1997-), 硕士研究生在读, 主要从事地震大地测量研究。

E-mail: huaizhang_97@163.com.

♣ 通讯作者简介: 聂兆生 (1982-), 正研级高级工程师, 主要从事大地测量观测技术在地震监测预报中的应用研究。

E-mail: niezhaosheng@126.com.

生大震时也不会出现量程饱和现象,可真实完整记录地震地表形变。许多研究者利用 GNSS 数据测定地震要素,如 Melgar 等 (2015) 针对地震仪存在仪器倾斜和量程饱和等现象,利用 6 个 $M_w 5.9 \sim 9.1$ 地震,基于精密单点定位处理了近场及远场共 1 321 个测站高频 GPS 数据,得到了利用地面峰值位移计算矩震级的经验公式。Fang 等 (2020) 为了快速确定震级,运用 22 个震例的高频 GPS 数据,利用峰值地面速度计算地震震级,所得结果与实际震级偏差为 0.26。尹昊等 (2018) 利用汶川地震 7 个近场高频 GPS 数据计算了汶川地震震中位置,与测震学方法得到的震中位置相差 15.5 km。姚文敏等 (2019) 通过 2016 年新西兰地震定量评估了 GNSS 峰值地面位移精度对震级估计的影响,指出峰值地面位移精度在 2 cm 以内时震级误差在 0.1 以内,且震级对峰值地面位移的敏感度随震中距增大而增加。上述研究均是基于 GPS 单系统观测数据进行研究的。BDS (北斗卫星导航系统, BeiDou Navigation Satellite System) 全球组网完成为多系统观测值融合解算应用于地震地壳形变监测提供了前所未有的契机。相关研究表明: BDS/GPS 双系统融合解算可显著提高可视卫星数、增强卫星空间几何结构,从而提高定位精度 (Li *et al.*, 2015; 祝会忠等, 2020; 魏二虎等, 2018)。

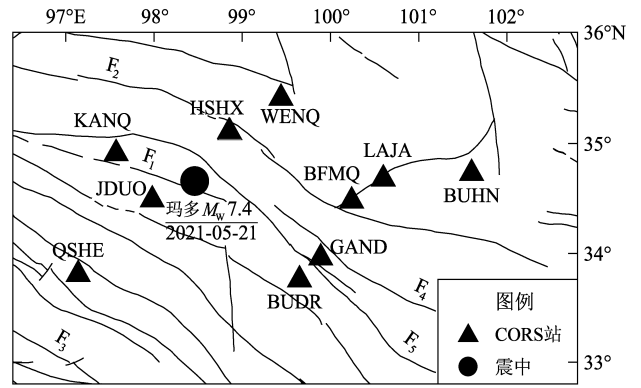
本文利用 GREAT 程序,对 2021 年玛多 $M_w 7.4$ 地震震中附近区域 10 个高频 GNSS 连续站观测数据进行 BDS、GPS 单系统, BDS/GPS 双系统 PPP (精密单点定位) 动态解算,分析了 GPS 单系统及融合 PPP 动态时间序列震前和震时两时段的精度,并计算得到了 2021 年玛多 $M_w 7.4$ 地震的三要素。GREAT 程序是武汉大学李星星教授团队设计研发的一款卫星大地测量与多源导航软件,包含多系统实时精密单点定位、卫星轨道、钟差精密产品生成、低轨增强 GNSS 等功能,具有标准化、模块化等特点 (Li *et al.*, 2020)。

1 BDS/GPS 融合 PPP 解算方法

1.1 玛多地震高频数据

2021 年 5 月 22 日青海省玛多县发生 $M_w 7.4$ 地

震 (此震级为全球矩心矩张量工作组发布,简称 GCMT)。中国地震局地震研究所在第一时间奔赴震区进行地震应急 GNSS 观测,共获取 10 个高频 GNSS 连续测站观测数据,其采样率为 1 s。图 1 为玛多地震震中附近区域连续站点分布图,图中 CORS 站为连续运行卫星定位服务参考站,可观测 GPS、BDS 两个系统的卫星。



F₁: 昆仑山口—江错断裂; F₂: 东昆仑断裂; F₃: 甘孜—玉树断裂; F₄: 久治断裂; F₅: 玛多—甘德断裂

图 1 2021 年玛多 $M_w 7.4$ 地震震中附近区域测站位置分布

Fig. 1 The distribution of GNSS stations in the 2021 Maduo $M_w 7.4$ earthquake region

1.2 BDS/GPS 融合 PPP 观测模型

电离层延迟误差是影响 PPP 定位精度的重要误差之一。对于电离层延迟误差,本文采用双频非电离层组合模型,可消除电离层延迟一阶项影响。BDS/GPS 融合 PPP 无电离层相位 L 和伪距 P 组合模型如下:

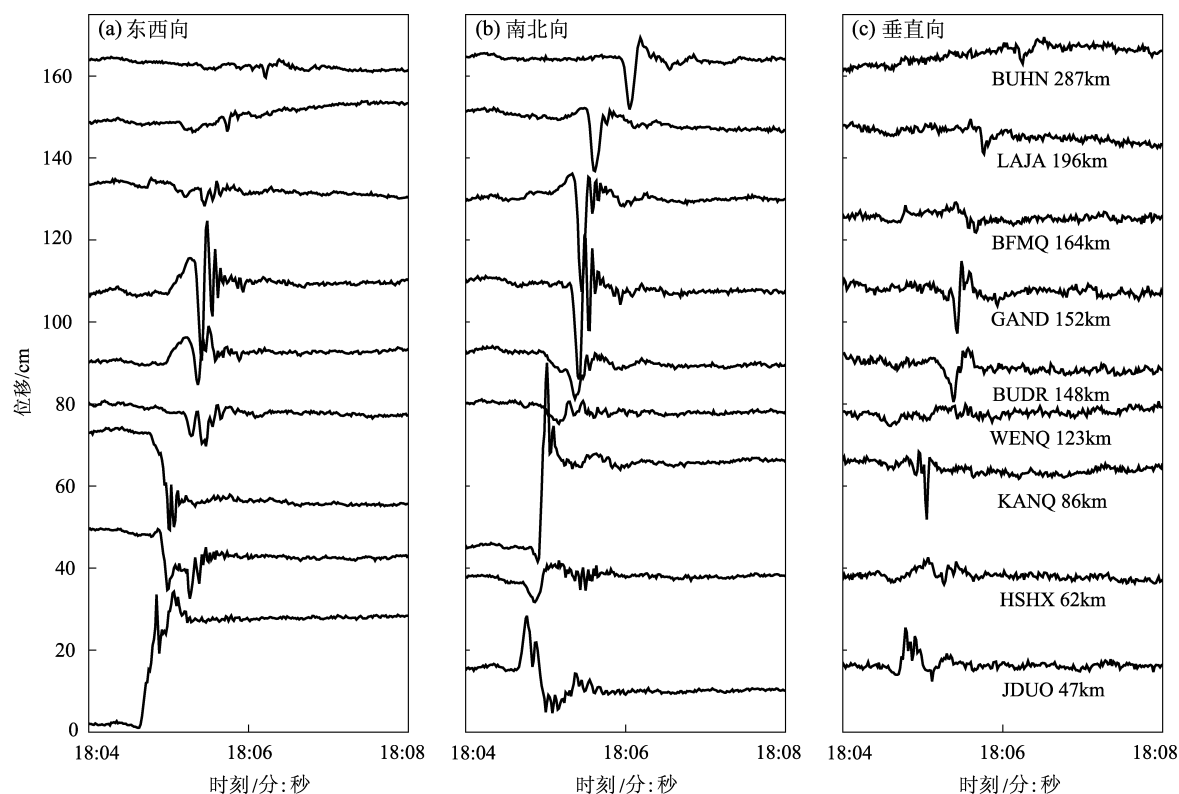
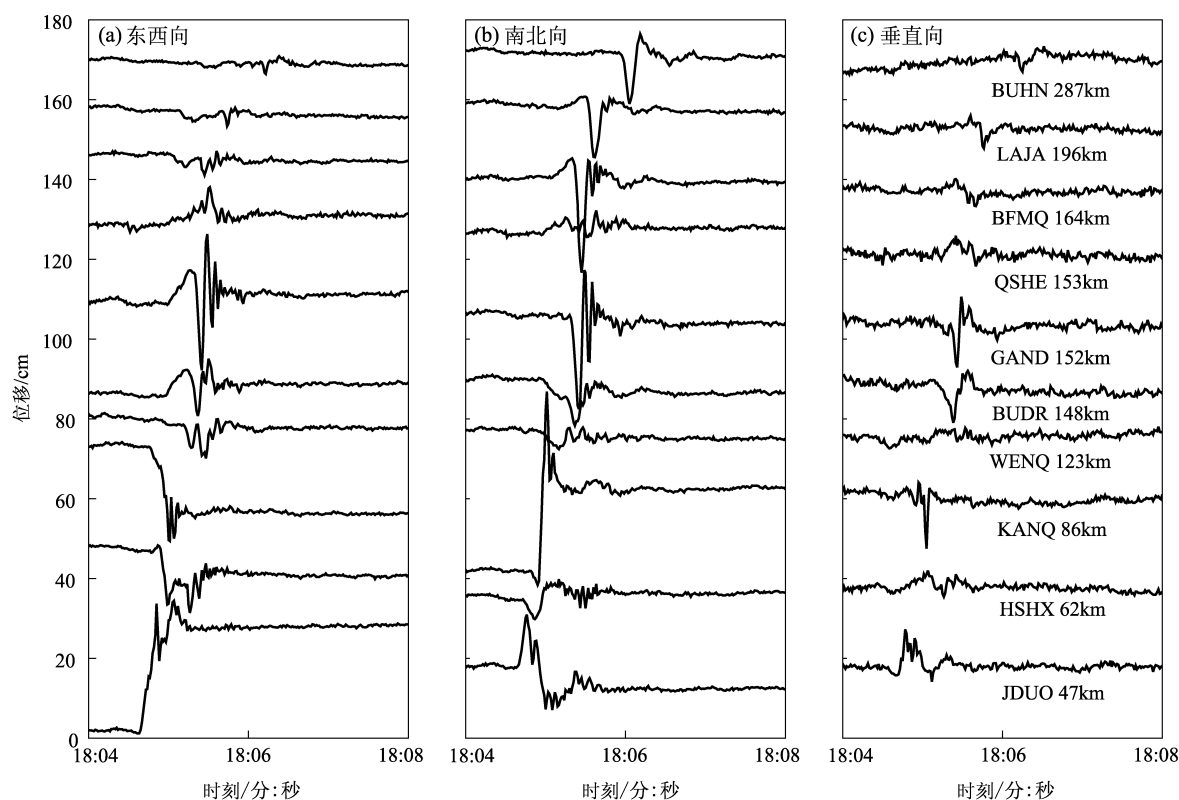
$$L_r^C = \rho_r^C + ct^C + \lambda_{IF}^C (N_r^C + B_r^C - B^{s,C}) + T_r^C + \varepsilon_r^C \quad (1)$$

$$P_r^C = \rho_r^C + ct^C + c(b_r^C - b^{s,C}) + T_r^C + e_r^C \quad (2)$$

$$L_r^C = \rho_r^C + ct^C + \lambda_{IF}^C (N_r^C + B_r^C - B^{s,C}) + T_r^C + \varepsilon_r^C \quad (3)$$

$$P_r^C = \rho_r^C + ct^C + c(b_r^C - b^{s,C}) + T_r^C + e_r^C \quad (4)$$

式中:下标 r 表示接收机;上标 G 和 C 分别代表 GPS 和 BDS; ρ 为接收机至卫星的几何距离; t 为接收机与卫星钟差的差值; λ_{IF} 为无电离层组合相位观测值的波长; N 为无电离层组合的模糊度; b_r 和 b^s 分别为接收机和卫星的测距码延迟, B_r 和 B^s

图3 2021年玛多 $M_w 7.4$ 地震高频 GPS 时间序列Fig. 3 The coordinate time series from high-rate GPS data of the 2021 Maduo $M_w 7.4$ earthquake图4 2021年玛多 $M_w 7.4$ 地震高频 BDS/GPS 时间序列Fig. 4 The coordinate time series from high-rate BDS/GPS data of the 2021 Maduo $M_w 7.4$ earthquake

从图 2 ~ 4 可以看出, BDS、GPS 和 BDS/GPS 融合 PPP 均可以描述震时地表位移随时间的变化。即使距震中约 290 km 的测站仍可以记录到地震形变信号。距震中最近的 JDUO 测站(距震中 47 km)最先接收到地震波信号,并记录到了约 27 cm 的地震永久地表形变。KANQ 和 HSHX 等测站也均记录到了较大的永久地表形变。但是 BDS 单系统时间序列波动较大,且当某一系统观测数据质量较差无法记录地震形变信号时,BDS/GPS 仍可保持良好的定位性能,满足地震形变监测需求。

2.2 GPS 及 BDS/GPS 动态时间序列精度分析

为了评估 GPS 和 BDS/GPS 时间序列的稳定性及噪声大小,本文通过历元间差分方法,利用高频(1 Hz)GNSS 测站坐标时间序列获得各测站 GPS 和 BDS/GPS 在东西、南北、垂直 3 个方向的高频速度时间序列,计算得到了各测站 GPS 和

BDS/GPS 速度时间序列在震前 30 min 的均方根(RMS 值),从表 1 可以看出,玛多地震前 30 min, GPS 的速度时间序列在 3 个方向的 RMS 值分别为 2.7、3.3 和 5.8 mm/s; BDS/GPS 的速度时间序列在 3 个方向 RMS 值均有所减小,分别为 2.3、2.8 和 5.6 mm/s,精度分别提高了 14.8%、15.2% 和 3.5%。速度时间序列可表现各测站 GPS 和 BDS/GPS 时间序列的稳定性及其噪声。测站速度时间序列的 RMS 值越小,表明其时间序列稳定性越强、噪声越小。

BDS/GPS 时间序列的稳定性及噪声表现优于 GPS 主要是由于 BDS/GPS 双系统的可视卫星数更多,其卫星空间几何结构更好。图 5 以 LAJA 站为例,给出了 GPS 单系统及 BDS/GPS 双系统可视卫星数量及几何精度因子(GDOP 值)。从图中可以看出: BDS/GPS 融合 PPP 可显著提高可视卫星数,增强卫星空间几何结构及其稳定性,从而提高定位精度。在地壳形变监测中, BDS/GPS 时间序列可发挥其精度高、稳定性强的优势。

表 1 玛多地震前 30 min 各测站的速度时间序列 RMS 值
Tab. 1 RMS values of velocity time series of each station
30 minutes before the Maduo earthquake

测站	卫星系统	东西向速度/ (mm · s ⁻¹)	北南向速度/ (mm · s ⁻¹)	垂直向速度/ (mm · s ⁻¹)
BFMQ	GPS	2.8	3.5	5.9
	BDS/GPS	2.3	2.9	5.7
BUDR	GPS	2.7	3.5	6.5
	BDS/GPS	2.4	3.1	6.4
BUHN	GPS	2.4	3	5.4
	BDS/GPS	2.1	2.6	5.2
GAND	GPS	3.3	3.9	6.9
	BDS/GPS	2.9	3.6	6.8
HSHX	GPS	2.4	2.9	5.2
	BDS/GPS	2.1	2.5	5.1
JDUO	GPS	2.4	3	5.3
	BDS/GPS	2.1	2.6	5.1
KANQ	GPS	2.5	2.9	5.3
	BDS/GPS	2.1	2.5	5.2
LAJA	GPS	3.1	3.5	5.6
	BDS/GPS	2.4	2.8	5.4
QSHE	GPS	44.8	50.8	70.7
	BDS/GPS	3.3	4.3	8.7
WENQ	GPS	3.1	3.6	6
	BDS/GPS	2.4	3.1	5.9
平均值	GPS	2.7	3.3	5.8
	BDS/GPS	2.3	2.8	5.6

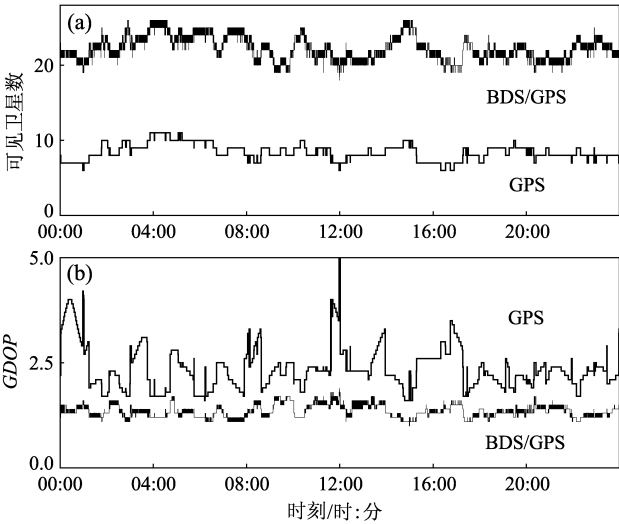


图 5 LAJA 测站 GPS 和 BDS/GPS 可视卫星数及 GDOP 值

Fig. 5 Number of Satellites of GPS and BDS/GPS and GDOP values for LAJA

3 用 BDS/GPS 测定玛多地震三要素

3.1 地震波初至时刻提取

准确提取地震波初至时刻是计算地震发震时

刻和震中位置的关键, 本文应用短时窗平均/长时窗平均法 (STA/LTA) (Allen, 1978) 提取地震波初至时刻, 选用历元间差分函数作为特征函数:

$$CF(i) = f(i) - f(i-1) \quad (5)$$

式中: $f(i)$ 为 i 时刻各方向坐标。短时窗主要表示特征函数在短时间内的变化情况, 长时窗则表示信号在当前时段内的平均噪声水平。当检测到地震波信号时, 短时窗特征函数的平均值与长时窗平均值的比值会明显增大, 当某一时刻长、短时窗的特征函数值比值大于设定的阈值时, 则认为地震波到达。

为了更准确地提取地震波初至时刻, 本文选取了多种长、短时窗长度和阈值组合, 将长时窗分别设置为 50 ~ 70 s, 步长为 5 s; 短时窗分别设置为 5 ~ 20 s, 步长为 1 s; STA/LTA 阈值分别设置为 1.8 ~ 2.8, 步长为 0.1。通过不同组合提取地震波初至时刻后发现, 长、短时窗长度及阈值的选取需要根据 GNSS 地震时间序列设定。当长时窗长度较小时, LTA 值可能会随时间变化较明显, 无法表现出 GNSS 时间序列的一般特性。当短时窗长度较小时, STA 值对地震信号较为敏感, 随时间波动较大, 可能会将一般噪声识别为地震信号; 而短时窗的长度较大时, 其 STA 值不能较为真实地描述地震信号在某一瞬间的变化状态。

最终, 本文选用的长时窗长度为 70 s, 短时窗长度为 9 s, 阈值为 2.2。利用 STA/LTA 法提取的各测站地震波初至时刻见表 2, 其中本文涉及到

玛多地震的时间, 使用的是国际标准时间。从表 2 可看出, 在更加稳定的 KANQ 测站的 BDS/GPS 时间序列中可更早探测到地震波信号。

3.2 震中位置及发震时刻反演

本文采用距离交会法确定地震震中, 假设地震的震中坐标为 (X, Y, Z) , 则各测站到震中的距离 D_i 可表示为:

$$D_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2} \quad (6)$$

假定地震波在地壳中各个方向的传播速度 v 是相同的, 则根据地震波初至时刻和各台站之间的距离可得如下观测方程:

$$\begin{cases} D_2 - D_1 - v(t_2 - t_1) = 0 \\ D_3 - D_1 - v(t_3 - t_1) = 0 \\ \vdots \\ D_n - D_1 - v(t_n - t_1) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

对上述观测方程进行线性化, 通过最小二乘迭代后可计算得到震中和地震波传播速度 v 。为了加快计算速度, 本文将第一个接收到地震波信号的测站坐标记为震中位置的初值。在地震研究中, GNSS 测站接收到的地震波一般为 S 波 (波速 3 ~ 4 km/s), 本文分别使用不同波速 (3 ~ 4 km/s, 步长为 0.1 km/s) 进行计算, 最终地震波速度 v 设为 3.2 km/s。地震发震时刻 T_0 可根据上一步中得到的震中坐标 (X, Y, Z) 和地震波速度计算求得。为了减少计算误差, 可对其取平均值:

$$T_0 = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \frac{D_i}{v})}{n} \quad (8)$$

式中: D_i 为第 i 测站至震中的距离; t_i 为第 i 测站的地震波初至时刻。

根据玛多地震的 GPS 和 BDS/GPS 地震时间序列 (图 2 ~ 4) 以及各测站地震波初至时刻 (表 2), 得到了 2021 年玛多地震的 GPS 和 BDS/GPS 地震震中位置和发震时刻分别为 (34.6°N, 98.54°E), 18:04:28.8; (34.63°N, 98.51°E), 18:04:29.2。

表 2 部分测站地震波初至时刻

Tab. 2 First arrival-time of seismic waves at some stations

测站	坐标		GPS	BDS/GPS	震中距/
	$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$	到时	到时	km
JDUO	34.49	97.98	18:04:45	18:04:45	46.83
HSHX	35.10	98.86	18:04:48	18:04:48	61.93
KANQ	34.91	97.57	18:04:59	18:04:58	86.44
WENQ	35.41	99.44	18:05:07	18:05:07	122.90
GAND	33.96	99.89	18:05:23	18:05:23	152.21
BUDR	33.76	99.65	18:05:24	18:05:24	148.20
BFMQ	34.48	100.24	18:05:28	18:05:28	164.08
LAJA	33.76	99.65	18:05:42	18:05:42	196.00
BUHN	34.73	101.6	18:06:03	18:06:03	287.08

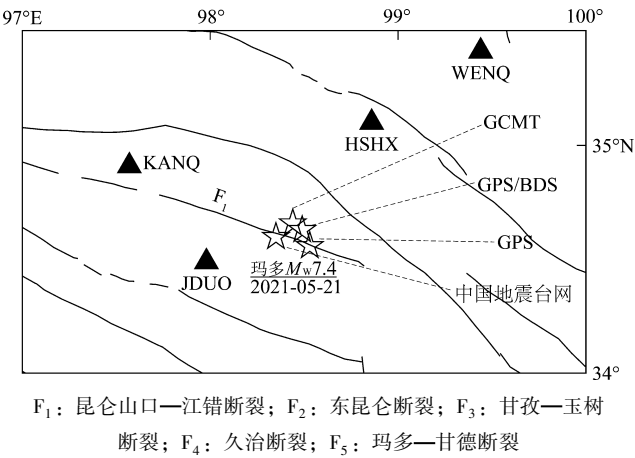


图 6 本文计算震中位置与不同机构发布震中分布
Fig. 6 Calculated epicenters and the epicenter published by the China Seismic Networks Center

从图 6 可以看出，本文计算所得震中位置与中国地震台网、GCMT 等机构发布的震中位置比较接近（表 3）。本文使用 BDS/GPS 时间序列所得震中位置与 GCMT 发布的震中位置相差 5.8 km，所得发震时刻与 GCMT 发布结果（18:04:29.2）一致，使用 GPS 时间序列震中位置与 GCMT 发布震中位置相差 10 km，所得发震时刻与 GCMT 结果相差 0.4 s；使用 BDS/GPS 时间序列所得震中位置与中国地震台网发布的震中位置相差 17.4 km，所得发震时刻与中国地震台网发布结果（18:04:11）相差 18.2 s，使用 GPS 时间序列所得震中与中国地震台网发布的震中位置相差 20 km，发震时刻与中国地震台网结果相差 17.8 s。利用 BDS/GPS 时间序列计算的震中位置和发震时刻更加接近实际震中位置与发震时刻。

表 3 本文与其它机构所得震中及发震时刻结果对比
Tab. 3 The epicenter and the original time of the Maduo earthquake from the other agencies and from the author

来源	震中位置		发震时刻
	$\varphi_N/(^{\circ})$	$\lambda_E/(^{\circ})$	
中国地震台网	34.59	98.34	18:04:11
GCMT	34.66	98.46	18:04:29.2
本文 BDS/GPS 结果	34.63	98.51	18:04:28.8
本文 GPS 结果	34.60	98.54	18:04:29.2

3.3 震级确定

日本学者（Kanamori, 1977; Hanks, Kanamori,

1979）提出了矩震级的概念。矩震级不是利用地震记录波形的振幅来计算震级，而是通过地震矩来确定震级。地震矩是通过 GNSS 或 InSAR 等方法获得地表平均滑动后获得的。应用矩震级来表征地震的大小比较准确，但是需要大量复杂计算得到，耗时较大。
Gutenberg（1945）推导出了地震面波最大水平位移、震中距和地震震级的经验关系公式为：

$$M = \log(PGD) + 1.66\log(R) + 2.0 \tag{9}$$

式中： M 为地震震级； PGD 为根据地震面波计算得到的测站峰值地面位移，其单位为 μm ； R 是测站至震中的距离，单位用 “°” 表示。Fang 等（2014）利用 3 个大地震的高频（1 Hz）GPS 数据验证了古登堡面波震级经验公式对 GPS 数据的可用性，得出该公式对 GPS 数据同样适用，由高频 GPS 计算得到的 PGD 同样可以得到准确的震级。

PGD 可通过 BDS/GPS 融合 PPP 地震时间序列提取东西向、南北向的地震波形振幅后得到，计算公式为 $H = \sqrt{E^2 + N^2}$ ， E 和 N 分别为东西向和南北向地震波形振幅。在实际应用中，可对 BDS/GPS 融合 PPP 地震时间序列每个历元的 E 和 N 作计算得到 H 值。图 7 以 KANQ 测站为例，计算了其各历元 H 值并提取 PGD ，得到 PGD 为 50.17 cm。

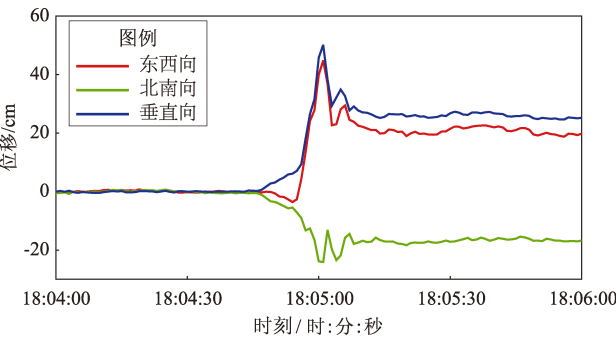


图 7 KANQ 测站震时水平方向坐标及 H 值变化
Fig. 7 Changes of horizontal coordinates and H value at KANQ station during the Maduo earthquake

计算每个测站各历元 H 值并提取得到各测站的峰值地面位移后，可利用峰值地面位移 PGD 根据式（9）计算地震震级。本文利用所有测站峰值地面位移估计的震级见表 4。

表 4 使用所有测站的 PGD 估算的震级Tab. 4 PGD magnitudes for all stations

测站	坐标		震中距/ (°)	PGD/cm		M_w	
	$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$		GPS	BDS/GPS	GPS	BDS/GPS
JDUO	34.49	97.98	0.43	31.75	32.69	6.89	6.91
HSHX	35.10	98.86	0.56	16.49	16.10	6.80	6.79
KANQ	34.91	97.57	0.78	50.05	50.17	7.52	7.53
WENQ	35.41	99.44	1.12	9.17	9.64	7.04	7.06
BUDR	33.76	99.65	1.34	11.47	11.86	7.27	7.29
GAND	33.96	99.89	1.38	28.36	28.79	7.69	7.69
QSHE	33.81	97.14	1.39	110.95	9.76	8.28	7.23
BFMQ	34.48	100.24	1.49	21.77	23.35	7.63	7.66
LAJA	34.68	100.60	1.78	12.44	11.61	7.51	7.48
BUHN	34.73	101.60	2.61	11.47	12.54	7.75	7.79

从表 4 中可以看出, 由于 QSHE 测站 GPS 观测数据质量较差, 利用其峰值地面位移计算得到震级为 $M_w8.28$, 与 GCMT 公布的震级相比偏大, 因此 QSHE 测站不参与后续各测站平均震级计算。对剩余 9 个测站 GPS 和 BDS/GPS 震级取平均值后, 得到平均 GPS 震级为 $M_w7.34$, 与 GCMT 公布的震级相差 0.06; 平均 BDS/GPS 震级为 $M_w7.36$, 与 GCMT 公布的震级相差 0.04。从上可以看出, 使用 BDS/GPS 比使用 GPS 峰值地面位移估算的震级更加接近公布震级。

利用峰值地面位移估算的震级呈现出方向性特征, 震级在断层破裂扩展方向偏大, 在非断层破裂扩展方向偏小。例如, 距离震中最近的 JDUE 和 HSHX 测站, 用 GPS 数据估算震级为 $M_w6.89$ 和 $M_w6.8$, 用 BDS/GPS 数据估算震级为 $M_w6.91$ 和 $M_w6.79$, 相比 GCMT 公布的震级 $M_w7.4$ 偏小; 在地震断层破裂扩展方向上的 KANQ 和 GAND 测站, 用 GPS 数据估算震级为 $M_w7.52$ 和 $M_w7.69$ 、用 BDS/GPS 数据估算震级为 $M_w7.53$ 和 $M_w7.69$, 比 GCMT 公布的震级偏大。笔者分析发现, 这主要与地震断层破裂的方向性效应和地震波方向性效应有关。Somerville 等 (1997) 研究表明地震波传播方向与地震断层破裂方向夹角越小时, 其地震动幅值越大。玛多地震为典型的左旋走滑型地震, 其破裂沿昆仑山口—江错断裂展布长约 160 km, 其走向约为 295° (王迪晋等, 2022)。据此可以看出, 位于昆仑山口—江错断裂及其延长线上的

KANQ、GAND 和 BFMQ 等测站具有更大的 PGD 值从而得到了偏大的震级, 而远离昆仑山口—江错断裂及其延长线的 WENQ、JDUE 和 HSHX 等测站的 PGD 偏小, 因此震级也偏小。从图 6 可以看出, 此次获取的 GNSS 连续站大部分分布于断层破裂扩展方向两侧, 因此用所有测站 PGD 估计的震级均偏小。

本文在利用 PGD 估算震级时, 只考虑了测站震中距及地震时间序列的 PGD , 未考虑地震断层破裂的方向性效应与地震波方向性效应。且由于各测站所处地壳结构、基岩性质以及测站高度等影响, 不同测站利用地震时间序列的 PGD 估算得到的震级与公布震级有微小的偏差。根据以上分析, 为了用 PGD 估算得到更准确震级, 克服地震断层破裂的方向性效应与地震波方向性效应以及不同测站的地壳地质差异影响, 在估计震级时应尽量在震中周围均匀地选取尽可能多的测站进行估计, 并采用多星座数据联合解算获取更真实的震时地表位移。

4 结论

本文利用 2021 年玛多 $M_w7.4$ 地震的高频 GNSS 观测数据, 对震前 30 min 和包含地震信息的 GPS 和 BDS/GPS 融合 PPP 时间序列进行了分析, 并计算了玛多地震的地震三要素, 得到如下结论:

(1) 通过历元间差分法获取震前 30 min 速度时间序列, 得出 GPS 速度时间序列在东西、北南、垂直 3 个方向上的 RMS 值分别为 2.7、3.3 和 5.8 mm/s; BDS/GPS 速度时间序列在 3 个方向的 RMS 值分别为 2.3、2.8 和 5.6 mm/s, 精度分别提高了 14.8%、15.2% 和 3.5%。BDS/GPS 可提高可视卫星数并增强卫星空间几何结构, 从而显著提高定位精度及其动态解算稳定性。

(2) 利用 GPS 地震时间序列计算得到玛多地震发震时刻为 18:04:28.8, 震中位置为 ($34.60^\circ N$, $98.54^\circ E$), 震级为 $M_w7.34$; BDS/GPS 地震时间序列计算得到的玛多地震发震时刻为 18:04:29.2, 震中位置为 ($34.63^\circ N$, $98.51^\circ E$), 震级为 $M_w7.36$ 。由 BDS/GPS 得到的地震三要素更加准确, 更接近 GCMT 公布的结果。

(3) 由于地震断层破裂的方向性效应和地震

波以及本文获取的 GNSS 测站位置分布不均匀,导致沿地震断层破裂方向的测站估算的震级偏大,从而使整体估算震级与 GCMT 的震级相比偏小。在今后的地震三要素解算中,可采用分布均匀的测站并使用 BDS/GPS 融合 PPP 保证地震三要素的准确性,从而更好地为地震预警、地震应急救援等工作提供技术支持和数据保障。

野外数据采集工作人员辛苦付出,武汉大学测绘学院李星星团队提供了 GREAT 程序,武汉大学卫星导航定位技术研究中心提供了精密产品,在此一并表示感谢。

参考文献:

- 李良发. 2019. 高精度北斗数据处理及地形变监测应用[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所.
- 刘刚, 聂兆生, 方荣新, 等. 2014. 高频 GNSS 形变波的震相识别: 模拟实验与实例分析[J]. 地球物理学报, 57(9): 2813–2825.
- 王迪晋, 王东振, 赵斌, 等. 2022. 2021 年青海玛多 $M_w 7.4$ 地震 GNSS 同震形变场及其断层滑动分布[J]. 地球物理学报, 65(2): 537–551.
- 魏二虎, 刘学习, 王凌轩, 等. 2018. BDS/GPS 组合精密单点定位精度分析与评价[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 43(11): 1654–1660.
- 姚文敏, 方荣新, 王珍, 等. 2019. 高频 GNSS 观测快速估计地震震级及其精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 39(12): 1249–1253.
- 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[J]. 地球物理学报, 61(5): 1806–1816.
- 祝会忠, 杨添宇, 赵洪涛, 等. 2020. GNSS 多系统精密单点定位方法与性能分析[J]. 测绘科学, 45(12): 1–7, 21.
- Allen R V. 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 68(5): 1521–1532.
- Bilich A, Cassidy J F, Larson K M. 2008. GPS seismology: application to the 2002 $M_w 7.9$ denali fault earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 98(2): 593–606.
- Blewitt G, Kreemer C, Hammond W, et al. 2006. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems[J]. Geophysical Research Letters, 33(11): L11309.
- Fang R X, Shi C, Song W W, et al. 2014. Determination of earthquake magnitude using GPS displacement waveforms from real-time precise point positioning[J]. Geophysical Journal International, 196(1): 461–472.
- Fang R X, Zheng J W, Geng J H, et al. 2020. Earthquake magnitude scaling using peak ground velocity derived from high-rate GNSS observations[J]. Seismological Research Letters, 92(1): 227–237.
- Gao Z Y, Li Y C, Shan X J, et al. 2022. Testing a prototype earthquake early warning system: A retrospective study of the 2021 $M_w 7.4$ Maduo, Tibet, earthquake[J]. Seismological Research Letters, 93(3): 1650–1659.
- Gutenberg B. 1945. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 35(1): 3–12.
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale[J]. Journal of Geophysical Research, 84(B5): 2348–2350.
- Kanamori H. 1977. The energy release in great earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 82(20): 2981–2987.
- Li X X, Zhang X H, Ren X D, et al. 2015. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou[J]. Scientific Reports, 5(1): 8328.
- Li X X, Zhu Y T, Zheng K, et al. 2020. Precise orbit and clock products of Galileo, BDS and QZSS from MGEX since 2018: comparison and PPP validation[J]. Remote Sensing, 12(9): 1415.
- Melgar D, Crowell B W, Geng J H, et al. 2015. Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement[J]. Geophysical Research Letters, 42(13): 5197–5205.
- Richter C F. 1935. An instrumental earthquake magnitude scale[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 25(1): 1–32.
- Shu Y M, Fang R X, Geng J H, et al. 2018. Broadband velocities and displacements from integrated GPS and accelerometer data for high-rate seismogeodesy[J]. Geophysical Research Letters, 45(17): 8939–8948.
- Somerville P G, Smith N F, Graves R W, et al. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity[J]. Seismological Research Letters, 68(1): 199–222.

Determination of Three Parameters of the 2021 Maduo $M_w7.4$ Earthquake Using High-rate BDS/GPS

ZHANG Huai¹, NIE Zhaosheng¹, LIU Gang¹, XIONG Wei¹, NI Yipeng¹, HUANG Jun²

(1. *Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, Hubei, China*)

(2. *Heilongjiang Provincial Geology and Mineral Resources Test and Application Institute, Harbin 150036, Heilongjiang, China*)

Abstract

The seismic time series of 10 high-rate GNSS stations during the 2021 Maduo $M_w7.4$ earthquake were acquired using GPS and BDS/GPS fusion PPP based on the GREAT program, and the velocity time series 30 minutes before the earthquake were obtained based on the variometric approach. The analysis found that the BDS/GPS relative to GPS velocity *RMS* values in the EW, NS and UP orientation can be improved by 14.8%, 15.2% and 3.5% respectively. The seismic wave's first arrival-time was extracted from the BDS/GPS time series of each station using the STA/LTA method, the location of the epicenter of the Maduo earthquake was (34.63°N , 98.51°E), and the earthquake's original time was 18:04:29 (UTC), calculated from the time of first arrival of seismic waves at each station. This article refers to the time of the Maduo earthquake, using the Coordinated Universal Time. The epicenter of the Maduo earthquake calculated by GPS time series is (34.6°N , 98.54°E), and the original time is 18:04:28.8. Using GPS and BDS/GPS peak ground displacement, the Maduo earthquake magnitude was inverted according to the empirical formula, and the obtained magnitudes were $M_w7.36$ and $M_w7.34$, respectively. The BDS/GPS magnitude was closer to the result published by GCMT. The results show that the BDS/GPS fusion PPP solution can improve the stability of time series and reduce noise, which can more realistically describe the surface displacement changes during the earthquake, thus improving the accuracy of the magnitude solution and providing better data support for earthquake early warning and post-earthquake rescue.

Keywords: BDS/GPS; PPP; crustal deformation monitoring; three parameters of an earthquake; Maduo earthquake