

赵亮,杨南南,徐爱功. 甘肃省 BDS PPP 精度分析及在地震位移监测中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(2):138-145.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240118
ZHAO Liang, YANG Nannan, XU Aigong. The accuracy analysis of BDS PPP in Gansu Province and application in monitoring earthquake displacement[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(2): 138-145. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240118

甘肃省 BDS PPP 精度分析及在地震位移监测中的应用

赵 亮¹, 杨南南², 徐爱功²

(1. 甘肃省测绘工程院 北斗导航定位中心, 甘肃 兰州 730000;

2. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为研究甘肃省内北斗导航卫星系统 (BDS) 精密单点定位 (PPP) 性能, 提出一种单北斗及包含北斗的多系统组合精度分析方法, 并分析 BDS 对地震中连续运行参考站 (CORS) 位移监测的可行性。基于甘肃省北斗卫星导航定位基准站网实测多频多模观测数据, 结合相位偏差改正模型, 采用无电离层组合模糊度固定 (AR) 算法, 从定位精度、卫星空间分布及位置精度因子 (PDOP) 等多方面评估定位结果, 利用静态和动态 PPP-AR 计算临夏积石山地震震中 LXJS 测站位移变化量。研究结果表明: 单北斗 BDS-3 (B3) 定位精度优于 B2/B3 和 B2, 多系统组合 GPS/GLONASS/Galileo/BDS-3 (G/R/E/B3) 优于 G/R/E/B2/B3 和 G/R/E/B2; 多系统组合 G/R/E/B3 优于单北斗 B3, Up 方向定位精度至少提升了 40%; 由于 B2 受空间卫星分布不均匀、卫星轨道及钟差误差较大等因素影响, 单北斗 B2/B3 和多系统组合 G/R/E/B2/B3 出现了 PDOP 值减小而定位精度下降的现象。研究结论为毫米级地震位移监测提供参考。

关键词: 北斗导航卫星系统; 模糊度固定; 多系统组合; 无电离层组合; 定位精度

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)02-0138-08

The accuracy analysis of BDS PPP in Gansu Province and application in monitoring earthquake displacement

ZHAO Liang¹, YANG Nannan², XU Aigong²

(1. Beidou Navigation and Positioning Center, Surveying and Mapping Engineering Institute of GanSu, Lanzhou 730000, China; 2. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To research the performance of the BeiDou navigation satellite system (BDS) precise point positioning (PPP) in Gansu Province, a precision analysis method for single BeiDou and BeiDou-inclusive multi-system combinations is proposed. The feasibility of using BDS to monitor displacement of continuous operating reference stations (CORS) during earthquakes is also analyzed. Based on multi-frequency, multi-mode observation data from the BeiDou satellite navigation reference station network in Gansu Province, and incorporating a phase bias correction model, the ambiguity resolution (AR) algorithm for ionosphere-free combination is applied. The positioning results are evaluated from multiple aspects such as positioning accuracy, satellite spatial distribution, and position dilution of precision (PDOP). Static and dynamic PPP-AR calculations are used to compute the displacement variation at the LXJS station in the epicenter of the Jishishan earthquake in Linxia. The results show that the BDS-3 (B3) positioning accuracy for single BeiDou is superior to B2/B3 and B2. The multi-system combination GPS/GLONASS/Galileo/BDS-3 (G/R/E/B3) outperforms G/R/E/B2/B3 and G/R/E/B2. The multi-system combination G/R/E/B3 provides better results than single B3, with an improvement of at least 40% in the Up-direction positioning accuracy. Because B2 is affected by factors such as uneven distribution of space satellites, large satellite orbit and clock error, the PDOP value of single Beidou B2/B3 and multi-system combination G/R/E/B2/B3 decreases and the positioning accuracy decreases. The research

收稿日期: 2024-05-07 修回日期: 2024-07-17 接受日期: 2024-07-30 责任编辑: 张雯

基金项目: 甘肃省自然资源厅科技创新项目 (202217)

作者简介: 赵 亮 (1988-), 男, 宁夏 吴忠人, 硕士, 高级工程师, 主要从事 GNSS 数据处理方面的研究。E-mail: 553779805@qq.com

conclusions provide a reference for millimeter-scale seismic displacement monitoring.

Keywords: BeiDou navigation satellite system (BDS); ambiguity resolution (AR); multi-system combination; ionosphere-free combination; positioning accuracy

0 引言

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)已完成全球组网部署,与美国全球定位系统(global positioning system, GPS)、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(globalnaja nawigazionnaja sputnikowaja sistema, GLONASS)和欧盟伽利略卫星导航系统(Galileo)组成四大全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)^[1]。连续运行参考站是地基区域增强技术实现的基础设施,其核心是利用GNSS差分定位技术,实现实时厘米级定位精度^[2]。但差分定位需要至少2台接收机同时接收GNSS信号,受限条件较多,灵活性欠佳。精密单点定位(precise point positioning, PPP)具有单机作业、不受作业距离限制、数据利用率高等优势,已被广泛应用于地震监测等领域^[3]。目前,基于CORS观测数据进行地震监测主要以GPS及其他多系统组合融合为主^[4],BDS应用较少。在加快推进北斗规模化应用背景下,掌握BDS精度及适用范围,能够更好地与其他地震监测手段结合,为地震预警、灾后救援和防灾减灾提供更加可靠的数据支持。

许多学者对BDS PPP定位精度及可靠性进行了深入研究。文献[5]从收敛性能和定位精度方面系统评估和对比北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)PPP和GPS PPP,数据测试结果表明两者定位性能基本相同,在高卫星截止高度角观测环境下,北斗二号(BeiDou-2 navigation satellite system, BDS-2)/BDS-3融合PPP定位性能明显优于GPS。文献[6]研究了BDS-2/BDS-3独立或与其他GNSS组合的PPP性能,实验结果表明,BDS-2/BDS-3/GPS/Galileo定位精度优于其他组合,各方向定位精度小于2.45 cm,收敛时间小于14.5 min。文献[7]研究了单北斗实时静态PPP定位精度,结果表明单北斗BDS-3和BDS-2/BDS-3静态PPP定位精度在各方向优于BDS-2, BDS-3水平定位精度略逊于BDS-2/BDS-3,高程精度略优于BDS-2/BDS-3。相位偏差的精确估计是实现PPP非差模糊度固定(ambiguity resolution, AR)的重要前提^[8]。文献[9]针对全球均匀分布的100多座国际GNSS服务

(international GNSS services, IGS)站静态观测数据,估算了GPS/Galileo/BDS三系统全频率可观测相位偏差(observable specific signal bias, OSB),得到的伪距和相位OSB产品的平均标准差满足PPP-AR要求。全频率PPP-AR可充分利用多频GNSS观测值,相比使用基础频率观测值实用价值更高。文献[10]利用多GNSS实验(multi-GNSS experiment, MGEX)地面站实测数据和武汉大学发布的多系统相位小数偏差产品,采用无电离层组合模型,分析评估了GPS/BDS/Galileo三系统组合PPP-AR的精度和性能,实验结果表明,地面观测站同时观测三系统卫星总数最多可达31颗,定位收敛时间小于11.25 min,水平定位精度优于2 cm,垂直定位精度小于5 cm。

上述对BDS PPP定位精度的研究,未详细区分BDS-2、BDS-3和BDS-2/BDS-3,数据大多为MGEX地面站观测数据,数据质量优于省级CORS观测数据,且未能全面阐述单北斗系统和包括北斗的多系统PPP定位精度,数据解算结果不足以代表区域实际情况。因此,本文采用甘肃省北斗卫星导航定位基准站网均匀分布在全省范围内的9座基准站对BDS-2(B2)、BDS-3(B3)和BDS-2/BDS-3(B2/B3)3种单北斗模式,以及GPS/GLONASS/Galileo/BDS-2(G/R/E/B2)、GPS/GLONASS/Galileo/BDS-3(G/R/E/B3)和GPS/GLONASS/Galileo/BDS-2/BDS-3(G/R/E/B2/B3)3种包含北斗的多系统组合模式PPP的定位精度和性能进行研究,并基于BDS PPP验证甘肃省北斗CORS站用于2023年12月18日临夏积石山县6.2级地震基准站位移变化监测的可行性。

1 精密单点定位模型及处理策略

1.1 观测方程

PPP组合与非组合模型均基于伪距和载波相位观测值构建观测方程并进行变换。其中,基于伪距和载波相位观测值的观测方程^[11-13]为

$$P_{i,r}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + \mu_i \cdot I_r^s + T_r^s + b_{i,r} - b_i^s + \varepsilon_{i,r,P}^s, \quad (1)$$

$$L_{i,r}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + \mu_i \cdot I_r^s + T_r^s + \delta_{i,r} - \delta_i^s + \lambda_i N_{i,r}^s + \varepsilon_{i,r,L}^s, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中:上标 s 为卫星编号;下标 i 和 r 分别为卫星频段编号和接收机编号; $P_{i,r}^s$ 为原始伪距观测值, m; ρ_r^s 为卫星到用户接收机的卫地距, m; c 为真空中的光速, m/s; t_r 和 t^s 分别为接收机钟差和卫星钟差, s; μ_i 为电离层延迟放大系数; I_r^s 为电离层延迟, m; T_r^s 为倾斜路径上的对流层延迟, m; $b_{i,r}$ 为接收机端在频率 i 上的伪距硬件延迟, m; b_i^s 为卫星端在频率 i 上的伪距硬件延迟, m; $\varepsilon_{i,r,P}^s$ 和 $\varepsilon_{i,r,L}^s$ 为相应的伪距和载波观测噪声, 即其他未建模的误差, m; $L_{i,r}^s$ 为载波相位观测值, m; $\delta_{i,r}$ 和 δ_i^s 分别为接收机端和卫星端在频率 i 上的相位延迟, 并吸收了各自相应的初始相位偏差, m; λ_i 为频率 i 上的波长, m; $N_{i,r}^s$ 为整周模糊度。

利用电离层误差与观测值频率的相关性, 对双频伪距和载波相位观测值进行线性组合, 得到无电离层组合观测值, 无电离层组合模型^[14-15]为

$$P_{if,r}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{1,r}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{2,r}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + T_r^s + b_{if,r} - b_{if}^s, \quad (3)$$

$$L_{if,r}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{1,r}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{2,r}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + T_r^s + \delta_{if,r} - \delta_{if}^s + \lambda_i N_{if,r}^s, \quad (4)$$

式中: f_1 、 f_2 为 L_1 、 L_2 载波相位观测值对应的频率; $P_{if,r}^s$ 为无电离层组合的伪距观测值, m; $L_{if,r}^s$ 为无电离层组合的载波相位观测值, m; $b_{if,r}$ 、 b_{if}^s 分别为接收机和卫星无电离层组合的伪距硬件延迟, m; $\delta_{if,r}$ 、 δ_{if}^s 分别为接收机和卫星无电离层组合的相位延迟, m; $N_{if,r}^s$ 为无电离层组合整周模糊度。

基于原始观测方程估计电离层延迟的影响^[16], 得到非差非组合模型, 该模型的伪距观测值为

$$P_{uc,r}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + \mu_i \cdot I_{uc} + T_r^s + b_{uc,r} - b_{uc}^s \quad (5)$$

非差非组合模型的载波相位观测值为

$$L_{uc,r}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) - \mu_i \cdot I_{uc} + T_r^s + \delta_{uc,r} - \delta_{uc}^s + \lambda_i N_{uc,r}^s, \quad (6)$$

式(5)和式(6)中: I_{uc} 为非差非组合模型的电离层延迟, m; $b_{uc,r}$ 、 b_{uc}^s 分别为接收机和卫星非差非组合模型的伪距硬件延迟, m; $\delta_{uc,r}$ 、 δ_{uc}^s 分别为接收机和卫星非差非组合模型的相位延迟, m; $N_{uc,r}^s$ 为非差非组合模型整周模糊度。

1.2 误差处理模型

采用Pride PPP-AR软件, 基于参数消去-恢复法的广义最小二乘原理进行参数估计, 根据定位模式与相关配置信息确定参数与法方程相关信息, 将待估参数分为3类: 常数参数、过程参数以及状态参数。静态解算模式中将测站坐标视为常数参数, 过程参数包括动态模式下测站位置参数、接收机钟差、天顶对流层延迟参数以及水平对流层梯度参数。状态参数为模糊度参数, 模糊度固定方法采用LAMBDA (least-squares ambiguity decorrelation adjustment) 算法, 在平差前保留模糊度参数, 以求得其方差-协方差矩阵并用于模糊度固定。

对流层延迟改正的方法是将萨斯塔莫宁(Saastamoinen)模型作为先验值, 将残余的对流层延迟按随机游走噪声进行估计, 并通过投影函数投影至信号传播方向, 电离层延迟改正采用无电离层组合模型消去一阶项, 非低纬度地区不进行高阶电离层改正^[17]。相对论效应、固体潮汐、海潮负荷、极潮、相位缠绕等使用软件自带模型进行改正, 卫星和接收机天线相位中心偏移量(phase center offse, PCO)、天线相位中心变化(phase center variation, PCV)使用IGS中心提供的天线相位中心改正文件进行改正^[18-19]。差分码偏差(differential code bias, DCB)和地球自转参数(earth rotation parameters, ERP)选择武汉大学MGEX分析中心(WUM)提供的精密事后产品, 数据处理策略^[20-22]见表1。

表 1 数据处理策略

Tab.1 data processing strategy

类别	参数	策略
观测值	卫星系统	GPS、GLONASS、Galileo、BDS-2、BDS-3
	截止高度角	7°
	采样间隔	30 s
	DCB产品	WUM精密OSB产品
	ERP产品	WUM精密ERP产品
	轨道与钟差	WUM精密轨道钟差产品
改正模型	卫星端/接收机端PCO/PCV	igs14.atx
	对流层	模型改正作为先验值, 残余的对流层延迟按随机游走噪声估计
	电离层	无电离层组合消去一阶项, 忽略高阶项的影响
	相对论效应、固体潮、海潮、极潮、相位缠绕等	软件自带模型
参数估计	位置	随机游走
	接收机钟差	白噪声
	模糊度	常数估计

2 北斗系统定位精度分析

为研究甘肃省北斗系统PPP定位精度,选取北斗卫星导航定位基准站网均匀分布在甘肃省的9座北斗CORS站点,采用这些站点2022年3月13日—2022年3月15日共计3 d的观测数据。基准站接收机类型为中海达VNet8U-I,天线类型为TRM59900.00 SCIS, CORS站分布见图1。这9座测站的真实坐标基于B级以上CORS静态联测及数据处理获取。

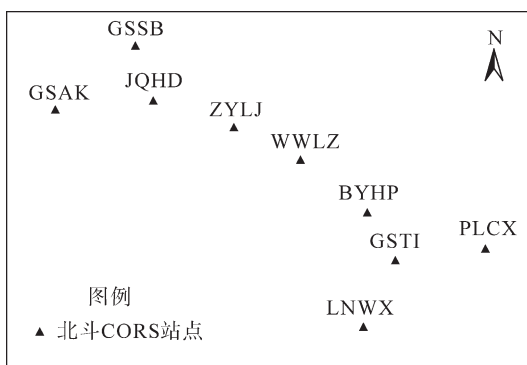
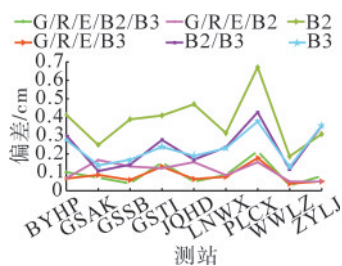
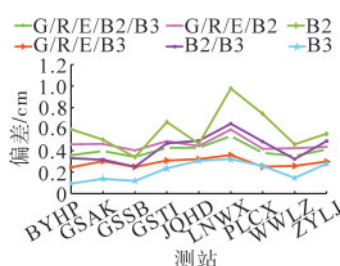


图1 所选北斗CORS站分布

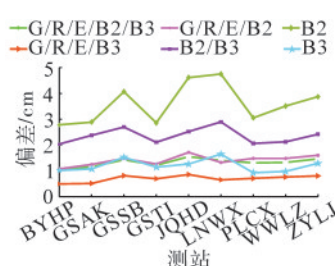
Fig.1 distribution of selected BeiDou CORS stations



(a) East方向



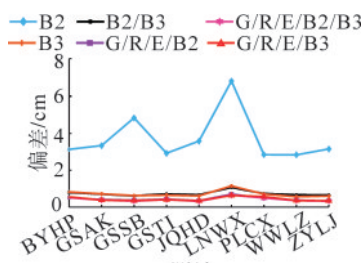
(b) North方向



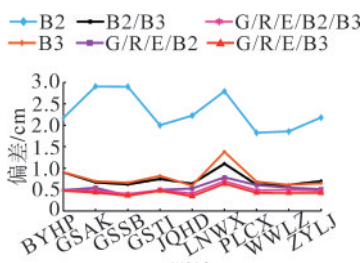
(c) Up方向

图2 各站点静态PPP定位偏差

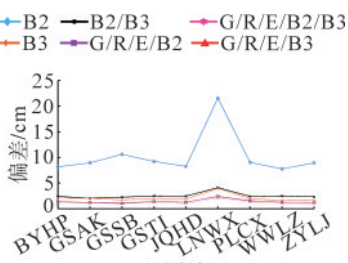
Fig.2 static PPP positioning deviation of each station



(a) East方向



(b) North方向



(c) Up方向

图3 各站点动态PPP定位偏差

Fig.3 kinematic positioning deviation of each station

由图3可以看出,在动态PPP模式中,单北斗B2/B3与B3精度基本一致,水平方向均小于1.1 cm,垂直方向小于4.0 cm,相比于B2在East、North、Up方向定位精度分别提升62.1%、83.8%、81.4%。多系统组合中G/R/E/B3水平方向和垂直方向定位精度

2.1 单天解定位精度

分别采用B2、B3、B2/B3单北斗解算模式以及G/R/E/B2、G/R/E/B3、G/R/E/B2/B3多系统组合解算模式,对9座CORS站坐标进行计算。将静态和动态PPP计算结果与基准站坐标真值作差,获得东(East)、北(North)和天顶(Up)3个方向的坐标差。以年积日第74 d定位结果为例,各CORS站不同系统PPP静态定位结果见图2。由图2可以看出,静态PPP模式下,单北斗B3 PPP定位精度最佳,East、North、Up方向定位精度分别小于0.4 cm、0.3 cm、1.6 cm,相比于B2/B3在North和Up方向定位精度分别提升了57.1%和44.8%,相比于B2在East、North和Up方向定位精度分别提升了42.9%、70.0%、66.7%。多系统组合中G/R/E/B3 PPP定位精度最高,East、North、Up方向定位精度分别小于0.2 cm、0.4 cm、0.9 cm,相比于G/R/E/B2/B3、G/R/E/B2,在East方向定位精度基本一致,在North方向定位精度分别提升了20.0%、33.3%,在Up方向分别提升了40.0%、47.1%。G/R/E/B3在East、North方向精度与B3基本一致,Up方向定位精度比B3提升了43.8%。动态定位结果见图3。

分别为0.6 cm和2.1 cm,相比于G/R/E/B2/B3、G/R/E/B2,在East、North、Up方向定位精度分别提升了14.3%、14.3%、8.7%和25.0%、14.3%、12.5%。G/R/E/B3相比于B3在East、North、Up方向定位精度分别提升了57.1%、50.0%、47.5%。

2.2 多时段定位精度

进一步对 3 d 内单北斗 B2、B2/B3、B3 和多系统 G/R/E/B2、G/R/E/B3、G/R/E/B2/B3 不同时段静态、动态 PPP 定位误差、单历元参与解算卫星数及 PDOP 的均值进行统计,时段长度分别为 1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h。当 GNSS 系统 PPP 定位结果在 East、North、Up 方向定位偏差均小于 0.1 m 时,认为达到收敛^[23]。

对于静态 PPP,单北斗 B2/B3、B3 均在 1 h 时达到收敛,收敛后 East、North、Up 方向定位精度分别为 0.4 cm、0.7 cm、1.2 cm;而 B2 在 4 h 时才能达到收敛,收敛后 East、North、Up 方向定位精度分别为 1.7 cm、1.4 cm、8.7 cm。多系统组合收敛时间均在 1 h 之内,G/R/E/B2 定位精度最低,收敛后 East、North、Up 方向定位精度分别为 0.4 cm、0.8 cm、1.2 cm;G/R/E/B2/B3、G/R/E/B3 在 East 和 North 方向定位精度基本一致,Up 方向定位精度均比 G/R/E/B2 提升约 30.0%。

对于动态 PPP,单北斗 B2/B3、B3 均在 1 h 时达到收敛,收敛后 East、North 方向定位精度均为 0.5 cm,Up 方向定位精度为 1.4~1.5 cm;而 B2 在观测 12 h 后 East 和 North 方向才达到收敛,收敛后 East、North 方向定位精度分别为 3.6 cm、5.4 cm。5 座 CORS 站在 Up 方向达到收敛,收敛后定位精度均为 8.9 cm,观测 24 h 后,Up 方向收敛的测站增加到 7 座,定位精度为 8.6 cm。多系统收敛时间均在 1 h 之内,G/R/E/B2、G/R/E/B2/B3、G/R/E/B3 组合收敛后 East、North、Up 方向定位精度分别为 0.3 cm、0.3 cm、0.8 cm。

位置精度因子(position dilution of precision, PDOP)反映卫星空中几何分布情况,PDOP 值随着卫星数的增大而减小,PDOP 值越小获得的定位结果越可靠^[24-25]。单北斗中,B2、B3、B2/B3 单历元平均参与解算卫星数分别为 7 颗、10 颗、17 颗;B2、B3、B2/B3 的 PDOP 平均值分别为 13.8、2.0、1.6,说明单北斗 B2 PPP 可用卫星的几何构型较差,定位结果质量较低。多系统组合中 G/R/E/B2、G/R/E/B3、G/R/E/B2/B3 平均可用卫星数分别为 31

颗、33 颗、41 颗;G/R/E/B2、G/R/E/B3、G/R/E/B2/B3 的 PDOP 平均值分别为 1.1、1.0、0.9。多系统单历元参与解算的卫星数明显多于单北斗,星座的空间几何构型更强,定位精度明显得到提升。

2.3 基于观测时长定权的定位精度

基于观测时长定权,计算单北斗和多系统组合不同观测时长单位权中误差,作为精度评定指标,单位权中误差为

$$\sigma = \sum_{i=1}^7 p_i \sigma_i, \quad (7)$$

式中: p_i 为对应站心坐标系坐标分量的权重,权重值根据时段确定。总观测时段分为 1 h、2 h、4 h、6 h、8 h、12 h、24 h,共 7 个时段, i 为对应的时段序号。不同时段的 PPP 定位结果与权重呈近似一元线性增长关系,对应的权重依次为 0.02、0.04、0.07、0.11、0.14、0.21、0.42; σ_i 为不同观测时长对应的坐标分量中误差。

基于观测时长定权的定位精度见表 2。鉴于单北斗 B2 在 2 h 及以下时段静态定位结果不收敛,12 h 及以下时段的动态 PPP 定位结果不收敛,最终仅统计精度未超限 CORS 站 4 h 以上的静态 PPP 定位精度及 24 h 动态 PPP 定位精度。对于 PPP 静态解算模式,单北斗 B3 相比于 B2/B3 和 B2 在 East、North、Up 方向定位精度分别提升了 33.3%、33.3%、44.4% 和 66.7%、63.6%、77.8%;多系统 G/R/E/B3 相比于 G/R/E/B2/B3 和 G/R/E/B2,在 North、Up 方向定位精度分别提升了 20.0%、44.4% 和 33.3%、54.5%,G/R/E/B3 与单北斗 B3 在 East、North 方向定位精度相同,在 Up 方向定位精度比 B3 提升 50%。对于 PPP 动态解算模式,单北斗 B3 相比于 B2/B3,仅在 Up 方向定位精度提升了 9.1%,相比于 B2,在 East、North、Up 方向定位精度分别提升了 69.6%、81.1%、80.6%;G/R/E/B3 相比于 G/R/E/B2/B3、G/R/E/B2 仅在 Up 方向定位精度提升了 7.7%;G/R/E/B3 相比于单北斗 B3 在 East、North、Up 方向定位精度分别提升了 42.9%、42.9%、40.0%。

表 2 基于观测时长定权的定位精度

Tab.2 positioning accuracy based on observation duration weighting

系统	静态定位精度/cm			动态定位精度/cm		
	East 方向	North 方向	Up 方向	East 方向	North 方向	Up 方向
B2	0.6	1.1	4.5	2.3	3.7	10.3
B3	0.2	0.4	1.0	0.7	0.7	2.0
B2/B3	0.3	0.6	1.8	0.7	0.6	2.2
G/R/E/B2	0.2	0.6	1.1	0.4	0.4	1.3
G/R/E/B3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.4	1.2
G/R/E/B2/B3	0.1	0.5	0.9	0.4	0.4	1.3

3 甘肃积石山站地震位移量分析

根据中国地震台网正式测定,北京时间2023年12月18日23时59分30秒在甘肃省临夏回族自治州积石山县发生6.2级地震,震源深度为10 km,震中位于北纬35.70°,东经102.79°。甘肃省北斗卫星定位基准站网积石山站(LXJS)距离震中不足5 km,站点类型为土层站,地基较为稳固。为进一步研究北斗系统在实际地震场景中的应用情况,利用PPP-AR动态处理模式,获取该站点G/R/E/B2/B3、G/R/E/B3、G/R/E/B2、B2/B3、B2、B3共6种不同定位星座模式下,采样间隔为1 s的高

频观测数据单历元解。多系统组合G/R/E/B2/B3、G/R/E/B3、G/R/E/B2和单北斗B2/B3、B3均可监测到震后LXJS发生明显的水平位移,且运动趋势一致,与测站真实坐标相比定位偏差见图4。一般而言,当位移变化大于2~3倍的坐标时间序列标准差(standard deviation, STD)时,可准确捕捉到位移变化信息,而单北斗B2由于East方向和North方向坐标时间序列STD分别高达1.3 cm和2.3 cm,已接近或超过地震导致的实际位移,见图5。此外,单北斗及包含北斗的多系统组合Up方向的STD均大于实际Up方向位移,因此地震引起的垂直方向位移同样无法实现准确监测。

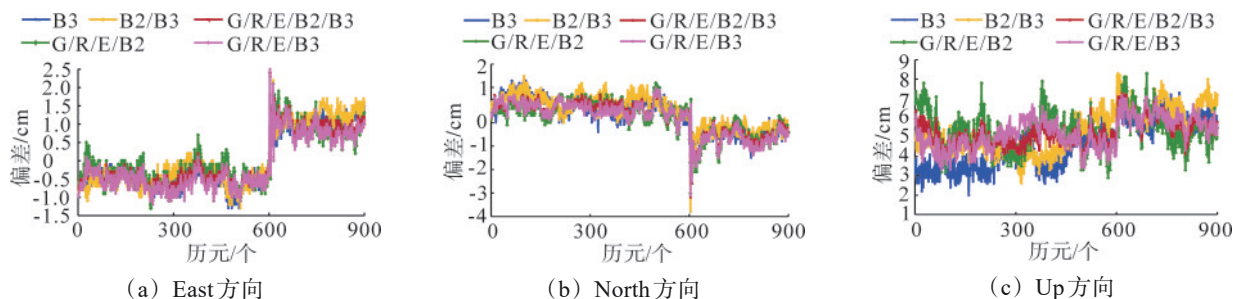


图4 单北斗B2/B3、B3及多系统组合定位偏差

Fig.4 single BeiDou B2/B3, B3 and multi-system combination positioning deviation

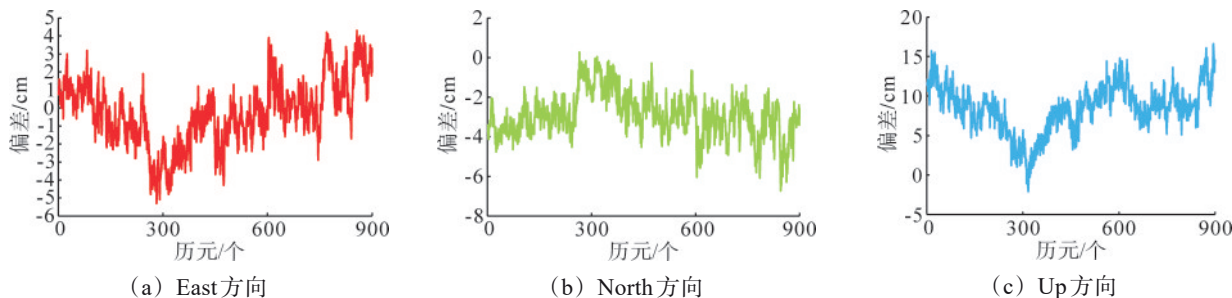


图5 单北斗B2定位偏差

Fig.5 single BeiDou B2 positioning deviation

为进一步展示地震对CORS站的影响,分别统计地震前15 min和地震后15 min坐标时间序列的STD、地震前后平均位移和地震时最大弹性位移,推算地震对该站点产生的弹性位移和永久性位移,因单北斗B2误差较大,不进行相关精度统计分析。LXJS站各方向位移变化见图6。G/R/E/B2/B3、G/R/E/B2、G/R/E/B3和单北斗B2/B3、B3在East和North方向上震前、震后的STD为0.3~0.5 cm,包含北斗的多系统组合坐标时间序列相对于单北斗更为稳定,其中G/R/E/B3定位性能最佳,震后在East和North方向平均位移量分别为1.4 cm和1.3 cm。

为验证地震导致的LXJS测站永久性位移,采用PPP-AR静态处理模式解算地震前、地震后

连续3 d采样间隔为30 s的观测数据,通过震前、震后定位结果推算得到该测站在East、North方向所产生的永久性位移与G/R/E/B3动态监测平均位移量基本一致。G/R/E/B3相比于单北斗中定位性能最佳的B3,仅在North方向监测精度提升了8.3%,相比于单北斗B2/B3在East、North方向定位精度分别提升了12.5%、8.3%。说明单北斗B3和B2/B3 PPP用于地震监测具备一定可行性。此外,由G/R/E/B3 PPP-AR动态解算结果可知,LXJS站发生了可恢复性的弹性形变,地震后在East和North方向发生的最大弹性位移的平均值分别为29 mm、39 mm,与单北斗B3、B2/B3相比,在East、North方向监测精度分别提升了3.6%、11.4%和11.5%、9.3%,弹性位移较差,均在5 mm之内。

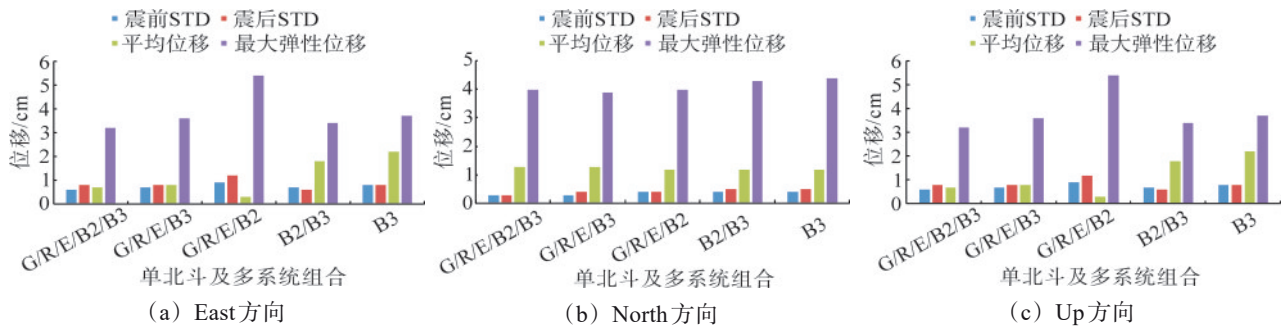


图6 LXJS站各方向位移变化

Fig.6 displacement changes in all directions at the LXJS station

4 结论

本文利用甘肃省北斗卫星导航定位基准站网实测多频多模观测数据和武汉大学发布的精密卫星轨道、精密钟差和相位偏差产品,从定位精度、收敛时间、卫星数及PDOP等多方面,研究了甘肃省内单北斗B2、B2/B3、B3及包括北斗的G/R/E/B2、G/R/E/B2/B3、G/R/E/B3多系统组合PPP-AR解算定位精度和性能。分析了位于临夏积石山地震震中区域LXJS测站的位移变化情况,得出如下结论。

(1) 综合不同观测时长定位结果,单北斗B3定位精度优于B2/B3和B2,多系统组合G/R/E/B3优于G/R/E/B2/B3和G/R/E/B2。与单北斗B3相比,多系统组合G/R/E/B3静态模式下East和North方向定位精度基本相同,Up方向定位精度提升了50%,动态模式下East、North、Up方向定位精度至少提升了40%。

(2) 多系统组合G/R/E/B2、G/R/E/B2/B3、G/R/E/B3及单北斗B2/B3、B3均在1 h内收敛,B2静态模式下4 h达到收敛,动态模式下East和North方向12 h达到收敛,Up方向24 h达到收敛。

(3) 单北斗B2可利用的解算卫星数为7~8颗,在轨卫星空间分布不均匀,PDOP值高达17.5,加之轨道误差、卫星钟差较大,信号质量差,导致其在单北斗B2/B3或多系统G/R/E/B2/B3模式下出现卫星数增多、PDOP值减小而整体定位精度下降的现象。

(4) 分别采用单北斗和基于北斗的多系统组合模式对临夏积石山地震震中CORS站位移变化进行分析,单北斗B2/B3、B3及多系统组合均可实现毫米级地震位移监测。

参考文献(References):

[1] 崔阳,陈正生,魏佼琛.不同时期的BDS-3精密单点定位性能分析[J].测绘通报,2023(9):1-5.

CUI Yang, CHEN Zhengsheng, WEI Jiaochen. Performance analysis of BDS-3 precise point positioning in different periods[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(9):1-5.

[2] 祝会忠,白云鹏.北斗三号高精度载波相位差分定位算法[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(5):593-599.

ZHU Huizhong, BAI Yunpeng. BeiDou-3 high-precision carrier phase difference positioning algorithm[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2024, 43(5):593-599.

[3] 史俊波,董新莹,欧阳晨皓,等.基于北斗三号PPP服务的快速静态和低动态定位性能分析[J].大地测量与地球动力学,2023,43(10):997-1002.

SHI Junbo, DONG Xinying, OUYANG Chenhao, et al. Assessment of fast static and low-speed kinematic positioning based on BDS-3 PPP service[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(10):997-1002.

[4] 王翔,聂志喜,王振杰,等.北斗三号PPP-B2b服务的海洋实时精密单点定位性能评估[J].导航定位学报,2023,11(4):18-23.

WANG Xiang, NIE Zhixi, WANG Zhenjie, et al. Initial assessment of offshore real-time precise point positioning based on BDS-3 PPP-B2b service[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2023, 11(4):18-23.

[5] 朱小韦,袁占良,杨耀环.北斗三号卫星导航系统精密单点定位的性能分析[J].测绘通报,2023(9):6-11,58.

ZHU Xiaowei, YUAN Zhanliang, YANG Yaohuan. Performance analysis of precise point positioning of BeiDou-3 Navigation Satellite System[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(9):6-11,58.

[6] 卢福康,余学祥,肖星星,等.BDS-2/BDS-3/GPS/Galileo双频精密单点定位精度分析与评价[J].全球定位系统,2022,47(5):35-44.

LU Fukang, YU Xuexiang, XIAO Xingxing, et al. BDS-2/BDS-3/GPS/Galileo dual frequency precision single point positioning accuracy analysis and evaluation[J]. GNSS World of China, 2022, 47(5):35-44.

[7] 戴金倩,吴迪,戴小蕾,等.BDS-3实时精密单点定位精度分析[J].测绘通报,2020(1):30-34.

DAI Jinqian, WU Di, DAI Xiaolei, et al. The real-time PPP precision analysis based on BDS-3[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(1):30-34.

[8] 黄剑明,庄典,李敬伟,等.BDS/GPS PPP固定解精度分析及其在地震中的应用[J].导航定位学报,2023,11(2):106-116.

- HUANG Jianming, ZHUANG Dian, LI Jingwei, et al. Precision analysis of BDS/GPS PPP fixed solution and its application in earthquake[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2023, 11(2): 106-116.
- [9] 董昊坤,张启元.GPS/Galileo/BDS三系统全频率PPP-AR性能分析[J].全球定位系统,2023,48(5):38-45,70.
- DONG Haoshen, ZHANG Qiyan. Performance analysis of GPS/Galileo/BDS three systems and all-frequency PPP-AR[J]. GNSS World of China, 2023, 48(5): 38-45, 70.
- [10] 袁兴明.GPS/BDS-3/Galileo精密单点定位模糊度固定[J].导航定位学报,2023,11(5):84-91.
- YUAN Xingming. Ambiguity resolution for GPS/BDS-3/Galileo precision point positioning[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2023, 11(5): 84-91.
- [11] 慕仁海,党亚民,许长辉.BDS-3新频点单点定位研究[J].测绘通报,2021(3):12-17.
- MU Renhai, DANG Yamin, XU Changhui. Research on single point positioning of BDS-3 new signal[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(3): 12-17.
- [12] 徐文康,党亚民,许长辉.BDS-3新频点PPP模糊度固定研究[J].测绘科学,2023,48(2):10-15,69.
- XU Wenkang, DANG Yamin, XU Changhui. Study on PPP ambiguity resolution with BDS-3 new frequency signals[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(2): 10-15, 69.
- [13] LI X P, PAN L. Precise point positioning with almost fully deployed BDS-3, BDS-2, GPS, GLONASS, Galileo and QZSS using precise products from different analysis centers[J]. Remote Sensing, 2021, 13(19): 3905.
- [14] 阴冠澎,徐爱功,高猛,等.BDS-3多频精密单点定位模型及性能分析[J].测绘科学,2023,48(2):36-44.
- YIN Guanpeng, XU Aigong, GAO Meng, et al. Research on model and performance of BDS-3 multi-frequency precise point positioning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(2): 36-44.
- [15] SU K, JIN S G, JIAO G Q. Assessment of multi-frequency global navigation satellite system precise point positioning models using GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo and QZSS[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(6): 064008.
- [16] ZHU S L, YUE D J, HE L N, et al. Modeling and performance assessment of BDS-2/BDS-3 triple-frequency ionosphere-free and uncombined precise point positioning[J]. Measurement, 2021, 180: 109564.
- [17] 徐宗秋,黄天舒,徐爱功,等.电离层二阶项改正对BDS精密单点定位的影响[J].测绘科学,2022,47(12):8-15.
- XU Zongqiu, HUANG Tianshu, XU Aigong, et al. Impact of second-order ionospheric delay for BDS precise point positioning[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(12): 8-15.
- [18] 徐宗秋.基于多导航卫星系统的精密单点定位模型与方法研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013:11-15.
- [19] 李文文,李敏,赵齐乐,等.FY3C卫星星载BDS与GPS数据质量分析与融合定轨[J].测绘学报,2018,47(增刊):9-17.
- LI Wenwen, LI Min, ZHAO Qile, et al. FY3C Satellite onboard BDS and GPS data quality evaluation and precise orbit determination[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(Suppl): 9-17.
- [20] 赵龙,郭将,栗广才,等.北斗/GNSS机载动态PPP性能分析[J].全球定位系统,2022,47(5):57-64.
- ZHAO Long, GUO Jiang, LI Guangcai, et al. Performance analysis of BDS/GNSS airborne kinematic PPP[J]. GNSS World of China, 2022, 47(5): 57-64.
- [21] 董建权,郭将,栗广才,等.不同对流层模型对机载精密单点定位的影响分析[J].全球定位系统,2022,47(6):9-17,37.
- DONG Jianquan, GUO Jiang, LI Guangcai, et al. Influence analysis of different tropospheric models on airborne precise point positioning[J]. GNSS World of China, 2022, 47(6): 9-17, 37.
- [22] GENG J H, CHEN X Y, PAN Y X, et al. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 91.
- [23] 祝会忠,杨添宇,赵洪涛,等.GNSS多系统精密单点定位方法与性能分析[J].测绘科学,2020,45(12):1-7,21.
- ZHU Huizhong, YANG Tianyu, ZHAO Hongtao, et al. GNSS multi-system precise point positioning method and performance analysis [J]. Science of Surveying and Mapping, 2020, 45(12): 1-7, 21.
- [24] VÁZQUEZ-ONTIVEROS J R, PADILLA-VELAZCO J, GAXIOLA-CAMACHO J R, et al. Evaluation and analysis of the accuracy of open-source software and online services for PPP processing in static mode[J]. Remote Sensing, 2023, 15(8): 2034.
- [25] LI Y, ZHANG Z T, HE X F, et al. Realistic stochastic modeling considering the PDOP and its application in real-time GNSS point positioning under challenging environments[J]. Measurement, 2022, 197: 111342.