引文格式:方荣新,陈智潜,李大炜,等.基于北斗PPP-B2b改正信号的地震同震形变实时监测方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):567-575.DOI:10.13203/j.whugis20240163

Citation:FANG Rongxin,CHEN Zhiqian,LI Dawei,et al.A Method for Real-Time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):567-575.DOI:10.13203/j.whugis20240163

基于北斗PPP-B2b改正信号的地震同震形变实时监测方法

方荣新[1] 陈智潜[1] 李大炜[2] 郑佳伟[1] 吕黄晖[1] 胡冰燕[2] 刘经南[1]

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

2 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

摘 要:针对精密单点定位(precise point positioning,PPP)实时解算需要提供精密卫星轨道和钟差产品,且高度依赖于网络传输等问题,提出一种基于北斗PPP-B2b改正信号的地震同震形变实时监测方法。该方法可直接利用全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)接收机同时接收观测数据和改正信号实现实时精密定位。利用2022年四川泸定Ms 6.8地震1 Hz GNSS观测数据回溯性反演,基于B2b改正产品的静态PPP平均均方根水平方向可达到1~2 cm,高程方向可达到2~4 cm;动态模式下,以WUM精密产品解算为参考,基于B2b改正产品解算的位移波形在东、北方向的差值分别仅为0.56 cm和1.08 cm。利用B2b产品和WUM产品定位结果确定的泸定地震震级分别为Ms 6.76和Ms 6.67,与中国地震局公布的震级相比仅相差0.04个震级单位,表明基于北斗B2b改正信号的PPP方法可应用于地震实时监测及地震参数快速确定等应用研究。

关键词:PPP-B2b信号;高频GNSS;地震监测;泸定地震

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-10-28

DOI:10.13203/j.whugis20240163 **文章编号**:1671-8860(2026)03-0567-09

A Method for Real-Time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals

FANG Rongxin[1] *CHEN Zhiqian*[1] *LI Dawei*[2] *ZHENG Jiawei*[1] *LÜ Huanghui*[1]
HU Bingyan[2] *LIU Jingnan*[1]

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: **Objectives**: For real-time precise point positioning (PPP) solutions, precise satellite orbit and clock correction products are required, and is highly dependent on network transmission. **Methods**: This paper proposes a real-time monitoring method for coseismic displacement based on BeiDou satellite navigation system (BDS) PPP-B2b signals, which enables direct utilization of global navigation satellite system (GNSS) receivers to simultaneously receive observation data and correction signals for real-time precise positioning. **Results**: By retrospectively inverting 1 Hz GNSS observation data for the 2022 Luding Ms 6.8 earthquake in Sichuan, the average root mean square of static PPP in the horizontal direction based on B2b correction products can reach 1-2 cm, and in the vertical direction can reach 2-4 cm. In the kinematic PPP mode, using WUM precise products as a reference, the displacement waveforms calculated based on B2b correction products have differences of only 0.56 cm and 1.08 cm in the east and north directions, respectively. The magnitude of the Luding earthquake determined using the displacement waveforms from B2b

基金项目:国家自然科学基金(42274025)。

第一作者:方荣新,博士,教授,主要从事北斗/GNSS高精度定位及应用研究。rfang@whu.edu.cn

通信作者:李大炜,博士,讲师。dwli@whu.edu.cn

products and WUM products is Ms 6.76 and Ms 6.67, respectively. Compared with the magnitude announced by the China Earthquake Administration, they differ by only 0.04 magnitude units. **Conclusions:** This study indicates that the PPP method based on BDS B2b correction signals can be applied to real-time seismic monitoring and rapid determination of seismic parameters.

Key words: PPP-B2b signal; GNSS; earthquake monitoring; Luding earthquake

随着高频(≥1 Hz)全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)接收机的出现以及高精度定位技术的发展,高频GNSS技术被广泛应用于地震同震形变监测及反演研究[1-9]。高频GNSS技术能克服测震仪饱和效应和强震仪基线偏差等问题,在大震监测中具有传统地震监测仪器无法比拟的优势[10-12]。

高频GNSS数据处理主要有相对定位和精密单点定位(precise point positioning,PPP)方法。相对定位方法通过与参考站作差,消除接收机钟差、电离层延迟、对流层延迟等误差,定位精度可达厘米级,但该方法在地震实时监测应用中存在难以快速选择稳定且距离合适的参考站的问题[13]。PPP仅使用单台接收机便可获取高精度位置坐标,成为地震同震形变监测的一种重要手段[14-15]。由于PPP实时解算需要实时提供精密卫星轨道和钟差产品,其应用性能高度依赖于网络传输条件。而大地震发生后,网络通信往往易中断,限制了实时PPP的工程化应用。

2019年中国北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,BDS)公开PPP-B2b服务信号,并且发布了对应的接口控制文件(PPP-B2b测试版),可为用户提供实时PPP服务。BDS-3地球静止轨道卫星(geostationary earth orbit,GEO)通过PPP-B2b信号实时为用户播发轨道、钟差、码偏差的改正参数,用户可直接利用GNSS接收机接收观测数据和B2b改正产品实现高精度定位。由于基于PPP-B2b改正信号的定位方式采用卫星播发替代互联网传输模式,因此不受网络传输限制,特别适合复杂环境下实时PPP应用[16]。

目前,国内外学者对BDS-3 PPP-B2b改正及其定位性能开展了相关研究。宋伟伟等[17]利用2020年9月7天的观测数据评估了PPP-B2b信号的北斗卫星轨道和钟差精度,表明B2b改正后的轨道在径向(R)、法向(C)、切向(A)的精度分别为10 cm、31 cm、30 cm。郭斐等[18]对轨道、钟差、码偏差进行了精度评估,7天的解算结果表明,中地球轨道卫星(middle earth orbit,MEO)卫星经B2b产品改正后,轨道精度在R、C、A的精度分别为6.84 cm、25.63 cm、21.93 cm。REN等[19]使用B2b改正产品和广播星历进行了实时PPP评估,结果表明,BDS-3卫星在R、C、A的实时轨道精度分别为7.25 cm、24.79 cm、25.87 cm。ZHANG等[20]对中国国内6个国际GNSS监测评估系统(international GNSS monitoring assessment service,iGMAS)测站150天的观测数据进行了分析,评估B2b改正产品和PPP性能,静态模式下,单BDS-3系统平均均方根(root mean square,RMS)在水平和垂直分量上分别约为2.1 cm和2.6 cm,BDS-3与全球定位系统(global positioning system,GPS)多系统平均RMS在水平和垂直分量上分别为1.8 cm和2.1 cm。在6个测站模拟动态PPP实验中,统计150天的解算结果表明,单BDS-3系统在水平和垂直分量上的平均RMS分别为21.5 cm和33.4 cm,BDS-3与GPS多系统平均RMS在水平和垂直分量上分别为15.2 cm和30.4 cm。NIE等[21]利用4个iGMAS测站的观测数据研究了BDS-3和GPS多系统下PPP精度,研究表明,静态模式下,B2b实现PPP水平定位精度可优于0.3 m,垂直定位精度可优于0.6 m,收敛后PPP在最后10 min的平均RMS值在东、北、高程3个方向上分别可达2.40 cm、1.60 cm、2.30 cm。模拟动态PPP模式下,统计4个测站3天的结果表明,在东、北、高程3个方向上的平均RMS分别可达8.10 cm、3.60 cm、8.00 cm。

在此基础上,相关学者开展了基于BDS-3 PPP-B2b信号的监测应用研究。YANG等[22]针对地震瞬时位移监测中传统方法的局限,采用静态数据模拟动态方式初步验证了B2b服务在地震监测中的可行性。FANG等[23]使用B2b改正产品对2021年Mw 7.4玛多地震实测数据进行分析处理,结果表明,与使用最终精密产品的GPS单系统的PPP结果相比,使用B2b改正产品在东、北、高程方向上精度分别可达到1.7 cm、2.4 cm和1.7 cm。ZANG等[24]利用2021年Mw 7.4玛多地震期间收集的GNSS观测数据,验证了PPP-B2b在实时震后位移监测方面的性能,并利用得到的同震位移数据回溯性反演了震级、震源机制和断层滑动分布,结果表明采用B2b产品结果与PPP产品反演的结果一致。

北斗PPP-B2b服务应用于地震监测研究还

处于初步探索阶段,除了2021年Mw 7.4玛多地震,尚未涵盖更多的地震案例,因此,本文以2022年四川泸定Mw 6.8地震为例,评估北斗PPP-B2b服务在地震波监测方面的性能,进一步了解B2b改正产品在震级计算等地学应用上的潜力。

1　原理与方法

目前,北斗系统播发的PPP-B2b信号可用于BDS-3与GPS卫星的广播星历改正。表1列出了B2b产品播发的4种主要信息类型。

表1　B2b信息类型

Table 1　B2b Signal Information Types

信息类型	信息内容
1	卫星掩码
2	轨道改正数、测距精度指数
3	码偏差改正数
4	钟差改正数

1.1　CNAV1导航电文改正方法

对于BDS-3,PPP-B2b信号可以改正B1C信号播发的CNAV1导航电文;对于GPS,可用PPP-B2b信号改正LNAV导航电文。由于北斗定位中常用的是B1I、B3I信号播发的D1、D2导航电文,与B2b采用的CNAV1导航电文有所不同,因此这里介绍针对CNAV1导航电文的改正方法。

1)长半轴平方根

CNAV1导航电文中并未播发轨道长半轴平方根,而是参考时刻长半轴的偏差ΔA,同时加入了长半轴变化率参数$\dot{A}$,因此长半轴的计算方式为:

$$A_k = A_{\mathrm{ref}} + \Delta A + (\dot{A})(t - t_{\mathrm{TOE}}) \tag{1}$$

式中,A_k为观测历元的长半轴;A_{ref}为长半轴的参考值,根据卫星类型,其数值也不同,例如MEO卫星的长半轴参考值为27 906.1 km,GEO卫星则为42 162.2 km;ΔA为与参考时刻的长半轴相对于参考值的偏差;$\dot{A}$为长半轴变化率参数;$t - t_{\mathrm{TOE}}$为观测历元与参考历元(time of ephemeris, TOE)的时间差。

2)平均角速度改正项

CNAV1导航电文中加入了平均角速度变化率$\Delta\dot{n}_0$(参考时刻的卫星平均角速度和计算值差值的变化率),计算平均角速度偏差公式为:

$$\Delta n_A = \Delta n_0 + \frac{\Delta\dot{n}_0 (t - t_{\mathrm{oe}})}{2} \tag{2}$$

式中,Δn_0为卫星平均角速度与计算值差值。

1.2　轨道、钟差和码偏差改正

在使用B2b改正产品前,需对PPP-B2b导航电文信息进行解码,得到轨道、钟差以及码偏差改正信息,再将其与导航电文进行匹配,即可得到精确的轨道和钟差产品。

1)卫星轨道改正

PPP-B2b导航电文信息中的轨道改正信息获取的参数为轨道改正向量$\delta\boldsymbol{O}$,其在R、A、C的分量分别为$[\delta O_R \ \delta O_A \ \delta O_C]^{\mathrm{T}}$。由于改正向量$\delta\boldsymbol{O}$所在坐标系为星固系,需要将其转换为地固系下的卫星轨道改正数$\delta\boldsymbol{X}$。$\delta\boldsymbol{X}$计算如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_R = \dfrac{\boldsymbol{r}}{|\boldsymbol{r}|}, \boldsymbol{e}_C = \dfrac{\boldsymbol{r}\times\dot{\boldsymbol{r}}}{|\boldsymbol{r}\times\dot{\boldsymbol{r}}|} \\ \boldsymbol{e}_A = \boldsymbol{e}_R \times \boldsymbol{e}_C \\ \delta\boldsymbol{X} = [\boldsymbol{e}_R \ \boldsymbol{e}_A \ \boldsymbol{e}_C]\cdot\delta\boldsymbol{O} \end{cases} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{r} = \boldsymbol{X}$为广播星历卫星位置矢量;$\dot{\boldsymbol{r}} = \dot{\boldsymbol{X}}_{\mathrm{broadcast}}$为广播星历卫星速度矢量;$\boldsymbol{e}_R$、$\boldsymbol{e}_A$、$\boldsymbol{e}_C$分别对应$R$、$A$、$C$方向的单位矢量;$\delta\boldsymbol{O} = [\delta O_R \ \delta O_A \ \delta O_C]^{\mathrm{T}}$为PPP-B2b信息中获得的轨道改正矢量[6]。

将式(3)中得到的卫星轨道改正数$\delta\boldsymbol{X}$与卫星位置向量$\boldsymbol{X}_{\mathrm{broadcast}}$(利用广播星历计算)联合解算即可得到改正后的卫星位置$\boldsymbol{X}_{\mathrm{orbit}}$:

$$\boldsymbol{X}_{\mathrm{orbit}} = \boldsymbol{X}_{\mathrm{broadcast}} - \delta\boldsymbol{X} \tag{4}$$

2)钟差改正

钟差改正导航电文中参数是相对于广播星历钟差的改正参数,计算公式如下:

$$t_{\mathrm{satellite}} = t_{\mathrm{broadcast}} - \frac{C_0}{c} \tag{5}$$

式中,$t_{\mathrm{satellite}}$为改正后的卫星钟差;$t_{\mathrm{broadcast}}$为广播星历计算的卫星钟差参数;C_0为PPP-B2b导航电文中的钟差改正参数;c为光速。

3)码偏差改正

通过不同信号得到的观测值之间存在系统性偏差,在处理各频率的信号时,需要消除该偏差,实现各频率各信号同步处理。北斗PPP-B2b信号提供GPS与BDS的码偏差分别基于L1/L2组合观测值和B3I观测值。本文使用的GPS观测值为L_1/L_2组合观测值,因此无需进行码偏差改正。但对于北斗系统,由于PPP-B2b信号提供的钟差频点基准为B3频点,当用户使用B1/B3双频无电离层组合模型时,需要进行码间偏差(differential code bias,DCB)的改正,计算如下:

$$\mathrm{d}t^s_{\mathrm{B1/B3}} = \mathrm{d}t^s_{\mathrm{B3}} - \frac{f^2_{\mathrm{B1}}}{f^2_{\mathrm{B1}} - f^2_{\mathrm{B3}}}\mathrm{DCB}^s_{\mathrm{B1/B3}} \tag{6}$$

式中，$d t^{s}_{B1/B3}$是以B1/B3为基准的卫星钟差；$d t^{s}_{B3}$为利用北斗导航电文计算得到的基准为B3的钟差；f_{B1}、f_{B3}分别代表B1、B3频点的频率；$DCB^{s}_{B1/B3}$为两频点间的码间偏差。

1.3 定位算法流程

利用B2b产品进行高精度定位时，首先对BDS-3 GEO卫星播发的PPP-B2b信号进行解码，获取高精度的轨道、钟差和码间偏差改正数；然后利用导航电文计算卫星位置与钟差，对计算得到的结果利用解码出的改正数进行改正；最后将改正后的精密轨道、钟差产品与GNSS观测数据一起进行PPP定位解算。算法流程如图1所示。

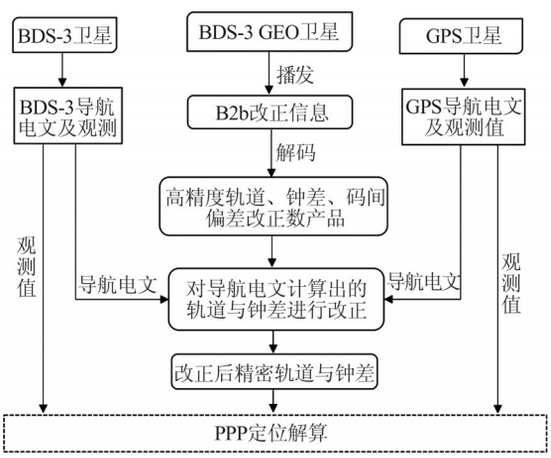


图1 基于PPP-B2b产品的定位算法流程

Fig. 1 Algorithm Flowchart for Positioning Based on PPP-B2b Products

本文PPP解算采用武汉大学自主研发的PANDA软件[25-26]。PPP解算使用双频无电离层组合观测值，利用无几何距离组合和Melbourne-Wubbena组合进行周跳探测，对流层延迟误差采用Saastamoinen模型和全球投影函数改正，天线相位缠绕、相对论效应、潮汐效应、地球自转等误差采用模型改正，软件采用平方根信息滤波估计站坐标、模糊度、接收机钟差以及残余电离层湿延迟参数。软件采用的精密产品分别为PPP-B2b信号改正广播星历后轨道和钟差产品（简称B2b改正产品）以及武汉大学IGS数据中心发布的精密轨道和钟差产品（简称WUM精密产品）。

2 结果与分析

2.1 实验数据

北京时间2022-09-05T12:52:18在四川省甘孜藏族自治州泸定县（102.08°E，29.59°N）发生Ms 6.8地震，震源深度16 km。本次地震为走滑型地震，破裂面走向为北北西-南南东，破裂由震中向东南方向延伸，最大破裂点位于震中东南方向10 km处[27]。本文选取了地震发生当天陆态网络6个GNSS测站（SCSM、SCTQ、SCYX、SCXD、SCXJ、SCLT）1 Hz观测数据进行分析，测站分布如图2所示，红色五角星为震中位置，黑色圆点为高频GNSS测站，黑色实线描绘了地震破裂方向。由于陆态网络工程建立较早，该6个测站的GNSS接收机无法接收BDS-3卫星数据，因此后续研究仅采用GPS观测数据。图3显示了地震期间测站SCYX 1 h（12:00:00—13:00:00）的GPS卫星天空图。PPP-B2b产品由定制的飞纳经纬接收机接收得到，并根据§1描述的原理与方法获得B2b精密改正产品。

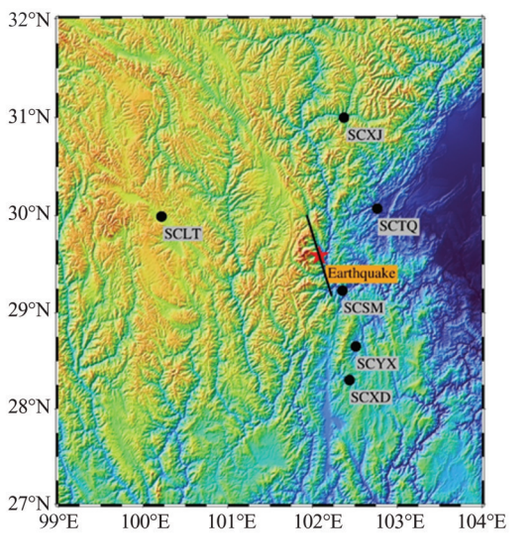


图2 震中与GNSS测站分布图

Fig. 2 Distribution Map of Epicenter and GNSS Stations

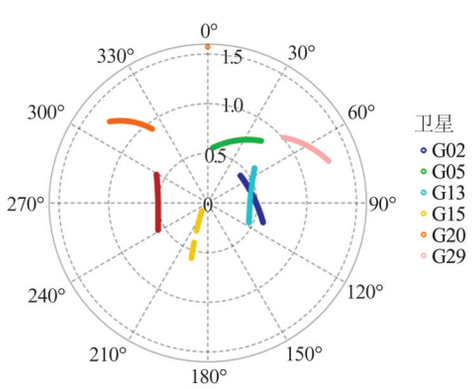


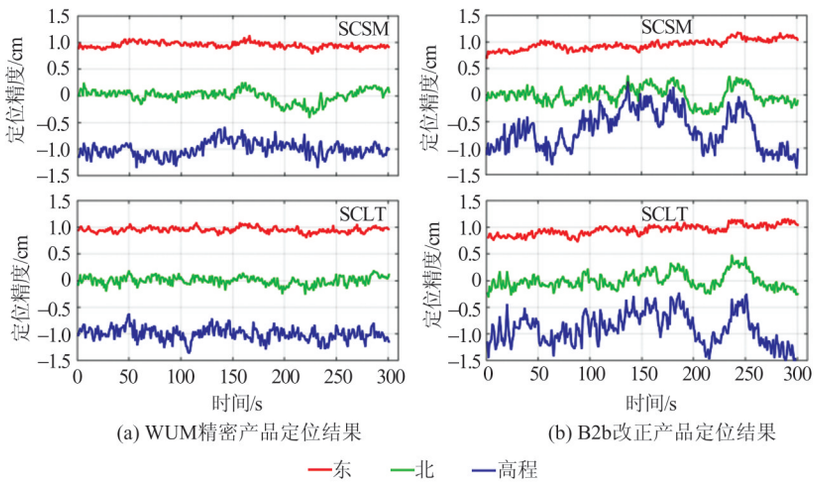
图3 地震期间测站SCYX 1 h GPS卫星天空图

Fig. 3 One-Hour GPS Satellite Sky Plot of Station SCYX During the Earthquake

2.2 静态实验结果

首先利用B2b改正产品与WUM事后精密产品对6个测站的GPS数据进行PPP解算，得到各测站东、北、高程3个方向的定位结果。为定量评

估两种PPP定位结果的解算精度,选取地震发生前测站静止不动的时段进行精度统计。图4为距离震中最近的SCSM测站与距离较远的SCLT测站在静止期间5 min的定位结果。



注:起始时间:2022-09-05T12:45:00。

图4　基于WUM精密产品与B2b改正产品的PPP结果

Fig. 4　PPP Results Based on WUM Products and B2b Products

表2统计了6个测站PPP定位精度RMS值。基于WUM精密产品的PPP定位精度在东、北、高程3个方向平均RMS分别为0.56 cm、0.93 cm、1.35 cm,基于B2b产品的PPP定位精度在东、北、高程3个方向平均RMS分别为1.06 cm、1.53 cm、3.08 cm,可见两者在水平方向精度相当,可达1~2 cm,后者在高程方向精度略低,但是其高程精度也优于4 cm。根据前人研究,PPP定位精度水平1~2 cm、高程3~5 cm可满足地震监测精度要求[10-11]。需要说明的是,本文主要瞄准地震波监测,而地震波的持续时间一般为几十秒至几分钟,因此统计时长为5 min的静态定位精度可满足地震监测需求。

表2　WUM精密产品与B2b改正产品PPP定位精度/cm

Table 2　PPP Positioning Accuracy Based on WUM Products and B2b Products/cm

测站	WUM精密产品			B2b改正产品		
	东	北	高程	东	北	高程
SCLT	0.48	0.80	1.21	0.93	1.50	3.00
SCSM	0.53	1.19	1.37	0.94	1.62	3.55
SCTQ	0.47	0.81	1.69	0.77	1.40	3.07
SCXD	0.51	0.76	0.98	1.14	1.71	2.71
SCXJ	0.86	1.25	1.48	1.26	1.41	3.20
SCYX	0.48	0.79	1.36	1.30	1.53	2.94
平均值	0.56	0.93	1.35	1.06	1.53	3.08

2.3　地震位移监测结果

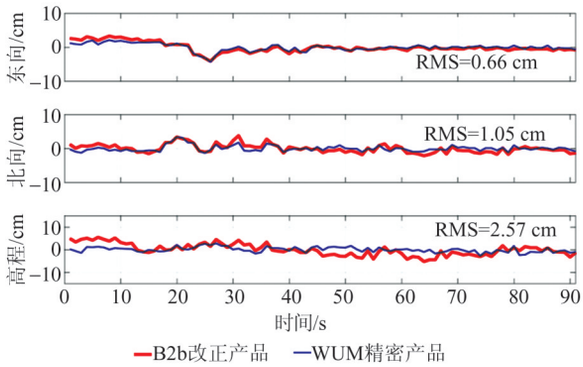
在验证基于B2b改正产品的PPP定位性能后,进一步评估其在地震位移监测中的性能。利用B2b改正产品和WUM精密产品分别对包含地震发生时刻的观测数据进行PPP解算得到地震位移波形。

图5显示了距离震中最近的测站SCSM的位移波形图,蓝线为WUM精密产品PPP定位结果,红线为B2b改正产品PPP定位结果。从图5可看出,东、北方向具有明显波动,高程方向波形较小。此次地震为走滑破裂,该破裂模式的特征为震动主要表现为水平方向[27]。考虑到离震中最近的SCSM测站的高程方向无明显震动波形,因此后续分析仅展示水平方向位移结果。

图6绘制了6个测站东、北方向的地震位移波形,蓝线表示WUM精密产品解算结果,红线表示B2b改正产品解算结果。为展示地震波到达时间及波形大小,纵轴按震中距进行排列与平移。从图6可以看出,距离震中最近的SCSM测站地震波最先到达,且位移波形最大。

为了定量评估B2b改正产品解算结果的精度,以WUM精密产品解算的结果为参考,统计两者定位结果差值的RMS值(表3)。表3结果表明,B2b改正产品解算结果与WUM精密产品解算结果在东、北方向的差值仅为0.56 cm和1.08 cm,说明基于B2b改正产品的地震波监测精度与基于WUM精密产品水平相当。

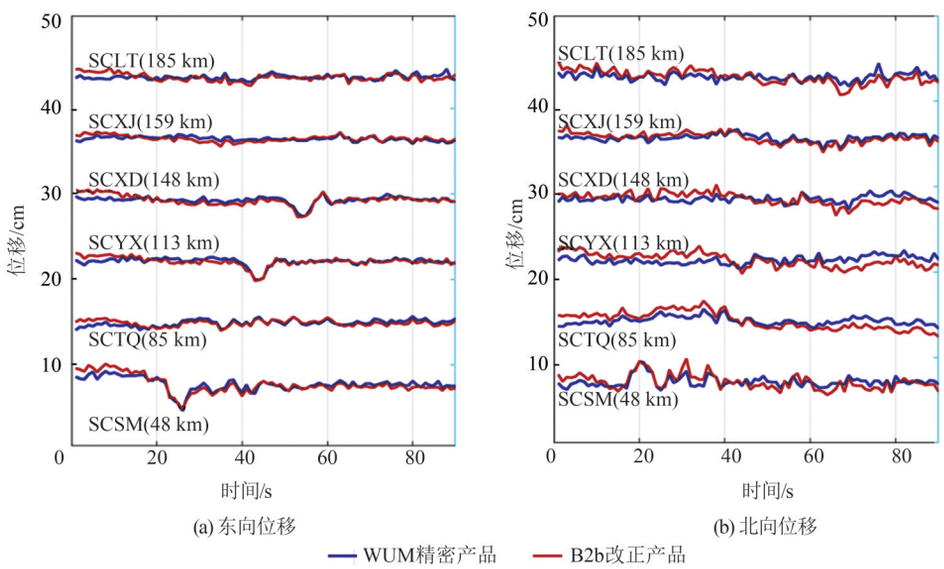
结合图2和图6发现,位于震中东南方向的SCYX(113 km)测站和SCXD(148 km)测站位移幅度大于位于震中东北方向的SCTQ(85 km)测站,但前两者距离震中距离更远,表现出地震波衰减与传播距离不完全一致。BOATWRIGHT[28]指出,地面



注:起始时间:2022-09-05T12:52:30。

图5 基于WUM精密产品与B2b改正产品解算的SCSM测站地震位移波形

Fig. 5 Displacement Waveforms Calculated by WUM Products and B2b Products at SCSM Station



注:起始时间:2022-09-05T12:52:30。

图6 6个测站东、北方向地震位移波形

Fig. 6 Earthquake Displacement Waveforms of Six Stations in the East and North Components

表3 WUM精密产品与B2b改正产品定位结果的差值RMS/cm

Table 3 Difference RMS of Positioning Results Between WUM Products and B2b Products/cm

测站	东向	北向
SCLT	0.66	1.08
SCSM	0.66	1.05
SCTQ	0.47	1.16
SCXD	0.57	1.02
SCXJ	0.46	0.88
SCYX	0.51	1.30
平均值	0.56	1.08

震动强度与破裂方向密切相关,沿着破裂方向上的地面震动强度相对较高,垂直于破裂方向上的地面震动强度相对较低,且离发震断层近的区域震动强度高。因此位于震中东南方向的SCSM、SCYX、SCXD测站的地震波大于东北方向的SCTQ、SCXJ测站的地震波。该结果与中华人民共和国应急管理部发布的地震烈度图相吻合,可进一步验证此次地震破裂由震中向东南方向延伸。

2.4 地震震级确定对比分析

地震震级是地震预警的关键参数之一,本文研究基于B2b改正产品定位结果的地震震级确定。首先从B2b改正产品定位结果中提取水平向峰值位移(peak ground displacement,PGD),然后利用震级计算方式确定地震震级,并与WUM精密产品结果计算的震级进行对比。计算公式如下:

$$A=\sqrt{E^2+N^2} \tag{7}$$

式中,A为水平向面波质点运动最大位移(PGD);E为东方向位移;N为北方向位移,单位均为μm。《地震震级的规定》(GB 17740—2017)给出的面

波地震公式如下：

$$M_S = \lg\left(\frac{A}{T}\right) + 1.66\lg(\Delta) + 3.5 \qquad (8)$$

式中，Δ 表示震中距，单位(°)；T 为 A 对应的周期，地震面波振幅的主振周期一般设定为 20 s，因此取 $T = 20$ s。

图 7(a)为利用式(8)和 PGD 计算的地震震级，利用 B2b 改正产品和 WUM 精密产品定位结果计算的震级平均值分别为 Ms 6.76 和 Ms 6.67，结果非常接近，仅相差 0.09 个震级单位，与中国地震局官方公布的面波震级 Ms 6.8 仅相差 0.04 个震级单位。图 7(b)给出了利用 B2b 产品和 WUM 精密产品定位结果提取的 PGD，两种定位结果提取的 PGD 差值平均值仅为 0.61 cm，说明两者水平相当。对于部分测站，如 SCTQ、SCXJ 的 PGD 值差距分别达到了 1.04 cm、1.22 cm，从图 2 中可以看出，由于两个测站位于地震破裂面的垂直方向，§2.2 中分析结果表明两种定位结果波形差距较大，导致两测站 PGD 差值高于其他测站。但是从式(8)中可分析出，由于计算震级时对 PGD 值取对数处理，因此 SCTQ、SCXJ 计算的震级差距分别仅为 0.19、0.18 个震级单位。姚文敏等[29]研究了震级与 PGD 误差的问题，表明当 PGD 值差距在 3 cm 以内时，对震级计算的影响较小，与本研究结果一致。

受破裂传播方向和测站场地放大效应影响，单个测站确定的震级略有差异，但与官方公布的震级最大相差也仅为 0.5 个震级单位。由此可见，基于 B2b 改正产品的精密定位方法可用于地震震级确定。

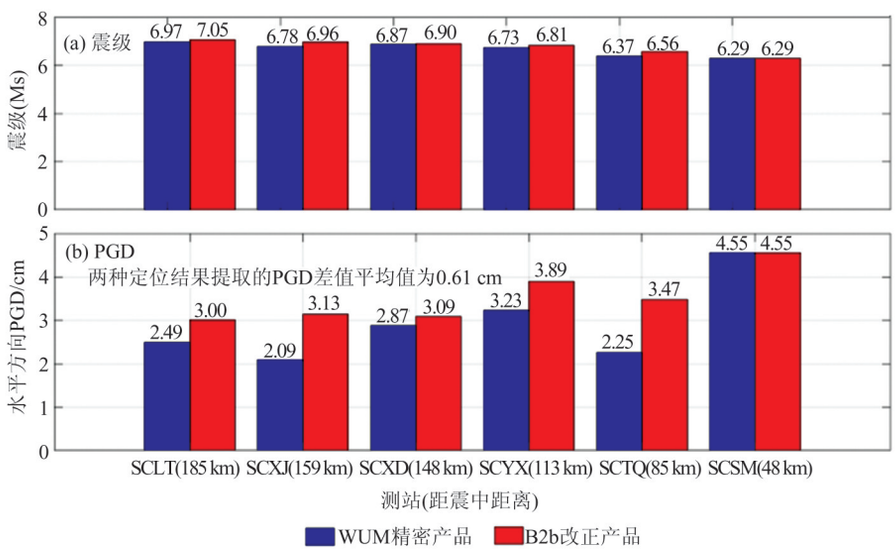


图 7　两种定位方法获得的震级和 PGD 提取结果

Fig. 7　Magnitude and PGD Values Obtained by Two Positioning Methods

3　结　语

本文提出了一种基于北斗 B2b 改正信号的地震同震形变实时监测方法，该方法可解决传统 PPP 实时解算需要提供精密卫星轨道和钟差产品，且高度依赖于网络传输条件的问题。以 2022 年四川泸定 Ms 6.8 地震为例，验证了该方法的可行性和精度水平。实验结果表明，基于 B2b 改正产品的 PPP 精度水平方向可达到 1～2 cm，高程方向可达到 2～4 cm；以 WUM 精密产品解算为参考，基于 B2b 改正产品解算的位移波形在东、北方向的差值分别仅为 0.56 cm 和 1.08 cm，说明两者精度相当。利用 B2b 产品和 WUM 精密产品定位结果确定的泸定地震震级分别为 Ms 6.76 和 Ms 6.67，互差仅为 0.09 个震级单位，与中国地震局公布的震级相比仅相差 0.04 个震级单位。因此，基于北斗 B2b 产品的 PPP 方法可应用于地震实时监测及地震参数快速确定等应用研究，具有较为广阔的应用前景。

参　考　文　献

[1] LARSON K M, BODIN P, GOMBERG J. Using 1-Hz GPS Data to Measure Deformations Caused by the Denali Fault Earthquake[J]. *Science*, 2003, 300(5624): 1421-1424.

[2] KANAMORI H. Real-Time Seismology and Earthquake Damage Mitigation[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2005, 33: 195-214.

[3] BILICH A, CASSIDY J F, LARSON K M. GPS Seismology: Application to the 2002 Mw 7.9 Denali Fault Earthquake[J]. *Bulletin of the Seismological*

Society of America, 2008, 98(2): 593-606.

[4] 杜存鹏. 基于GNSS和震相资料的安丘:莒县断裂形变特征及地震危险性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 332.
DU Cunpeng. Deformation Characteristics and Seismic Risk Analysis of Anqiu: Juxian Fault Based on GNSS and Seismic Phase Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(2): 332.

[5] 李志才, 陈智, 武军郦, 等. 基于高频GNSS观测的甘肃积石山Ms 6.2地震同震形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(2): 236-246.
LI Zhicai, CHEN Zhi, WU Junli, et al. Coseismic Deformation of the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province Based on High-Frequency GNSS Observation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(2): 236-246.

[6] 许才军, 贺克锋. 地震周期形变的大地测量研究进展和展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1736-1755.
XU Caijun, HE Kefeng. Advancements in Earthquake Cycle Deformation Research Based on Geodetic Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1736-1755.

[7] 郑佳伟. 基于高频GNSS和加速度计信息的大震破裂特征快速确定研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2022.
ZHENG Jiawei. Rapid Determination of Rupture Characteristic of Large Earthquakes Based on high-rate GNSS and accelerometer [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.

[8] ZHENG J W, FANG R X, LI M, et al. Line-Source Model Based Rapid Inversion for Deriving Large Earthquake Rupture Characteristics Using High-Rate GNSS Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(5): e2021GL097460.

[9] 郑佳伟, 李敏, 方荣新, 等. 联合高频GNSS和强震数据快速反演四川泸定6.8级地震断层破裂特征[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1419-1427.
ZHENG Jiawei, LI Min, FANG Rongxin, et al. Rapid Inversion of Fault Rupture Characteristics for the Luding M 6.8 Earthquake in Sichuan with High-Rate GNSS and Strong-Motion Data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1419-1427.

[10] 熊永良, 黄丁发, 徐韶光, 等. 长距离动态GPS数据处理方法与汶川地震引起的动态地壳形变特征分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(3): 265-269.
XIONG Yongliang, HUANG Dingfa, XU Shaoguang, et al. Long Distance Kinematic GPS Data Processing and Kinematic Crustal Deformation Features Analysis of Wenchuan Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3): 265-269.

[11] 郑凯. 单站GNSS宽频带地震地表位移监测方法和关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
ZHENG Kai. Research on Methodology of Broadband Seismic Displacement Mornitoring Using a Single High-Rate GNSS Receiver [D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[12] 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.

[13] SHI C, LOU Y, ZHANG H, et al. Seismic Deformation of the Mw 8.0 Wenchuan Earthquake from High-Rate GPS Observations [J]. *Advances in Space Research*, 2010, 46(2): 228-235.

[14] 张小红, 郭斐, 郭博峰, 等. 利用高频GPS进行地表同震位移监测及震相识别[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 1912-1918.
ZHANG Xiaohong, GUO Fei, GUO Bofeng, et al. Coseismic Displacement Monitoring and Wave Picking with High-Frequency GPS [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(6): 1912-1918.

[15] FANG R X, SHI C, SONG W W, et al. Determination of Earthquake Magnitude Using GPS Displacement Waveforms from Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 196(1): 461-472.

[16] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件精密单点定位服务信号PPP-B2b(1.0版)[DB/OL]. [2024-09-16]. http://www.BeiDou.gov.cn/x1/gfxz/202008/P020200803362060731204.pdf, 2020.
China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b (Version 1.0) [DB/OL]. [2024-09-16]. http://www.BeiDou.gov.cn/xt/gfxz/202008/P020200803362060731204.pdf,2020.

[17] 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 等. 北斗三号PPP-B2b服务性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 408-415.
SONG Weiwei, ZHAO Xinke, LOU Yidong, et al. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 408-415.

[18] 郭斐, 周超, 吴子恒. 北斗三号PPP-B2b信号精度及精密单点定位性能评估[J]. 南京信息工程大学

学报(自然科学版), 2022, 14(6): 658-666.
GUO Fei, ZHOU Chao, WU Ziheng. Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Signal Accuracy and Precise Point Positioning Service[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 14(6): 658-666.

[19] REN Z L, GONG H, PENG J, et al. Performance Assessment of Real-Time Precise Point Positioning Using BDS PPP-B2b Service Signal[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(8): 3242-3254.

[20] ZHANG W X, LOU Y D, SONG W W, et al. Initial Assessment of BDS-3 Precise Point Positioning Service on GEO B2b Signal[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(1): 690-700.

[21] NIE Z X, XU X F, WANG Z J, et al. Initial Assessment of BDS PPP-B2b Service: Precision of Orbit and Clock Corrections, and PPP Performance [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2050.

[22] YANG H, JI S Y, WENG D J, et al. Assessment of the Feasibility of PPP-B2b Service for Real-Time Coseismic Displacement Retrieval[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(24): 5011.

[23] FANG R X, LÜ H H, HU Z G, et al. GPS/BDS Precise Point Positioning with B2b Products for High-Rate Seismogeodesy: Application to the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake[J]. *Geophysical Journal International*, 2022, 231(3): 2079-2090.

[24] ZANG J F, FAN S J, XU C J, et al. Performance Assessment of the BDS-3 PPP-B2b Service for Real-Time Earthquake Source Description: A Case Study for the 2021 Mw 7.4 Maduo Earthquake[J]. *GPS Solutions*, 2023, 28(1): 26.

[25] 施闯, 赵齐乐, 楼益栋, 等. 卫星导航系统综合分析处理软件PANDA及研究进展[J]. 航天器工程, 2009, 18(4): 64-70.
SHI Chuang, ZHAO Qile, LOU Yidong, et al. PANDA: Comprehensive Processing Software for Satellite Navigation Systems and Its Research Progress[J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(4): 64-70.

[26] LIU J N, GE M R. PANDA Software and Its Preliminary Result of Positioning and Orbit Determination[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 603-609.

[27] 张喆, 房立华, 许力生. 2022年四川泸定M_S6.8地震震源基本特征[J]. 地球物理学报, 2023, 66(4): 1397-1408.
ZHANG Zhe, FANG Lihua, XU Lisheng. Primary Source Characteristics of the 2022 Sichuan Luding Ms 6.8 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(4): 1397-1408.

[28] BOATWRIGHT J. The Persistence of Directivity in Small Earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(6): 1850-1861.

[29] 姚文敏, 方荣新, 王珍, 等. 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, 2019, 39(12): 1249-1253.
YAO Wenmin, FANG Rongxin, WANG Zhen, et al. Use and Accuracy of High-Rate GNSS Observations to Quickly Estimate Earthquake Magnitude [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(12): 1249-1253.