



引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20200686

Citation: 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. DOI:10.13203/j.whugis20200686

北斗三号PPP-B2b服务性能评估

宋伟伟¹ 赵新科¹ 楼益栋¹ 孙唯彬¹ 赵正予²

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉,430079

² 武汉大学电子信息学院,湖北 武汉,430072

摘要:北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)精密单点定位(precise point positioning, PPP)-B2b信号为中国及周边地区提供实时PPP(real-time PPP, RTPPP)服务,为了推广PPP-B2b信号的应用,需要对其服务性能进行评估。根据全球连续监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS)在中国的测站2020年9月的观测数据,评估了基于PPP-B2b信号的北斗卫星导航系统的轨道和钟差精度;分析了使用BDS-3 PPP-B2b产品的B1I+B3I、B1c+B2a信号组合的定位精度以及北(north, N)方向、东(east, E)方向、天(up, U)方向收敛情况。结果显示: BDS轨道产品径向精度均值为0.1 m,切向精度均值为0.31 m,法向精度均值为0.3 m;钟差精度均方根的均值为2.26 ns,标准差的均值为0.08 ns。关于PPP收敛时间情况,在N、E、U 3个方向上,使用德国地学中心多系统快速产品(GFZ BeiDou multi-GNSS, GBM)的B1I+B3I信号组合收敛最快,且最终收敛精度最高,其次是B1I+B3I(PPP-B2b)信号组合,最后是B1c+B2a(PPP-B2b)信号组合。结果表明, BDS-3 PPP-B2b信号满足中国区域PPP服务的要求。

关键词:北斗三号卫星导航系统; PPP-B2b; 精密单点定位; 全球连续监测评估系统; 收敛时间; 定位精度

中图分类号: P228

文献标识码: A

收稿日期: 2020-12-16

DOI: 10.13203/j.whugis20200686

文章编号: 1671-8860(2023)03-0408-08

Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service

SONG Weiwei¹ ZHAO Xinke¹ LOU Yidong¹ SUN Weibin¹ ZHAO Zhengyu²

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

² Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: Objectives: With the ability of providing real-time precise point positioning (RTPPP) service for China and surrounding countries, the application of BeiDou-3 navigation satellite system(BDS-3) precise point positioning(PPP)-B2b signals have seen a rapid rise in recent years. And the performance evaluation is a vital issue for large deployment in the future, such as the evaluation about the accuracy of orbit and clock error, as well as the analysis of precision and convergence time for PPP. **Methods:** Based on the observations from September 2020 of the China branch stations of international GNSS monitoring and assessment system(iGMAS), the accuracy of orbit and clock error, as well as the positioning accuracy of B1I+B3I and B1c+B2a signal combination are carefully evaluated in this dissertation. **Results:** The results show that the average accuracy of PPP-B2b orbit products in radial, along-track and cross-track directions are 0.1 m, 0.31 m and 0.3 m, respectively. Besides, the root mean square of clock error correction is 2.26 ns. In terms of PPP convergence, the convergence time of the B1I+B3 signal combination using GFZ BeiDou multi-GNSS(GBM) products is the quickest in the north, east and up directions, with the highest final convergence accuracy. The second is B1I+B3I(PPP-B2b), and B1c+B2a(PPP-B2b) is at the last. **Conclu-**

基金项目:中央高校基本科研专项(2042019kf0222);北斗重大专项(GFZX030302030202);国家重点研发计划(2017YFB0503401-01);教育部联合基金(6141A02011907)。

第一作者:宋伟伟,博士,教授,博士生导师,研究方向为精密单点定位等。sww@whu.edu.cn

通讯作者:楼益栋,教授,博士生导师。ydlou@whu.edu.cn

sions: Summarizing the above discussions, BDS-3 PPP-B2b signals is capable of providing regional PPP service in China.

Key words: BeiDou-3 navigation satellite system; PPP-B2b; precise point positioning; international GNSS monitoring and assessment system; convergence time; positioning accuracy

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是中国自主建设的全球卫星导航定位系统,可提供无线电卫星导航服务(radio navigation satellite service, RNSS)、精密单点定位(precise point positioning, PPP)服务^[1]等。2019-12-27,中国卫星导航系统管理办公室公开了用于RNSS服务的B2b信号^[2]和用于PPP服务的PPP-B2b信号^[3]。北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)于2020-07-31正式开通,星座设计由30颗卫星组成,包括24颗中圆地球轨道(medium Earth orbit, MEO)、3颗地球同步轨道(geosynchronous Earth orbit, GEO)和3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO)卫星^[4],提供服务的范围覆盖全球的用户^[5]。MEO和IGSO轨道卫星播发的B2b信号提供RNSS服务,在GEO轨道卫星上播发的信号称为PPP-B2b信号,提供PPP服务^[2-3,6]。目前,PPP-B2b已经具备发播有效卫星为C19~C45(C31除外)共26颗BDS-3卫星的精密改正电文,为实时PPP(real-time PPP, RTPPP)的研究与应用提供了更多方法。本文以此为出发点,对PPP-B2b信号用于PPP的有关内容进行评估与分析。

PPP最早由美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的Zumberge等人率先提出^[7],它是指利用高精度卫星钟差和轨道产品,在修正各种误差改正后,采用最小二乘、卡尔曼滤波等方法,通过单台全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机的载波相位和伪距观测值获取高精度的国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)下的三维坐标的技术^[8-12]。RTPPP的实现需要实时轨道产品和实时钟差产品。为满足用户对实时PPP的要求,国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)于2007年启动IGS实时试点项目IGS RTPPP,各机构基于NTRIP(Networked transport of RTCM via internet protocol)通过互联网以状态空间表示(state space representation, SSR)的形式向全球用户播发实时改正数^[13]。2013年4月,IGS实时服务(real-time service, RTS)正式提供实时轨道和实时钟差产

品。各分析中心实时估计得到卫星轨道误差和卫星钟差,基于NTRIP协议通过网络播发,注册用户通过网际互连协议(Internet protocol, IP)和端口实时接收广播星历、精密轨道、钟差改正数即可恢复实时轨道和钟差^[14]。PPP-B2b信号通过星基播发精密产品改正数,为掌握PPP-B2b信号的服务性能,有必要对其播发的精密产品进行评估,对定位精度与收敛情况进行分析。

自BDS-3开始服务以来,关于BDS-3实时轨道产品等方面的评估已有一些研究。文献[15]对17个全球连续监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS)站收集的BDS-3/全球定位系统(global positioning system, GPS)观测数据进行分析,轨道评估结果表明,广播星历的均方根(root mean square, RMS)在径向(radial, R)、切向(along-track, A)和法向(cross-track, C)分量上分别达到0.19 m、0.69 m和0.79 m;文献[16]的研究表明,BDS-3广播星历轨道R精度优于0.1 m,三维精度优于1 m;文献[17]采用72 h弧段的BDS-3 MEO卫星定轨实验表明,BDS-3 MEO卫星轨道24 h重叠弧段一维RMS精度优于5 cm;文献[18]的研究表明,BDS-3重叠弧段精度可达到同样的精度水平;文献[19]的研究表明,BDS-3实时R轨道误差优于10 cm;文献[20]评价了法国国家空间研究中心的GPS、GLONASS、Galileo产品,以及BDS的MEO和IGSO的实时轨道产品精度;文献[21]首先进行了BDS-3卫星实时精密定轨及精度评定,结果表明BDS-3 MEO卫星实时轨道平均精度为112 mm,然后基于计算的实时轨道生成了SSR信息,并对其进行了精度损失和有效服务时长的研究和讨论。

BDS利用PPP-B2b信号作为数据播发通道,通过BDS-3 GEO卫星播发BDS-3和其他GNSS精密轨道和钟差等改正参数,为中国及周边地区用户提供动态分米级、静态厘米级的精密定位服务^[22]。关于BDS-3卫星播发的PPP-B2b信号的轨道钟差评估,以及用于PPP时的精度的研究还处于起步阶段。文献[5]介绍了B2b信号的信息结构,解析了PPP-B2b信号播发信息,对自研接收机接收的B2b信号进行解析和定位结果分析,

结果表明,北(north,N)方向、东(east,E)方向、天(up,U)方向定位精度的RMS值依次为0.45 m、0.31 m和0.8 m;文献[23]使用软件定义接收机(software-defined receiver,SDR)评估了PPP-B2b的轨道修正、时钟校正和差分码偏差校正,评估了BDS和GPS的时变特性,分析了PPP服务的完整性和稳定性;文献[24]提出基于优化ACE-BOC复用调制方法的PPP-B2b信号的方案设计,性能评估表明,基于单个BDS星座的水平 and 垂直方向定位精度分别优于0.15 m和0.3 m,平均收敛时间不超过800 s。以上所列文献对BDS-3实时轨道产品以及PPP-B2b的测评各有侧重,为PPP-B2b的服务性能测评提供了部分理论依据,但是还不够全面。为进一步掌握PPP-B2b在轨道、钟差、定位精度与收敛情况等方面的性能,本文将对此进行分析和评估工作。

以卫星导航系统提供PPP服务的,目前有日本的准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)以及Galileo系统。QZSS系统的L6信号包含L6D和L6E,L6D为日本本土提供厘米级增强服务(centimeter level augmentation service, CLAS),L6E为QZSS卫星覆盖范围提供广域厘米级增强实验的验证^[25-27]。Galileo系统的E6B信号通过MEO卫星播发,为全球区域提供PPP服务^[28]。PPP-B2b信号将陆续支持BDS、GPS、GLONASS和Galileo系统的PPP服务。

本文利用定制的飞纳接收机接收PPP-B2b信号改正数进行精密产品恢复,并根据中国区域iGMAS测站提供的观测文件,对基于PPP-B2b信号提供的精密产品的BDS轨道和钟差进行空间测距信号误差(signal-in-space range error, SISRE)评估,以及对用于PPP的定位精度和收敛时间进行分析,为PPP-B2b信号的科研分析与实际应用提供参考。

1 BDS-3 PPP-B2b 基本介绍

BDS-3的3颗GEO、3颗IGSO、24颗MEO卫星播发的B1I和B3I信号提供RNSS服务,3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星的B1c、B2a、B2b信号也提供RNSS服务,3颗GEO卫星通过PPP-B2b信号提供PPP服务。因此,本文分别对使用PPP-B2b改正数的B1I+B3I、B1c+B2a信号组合进行PPP定位精度与收敛情况分析。

BDS PPP服务信息在PPP-B2b信号中播发,PPP-B2b信号的载波频率为1 207.14 MHz,该信

号包括I支路和Q支路分量,BDS-3前3颗GEO卫星仅播发I支路分量。截至2020年8月,仅公开了I支路相关内容。

PPP-B2b信号在设计上可用于对4大GNSS及其组合提供PPP服务。对BDS系统,PPP-B2b信息用于改正B1c信号的CNAV1导航电文。PPP-B2b信号及PPP服务信息的时间采用BDS时间(BDS time, BDT),坐标系采用北斗坐标系(BeiDou coordinate system, BDCS)。PPP-B2b信号播发的各类改正数以BDT为时间基准,当用户采用多个导航系统观测进行精密定位解算时,每个历元需针对各导航系统设置不同的接收机钟差参数。本文实验所接收的PPP-B2b信号改正数,钟差改正数以“#BD3PPP4”开头,历元间隔为6 s;轨道改正数以“#BD3PPP2”开头,历元间隔为48 s。

2 PPP 有关理论方法

首先介绍PPP模型,然后介绍进行实时PPP所需要的卫星轨道改正与卫星钟差改正。用户接收机会接收到B1I、B3I、B2a、B1c等不同频率的信号,因此还将介绍卫星码间偏差修正的原理。

2.1 PPP 模型

PPP采用双频伪距和载波的无电离层组合时,可以消除电离层一阶项影响。伪距和相位无电离层组合观测方程可表示为:

$$\begin{cases} P_i = \rho_i + c(\Delta t_i^s - \Delta t_r) + \delta_{\text{trop}} + \epsilon(P_i) \\ L_i = \rho_i + c(\Delta t_i^s - \Delta t_r) + \delta_{\text{trop}} - N_i \lambda + \epsilon(L_i) \end{cases} \quad (1)$$

式中, P_i 和 L_i 分别表示无电离层伪距和相位观测值; s 代表卫星; i 表示卫星编号; r 表示接收机; ρ_i 表示接收机到卫星间的几何距离; c 表示光速; Δt_i^s 为不同卫星的钟差; Δt_r 为接收机钟差; δ_{trop} 为对流层延迟; λ 表示无电离层组合波长; N_i 表示载波相位模糊度; $\epsilon(P_i)$ 、 $\epsilon(L_i)$ 分别表示伪距和相位观测的多路径效应误差、测量噪声等。

2.2 卫星轨道改正

轨道改正信息参数为轨道改正向量 $\mathbf{A}_{\text{orbit}}$ 在R、A、C 3个方向上的分量,用户在使用时需要先利用CNAV1导航电文计算出卫星位置向量 \mathbf{X}_{brdc} ,将轨道消息与CNAV1导航电文成功匹配后方可计算卫星位置改正向量 $\Delta\mathbf{X}$,修正算法为:

$$\mathbf{X}_{\text{orbit}} = \mathbf{X}_{\text{brdc}} - \Delta\mathbf{X} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{X}_{\text{orbit}}$ 表示改正后的卫星位置; \mathbf{X}_{brdc} 表示广播

星历计算得到的卫星位置; ΔX 表示轨道改正数。

ΔX 的计算公式为:

$$\begin{cases} e_R = \frac{r}{|r|} \\ e_C = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \\ e_A = e_C \times e_R \\ \Delta X = [e_R \ e_A \ e_C] \cdot \Delta_{orbit} \end{cases} \quad (3)$$

式中, r, \dot{r} 分别表示广播星历中卫星位置向量和速度向量; e_R, e_A, e_C 分别对应径向、切向和法向的单位矢量; Δ_{orbit} 为轨道改正向量。

2.3 卫星钟差改正

钟差改正电文参数是相对于广播星历钟差的改正参数,在轨道与广播星历成功匹配后,用户需再将钟差改正消息中的版本号与轨道改正消息中的版本号匹配。

使用方法如下:

$$t_{s-c} = t_{bndc} - \frac{C_0}{c} \quad (4)$$

式中, t_{bndc} 表示由广播星历计算得到的卫星钟差改正数; t_{s-c} 表示改正后的卫星钟差改正数; C_0 表示 PPP-B2b 提供的钟差改正参数。轨道、钟差与广播星历中相关参数全部成功匹配后,该组改正信息方可在定位中使用。

2.4 卫星码间偏差修正

用户在处理卫星观测数据时可能会用到 B1I、B3I、B1c、B1I、B2a 等多种频率的信号,故同步处理各频率各类信号时,需要首先消除该偏差,用户可对照 PPP-B2b 中差分码偏差(differential code bias, DCB)改正类型来对卫星码间偏差进行实时改正,从而实现各类信号同步处理,其修正算法公式为:

$$P_{corr} = P_{ini} - P_{sig} \quad (5)$$

式中, P_{corr} 表示修正后观测值; P_{ini} 表示原始观测值; P_{sig} 表示对应信号的码间偏差。

3 PPP-B2b 产品评估及有关定位精度分析

为了获取 BDS-3 PPP-B2b 信号提供的精密产品的空间测距信号误差精度,以及在中国范围内的 PPP 定位精度和收敛情况等,本文对 BDS-3 PPP-B2b 实时产品进行精度分析。BDS 播发 B1I、B3I、B1c 和 B2a 等多种信号,为验证不同信号组合所能实现的定位效果,本文根据 iGMAS 中国测站的观测值,定位精度与收敛时间的结果

均基于 GPS+BDS-3 双系统:(1)GPS 采用 L1、L2 频率,BDS-3 采用 B1I、B3I 信号,使用 PPP-B2b 改正数,简称为 B1I+B3I(PPP-B2b)或基于 PPP-B2b 改正数的 B1I+B3I 信号组合;(2)GPS 采用 L1、L2 频率,BDS-3 采用 B1c、B2a 信号,使用 PPP-B2b 改正数,简称为 B1c+B2a(PPP-B2b)或基于 PPP-B2b 改正数的 B1c+B2a 信号组合;(3)GPS 采用 L1、L2 频率,BDS-3 采用 B1I、B3I 信号,使用德国地学中心多系统快速产品(GFZ BeiDou multi-GNSS, GBM),简称为 B1I+B3I(GBM)或使用 GBM 产品的 B1I+B3I 信号组合。

PPP-B2b 信号改正数中,轨道改正数的历元时间间隔为 48 s,钟差改正数的历元时间间隔为 6 s;GFZ 提供的最终精密星历产品的时间间隔为 5 min,最终精密钟差产品的时间间隔为 30 s。本文所用 PPP 程序为笔者开发的 Mass 软件。

3.1 BDS-3 PPP-B2b 实时产品分析

本文选取北斗周第 769 周(年积日 271—277,共 7 d),将利用飞纳接收机接收的 PPP-B2b 改正数与 GBM 产品进行比较,对同一时刻每颗卫星的卫星位置作差(如果采样时刻未对齐,则采用拉格朗日插值法对数据集进行内插),并将差值转换到每颗卫星 R、A、C 3 个方向。

对互差序列 $\Delta_{orbit_{i,R}}, \Delta_{orbit_{i,A}}, \Delta_{orbit_{i,C}}$ 以 1 d 为一个统计单位,计算 RMS $R_{orbit_{i,R}}, R_{orbit_{i,A}}, R_{orbit_{i,C}}$:

$$R_{orbit_{i,*}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_{orbit_{i,*}}^2}{N}} \quad (6)$$

式中, N 为样本个数;*代表 R、A、C。

选取产品时间段为 24 h,对实时北斗钟差与后处理钟差(GBM 产品)作差,得到每颗卫星钟差的互差序列 C_i 。

选择一颗参考卫星(可以选择各个卫星系统整体星座钟差互差重心为参考基准),其他卫星计算的钟差互差结果对参考星的钟差作一次差,消除由于基准钟不同而对钟差产生的差异,得到双差钟差值序列 $C_{i,R}$ 。为了统计相位钟的精度,消除每颗卫星的钟差基准:

$$C'_i = \Delta C_{i,R} - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta C_{i,R}}{N} \quad (7)$$

统计每颗卫星 C_i 序列的 RMS R_{C_i} 。连续 24 h 统计一个结果:

$$R_{C_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta C_i^2}{N}} \quad (8)$$

式中, n 为样本个数。

按照以上方法,对北斗周第769周基于PPP-B2b信号提供的精密产品的BDS轨道和钟差进行精度评估,BDS轨道R精度均值为0.11 m,A精度均值为0.31 m,C精度均值为0.32 m;钟差精度RMS均值为2.14 ns,标准差(standard deviation,STD)均值为0.06 ns。轨道钟差产品精度统计结果如图1和图2所示,其中横坐标为周天数,表示第769周的第0—6天。

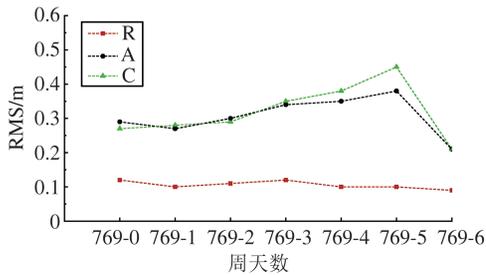


图1 第769周BDS轨道精度评估

Fig.1 Evaluation of Orbit Accuracy of BDS During the 769th Week

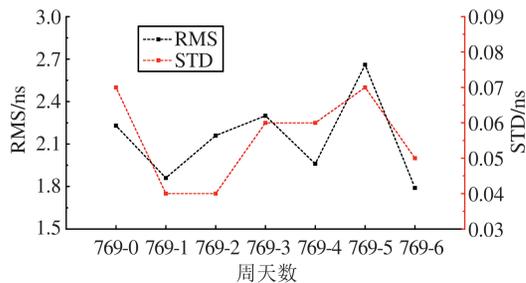


图2 第769周BDS SISRE RMS均值与STD均值

Fig.2 RMS Mean Value and STD Mean Value of SISRE of BDS During the 769th Week

3.2 B1I+B3I信号组合PPP结果分析

iGMAS始建于2011年,其主要任务是建立全球多模GNSS跟踪网,进行数据采集、存储和处理分析^[29]。PPP-B2b信号主要覆盖中国及周边地区,本文选取iGMAS在中国的8个测站(BJF1、CHU1、GUA1、KUN1、LHA1、SHA1、WUH1、XIA1)2020年9月年积日为251—271的其中15 d观测数据,其余天数的观测文件时长较短,未采用。对基于PPP-B2b改正数的B1I+B3I信号组合进行事后仿实时动态定位,统计N、E、U方向定位精度RMS并进行分析,与使用GFZ的GBM最终产品的定位结果进行比较。

基于PPP-B2b改正数的B1I+B3I信号组合定位结果如图3所示。统计结果显示,各站N方向定位精度约为0.05 m;E方向除GUA1站的结

果为0.117 m以外,其他站定位精度均在0.1 m内;各站U方向定位精度均在0.2 m内。

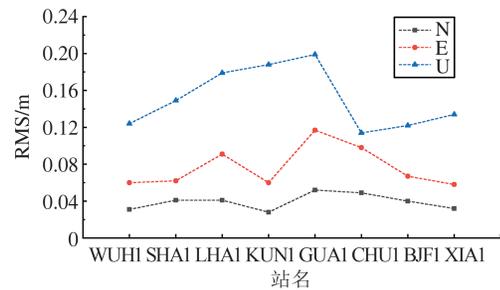


图3 基于PPP-B2b改正数的B1I+B3I信号组合的PPP精度

Fig.3 PPP Accuracy of B1I + B3I Signal Combination Based on PPP-B2b Correction

图4为采用GFZ中心GBM产品的B1I+B3I信号组合的GPS+BDS-3事后动态定位结果。可以看出,各站N方向定位精度约为0.02 m,E方向定位精度大部分在0.04 m内,但CHU1站E方向定位精度约0.07 m;各站E方向定位精度均在0.09 m内。

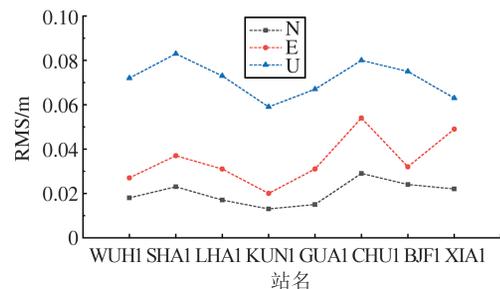


图4 基于GBM产品的B1I+B3I信号组合的PPP精度

Fig.4 PPP Accuracy of B1I + B3I Signal Combination Based on GBM Products

3.3 B1c+B2a信号组合PPP结果分析

选取与§3.2中相同的测站,对基于PPP-B2b改正数的B1c+B2a信号组合进行事后仿实时动态定位,统计N、E、U方向定位精度RMS,如图5所示。

统计结果显示,N方向定位精度除CHU1站约0.07 m外,其他各站均在0.05 m左右;E方向上,CHU1站、GUA1站、LHA1站的定位精度在0.11 m左右,其他站定位精度均在0.06 m内;U方向上,除了GUA1站、KUN1站、LHA1站的定位精度约0.2 m,其他站均在0.15 m内。

定位精度方面,对比图3~5可以看出,使用PPP-B2b改正数计算GPS+BDS-3定位结果,B1I+B3I信号组合与B1c+B2a信号组合在N、

E、U 这三个方向上的定位精度基本一致。

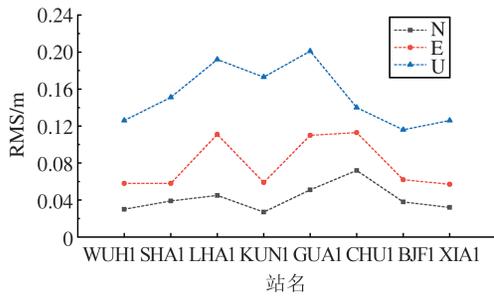


图 5 基于 PPP-B2b 改正数的 B1c+B2a 信号组合的 PPP 精度

Fig.5 PPP Accuracy of B1c+B2a Signal Combination Based on PPP-B2b Correction

3.4 N、E、U 方向收敛情况分析

本文选取 iGMAS 在中国的测站中的 BJF1、GUA1、KUN1、LHA1、SHA1 共 5 个站, CHU1、XIA1 和 WUH1 站在本文研究的数据期间的观测文件时长较短, 为保证 2 h 一组的数据分析, 未采用这 3 站的数据。

本文研究了 2020 年 9 月年积日 251—271 期间的 12 d 的观测数据, 对 B1I+B3I(PPP-B2b)、B1c+B2a(PPP-B2a)、B1I+B3I(GBM) 3 组信号进行事后仿实时动态 PPP 定位。观测文件历元时间间隔为 30 s, 以 2 h 为重收敛的时间间隔, 统计 3 组信号定位结果在 N、E、U 方向 2 h 内(共 240 个历元)共计 720 组收敛趋势, 如图 6 所示。

3 组信号在 N、E、U 方向经过一些特定时间后的收敛精度 RMS 见表 1~3。

关于 PPP 收敛情况, 在 N、E、U 3 个方向上, B1I+B3I(GBM) 信号组合收敛最快, 且最终收敛精度最高, 其次是 B1I+B3I(PPP-B2b) 信号组合, 最后是 B1c+B2a(PPP-B2b) 信号组合。

以平面精度达到 0.3 m、高程精度达到 0.6 m 为收敛标准, 使用 GBM 产品的 B1I+B3I 信号在 8 min 达到标准, 使用 PPP-B2b 改正数的 B1I+B3I 信号在 9 min 达到标准, 使用 PPP-B2b 改正数的 B1c+B2a 信号在 20 min 达到标准。

4 结 语

本文选取 iGMAS 在中国的测站在 2020 年 9 月的观测数据, 对 BDS-3 PPP-B2b 信号产品与定位结果进行了分析。PPP-B2b 产品评估方面, 轨道 R 精度均值为 0.11 m, A 精度均值为 0.31 m, C 精度均值为 0.32 m; 钟差改正数精度 RMS 均值为 2.14 ns, STD 均值为 0.06 ns。使用 PPP-B2b

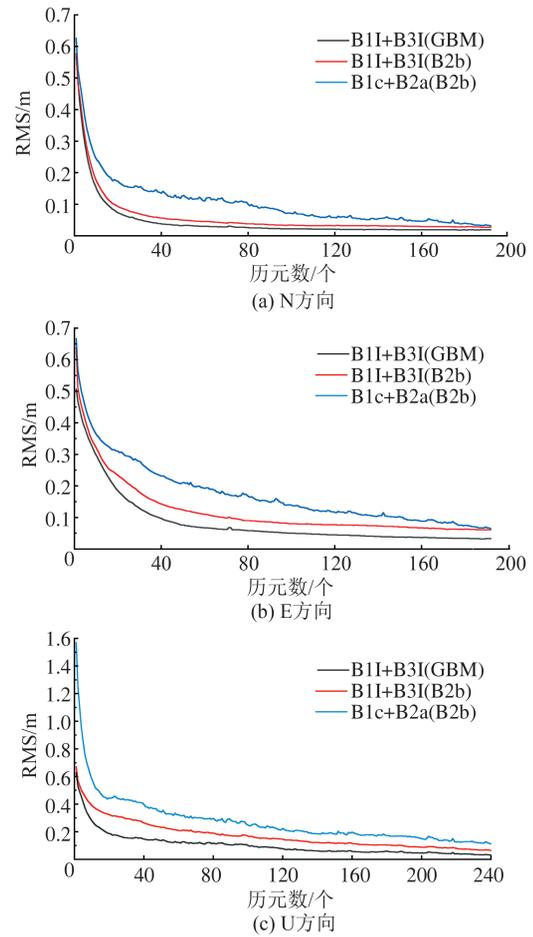


图 6 3 组信号组合在 N、E、U 方向按历元收敛情况
Fig.6 Convergence of Three Signal Combinations in the Directions of N, E, U According to Epoch

表 1 3 组信号组合 N 方向收敛精度 RMS

Tab.1 RMS of Convergence Accuracy of Three Signal Combinations in N Direction

时间 /min	B1I+B3I (GBM) /m	B1I+B3I (PPP-B2b)/m	B1c+B2a (PPP-B2b)/m
0.5	0.569	0.577	0.627
1	0.489	0.482	0.526
5	0.188	0.216	0.278
10	0.094	0.112	0.185
20	0.047	0.066	0.145
30	0.033	0.051	0.121

改正数, 计算 GPS+BDS-3 的 B1I+B3I 信号组合, N 方向定位精度在 0.05 m 左右; E 方向, 除 GUA1 站的结果为 0.117 m 以外, 其他站定位精度均在 0.1 m 内; U 方向定位精度均在 0.2 m 内。B1c+B2a(PPP-B2b) 的动态 PPP 定位结果 RMS 值与 B1I+B3I(PPP-B2b) 基本一致。

关于 PPP 收敛情况, 在 N、E、U 3 个方向, 使用 GBM 产品的 B1I+B3I 信号收敛最快, 且最终

收敛精度最高,其次是B1I+B3I(PPP-B2b),最后是B1c+B2a(PPP-B2a)。本文实验结果表明,BDS-3 PPP-B2b信号可以满足对PPP的应用需求。

表2 3组信号组合E方向收敛精度RMS

Tab.2 RMS of Convergence Accuracy of Three Signal Combinations in E Direction

时间 /min	B1I+B3I (GBM) /m	B1I+B3I (PPP-B2b) /m	B1c+B2a (PPP-B2b) /m
0.5	0.508	0.638	0.672
1	0.469	0.511	0.571
5	0.328	0.346	0.389
10	0.224	0.253	0.323
20	0.121	0.170	0.262
30	0.079	0.127	0.207

表3 3组信号组合U方向收敛精度RMS

Tab.3 RMS of Convergence Accuracy of Three Signal Combinations in U Direction

时间 /min	B1I+B3I (GBM) /m	B1I+B3I (PPP-B2b) /m	B1c+B2a (PPP-B2b) /m
0.5	1.220	1.146	1.569
1	1.020	1.144	1.249
5	0.372	0.473	0.582
10	0.211	0.295	0.444
20	0.118	0.195	0.399
30	0.094	0.168	0.322

参 考 文 献

- [1] China Satellite Navigation Office. The Application Service Architecture of BeiDou Navigation Satellite System (Version 1.0) [EB/OL]. (2019-12-27) [2020-05-05]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfz/201912/P020191227332811335890.pdf>. (中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统应用服务体系(1.0版)[EB/OL]. (2019-12-27) [2020-05-05]. <http://www.beidou.gov.cn/xt/gfz/201912/P020191227332811335890.pdf>.)
- [2] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Open Service Signal B2b (Version 1.0) [EB/OL]. (2020-07-01) [2020-05-05]. <http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/jjcktqkxwfbh/gdxw6/202008/P020200803321778634157.pdf>. (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公开服务信号B2b(1.0版)[EB/OL]. (2020-07-01) [2020-05-05]. <http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/jjcktqkxwfbh/gdxw6/202008/P020200803321778634157.pdf>.)
- [3] China Satellite Navigation Office. BeiDou Navigation Satellite System Signal in Space Interface Control Document Precise Point Positioning Service Signal PPP-B2b (Version 1.0) [EB/OL]. (2020-07-01) [2020-05-05]. <http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/jjcktqkxwfbh/gdxw6/202008/P020200803322412539295.pdf>. (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)[EB/OL]. (2020-07-01) [2020-05-05]. <http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/jjcktqkxwfbh/gdxw6/202008/P020200803322412539295.pdf>.)
- [4] Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 92-100. (曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 92-100.)
- [5] Zhao Ang, Yang Yuanxi, Xu Yangyin, et al. Integrity Analysis of GNSS Single System and Multi-system Combination [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 72-80. (赵昂, 杨元喜, 许扬胤, 等. GNSS单系统及多系统组合完好性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 72-80.)
- [6] He Xulei, Liu Cheng, Chen Ying, et al. Analysis of B2b Signal of BDS III Satellite [J]. *Application of Electronic Technique*, 2020, 46(3): 1-4. (何旭蕾, 刘成, 陈颖, 等. 北斗三号卫星B2b信号解析[J]. 电子技术应用, 2020, 46(3): 1-4.)
- [7] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [8] Song Weiwei. Research on Real-Time Clock Offset Determination and Real-Time Precise Point Positioning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011. (宋伟伟. 导航卫星实时精密钟差确定及实时精密单点定位理论方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.)
- [9] Yan Zhongbao, Zhang Xiaohong. Partial Ambiguity Resolution Method and Results Analysis for GNSS Uncombined PPP [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 979-989. (闫忠宝, 张小红. GNSS非组合PPP部分模糊度固定方法与结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 979-989.)
- [10] Kouba J. Measuring Seismic Waves Induced by Large Earthquakes with GPS [J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 2003, 47(4): 741-755.

- [11] Bisnath S, Gao Y. Current State of Precise Point Positioning and Future Prospects and Limitations [C]//International Association of Geodesy Symposium, Perugia, Italy, 2007.
- [12] Guo J, Li X X, Li Z H, et al. Multi-GNSS Precise Point Positioning for Precision Agriculture[J]. *Precision Agriculture*, 2018, 19(5): 895-911.
- [13] Xia Fengyu, Ye Shirong, Zhao Lewen, et al. Analysis of Real-Time Precision Point Positioning Based on SSR Corrections[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(3): 52-57. (夏凤雨, 叶世榕, 赵乐文, 等. 基于SSR改正的实时精密单点定位精度分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 52-57.)
- [14] Wang Guangxing, Zhao Qile. Preliminary Analysis of Real-Time Orbit and Clock Error Based on BNC [C]//China Satellite Navigation Conference, Guangzhou, China, 2012. (王广兴, 赵齐乐. 基于BNC的实时轨道和时钟误差初步分析[C]//第三届中国卫星导航学术年会, 中国广州, 2012.)
- [15] Yang Y X, Gao W G, Guo S R, et al. Introduction to BeiDou-3 Navigation Satellite System[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.
- [16] Wang Haichun, Jia Xiaolin, Li Ding, et al. Accuracy Assessment and Analysis of Broadcast Ephemeris of BDS-3 Satellites[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2019, 7(4): 60-63. (王海春, 贾小林, 李鼎, 等. 北斗三号卫星广播星历精度评估分析[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 60-63.)
- [17] Yan X Y, Huang G W, Zhang Q, et al. Estimation of the Antenna Phase Center Correction Model for the BeiDou-3 MEO Satellites[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2850.
- [18] Zhang B, Jia X L, Sun F P, et al. Performance of BeiDou-3 Satellites: Signal Quality Analysis and Precise Orbit Determination[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(3): 687-695.
- [19] Chen Yongjian. Analysis of Impact of New BDS-3 Satellites on Relative Positioning Accuracy of BDS-2 Short Baseline[J]. *Journal of Geomatics*, 2022, 47(2): 6-10. (陈永健. BDS-3新卫星对BDS-2短基线相对定位精度的影响分析[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(2): 6-10.)
- [20] Kazmierski K, Sońnica K, Hadas T. Quality Assessment of Multi-GNSS Orbits and Clocks for Real-Time Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 11.
- [21] Wang Le, Xie Shichao, Huang Guanwen, et al. BDS-3 Satellite Real-Time Orbit Correction Parameters Generation and Service Performance Analysis [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, 45(4): 51-56. (王乐, 解世超, 黄观文, 等. 北斗三号实时轨道改正数生成及服务性能分析[J]. 测绘地理信息, 2020, 45(4): 51-56.)
- [22] 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): 1-8.
- [23] Lu X C, Chen L, Shen N, et al. Decoding PPP Corrections from BDS B2b Signals Using a Software-Defined Receiver: An Initial Performance Evaluation [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7871-7883.
- [24] Liu C, Gao W G, Liu T X, et al. Design and Implementation of a BDS Precise Point Positioning Service [J]. *Navigation*, 2020, 67(4): 875-891.
- [25] The Cabinet Office, Government of Japan. Quasi-Zenith Satellite System Interface Specification Centimeter Level Augmentation Service (IS-QZSS-L6-002) [EB/OL]. (2019-12) [2020-02-10]. https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/is_qzss_l6_002_agreee.html.
- [26] Japan Aerospace Exploration Agency. Interface Specification for MADOCA-SEAD [EB/OL]. (2019-07-01) [2020-02-10]. https://ssl.tksc.jaxa.jp/madoca/public/doc/Interface_Specification_B_en.pdf.
- [27] Bu Jinwei, Zuo Xiaoqing, Jin Lixin, et al. Positioning Performance Evaluation of BDS/QZSS and Its Combined Systems in China, Japan and Their Peripheral Areas [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(4): 574-585. (布金伟, 左小清, 金立新, 等. BDS/QZSS及其组合系统在中国和日本及周边地区的定位性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(4): 574-585.)
- [28] Göhler E, Krol I, Bodenbach M. A Galileo E 6B / C Receiver: Signals, Prototype, Tests and Performance Conference [C]//ION GNSS+, Portland, USA, 2016.
- [29] Chen Guo, Wei Na, Zhao Qile, et al. Research on the Combination of Station Coordinate Products Derived from Multiple Analysis Centers [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1289-1295. (陈国, 魏娜, 赵齐乐, 等. 多分析中心站坐标产品的综合方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1289-1295.)