



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估
作者: 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 孙唯彬, 赵正予
DOI: 10.13203/j.whugis20200686
收稿日期: 2020-12-16
网络首发日期: 2021-06-15
引用格式: 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 孙唯彬, 赵正予. 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200686>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200686

引用格式：

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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200686 (SONG Weiwei, ZHAO Xinke, LOU Yidong, et al. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 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 PPP-B2b 信号为中国及周边地区提供实时精密单点定位 (Real-Time Precise Point Positioning, 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。本文对北斗三号 PPP-B2b 产品进行分析; 根据全球连续监测评估系统 (international GNSS Monitoring and Assessment System, iGMAS) 在中国的测站在 2020 年 9 月的观测数据, 评估了基于 PPP-B2b 信号的 (Beidou Navigation Satellite System) 的轨道和钟差精度; 分析了使用北斗三号 PPP-B2b 产品的 B1I+B3I、B1C+B2a 信号组合的定位精度、NEU 方向收敛情况。结果显示: BDS 轨道产品 R 方向精度均值为 0.1m, A 方向精度均值为 0.31m, C 方向精度均值为 0.3m; 钟差精度均方根 (Root Mean Square, RMS) 的均值为 2.26ns, 标准差 (Standard Deviation, STD) 的均值为 0.08ns。关于 PPP 收敛时间情况, 在 NEU 三个方向上, 使用 GBM 产品的 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, 北斗三号 PPP-B2b 信号满足中国区域 PPP 服务的要求。

关键词: 北斗三号; 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: P228.4

文献标志码: A

北斗卫星导航系统是我国自主建设的全球卫星导航定位系统, 可提供卫星无线电导航 (Radio Navigation Satellite Service, RNSS) 服务、精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP) 服务等。

2019 年 12 月 27 日, 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]和用于精密单点定位服务的 PPP-B2b 信号^[3]。北斗三号全球卫星导航系统于 2020 年 7 月 31 日正式开通, 星座设计由 30 颗卫星组成, 包括 24 颗 MEO (Medium Earth

Orbit)、3 颗 GEO (Geosynchronous Earth Orbit) 和 3 颗 IGS0 (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit) 卫星^[4], 提供服务的范围覆盖全球的用户^[5]。在 MEO 和 IGS0 轨道卫星上播发的 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 颗北斗三号卫星的精密改正电文, 为实时精密单点定位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

收稿日期: 2020-12-16

项目资助: 中央高校基本科研专项项目 (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, 研究方向为精密单点定位等。E-mail: sww@whu.edu.cn

通信作者: 楼益栋, 博士, 教授。E-mail: ydlou@whu.edu.cn

行评估与分析。

精密单点定位最早由 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 的 Zumberge 等人率先提出^[7], 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 GNSS 接收机的载波相位和伪距观测值, 获取高精度的 ITRF 框架下的三维坐标的技术^[8-12]。

实时精密单点定位的实现需要实时轨道产品和实时钟差产品。传统方式, 为满足用户对实时 PPP 的要求, IGS (International GNSS Service) 于 2007 年启动 IGS 实时试点项目 (IGS Real-Time Pilot Project, IGS-RTPP), 各机构基于 NTRIP 协议通过互联网, 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 Internet 播发, 注册用户通过 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 信号是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。

自北斗三号开始服务以来, 关于北斗三号实时轨道产品等方面的评估已有一定的研究。Yang Yuanxi 等^[15]通过对 17 个 iGMAS 站收集的 BDS-3/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 (RMS) 误差在径向、切向和法向分量上分别达到 0.19m、0.69m 和 0.79m; 王海春等^[16]研究表明, 北斗三号广播星历轨道径向精度优于 0.1m, 三维精度优于 1m; Yan 等^[17]采用 72h 弧段的 BDS-3ME0 卫星定轨实验表明, 北斗三号 ME0 卫星轨道 24h 重叠弧段 1D RMS 精度优于 5cm; Zhang 等^[18]研究表明, 北斗三号重叠弧段精度可达到同样的精度水平; 戴金倩等^[19]研究表明, 北斗三号实时径向轨道误差优于 10cm; Kazmierski 等^[20]评价了 CNES 的 GPS、GLONASS、Galileo 产品, 以及 BDS 的 ME0 和 IGS0 的实时轨道产品精度。王

乐等^[21]进行了 BDS-3 卫星实时精密定轨及精度评定, 结果表明北斗三号 ME0 卫星实时轨道平均精度 112mm; 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。

北斗导航系统利用 PPP-B2b 信号作为数据播发通道。通过北斗三号地球静止轨道 (GEO) 卫星播发北斗三号系统和其它全球卫星导航系统 (GNSS) 精密轨道和钟差等改正参数, 为我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]。关于北斗三号卫星播发的 PPP-B2b 信号的轨道钟差评估, 以及用于精密单点定位时的精度的研究还处于起步阶段。何旭蕾等^[5]介绍了 B2b 信号信息结构; 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, N、E、U 方向定位精度的 RMS 值依次为 0.45m、0.31m 和 0.8m; Xiangchen Lu 等^[23]人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; Liu Cheng 等^[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 星座的水平方向和垂直方向定位精度分别优于 0.15m 和 0.3m, 平均收敛时间不超过 800s。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 QZSS 系统以及 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 (CentimeterLevel 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 ME0 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的 PPP-B2b 信号改正数进行精密产品恢复, 以

及中国区域的 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 北斗三号 PPP-B2b 基本介绍

北斗三号系统的3颗GEO、3颗IGSO卫星和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信号提供精密单点定位服务。基于此,本文将分别对使用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。

北斗系统PPP服务信息在PPP-B2b信号中播发,PPP-B2b信号的载波频率为1207.14MHz,该信号包括I支路和Q支路分量,北斗三号前三颗GEO卫星仅播发I支路分量。截至2020年8月,目前仅公开了I支路相关内容。

PPP-B2b 信号在设计上可用于对四大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BDT,坐标系采用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6s;轨道改正数以“#BD3PPP2”开头,历元间隔为48s。

2 PPP 有关理论方法

本文将对北斗三号 PPP-B2b 产品的轨道和钟差进行评估,以及用于仿实时动态PPP的精度与收敛时间进行分析。因此,本文将首先介绍PPP模型;而后介绍进行实时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,因此本文将介绍卫星码间偏差修正的原理。

2.1 精密单点定位模型

精密单点定位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:

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

其中, P_i 和 L_i 分别表示无电离层伪距和相位观测值(单位:米); 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 为不同卫星的卫星钟差; 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; $\varepsilon(P_i)$ 、 $\varepsilon(L_i)$ 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 Δ_{orbit} 在径向R、切向A和法向C三个方向上的分量,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} (具体算法参考CNAV1-ICD),将轨道消息的IODN与CNAV1导航电文中的IODE成功匹配后,方可计算卫星位置改正向量 $\Delta \mathbf{x}$,修正算法如下:

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

式中, \mathbf{X}_{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, $\Delta \mathbf{X}$ 表示轨道改正数。 $\Delta \mathbf{X}$ 的计算方法如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_R &= \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|} \\ \mathbf{e}_C &= \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|} \\ \mathbf{e}_A &= \mathbf{e}_C \times \mathbf{e}_R \\ \Delta \mathbf{X} &= [\mathbf{e}_R \quad \mathbf{e}_A \quad \mathbf{e}_C] \cdot \Delta_{orbit} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 \mathbf{r} 、 $\dot{\mathbf{r}}$ 分别表示广播星历中卫星位置向量和速度向量, \mathbf{e}_R 、 \mathbf{e}_A 、 \mathbf{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IOD Corr与轨道改正消息中的IOD Corr匹配。

使用方法如下:

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

其中, t_{brdc} 表示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, c 表示光速。

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中消息3中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,其修正算法见公式:

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

其中, P_{corr} 表示修正后观测值, P_{ini} 表示原始观测值, DCB_i 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

为了获取北斗三号 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,本文的实验部分,将对北斗三号 PPP-B2b 实时产品进行精度分析; BDS 系统播发的信号包含 B1I、B3I、B1C 和 B2a 等多种,为验证不同信号组合所能实现的定位效果,本文基于 iGMAS 在中国的测站的观测值,计算定位精度与收敛时间的结果均基于 GPS+BDS-3 双系统: 第一组, 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”; 第二组, 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”; 第三组, GPS 采用 L1、L2 频率, BDS-3 采用 B1I、B3I 信号,使用 GBM 产品,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 48s,钟差改正数的历元时间间隔为 6s; GFZ 提供的最终精密星历产品的时间间隔为 5min,最终精密钟差产品的时间间隔为 30s。本文所用精密单点定位程序为武汉大学卫星导航定位技术研究中心宋伟伟副教授开发的 Mass 软件。

3.1 北斗三号 PPP-B2b 实时产品分析

本文选取北斗周第 769 周(年积日为 271-277,共 7 天),利用飞纳接收机接收的 PPP-B2b 改正数与事后最终轨道(GBM 产品)进行比较,对同一时刻每颗卫星的卫星位置做差(如果采样时刻未对齐则采样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径向、切向、法向三个方向。

对互差序列 $\Delta orbit_{i,r}$ 、 $\Delta orbit_{i,a}$ 、 $\Delta orbit_{i,c}$ 以一天为一个统计单位,计算均方根误差 $RMS_{orbit,r}$ 、 $RMS_{orbit,a}$ 、 $RMS_{orbit,c}$

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

其中 N 为样本个数;

选取产品时间段为 24 小时,实时北斗钟差与后处理钟差(GBM 产品)作差,得到每颗卫星的钟差的互差序列 Δclk_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),其它卫星计算的钟差互差结果对参考星的钟差做一次差,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 $\Delta clk_{i,r}$ 。

为了统计相位钟的精度,消除每颗卫星的钟差基准。

$$\Delta \text{clk}_i = \Delta \text{clk}_{i,r} - \frac{\sum_{i=1}^n \Delta \text{clk}_{i,r}}{N} \quad (7)$$

统计每颗卫星 Δclk_i 时间序列的 RMS。连续 24 小时统计一个结果。

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta \text{clk}_i^2}{N}} \quad (8)$$

其中 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 方向精度均值为 0.11m, A 方向精度均值为 0.31m, C 方向精度均值为 0.32m; 钟差精度 RMS 均值为 2.14ns, STD 均值为 0.06ns。轨道钟差产品精度统计结果,如图 1 和图 2 所示:

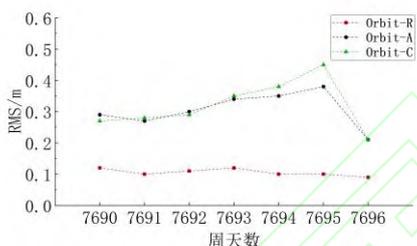


图 1 769 周 BDS 轨道精度评估

Fig.1 Evaluation of orbit accuracy of BDS during the 769th week

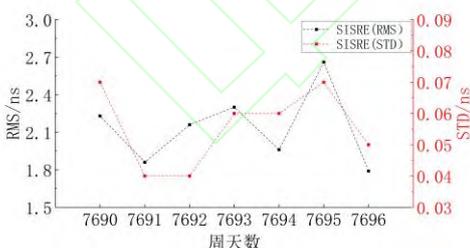


图 2 769 周 BDS 钟差 RMS 均值与 STD 均值

Fig.2 RMS mean value and STD mean value 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 测站在中国的 8 个站,在 2020 年 9 月年积日为 251-271 内的 15 天的观测数据,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 NEU 方向定位精度 RMS 进行分析,与使用德国地学中心(GFZ)的 GBM 最终产品的定位结果进行比较。



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

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 方向定位精度在 0.05m 左右; E 方向,除 GUA1 站的结果为 0.117m 以外,其他站定位精度均在 0.1m 内; U 方向定位精度均在 0.2m 内。

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 方向定位精度在 0.02m 左右; E 方向定位精度大部分在 0.04m 内,但 CHU1 站 E 方向定位精度约 0.07m; 各站 E 方向定位精度均在 0.09m 内。

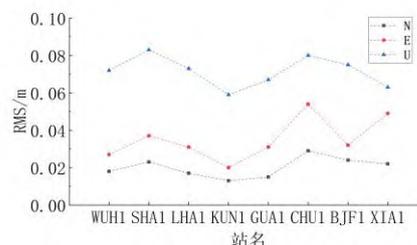


图 4 基于 GBM 产品的 B1I+B3I 信号组合的 PPP 精度

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

本文选取 iGMAS 测站在中国的 8 个站 (BJF1、CHU1、GUA1、KUN1、LHA1、SHA1、WUH1、XIA1), 在 2020 年 9 月年积日为 251-271 内的 15 天的观测数据, 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 B1C+B2a 信号组合进行事后仿实时动态定位, 统计 NEU 方向定位精度 RMS, 如图 5 所示。

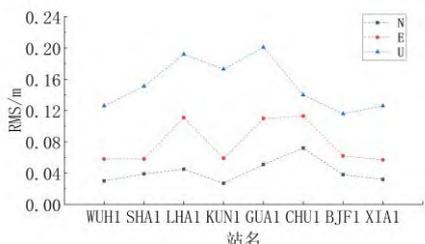


图 5 基于 PPP-B2b 改正数的 B1C+B2a 信号组合的精度

Fig.5 PPP accuracy of B1C+B2a signal combination based on PPP-B2b correction

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

定位精度方面, 对比图 3、图 4 和图 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 NEU 三个方向上的定位精度基本一致。

3.4 NEU 方向收敛情况分析

本文选取 iGMAS 国内测站中的 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, 为保证下文 2h 一组的数据分析, 未采用这三站的数据。

本文研究了 2020 年 9 月内年积日为 251-271 期间的 12 天的观测数据, 对 B1I+B3I (PPP-B2b)、B1C+B2a (PPP-B2a)、B1I+B3I (GBM) 三组进行事后仿实时动态 PPP 定位; 观测文件历元时间间隔为 30s,

以 2h 为重收敛的时间间隔, 统计三组信号定位结果在 NEU 方向 2h 内(共 240 个历元)共计 720 组收敛趋势, 见图 6。

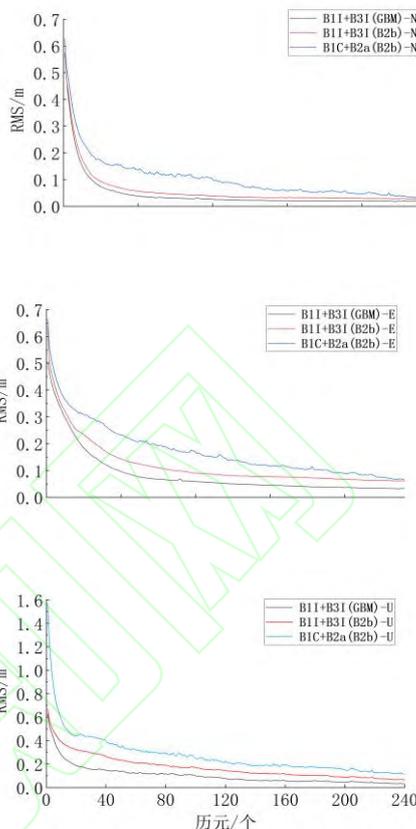


图 6 三组信号组合在 NEU 方向按历元收敛情况
Fig.6 The convergence of three signal combinations in the direction of NEU according to epoch

三组信号在 NEU 方向经过一些特定时间后的收敛精度 RMS 见表 1、表 2 和表 3。

表 1 三组信号组合 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) -N(m)	B1I+B3I (PPP-B2b) -N(m)	B1C+B2a (PPP-B2b) -N(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

关于 PPP 收敛情况,在 NEU 三个方向上,使用 GBM 产品的 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。

按照平面精度达到 0.3m 高程精度达到 0.6m 为收敛标准,使用 GBM 产品的 B1I+B3I 信号在 8min 达到标准,使用 PPP-B2b 改正数的 B1I+B3I 信号在 9min 达到,使用 PPP-B2b 改正数的 B1C+B2a 信号在 20min 达到。

表 2 三组信号组合 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) -U(m)	B1I+B3I (PPP-B2b) -U(m)	B1C+B2a (PPP-B2b) -U(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	0.17	0.262
30	0.079	0.127	0.207

表 3 三组信号组合 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) -U(m)	B1I+B3I (PPP-B2b) -U(m)	B1C+B2a (PPP-B2b) -U(m)
0.5	1.22	1.1461	1.569
1	1.02	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

4 结语

本文选取 iGMAS 国内测站在 9 月的观测

数据,对北斗三号 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 方向精度均值为 0.11m, A 方向精度均值为 0.31m, C 方向精度均值为 0.32m;钟差改正数精度 RMS 均值为 2.14ns, STD 均值为 0.06ns。使用 PPP-B2b 改正数,计算 GPS+BDS-3 的 B1I+B3I 信号组合, N 方向定位精度在 0.05m 左右; E 方向,除 GUA1 站的结果为 0.117m 以外,其他站定位精度均在 0.1m 内; U 方向定位精度均在 0.2m 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 NEU 三个方向,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,北斗三号 PPP-B2b 信号可以满足对 PPP 的应用需求。

参考文献

- [1] China Satellite Navigation Office . The Application Service Architecture of BeiDou Navigation Satellite System (Version 1.0) [DB/OL].2019. (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) [DB/OL].2019.)
<http://www.beidou.gov.cn/xt/gfxz/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)[DB/OL].2019. (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) [DB/OL].2019.)<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) [DB/OL].2020. (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].2020.)
<http://www.beidou.gov.cn/zt/xwfbh/jjcktqkxwfbh/gdxw6/202008/P020200803322412539295.pdf>

- [4] Cai Hongliang, Meng Yinan, Geng Tao, et al. Initial Results of Precise Orbit Determination Using Satellite-Ground and Inter-Satellite Link Observations for BDS-3 Satellites[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10): 1493-1500 (蔡洪亮, 孟轶男, 耿涛, 等. 北斗三号卫星星地星间联合精密定轨初步结果[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2020, 45(10): 1493-1500)
- [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+13. (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+13.)
- [7] J, F, Zumberge, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1997.
- [8] Song Weiwei. Research on real-time clock offset determination and real-time precise point positioning[D]. 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]. 武汉大学, 2011.)
- [9] Xu Lei, Chang Guobin, Gao Jingxiang, et al. Estimation of BDS DCB Based on Closure Constraint[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(4): 520-529 (徐磊, 常国宾, 高井祥, 等. 附加闭合差约束的BDS频间偏差估计模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(4): 520-529)
- [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[M]// *Observing our Changing Earth*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [12] Jing Guo 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, 2012
- [15] Yang Y, Gao W, Guo S, et al. Introduction to BeiDou - 3 navigation satellite system[J]. *Navigation*, 2019, 66.
- [16] Wang Haichun, Jia Xiaolin, Li Ding, et al. Accuracy assessment and analysis of broadcast ephemeris of BDS-3 satellite[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2019, 7(4): 60-63+74. (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+74.)
- [17] Yan X, Huang G, 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, Sun F, 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] 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. (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.)
- [20] Kazmierski K, Sonica 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, Mao Y, Sun B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1):1.
- [23] Lu X C, Chen L, Nan S, et al. Decoding PPP Corrections from BDS B2b Signals Using a Software-defined Receiver: an Initial Performance Evaluation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, PP(99):1-1.
- [24] Liu Cheng 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)[DB/OL].(2019-12)[2020-02-10].https://qzss.go.jp/en/technical/ps-is-qzss/is_qzss_l6_002_agree.html.
- [26] Japan Aerospace Exploration Agency.Interface specification for MADOCA-SEAD[DB/OL].(2019-07)[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+611.(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+611.)
- [28] Gohler E, Krol I, Bodenbach M, et al.A Galileo E6-B/C receiver: signals, prototype, tests and performance[C].ION GNSS+, 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.)

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 30072, China

Abstract: With the ability of providing Real-Time Precise Point Positioning (RTPPP) service for China and surrounding countries, the application of BeiDou Navigation Satellite System(BDS-3) 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 Precise Point Positioning(PPP). We hereby follow this idea in this paper. Based on the September observations 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. The results show that the average accuracy of PPP-B2b orbit products in R, A and C direction is 0.1 m, 0.31 m and 0.3 m, respectively. Besides, the root mean square (RMS) of clock error correction is 2.26 ns, In terms of PPP convergence, the B1I+B3I signal combination using GBM products is the quickest among them, with the highest final convergency accuracy. The second is B1I + B3I (PPP-B2b), and B1C + B2a(PPP-B2b) is at the last. Summarizing the above discussions, BDS-3 PPP-B2b signals is capable of providing regional PPP service in China.

Key words: BeiDou Navigation Satellite System; PPP-B2b; Precise Point Positioning; International GNSS Monitoring and Assessment System; Convergence Time; Positioning Accuracy

First author: SONG Weiwei, PhD, associate professor, specializes in Precise Point Positioning. E-mail: sww@whu.edu.cn

Corresponding author: LOU Yidong, PhD, professor. E-mail: ydlou@whu.edu.cn

Foundation support: Basic Scientific Research Projects of Central Universities(2042019kf0222); Major Project of BDS(GFZX030302030202); National Key Research and Development Project(2017YFB0503401-01); Joint Foundation for Ministry of Education (6141A02011907).

网络首发:

标题: 北斗三号 PPP-B2b 服务性能评估

作者: 宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 孙唯彬, 赵正予

收稿日期: 2020-12-16

DOI: 10.13203/j.whugis20200686

引用格式:

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, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200686 (SONG Weiwei, ZHAO Xinke, LOU Yidong, et al. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, DOI: 10.13203/j.whugis20200686)

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

北斗三号卫星地星间联合精密定轨初步结果

蔡洪亮, 孟轶男, 耿涛, 谢新

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(10): 1493-1500

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180499>

北斗三号最简系统卫星信号质量分析

何义磊

武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 394-402

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20180379>

使用抛物面定向天线分析北斗三号星上伪距和载波测距偏差

周仁宇, 胡志刚, 蔡洪亮, 赵镇, 饶永南, 陈良, 赵齐乐

武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(9): doi: 10.13203/j.whugis20200182

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200182>

