

引用格式: 矫殿成, 何在民, 马红皎, 等. 基于 JFNG 站的北斗 PPP-B2b 服务实时精密单点定位精度评估[J]. 时间频率学报, 2023, 46(2): 130-140.

基于 JFNG 站的北斗 PPP-B2b 服务 实时精密单点定位精度评估

矫殿成^{1,2}, 何在民³, 马红皎¹, 武建锋¹

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 西安邮电大学 通信与信息工程学院/人工智能学院, 西安 710121)

摘要: 北斗三号 PPP-B2b 服务能够给中国以及周边区域提供免费的高精度服务。通过司南 K803 系列接收机接收 PPP-B2b 信号, 利用 JFNG 站 2021 年 11 月 5 日至 11 月 13 日共 9 天的观测数据, 评估了基于 PPP-B2b 产品的 BDS 和 GPS 的精密单点定位 (PPP) 的精度, 包括静态和动态定位的精度以及对流层天顶延迟 (ZTD) 精度。结果表明: BDS 静态 PPP 的定位偏差均方根误差 (root mean square, RMS) 在 *N*、*E* 方向为 1.5 cm 左右, 在 *U* 方向上为 3 cm 左右; GPS 静态 PPP 在 *N* 方向上的 RMS 在 1 cm 以内, *E* 方向 RMS 在 5 cm 左右, *U* 方向 RMS 在 2 cm 左右; BDS 动态 PPP 在 *N* 方向 RMS 在 3 cm 左右, *E* 方向 RMS 在 4 cm 左右, *U* 方向上的 RMS 在 8 cm 左右, GPS 动态 PPP 在 *N* 方向上为 4 cm 左右, 在 *E* 方向上为 6 cm 左右, 在 *U* 方向为 10 cm 左右。BDS 的 ZTD 静态平均误差 RMS 小于 1 cm, 动态在 1.3 cm 以内; GPS 的 ZTD 误差稍大一些, 静态平均误差在 1.5 cm 左右, 动态平均误差在 2 cm 以内。最终可以得出: 基于 JFNG 站的北斗 PPP-B2b 服务实时精密单点定位 BDS 的定位精度和 ZTD 精度优于 GPS。

关键词: 精密单点定位; 动态实时定位; 静态实时定位; PPP-B2b; 天顶对流层延迟

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-02-0130-11

Performance evaluation of real-time precise point positioning based on BDS PPP-B2b service: a case study of JFNG

JIAO Dian-cheng^{1,2}, HE Zai-min³, MA Hong-jiao¹, WU Jian-feng¹

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. School of Communications and Information Engineering & School of Artificial Intelligence,

Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China)

Abstract: The BDS-3 PPP-B2b service can provide free high-precision services to China and surrounding areas. This article used Sinan K803 series receivers to receive PPP-B2b and evaluate its service accuracy, the

evaluation period was 9 days, from November 5 to November 13, 2021. The impact of precise point positioning (PPP) of JFNG station based on BDS and GPS of PPP-B2b products was analyzed, including the precision of static and dynamic positioning, and precision of zenith tropospheric delay (ZTD). The results showed that: the root mean square error (RMS) of positioning deviation for BDS static PPP was about 1.5 cm in the N and E components, and about 3 cm in the U component; the RMS of GPS static PPP in the N component was within 1 cm, in the E component was about 5 cm, in the U component was about 2 cm; the RMS of the BDS dynamic PPP was about 3 cm in the N component, in the E component was about 4 cm, in the U component was about 8 cm, and the RMS of the GPS dynamic PPP was about 4 cm in the N component. It was about 6 cm and 10 cm in the E and U component, respectively. The static average error RMS of the ZTD for BDS was less than 1 cm, and the dynamic average error was within 1.3 cm; the ZTD error of GPS was slightly larger, the static average error was about 1.5 cm, and the dynamic average error was within 2 cm.

Key words: precise point positioning; dynamic real-time positioning; static real-time positioning; PPP-B2b; zenith tropospheric delay

0 引言

北斗卫星导航系统 (BDS) 是中国自主建设运行的全球卫星导航定位系统。北斗三号全球卫星导航系统于 2020 年 7 月 31 日正式开通, 其星座由 3 颗地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO) 卫星、3 颗倾斜地球同步轨道 (inclined geo-synchronous orbit, IGSO) 卫星和 24 颗中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星组成。能够提供定位导航授时 (radio navigation satellite service, RNSS)、国际搜救 (search and rescue, SAR) 等服务, 服务范围覆盖全球; 在中国及周边地区可以提供精密单点定位 (precise point positioning, PPP)、星基增强 (satellite-based augmentation system, SBAS) 等服务^[1]。在 MEO 和 IGSO 轨道卫星上播发的 B2b 信号提供 RNSS 服务, 而 PPP-B2b 信号则由 GEO 卫星播发, 提供 PPP 服务^[2]。目前可以为 59 颗卫星提供改正电文信息, 其中为北斗卫星导航系统中 C19 到 C46 (C31 除外) 共 27 颗提供改正信息, 为 GPS 中 G01 到 G32 共 32 颗卫星提供改正信息。

精密单点定位最早由 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 的 J. F. Zumberge 等人^[3]率先提出, 开始多为事后定位为主, 随着 IGS (International GNSS Service) 实时试点项目 (IGS Real-Time Pilot Project, IGS-RTPP) 的启动, 实时 PPP 实现成为可能^[4]。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, 用户实时接收广播星历、精密轨道、钟差改正数即可恢复实时轨道和钟差。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, 需要对其进行评估^[5]。

自北斗三号导航系统正式运行以来, 多个高校和科研机构也对北斗三号有了一些相关研究。何旭蕾等^[2]对北斗三号卫星 B2b 信号进行了解析, 通过自主研发的接收机对天空中的卫星 B2b 信号进行捕获跟踪, 解析了 B2b 信号播发消息并且进行了定位结果分析, 最后尝试对 B2b 信号的 Q 支路进行了解析。Wang Liang 等^[6]将 RTS 产品 CLK93 用于 BDS 实时精密单点定位, 发现 N 、 E 、 U 的平均定位精度在静态模式为 1.7、2.2、2.6 cm, 在动态模式下为 10.3、15.6、29.2 cm。唐斌等^[7]利用北斗三号系统在中国华北、西北、东北以及东南地区设立的 4 个测站的验证终端接收处理 PPP-B2b 信号, 各测站北斗单系统 PPP 水平精度 (95%) 优于 0.3 m, 高程优于 0.6 m, 收敛时间均值小于 30 min。黄伦文等^[8]利用北斗三号 PPP-B2b 信号, 分析了北斗单系统 PPP 定位精度, 静态定位 N 、 E 、 U 方向定位精度 RMS (root mean square) 分别可达 0.8、1.5 和 1.6 cm, 动态定位精度 RMS 分别达到 3.6、6.0 和 12.2 cm, 实现了静态厘米级、动态

分米级的定位服务。史增凯等^[9]采用了非组合 PPP 模型对 BDS 精密授时精度开展了相关研究,发现静态条件下亚太地区尤其是中国境内 BDS 定位精度高于 GPS, BDS 的精密授时精度更优。聂志希等^[10]对 PPP-B2b 服务进行了初步评估,收集了 3 天的 PPP-B2b 信息,采用了 4 小时一中断的处理方式,发现静态 PPP 平均 17.7 min 达到水平定位精度优于 0.3 m,垂直定位精度优于 0.6 m 的要求, E 、 N 、 U 方向平均定位精度分别为 2.4、1.6、2.3 cm。对于动态 PPP,全收敛后 E 、 N 、 U 方向定位误差的 RMS 值分别为 8.1、3.6、8.0 cm。

在以上研究中,有一部分是从信号角度研究 PPP-B2b,另一部分则是研究了 PPP-B2b 的定位精度,不过相对而言存在一些局限,有的只研究了北斗单系统的定位精度,有的只研究了轨道精度,有的是用非组合 PPP 模型进行相关验证。与之前的研究不同的是,本文采用了无电离层组合模型,分别对北斗卫星导航系统和 GPS 基于 BDS PPP-B2b 服务的实时精密单点定位进行研究,并对处理方式和一些参数模型进行了修改。通过司南 K803 系列接收机接收到的 PPP-B2b 产品流进行解算,结合观测文件,对实时 PPP 的定位精度、收敛时间以及天顶对流层延迟进行评估与分析。

1 PPP-B2b 改正算法

1.1 精密单点定位模型

精密单点定位是采用单台 GNSS 接收机的载波相位和测距码伪距观测值等,采用高精度的卫星轨道和钟差,使用精确模型改正固体潮、天线相位中心偏差等系统误差,独立解算高精度接收机坐标、接收机钟差等参数的绝对定位技术。

精密单点定位采用双频伪距和载波相位无电离层组合时,可以消除电离层一阶项的影响,伪距和载波相位的无电离层组合观测方程^[11]可以表示为:

$$\begin{cases} P_{\text{IF}}^{S,i} = \rho + c\Delta t^i - c\Delta t_{r,s} + \delta_{\text{Trop}} + \varepsilon(P_{\text{IF}}^{S,i}) \\ \Phi_{\text{IF}}^{S,i} = \rho + c\Delta t^i - c\Delta t_{r,s} + \delta_{\text{Trop}} + \lambda_i N^i + \varepsilon(\Phi_{\text{IF}}^{S,i}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: S 为卫星系统, i 为卫星编号, $P_{\text{IF}}^{S,i}$ 、 $\Phi_{\text{IF}}^{S,i}$ 分别为无电离层组合伪距和载波相位观测值, ρ 为测站与卫星之间的几何距离, c 为光速, Δt^i 为卫星钟差, $\Delta t_{r,s}$ 为接收机钟差, δ_{Trop} 为对流层延迟, λ_i 为无电离层组合波长, N^i 为载波相位模糊度, $\varepsilon(P_{\text{IF}}^{S,i})$ 是伪距多路径效应误差、观测噪声, $\varepsilon(\Phi_{\text{IF}}^{S,i})$ 是相位多路径效应误差以及观测噪声,卫星轨道误差、相对论效应、固体潮、天线相位中心等误差通过模型进行改正。

1.2 基于北斗 PPP-B2b 卫星轨道改正

轨道改正信息为轨道改正向量 δO 在径向、切向和法向上的分量,用户利用广播星历计算出卫星位置向量 X_{broc} ,然后将轨道改正与广播星历匹配恢复得到精确的轨道,具体修正算法^[12]如下:

$$X_{\text{orb}} = X_{\text{broc}} - \delta X \quad (2)$$

式(2)中: X_{orb} 为由轨道改正电文改正后的精密卫星位置, X_{broc} 是由广播星历计算出的卫星位置, δX 表示卫星轨道改正, δX 改正计算公式^[12]如下:

$$e_{\text{rad}} = \frac{r}{|r|}, \quad (3)$$

$$e_{\text{cro}} = \frac{r \times \dot{r}}{|r \times \dot{r}|} \quad (4)$$

$$e_{\text{alo}} = e_{\text{cro}} \times e_{\text{rad}} \circ \quad (5)$$

$$\delta X = [e_{\text{rad}} \ e_{\text{alo}} \ e_{\text{cro}}] \cdot \delta O \circ \quad (6)$$

式(3)至(6)中, $r = X_{\text{broc}}$ 为广播星历卫星位置矢量, $\dot{r} = \dot{X}_{\text{broc}}$ 为广播星历卫星速度矢量, e_{rad} 、 e_{alo} 、 e_{cro} 分别对应径向、切向和法向的单位矢量, δO 为轨道径向、切向和法向改正矢量。

1.3 基于北斗 PPP-B2b 卫星钟差改正

钟差改正电文是相对于广播星历钟差的改正参数, 用户需在轨道和广播星历匹配之后, 将钟差改正产品中的改正信息的 IOD Corr 与轨道改正产品的改正信息的 IOD Corr 匹配。

钟差改正参数使用方法^[12]具体如下:

$$t_{\text{sat}} = t_{\text{broc}} - \frac{C_0}{c} \circ \quad (7)$$

式(7)中: t_{broc} 为由广播星历计算的卫星钟差, t_{sat} 为经钟差改正参数恢复后的精密卫星钟差, c 为光速, C_0 是从钟差改正电文中获得的钟差改正参数。

1.4 基于北斗 PPP-B2b 卫星码间偏差

由于卫星跟踪模式不同, 各观测值都包含一个与信号跟踪模式相关的偏差, 同步处理各频率各个信号时, 需要首先消除该偏差, 实现各类信号同步处理。用户可以对照 DCB 改正类型来对卫星码间偏差进行改正, 其修正公式^[12]为

$$\tilde{l}_{\text{sig}} = l_{\text{sig}} - B_{\text{sig}}^{\text{DC}} \circ \quad (8)$$

式(8)中: \tilde{l}_{sig} 对应 sig 信号修正后的观测值, l_{sig} 为 sig 信号接收机直接捕获的观测值, $B_{\text{sig}}^{\text{DC}}$ 对应该信号的码间偏差。

在北斗双频无电离层组合观测值中^[12]:

$$\tilde{l}_{\text{IF}} = \frac{\gamma \tilde{l}_{\text{B1Cp}} - \tilde{l}_{\text{B2ap}}}{\gamma - 1} = \frac{\gamma l_{\text{B1Cp}} - l_{\text{B2ap}}}{\gamma - 1} - \frac{\gamma B_{\text{B1Cp}}^{\text{DC}} - B_{\text{B2ap}}^{\text{DC}}}{\gamma - 1} \circ \quad (9)$$

式(9)中: \tilde{l}_{B1Cp} 和 \tilde{l}_{B2ap} 分别为 B1Cp 和 B2ap 信号修正后的观测值, l_{B1Cp} 和 l_{B2ap} 分别为 B1Cp 和 B2ap 信号接收机直接捕获的观测值, $B_{\text{B1Cp}}^{\text{DC}}$ 和 $B_{\text{B2ap}}^{\text{DC}}$ 分别为对应该信号的码间偏差。 $\gamma = \frac{f_{\text{B1Cp}}^2}{f_{\text{B2ap}}^2}$, f_{B1Cp} 为 B1Cp 载波中心频率, f_{B2ap} 为 B2ap 载波中心频率。

2 北斗三号 PPP-B2b 的定位精度和对流层天顶延迟评估

本文选取了 2021 年 11 月 5 日至 11 月 13 日共 9 天的 B2b 改正数产品, 采用了 JFNG 站的同一天的观测文件和中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心提供的导航数据文件。

试验采用 MG-APP 软件^[13]二次开发程序进行 PPP 解算, 采用事后仿实时的处理方式, 模拟实时静态、动态测试, 将静态定位结果和动态定位结果与 IGS 分析中心提供的参考值进行比较, 定位精度采用 RMS 来描述, 并将地心地固坐标系中的 X 、 Y 、 Z 方向上的分量转换成站心坐标系下的 N 、 E 、 U 方向上的分量。收敛时间的判断标准是连续十个历元定位误差小于 PPP 服务的系统设计指标, 即动态水平方向 0.3 m, 高程方向 0.6 m, 静态水平方向 0.1 m, 高程方向 0.2 m^[14]。

2.1 数据处理策略

为了验证实时精密单点定位性能, 本文使用了单 BDS 和单 GPS 无电离层组合模型进行静态定位解算和动态定位结算, 具体解算策略如表 1 所示。

表 1 实时精密单点定位数据处理策略

项目	策略
观测数据采样间隔	30 s
卫星截止高度角	7.5°
天线相位缠绕	模型改正
固体潮	模型改正
相对论效应	模型改正
地球自转	模型改正
天线相位中心偏差	IGS14.ATX 改正
对流层干分量延迟	UNB3m 模型改正
对流层湿分量延迟	随机游走估计
接收机坐标 (静态)	常数估计
接收机坐标 (动态)	白噪声估计
接收机钟差	白噪声估计

2.2 结果分析

2.2.1 静态 PPP 精度评估

对 GPS、BDS 观测数据进行静态 PPP 解算, 通过与参考值作差, 比较不同系统情况下 N 、 E 、 U 方向上的偏差, 以 JFNG 站为例, 图 1 和图 2 中展示了 2021 年 11 月 8 日的定位情况, 表 2 所示统计了 9 天的收敛时间和定位精度 (注: 如果出现多次发散收敛的情况, 选取第一次收敛的时间作为收敛时间的统计值; 同时, 因在定位前期定位结果还未收敛, 所以选取第 1 000 个到第 2 000 个历元中稳定收敛的 500 个历元计算定位误差 RMS)。

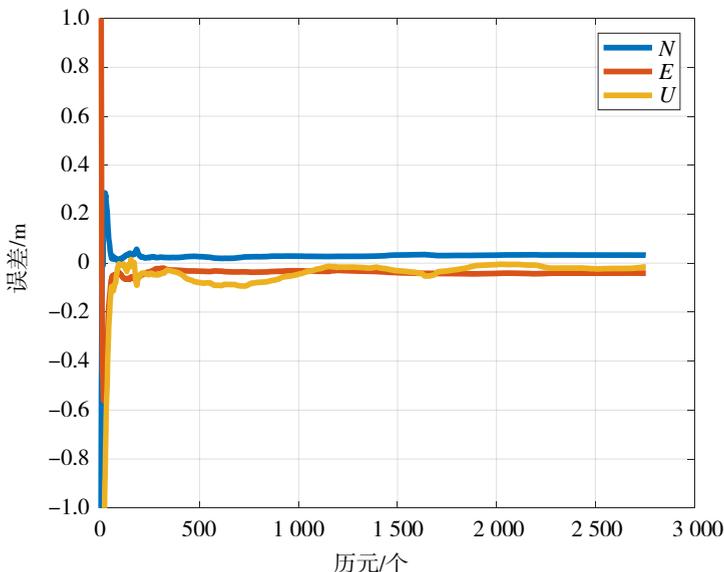


图 1 BDS 静态模式下实时精密单点定位坐标偏差序列

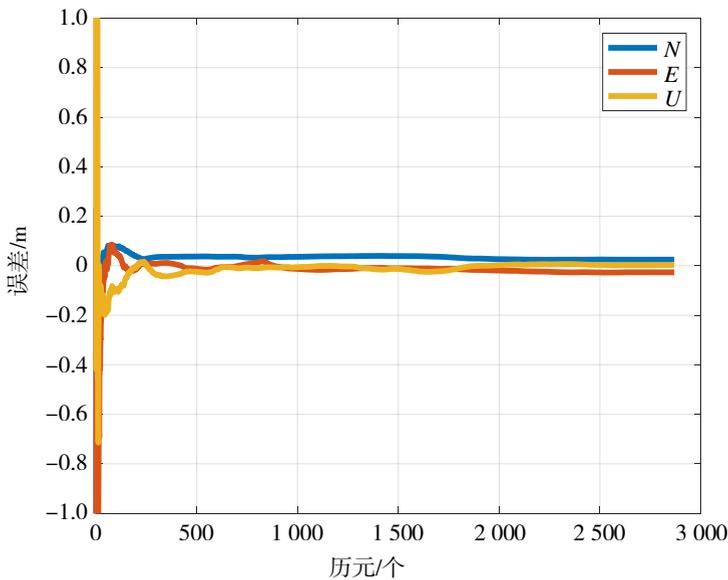


图 2 GPS 静态模式下实时精密单点定位坐标偏差序列

表 2 静态精密单点定位收敛情况统计表

日期	BDS			GPS				
	收敛时间/min	N/m	E/m	U/m	收敛时间/min	N/m	E/m	U/m
20211105	13.00	0.008	0.020	0.039	22.00	0.007	0.044	0.007
20211106	7.50	0.011	0.021	0.040	13.50	0.004	0.065	0.007
20211107	11.00	0.003	0.014	0.044	35.00	0.008	0.075	0.022
20211108	6.50	0.003	0.005	0.049	15.00	0.011	0.098	0.012
20211109	11.50	0.017	0.006	0.021	36.00	0.002	0.069	0.049
20211110	8.00	0.010	0.016	0.026	14.00	0.005	0.065	0.020
20211111	18.00	0.018	0.022	0.013	25.00	0.011	0.027	0.002
20211112	14.00	0.018	0.019	0.008	36.50	0.007	0.025	0.043
20211113	20.50	0.027	0.003	0.013	17.00	0.019	0.011	0.027
平均值	12.22	0.015	0.016	0.032	23.78	0.008	0.053	0.021

由图 1、图 2 和表 2 数据可得，BDS 经过 12 min 左右坐标偏差收敛到 PPP 服务设计指标，GPS 经过 23 min 左右收敛到 PPP 服务设计指标，个别数据需要半个小时以上才能稳定收敛，BDS 的收敛速度略快于 GPS。BDS 静态 PPP 在 N 、 E 方向上的定位偏差 RMS 在 1.5 cm 左右， U 方向上的 RMS 在 3 cm 左右，GPS 静态 PPP 在 N 方向上的 RMS 在 1 cm 以内， E 方向 RMS 在 5 cm 左右， U 方向上的 RMS 在 2 cm 左右，BDS 静态 PPP 在 N 、 E 、 U 方向上的定位精度与 GPS 的静态 PPP 的定位精度大致相同。

2.2.2 动态 PPP 精度评估

类比静态 PPP 精度评估，对动态 PPP 进行精度评估。通过与参考值作差，比较不同系统情况下 N 、

E 、 U 方向上的偏差,以 JFNG 站为例,图 3 和图 4 展示了 2021 年 11 月 8 日的定位情况,表 3 所示统计了 9 天的收敛时间和定位精度。

由图 3、图 4 和表 3 数据可知, GPS、BDS 动态 PPP 平均收敛时间为 30 min 左右。BDS 动态 PPP 在 N 方向 RMS 在 3 cm 左右, E 方向 RMS 在 4 cm 左右, U 方向上的 RMS 在 8 cm 左右,值得注意的是, GPS 动态 PPP 在解算过程中多天出现了由于可见区域内播发 GPS 卫星的改正数不够,导致定位结果中断而后又重新收敛的情况,所以在统计时只统计收敛之后的数据。去除不收敛的数据之后,可以得到在 N 方向上 RMS 为 4 cm 左右,在 E 方向上为 6 cm 左右,在 U 方向为 10 cm 左右; BDS 系统动态 PPP 在 N 、 E 、 U 方向上的定位精度略优于 GPS 的动态 PPP 的定位精度。

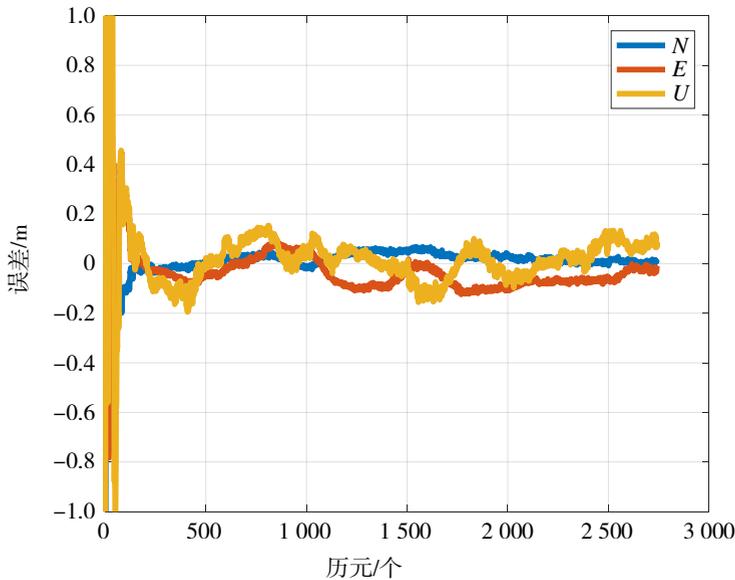


图 3 BDS 动态模式下实时精密单点定位偏差序列

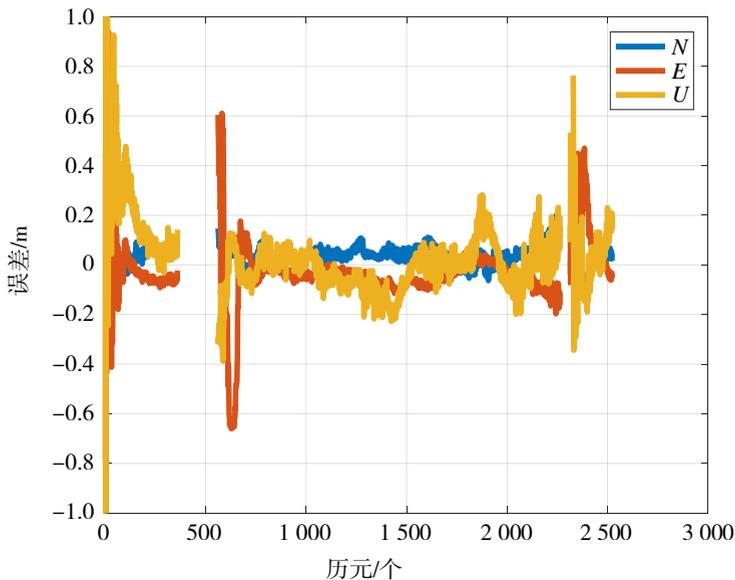


图 4 GPS 动态模式下实时精密单点定位偏差序列

表 3 动态精密单点定位收敛情况统计表

日期	BDS			GPS				
	收敛时间/min	N/m	E/m	U/m	收敛时间/min	N/m	E/m	U/m
20211105	47.50	0.018	0.045	0.023	52.50	0.034	0.047	0.101
20211106	43.00	0.027	0.032	0.097	31.00	0.029	0.078	0.056
20211107	27.00	0.015	0.039	0.071	35.50	0.031	0.049	0.218
20211108	35.50	0.022	0.022	0.139	23.00	0.031	0.057	0.093
20211109	7.50	0.033	0.049	0.067	29.50	0.045	0.039	0.052
20211110	41.00	0.040	0.037	0.032	38.00	0.019	0.076	0.074
20211111	23.00	0.026	0.039	0.112	22.50	0.029	0.045	0.080
20211112	43.00	0.037	0.062	0.096	24.50	0.050	0.100	0.112
20211113	24.50	0.044	0.072	0.092	23.00	0.078	0.031	0.103
平均值	32.44	0.029	0.044	0.081	31.10	0.038	0.058	0.099

2.2.3 对流层天顶延迟评估

作为精密单点定位的副产品，ZTD (zenith tropospheric delay) 是气象分析和预报的重要参考指标。利用 PPP-B2b 产品可以对天顶对流层延迟进行估计，从而进行精确水汽估算。本文采用的是 UNB3m 模型，UNB3m 模型是 UNB 系列模型之一，由加拿大 NEW Brunswick 大学提出的对流层延迟改正模型，UNB 模型的组成为 Saastamoinen 天顶延迟、Niell 投影函数以及气象参数年均值表和振幅表^[15]，该模型改正的是对流层干分量；对于对流层湿分量，采用随机游走的方式进行估计。同样，以 JFNG 站为例，将 GPS 和 BDS 得到的 ZTD 值与参考值进行分析比较，由于 IGS 分析中心 ZTD 参考值时间间隔为 300 s，所以采用拉格朗日插值法，将 ZTD 参考值时间间隔与解算值时间间隔统一至 30 s，对于解算中个别时间点出现的数据缺失按参考值进行估计，分析 ZTD 精度。图 5、图 6、图 7、图 8 分别为 2021 年 11 月 13 日 BDS、GPS 的静态以及动态 ZTD 误差结果。并将 2021 年 11 月 5 日至 11 月 13 日共 9 天的 ZTD 误差统计至表 4 (注：选取每天第 1 000 个历元到第 2 000 个历元中稳定收敛的 500 个历元计算 RMS)。

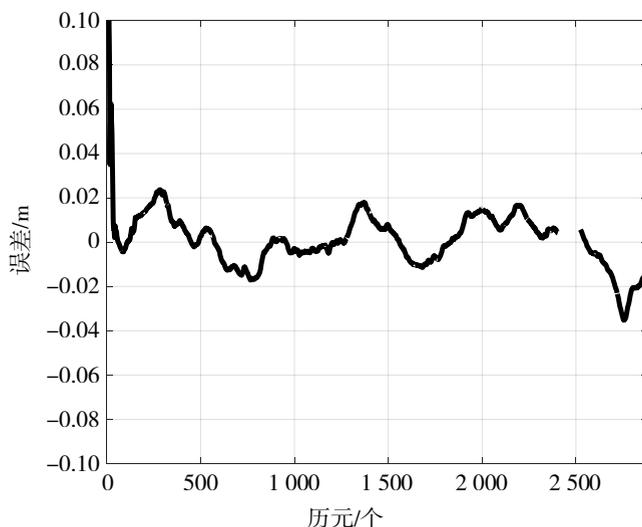


图 5 BDS 静态模式下 ZTD 误差曲线

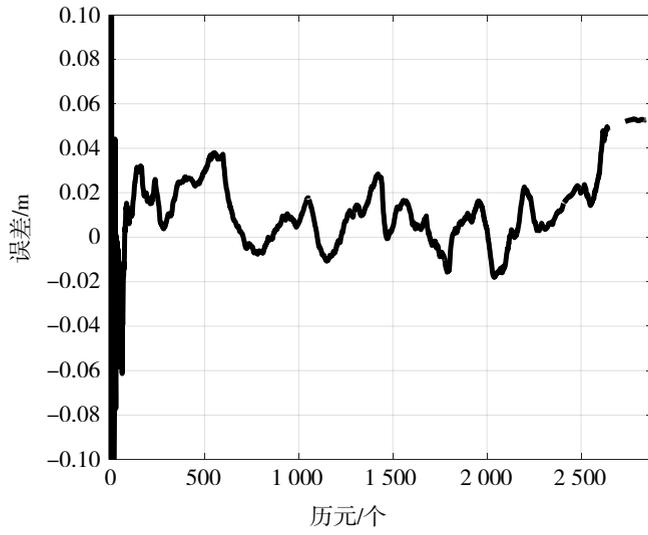


图 6 GPS 静态模式下 ZTD 误差曲线

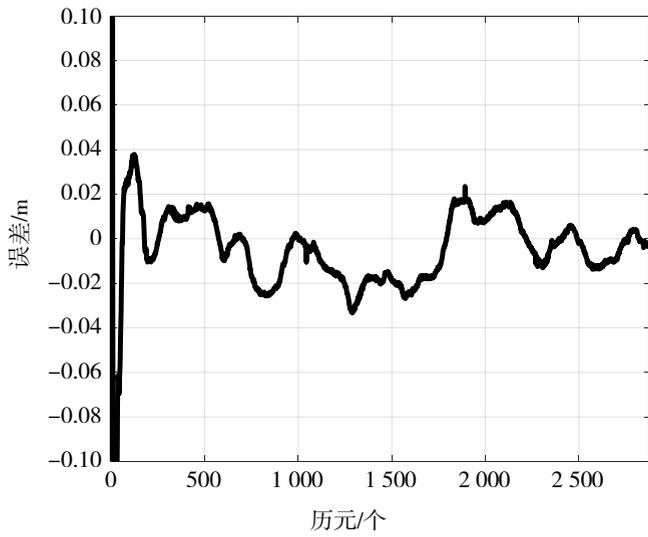


图 7 BDS 动态模式下 ZTD 误差曲线

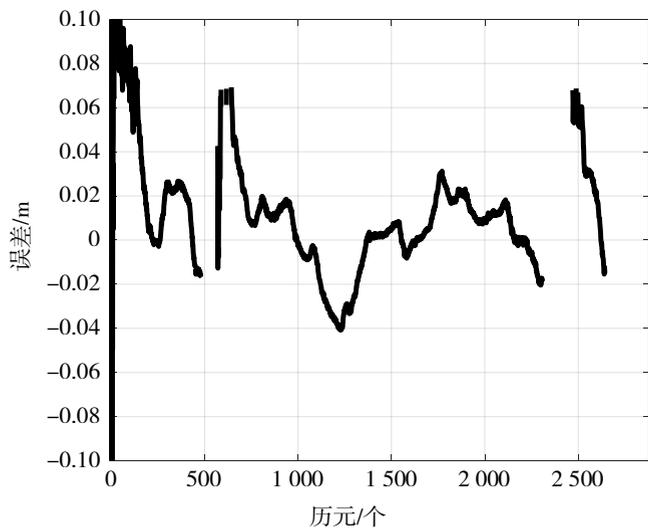


图 8 GPS 动态模式下 ZTD 误差曲线

表 4 不同导航系统 ZTD 误差

单位: m

日期	BDS 静态	GPS 静态	BDS 动态	GPS 动态
20211105	0.008 1	0.013 6	0.010 1	0.017 9
20211106	0.008 7	0.011 8	0.009 0	0.015 4
20211107	0.012 4	0.011 3	0.011 4	0.026 5
20211108	0.009 8	0.017 2	0.022 0	0.012 8
20211109	0.011 0	0.025 9	0.010 4	0.012 9
20211110	0.005 2	0.017 9	0.014 0	0.059 8
20211111	0.007 3	0.007 2	0.014 3	0.004 4
20211112	0.010 4	0.016 1	0.012 4	0.006 4
20211113	0.005 9	0.012 3	0.014 4	0.016 4
平均	0.008 8	0.014 8	0.013 1	0.019 2

从以上数据中可以看出, BDS 的 ZTD 静态平均误差 RMS 小于 1 cm, 动态在 1.3 cm 以内; GPS 的 ZTD 误差稍大一些, 静态平均误差在 1.5 cm 左右, 动态平均误差在 2 cm 以内。可见, 无论是静态还是动态, BDS 的精度都好于 GPS。

3 结语

北斗三号 PPP-B2b 服务能够给中国及周边区域提供免费的高精度服务, 为了评估其服务精度, 本文分析单 GPS、单 BDS 在经过 PPP-B2b 改正产品后的定位精度以及生成的天顶对流层延迟精度, 通过对 JFNG 站 2021 年 11 月 5 日至 11 月 13 日共 9 天的观测数据解算结果分析, 结论如下:

- ① 对于静态精密单点定位, BDS 和 GPS 的定位精度大致相当, BDS 的收敛时间略快于 GPS。
- ② 对于动态精密单点定位, BDS 在 N 、 E 、 U 方向上的定位精度略优于 GPS 的动态 PPP 的定位精度, 收敛时间大致相当。
- ③ 对于对流层天顶延迟, 在同样的定位模式中, BDS 的 ZTD 精度优于 GPS。
- ④ 结合实验结果可以得出, 基于 JFNG 站的北斗 PPP-B2b 服务的实时精密单点定位 BDS 的定位精度和 ZTD 精度优于 GPS。

参考文献:

- [1] 全国北斗卫星导航标准化技术委员会. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范[K]. 3.0 版. 2021.
- [2] 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.
- [3] 宋伟伟, 何成鹏, 辜声峰. 不同纬度区域电离层增强 PPP-RTK 性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1832-1842.
- [4] 沈朋礼. GNSS 实时精密单点定位质量控制方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2021.
- [5] 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.
- [6] WANG L, LI Z S, GE M R, et al. Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS

- real-time service[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 1-12.
- [7] 唐斌, 李金龙, 贾小敏, 等. 北斗三号系统精密单点定位服务解析与应用[J]. *导航定位与授时*, 2021, 8(3): 103-108.
- [8] 黄伦文, 孟宪伟. 基于北斗 3 号 PPP-B2b 信号的精密单点定位精度分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2021, 41(5): 516-519.
- [9] 史增凯, 马祥泰, 钱昭勇, 等. 基于北斗卫星导航系统非组合精密单点定位算法的精密授时精度研究[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(9): 3203-3211.
- [10] 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): 2050-2050.
- [11] 刘俊钊, 李浩军. 实时精密单点定位系统实现与精度分析[J]. *工程勘察*, 2323, 404(3): 40-43+50.
- [12] 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[K]. 1.0 版. 2020.
- [13] XIAO G W, LIU G Y, OU J K, et al. MG-APP: an open-source software for multi-GNSS precise point positioning and application analysis[J]. *GPS Solution: The Journal of Global Navigation Satellite System*, 2020, 24(B3): 113-178.
- [14] 蔡洪亮, 孟轶男, 耿长江, 等. 北斗三号全球导航卫星系统服务性能评估: 定位导航授时、星基增强、精密单点定位、短报文通信与国际搜救[J]. *测绘学报*, 2021, 50(4): 427-435.
- [15] 周淼, 杨龙, 王和丽. UNB3m 对流层延迟模型在中国西部地区的精度分析[J]. *城市勘测*, 2015(1): 69-72.