



BDS3/GPS PPP-B2b 定位收敛性能分析

摘要

基于 BDS3 提供的 PPP-B2b 服务,测试分析了不同伪距精度的接收机在 PPP-B2b 定位收敛时间和收敛精度等方面的差异.结果表明:BDS3 单系统定位精度静态 30 min 可收敛至水平方向优于 0.15 m,高程方向优于 0.17 m;BDS3/GPS 双系统定位精度静态 20 min 可收敛至水平方向优于 0.11 m,高程方向优于 0.13 m;相比于 BDS3 单系统,双系统定位精度水平和高程方向分别提升 26.7% 和 23.5%.此外,平均伪距精度为 1.681 m 的 A 接收机,其 BDS3 单系统 PPP-B2b 定位收敛 30 min 后精度为 0.331 m, BDS3/GPS 双系统收敛 20 min 后精度为 0.250 m;平均伪距精度为 0.873 m 的 B 接收机,单系统和双系统对应的收敛精度分别为 0.221 m 和 0.167 m;两者相比,B 接收机的平均伪距精度提高 0.808 m 后,使用其进行 PPP-B2b 测试 BDS3 单系统和 BDS3/GPS 双系统的收敛精度分别提升 33.4% 和 33.2%.

关键词

PPP-B2b;精密单点定位(PPP);收敛速度

中图分类号 P228.4

文献标志码 A

收稿日期 2022-08-08

资助项目 上海市技术创新中心项目(21DZ22 20800)、上海市科委高新技术领域项目(20511103101)

作者简介

包林鹏,男,主要研究方向为精密单点定位.linpeng_bao@huacnav.cn

曾琪(通信作者),男,工程师,主要研究方向为 GNSS 精密定位技术.qi_zeng@huacnav.cn

0 引言

2020 年 8 月 BDS3 正式建成并开通全球服务,该系统由 24 颗中轨道(MEO)卫星、3 颗倾斜轨道(IGSO)卫星和 3 颗高轨道(GEO)卫星组成^[1].BDS3 系统除了提供全球定位导航授时(PNT)服务外,还提供短报文通信、国际搜救、星基增强(SBAS)和精密单点定位(PPP)等多种服务^[1].其中,PPP 服务就是通过 3 颗 GEO 卫星播发的 PPP-B2b 信号来实现的,目前依靠 PPP-B2b 信号所播发的 26 颗 BDS3 卫星的精密改正产品,可以实现实时动态分米级和静态厘米级的定位精度^[2-3].

PPP-B2b 服务和传统的实时动态定位(Real Time Kinematic, RTK)、网络 RTK 技术相比,用户可在不架设额外基准站的情况下在中国及周边任何区域实现厘米级定位精度,因而在海洋、农业等领域具有广泛的应用前景.PPP-B2b 自开通以来,国内很多学者已经对其服务性能进行了大量的研究.许扬胤等^[4]基于 BDS3 广播星历研究发现,BDS3 卫星广播星历轨道精度在径向、切向和法向的精度分别可达 0.18、0.6 和 0.6 m,广播星历钟差精度可达 1.86 ns.黄伦文等^[5]对 PPP-B2b 定位效果分析指出,BDS3 精密改正产品在径向、切向和法向的精度分别可达 0.07、0.33 和 0.24 m,钟差产品精度优于 0.1 ns.Ren 等^[6]基于 MGEX 和 IGMAS 观测站数据研究指出,BDS3/GPS 双系统 PPP-B2b 静态定位平均精度在 N、E、U 方向分别可达 1.07、2.69 和 2.25 cm,不同测站收敛时间在 8~22 min,动态定位平均精度在 N、E 和 U 方向分别可达 3.60、5.90 和 9.40 cm,不同测站收敛时间在 10~28 min.宋伟伟等^[7]分别对 B1I/B3I 和 B1c/B2a 不同观测频点进行分析,结果表明采用 B1I/B3I 组合收敛速度略优于 B1c/B2a 组合.

PPP-B2b 定位精度和收敛速度不但与卫星改正产品精度和卫星信号质量相关,与接收机伪距观测质量和精度也有直接的影响,然而国内外很少有学者对其展开详细分析.本文首先给出 PPP-B2b 定位数学模型及数据处理方法,采用不同类型的接收机进行实时 PPP-B2b 定位测试,并统计其收敛速度和收敛精度,然后结合伪距精度对 PPP-B2b 的收敛速度和定位精度进行对比分析,结果表明 BDS3/GPS 双系统 PPP-B2b 动、静态定位收敛速度均优于 BDS3 单系统,且伪距观测值精度对 PPP-B2b 收敛速度影响较大.

1 上海华测导航技术股份有限公司,上海,201702

1 PPP-B2b 定位模型与数据处理

1.1 精密单点定位模型

本文 BDS3 选用 B1c/B2a 频点,利用双频消电离层组合消除电离层延迟一阶项的影响,其伪距和相位观测方程^[8]可表示为

$$P_{IF_{1,2}} = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T + b_{r,IF_{1,2}} - b_{IF_{1,2}}^s + e_{IF_{1,2}}, \quad (1)$$

$$L_{IF_{1,2}} = \lambda_{IF_{1,2}} \varphi_{IF_{1,2}} = \rho + c(dt_r - dt^s) + T + \lambda_{IF_{1,2}} (N_{IF_{1,2}}^s + B_{r,IF_{1,2}} - B_{IF_{1,2}}^s) + \varepsilon_{IF_{1,2}}, \quad (2)$$

式中,下标 1,2 分别表示各系统参与解算的第 1 个和第 2 个频点, $P_{IF_{1,2}}$ 、 $L_{IF_{1,2}}$ 分别为消电离层组合伪距和相位观测值, ρ_r^s 为站星几何距离, c 为光速, dt_r 为接收机钟差, dt^s 为卫星钟差, T 为对流层延迟, $\lambda_{IF_{1,2}}$ 为消电离层组合波长, $b_{r,IF_{1,2}}$ 和 $b_{IF_{1,2}}^s$ 表示伪距无电离层组合硬件延迟, $N_{IF_{1,2}}^s$ 为相位整周模糊度, $B_{r,IF_{1,2}}$ 和 $B_{IF_{1,2}}^s$ 表示相位无电离层组合硬件延迟, $e_{IF_{1,2}}$ 、 $\varepsilon_{IF_{1,2}}$ 分别为伪距和相位观测值测量误差。

1.2 轨道改正

卫星轨道改正信息播发的是卫星在星固坐标系下径向、切向和法向的分量,在匹配 CNAV 星历后可以计算出卫星位置相应的改正向量 δX ,再根据广播星历播发的卫星位置 $X_{broadcast}$,利用式(3)进行轨道改正^[9-11]:

$$X_{orbit} = X_{broadcast} - \delta X, \quad (3)$$

式中, X_{orbit} 为由轨道改正电文改正后的卫星位置, $X_{broadcast}$ 为广播星历计算得到的卫星位置, δX 为卫星位置改正项。 δX 的计算方法如下:

$$\begin{aligned} e_{radical} &= \frac{\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|}, \\ e_{cross} &= \frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}|}, \\ e_{along} &= e_{cross} \times e_{radical}, \\ \delta X &= [e_{radical} \ e_{along} \ e_{cross}] \cdot \delta O, \end{aligned} \quad (4)$$

式中, \mathbf{r} 为 $X_{broadcast}$ 广播星历计算得到的卫星位置矢量, $\dot{\mathbf{r}}$ 为 $\dot{X}_{broadcast}$ 广播星历卫星速度矢量, e_i 为方向矢量, $i = \{\text{radical}, \text{along}, \text{cross}\}$ 分别对应径向、切向和法向, δO 为轨道改正矢量。

1.3 钟差改正

钟差改正电文包括的参数是相对于广播星历钟差的改正参数,使用方法^[9-11]如下:

$$t_{satellite} = t_{broadcast} - \frac{C_0}{c}, \quad (5)$$

式中, $t_{satellite}$ 为经过钟差改正后的卫星钟差, $t_{broadcast}$ 为广播星历计算得到的卫星钟差, C_0 为 PPP-B2b 电文中播发的钟差改正参数, c 为光速。

1.4 码偏差改正

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。同步处理各频率各类信号时,需要消除该偏差,其修正方法^[9-11]如下:

$$\tilde{l}_{sig} = l_{sig} - D_{CB,sig}, \quad (6)$$

式中, \tilde{l}_{sig} 为信号修正后的观测值, l_{sig} 为接收机直接捕获的 sig 信号观测值, $D_{CB,sig}$ 为 PPP-B2b 电文播发的对应该信号的码间偏差。

2 伪距观测值质量与收敛速度分析

2.1 实验设计及数据采集

为了分析 BDS3 单系统及 BDS3/GPS 双系统收敛速度和收敛精度,分别选用 A、B 两台不同类型的接收机进行测试,采集时间为 2022 年年积日 147~148,采样间隔为 1 s,接收机并排放置于楼顶,记录实时数据流和 BDS3/GPS 双系统 PPP-B2b 改正数据,并每隔 2 h 自动重启。

同时为了分析 PPP-B2b 的绝对定位精度,两台接收机的参考坐标通过与周边上海华测导航技术股份有限公司的“华测一张网”CORS 站联测得到。统计两台接收机各时段的收敛精度时,收敛精度定义为 BDS3 单系统收敛 30 min、BDS3/GPS 双系统收敛 20 min 后 1 h 内 95% 置信度的定位误差统计。收敛成功率定义为 BDS3 单系统水平外符合精度优于 0.3 m、高程优于 0.6 m, BDS3/GPS 双系统水平外符合精度优于 0.2 m、高程优于 0.4 m 的时段点总时段的比例。

2.2 PPP-B2b 收敛效果分析

PPP-B2b 改正电文提供了多系统的轨道钟差改正数,目前常用的为 BDS3 单系统与 BDS3/GPS 双系统 PPP 定位模式。利用式(3)~(6)分别对轨道、钟差及码偏差进行改正,进行 BDS3 单系统及 BDS3/GPS 双系统事后仿实时动、静态 PPP-B2b 定位解算。以年积日 148 的 UTC 时 03:00:00—05:00:00 时段的结果为例,其结果定位曲线如图 1 所示。

由图 1 可以看出, BDS3/GPS 双系统相比 BDS3 单系统 PPP-B2b 定位收敛速度更快,两种模式均能在 15 min 以内收敛到平面分米级精度。另外由于参与解算卫星数差异, BDS3 单系统在高程方向上的收敛精度相比 BDS3/GPS 双系统略差。

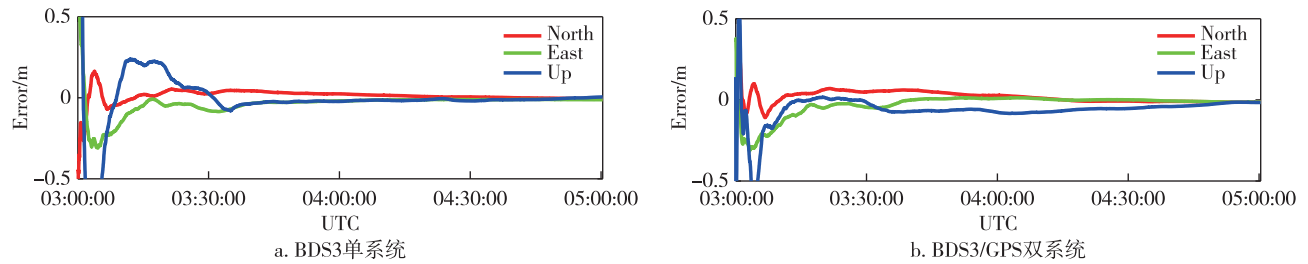


图1 BDS3 单系统及 BDS3/GPS 双系统 PPP-B2b 定位时序

Fig. 1 Positioning results of BDS3 and BDS3/GPS

为了分析两厂商不同接收机各时段收敛效果,将两台接收机分别采用 BDS3 单系统和 BDS3/GPS 双系统观测值进行仿实时 PPP-B2b 定位,并统计 17 个时段静态 (Static)、仿动态 (Kinematic) 的收敛精度,其结果如图 2—3 所示。

由图 2 可以看出:对于接收机 A 的收敛成功率, BDS3 单系统静态定位为水平 70.6%、高程 100%, 仿动态定位为水平 29.4%、高程 64.7%, 而 BDS3/GPS 双系统静态定位为水平 64.7%、高程 100%, 仿动态定位为水平 23.5%、高程 52.9%。由图 3 可以看出:对

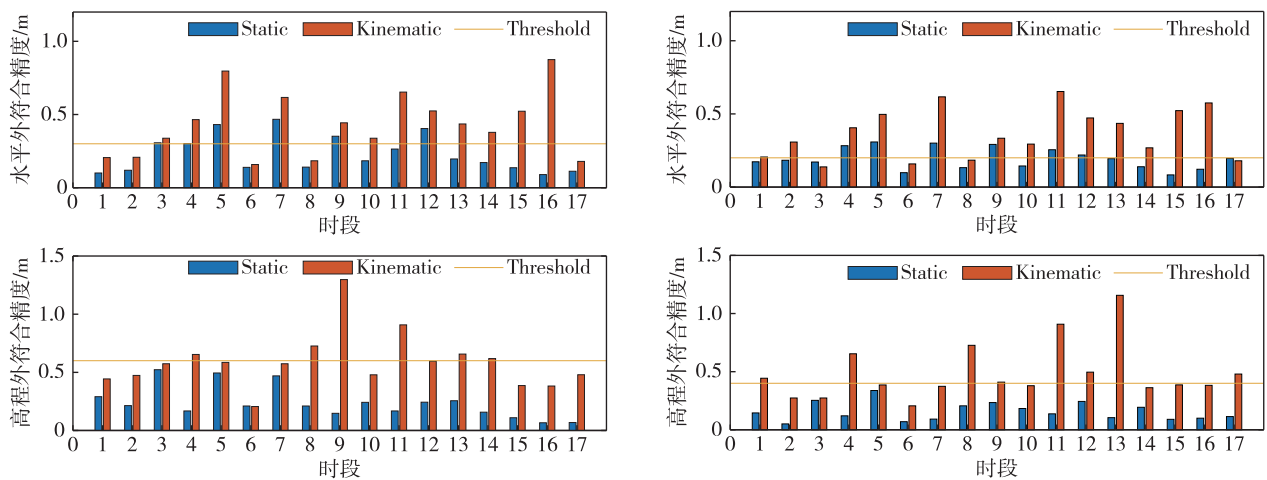


图2 接收机 A 不同时段收敛精度统计(左:BDS3 单系统;右:BDS3/GPS 双系统)

Fig. 2 Accuracies of receiver A at 95% confidence level(left: BDS3, right: BDS3/GPS)

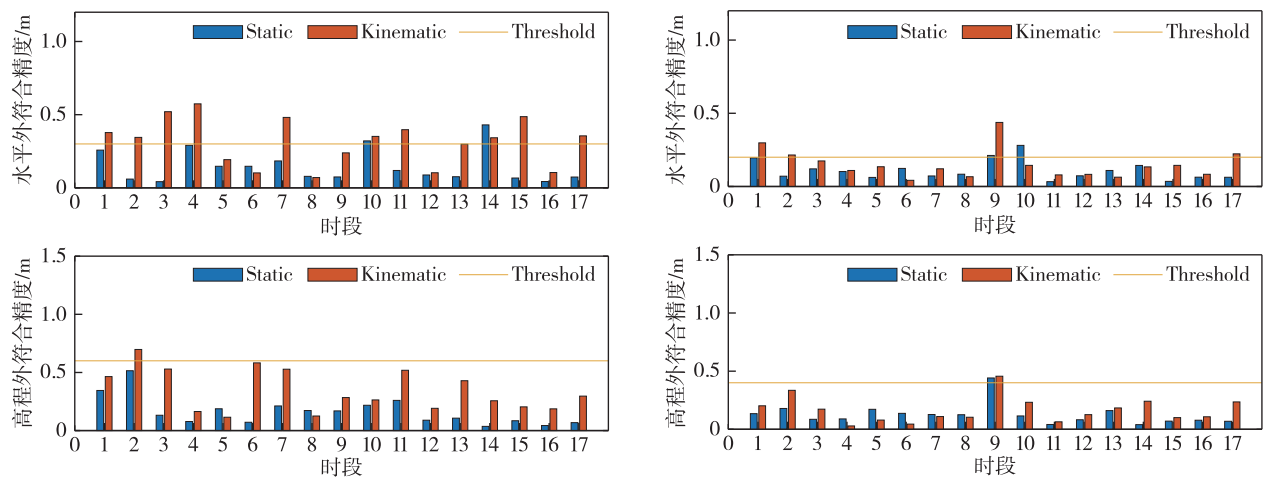


图3 接收机 B 不同时段收敛精度统计(左:BDS3 单系统;右:BDS3/GPS 双系统)

Fig. 3 Accuracies of receiver B at 95% confidence level(left: BDS3, right: BDS3/GPS)

于接收机 B 的收敛成功率. BDS3 单系统静态定位为水平 88.2%、高程 100%, 伪动态定位为水平 41.2%、高程 94.1%, BDS3/GPS 双系统静态定位为水平 88.2%、高程 94.1%, 伪动态定位水平为 76.5%、高程 94.1%. 整体来看, 接收机 B 的收敛成功率显著优于接收机 A.

表 1 给出了所有时段的收敛精度统计结果.

表 1 单 BDS3 及 BDS3/GPS 收敛平均外符合精度

Table 1 Average accuracies of BDS3 and BDS3/GPS after convergence m

方向	接收机 A				接收机 B			
	BDS3		BDS3/GPS		BDS3		BDS3/GPS	
	静态	动态	静态	动态	静态	动态	静态	动态
水平	0.231	0.431	0.194	0.368	0.147	0.314	0.109	0.150
高程	0.238	0.591	0.157	0.488	0.164	0.346	0.127	0.166

由表 1 可知: 接收机 A 采用单 BDS3 观测值进行 PPP-B2b 定位, 静态收敛外符合精度可以达到水平 0.231 m, 高程 0.238 m, 采用 BDS3/GPS 双系统观测, 收敛精度可以达到水平 0.194 m, 高程 0.157 m; 接收机 B 采用单 BDS3 观测值, 静态收敛精度可以达到水平 0.147 m, 高程 0.164 m, 采用 BDS3/GPS 双系统, 收敛精度可以达到水平 0.109 m, 高程 0.127 m.

动态外符合收敛精度明显差于静态定位. 另外,

接收机 B 各定位模式下收敛精度均优于接收机 A.

2.3 伪距观测值质量与收敛速度关联性分析

两台接收机观测时段和环境完全相同, 使用的算法固件版本也均一致, 但收敛精度和收敛成功率差异较大. 另外, 即使对于同一接收机, 不同时段的收敛性能也存在差异. 为了进一步分析原因, 本文挑选个别时段对两台接收机的伪距观测值精度进行残差分析.

以年积日 148 上午 08:30:00—10:30:00 时段两台设备同时观测的两组数据为例, 两组数据静态、动态收敛曲线分别如图 4—5 所示. 可以看出, 接收机 A 静态定位收敛较慢, 收敛 1 h 后定位曲线仍存在波动, 伪动态定位模式收敛速度更慢, 而同时段观测的接收机 B 收敛速度较为正常, 且收敛精度较为稳定.

为了分析收敛速度与伪距观测值精度的关系, 采用固定真值坐标反算伪距残差的方案进行验证, 此时伪距残差基本可以反映伪距观测值的精度. 为了方便查看, 仅输出两接收机同时跟踪到的 BDS3 系统中的 C21、C22、C34、C44 及 GPS 系统的 G02、G05、G16、G20 卫星验后残差, 其结果如图 6 所示.

可以看出, 对于接收机 A, BDS3 和 GPS 各卫星的伪距残差波动较大, 部分卫星如 G02、G16 残差波动达到 5 m, 而接收机 B 的各卫星伪距残差波动比较平缓, 基本都在 1.5 m 以内.

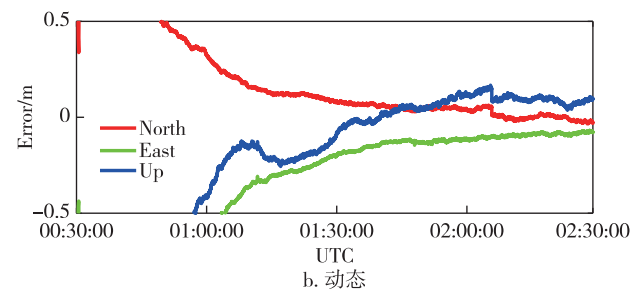
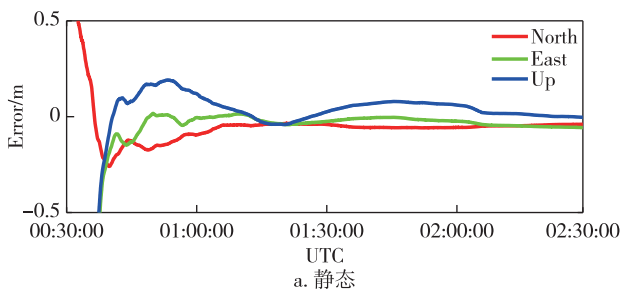


图 4 接收机 A PPP-B2b 收敛时序
Fig. 4 PPP-B2b convergence series of receiver A

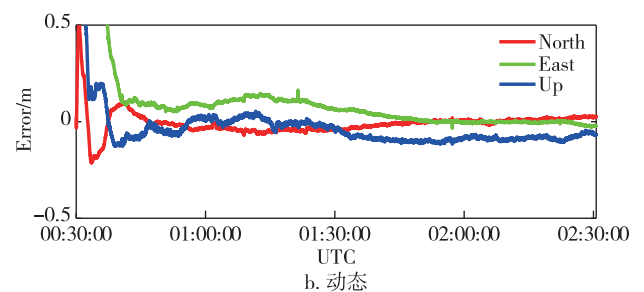
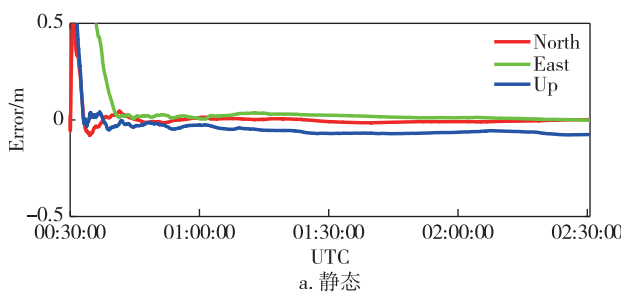


图 5 接收机 B PPP-B2b 收敛时序
Fig. 5 PPP-B2b convergence series of receiver B

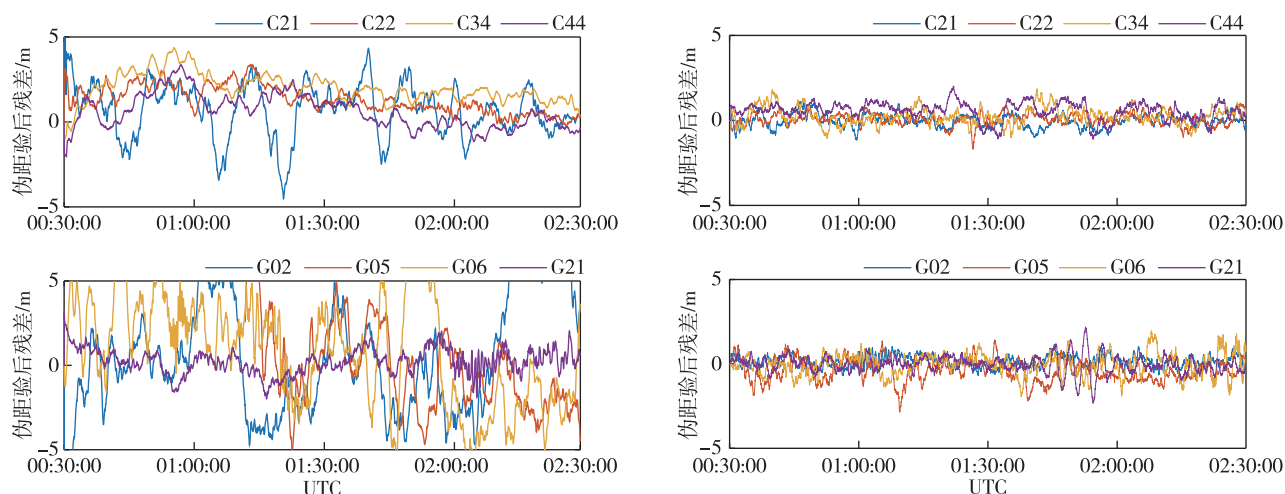


图6 部分卫星伪距验后残差序列(左:接收机 A;右:接收机 B)

Fig. 6 Residual series of pseudo-range of some satellites(left:receiver A;right:receiver B)

在 PPP-B2b 初始定位阶段,模糊度参数尚未收敛,伪距观测值精度越高,为整周模糊度参数提供的基准就越准确,收敛速度也就越快.为探究接收机 A 伪距观测值精度差是否为普遍现象,本文对两接收机同时段测得的 17 组数据进行伪距残差分析,将残差(单位:m)划分 $[0, 0.5]$ 、 $(0.5, 1]$ 、 $(1, 2]$ 、 $(2, 3]$ 以及 >3 的 5 个区间,统计两种接收机的伪距残差分布如图 7 所示,同时统计平均伪距精度如表 2 所示.

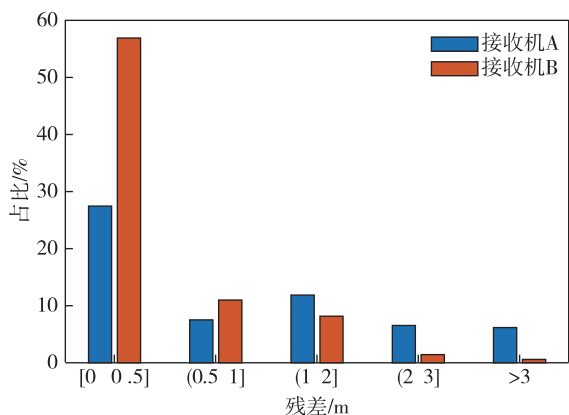


图7 接收机 A、B 伪距验后残差分布

Fig. 7 Distribution of pseudo-range residuals for receiver A and receiver B

表2 平均伪距精度与收敛精度对比

Table 2 Average accuracies of BDS3 and BDS3/GPS after convergence m

设备类型	平均伪距精度	BDS3 收敛精度	BDS3/GPS 收敛精度
接收机 A	1.680 7	0.331 2	0.249 8
接收机 B	0.872 5	0.220 6	0.166 8

由图 7 可以看出:接收机 A 伪距验后残差普遍较大,小于 1 m 的比例不足 40%,另外还存在部分残差超过 3 m,可见接收机 A 的伪距观测值精度较差;接收机 B 伪距残差在 1 m 以内的比例达到 70%,2 m 以内比例达到 97%,精度明显优于接收机 A.由表 2 可以看出,接收机 B 平均伪距精度优于 1 m,相比接收机 A 高出 48.1%,其收敛速度也更快,BDS3 单系统和 BDS3/GPS 双系统收敛精度相比接收机 A 分别提升 33.4%和 33.2%.

3 结论

本文基于两台接收机的观测数据,分析了目前 PPP-B2b 精密单点定位的收敛性能,并在此基础上研究了伪距观测值精度对于收敛速度的影响,得出结论如下:

1)采用 BDS3 单系统进行 PPP-B2b 定位,静态收敛精度为水平方向优于 0.15 m,高程方向优于 0.17 m;伪动态收敛精度为水平方向优于 0.32 m,高程方向优于 0.35 m.

2)采用 BDS3/GPS 双系统进行 PPP-B2b 定位,静态收敛精度为水平方向优于 0.11 m,高程方向优于 0.13 m;伪动态收敛精度为水平方向优于 0.16 m,高程方向优于 0.17 m.

3)伪距观测值精度对于 PPP-B2b 收敛速度影响较大,在平均伪距精度提高 0.808 m 后,单 BDS3 及 BDS3/GPS 双系统分别提升 33.4%和 33.2%.

参考文献

References

- [1] 杨元喜,许扬胤,李金龙,等.北斗三号系统进展及性能预测;试验验证数据分析[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):584-594
YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system; data analysis based on BDS-3 demonstration system [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(5): 584-594
- [2] 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]. [2022-06-06]. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/202008/t20200803_20930.html
- [3] 朱永兴,冯来平,贾小林,等.北斗区域导航系统的PPP精度分析[J].测绘学报,2015,44(4):377-383
ZHU Yongxing, FENG Laiping, JIA Xiaolin, et al. The PPP precision analysis based on BDS regional navigation system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(4): 377-383
- [4] 许扬胤,杨元喜,曾安敏,等.北斗三号全球系统空间信号精度评估分析[J].大地测量与地球动力学,2020,40(10):1000-1006
XU Yangyin, YANG Yuanxi, ZENG Anmin, et al. Accuracy assessment of signal in space of BDS-3 global system [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2020, 40(10): 1000-1006
- [5] 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
HUANG Lunwen, MENG Xianwei. Accuracy analysis of precise point positioning using BDS-3 PPP-B2b signals [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(5): 516-519
- [6] 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
- [7] 宋伟伟,赵新科,楼益栋,等.北斗三号PPP-B2b服务性能评估[J/OL].武汉大学学报(信息科学版):1-11 [2022-08-07]. DOI:10.13203/j.whugis20200686
SONG Weiwei, ZHAO Xinke, LOU Yidong, et al. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b service [J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University: 1-11 [2022-08-07]. DOI:10.13203/j.whugis20200686
- [8] 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: Solid Earth, 1997, 102(B3): 5005-5017
- [9] Zhang R Z, He Z M, Ma L M, et al. Analysis of BDS-3 PPP-B2b positioning and time transfer service [J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2769
- [10] Xu Y Y, Yang Y X, Li J L. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b precise point positioning service [J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 142-155
- [11] Tao J, Liu J N, Hu Z G, et al. Initial assessment of the BDS-3 PPP-B2b RTS compared with the CNES RTS [J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 131-116

Convergence performance analysis of BDS3/GPS PPP-B2b

BAO Linpeng¹ ZENG Qi¹ WAN Lihua¹¹ Shanghai Huace Navigation Technology Ltd, Shanghai 201702

Abstract Based on the PPP-B2b service provided by the new BDS3 satellite navigation system, the performance of PPP including convergence time and positioning accuracy is analyzed via receivers with different pseudo-range accuracies. The results show that the accuracy of BDS3-only system after convergence (about 30 min) is better than 0.15 m in horizontal and 0.17 m in vertical direction, respectively. While the accuracy of BDS3/GPS dual system after convergence (about 20 min) is 0.11 m in horizontal and 0.13 m in vertical direction, respectively, both of which are better than the BDS3-only solution. The accuracy of BDS3/GPS solution is improved by 26.7% and 23.5% in horizontal and vertical direction, respectively, when compared with BDS3-only solution. In addition, it also shows that the receiver A with average pseudo-range accuracy of 1.681 m can reach 3D accuracy of 0.331 m (BDS3-only) after convergence of 30 min, and realize 3D accuracy of 0.250 m (BDS3/GPS) after convergence of 20 min in static mode. For the receiver B with average pseudo-range accuracy of 0.873 m, the 3D accuracy is improved from 0.221 m (BDS3-only) with convergence time of 30 min, to 0.167 m (BDS3/GPS) with convergence time of 20 min in static mode. From the above comparisons, it is clearly shown that the receiver B with pseudo-range improved by 0.808 m, can improve positioning accuracy by 33.4% after convergence in BDS3-only solution and 33.2% in BDS3/GPS solution, respectively.

Key words PPP-B2b; precise point positioning (PPP); convergence rate