引文格式：尹宏杰. BDS-3 单频 PPP 定位精度与收敛性分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 112-115. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.029

BDS-3 单频 PPP 定位精度与收敛性分析

尹宏杰[1]
（1. 郑州市规划勘测设计研究院，河南 郑州 450000）

摘　要：BDS-3 已经组网完成，其多频信号的播发丰富了 BDS-3 定位的多样性，但当前对 BDS-3 单频 PPP 研究较少，因此该文进行了 BDS-3 系统 B1C、B1I、B2A、B2B、B3I 静态与伪动态 PPP 解算实验，分析了 BDS-3 单频 PPP 定位精度与收敛性。实验结果表明，BDS-3 单频静态 PPP 定位性能较优，水平和高程定位精度都在厘米级，收敛时间相差较多，其中 B2B 频率定位精度优于 L1 和 E1 频率，且收敛时间最短，在 70 min 以内；BDS-3 单频动态 PPP 定位性能较差，除个别频率，水平定位精度在厘米级，高程定位精度在分米级，首次收敛时间较长。

关键词：BDS-3；单频；PPP；精度；收敛性
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0112-04

Analysis of BDS-3 Single Frequency PPP Positioning Accuracy and Convergence

YIN Hongjie[1]
(1. Zhengzhou Planning, Survey and Design Institute, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The BDS-3 network has been completed, and its multi-frequency signal broadcast has enriched the diversity of BDS-3 positioning. However, there are few studies on BDS-3 single frequency PPP. In this paper, we carried out B1I, B2A, B2B, B3I static and pseudo-dynamic PPP solution experiments, and analyzed the BDS-3 single frequency PPP positioning accuracy and convergence. The experimental results show that the BDS-3 single frequency static PPP positioning performance is better, the horizontal and elevation positioning accuracy is at the centimeter level, and the convergence time is quite different. Among them, the B2B frequency positioning accuracy is better than the L1 and E1 frequencies, and the convergence time is the shortest. Within 70 min, BDS-3 single frequency dynamic PPP positioning performance is poor, except for individual frequencies, the horizontal positioning accuracy is at the centimeter level, the elevation positioning accuracy is at the decimeter level, and the first convergence time is long.

Key words: BDS-3, single frequency, PPP, accuracy, convergence

北斗三号全球定位系统（BDS-3）在北斗一号和北斗二号的基础上进一步完善建成，卫星星座依然采用 GEO、MEO、IGSO 3 种混合星座设计，信号在保留 B1I 频率和 B3I 频率的基础上增加了 B1C 频率和 B2A 频率 2 个新信号，原有 B2I 频率在保持频率不变的基础上修改了调制方式，改为 B2B 频率[1-4]。精密单点定位（PPP）作为当前精密定位技术之一，且相比其他定位方式具有一定的优越性，不少学者已经对 BDS-3 精密单点定位性能进行了研究[5-7]。当前很多学者主要对 BDS-3 双频与三频精密单点定位性能进行研究[8-13]，但缺乏对 BDS-3 单频精密单点定位性能的研究，因此本文基于多个 MGEX 跟踪站数据，分析了 BDS-3 单频精密单点定位性能。

1　数学模型

BDS-3 精密单点定位单频伪距与载波相位观测方程一般表示如下[14-15]

$$\begin{cases} P_i^j = \rho^j + c(dt_r - dt^j) + V_{\text{orb}}^j + b + I + T + \varepsilon \\ \Phi_i^j = \rho^j + c(dt_r - dt^j) + \lambda_i N + V_{\text{orb}}^j + d - I + T + \varsigma \end{cases} \tag{1}$$

式中，i 为 BDS-3 频率；j 为卫星号；P_i^j 为伪距观测值；Φ_i^j 为载波相位观测值；ρ^j 为测站至卫星间几何距离；c 为光速；dt_r 为接收机钟差；$\mathrm{d}t^j$ 为卫星钟差；V_{orb}^j 为轨道误差；b 为伪距硬件延迟；d 为载波相位硬件延迟；λ_i 为频率波长；N 为整周模糊度；I 为电离层延迟；T 为对流层延迟；ε 为伪距观测噪

收稿日期：2022-02-27；修回日期：2022-03-16。
项目来源：西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室（长安大学）开放基金资助项目（300102261501）。
作者简介：尹宏杰（1983—），硕士，高级工程师，主要从事测绘新技术及应用、InSAR 理论及应用技术研究，E-mail：hongjieyin@126.com。

声；ς为载波相位观测噪声。

2　实验分析

2.1　数据选取与解算策略

为详细分析BDS-3单频精密单点定位性能，随机选取了7个MGEX网2021年7 d数据，其中PTGG站无B2B频率，数据采样间隔为30 s。在数据解算时，精密星历与钟差采样GBM产品，解算截止高度角设置为10°，解算频率为BDS-3系统B1C、B1I、B2A、B2B、B3I，GPS系统L1频率和Galileo系统E1频率作为对比数据。

2.2　算例分析

根据2.1的数据处理策略，对所选7个测站分别进行了静态与仿动态PPP解算，静态PPP从定位偏差、定位精度、收敛时间3个方面进行分析，仿动态PPP从定位偏差、定位精度、首次收敛时间3个方面进行分析。其中参考坐标采用IGS中心发布的周解算坐标，收敛定义为定位偏差小于20 cm，并且持续20个历元。

2.2.1　静态PPP定位精度与收敛性分析

以KRGG站为例，图1为静态PPP解算定位偏差，从图1可以看出，7种单频静态PPP E方向定位偏差都比较稳定，最后收敛至1 cm以内；B1I频率PPP N方向和U方向定位偏差出现较大偏差，其余频率定位偏差较为稳定，且最后都收敛至1 cm以内。

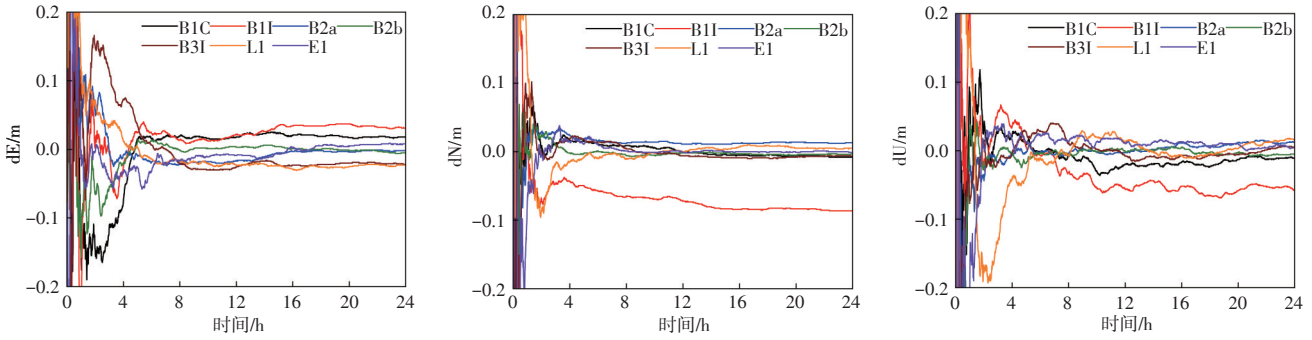


图1　KRGG站静态PPP定位偏差

图2为连续7 d单测站BDS-3系统5种单频、GPS系统L1频率、Galileo系统E1频率静态PPP定位精度。从图2可以看出，除个别测站个别频率外，单测站E方向定位精度优于3 cm，N方向定位精度优于4 cm，U方向定位精度优于6 cm，由于PTGG站接收不到B2B信号，因此其对应的3个方向定位精度为0。

图3为连续7 d单测站BDS-3系统5种单频、GPS系统L1频率、Galileo系统E1频率静态PPP收敛时间，从图3可以看出，除个别测站个别频率外，单测站单频静态PPP收敛时间都在150 min以内，同样由于PTGG站接收不到B2B信号，其对应的收敛时间为0。

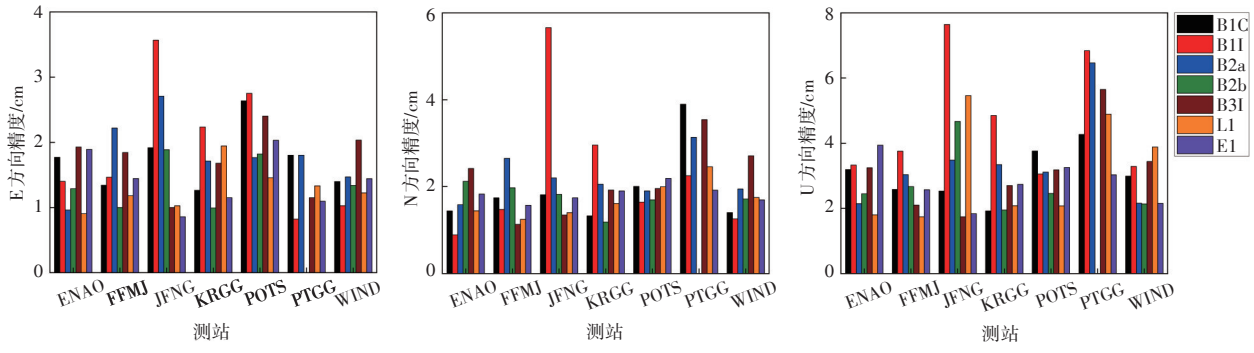


图2　单测站静态PPP定位精度

鉴于不同测站单频静态PPP定位精度与收敛时间不同，因此表1进一步计算出7个测站连续7 d定位精度与收敛时间平均值，在平均值计算时，将部分测站个别频率较差的定位精度与收敛时间剔除。从表1可以看出，7种频率静态PPP E方向定位精度优于2 cm；B1C频率、B2B频率、L1频率、E1频率静态PPP N方向定位精度优于2 cm；B1I频率、B2A频率和B3I频率静态PPP N方向定位精度优于3 cm；B1C频率、B2A频率、B2B频率、E1频率静态PPP U方向定位精度优于3 cm；B1I频率、B3I频率和L1频率和静态PPP U方向定位精度优于3 cm。B1C频率、B3I频率、B2A频率静态PPP收敛时间在90 min以内，B2B频率静态PPP收敛时间在70 min以内，B3I频率和L1频率静态PPP收敛时间在80 min以内，E1频率静态PPP收敛时

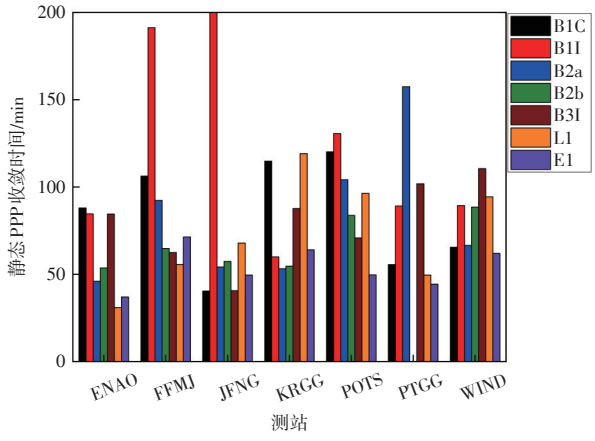


图3 单测站静态PPP收敛时间

间在60 min以内。7种单频静态PPP 3D方向定位精度由高到底为B2B、E1、L1、B1C、B2A、B3I、B1I。

2.2.2 动态PPP定位精度与收敛性分析

以KRGG站为例，图4为动态PPP解算定位偏差，从图4可以看出，7种单频动态PPP定位偏差在首次收敛后波动范围较大，E方向和N方向定位偏差整体在±20 cm以内波动，高程方向定位偏差整体在±50 cm以内变化。图5为连续7 d单测站BDS-3系统5种单频、GPS系统L1频率、Galileo系统E1频率动态PPP定位精度，从图5可以看出，PTGG站所有单频和ENAO站B3I频率动态PPP定位精度较差，除此之外，其他单频动态PPP E方向定位精度优于15 cm，N方向定位精度优于20 cm，U方向定位精度优于30 cm，由于PTGG站接收不到B2B信号，因此其对应的3个方向定位精度为0。图6为连续7 d单测站BDS-3系统5种单频、GPS系统L1频率、Galileo系统E1频率动态PPP首次收敛时间，从图6可以看出，除PTGG站和FFMJ站B1I频率外，单测站单频动态PPP首次收敛时间都在300 min以内，同样由于PTGG站接收不到B2B信号，其对应的收敛时间为0。

表1 单频静态PPP多测站定位精度与收敛时间平均值

频率	平均定位精度/cm				平均收敛时间/min
	E	N	U	3D	
B1C	1.73	1.95	2.83	3.85	84.36
B1I	1.89	2.30	3.66	4.72	80.79
B2A	1.80	2.21	2.88	4.05	81.98
B2B	1.39	1.75	2.72	3.52	67.11
B3I	1.72	2.15	3.15	4.18	79.79
L1	1.30	1.70	3.13	3.79	73.40
E1	1.42	1.84	2.79	3.63	53.98

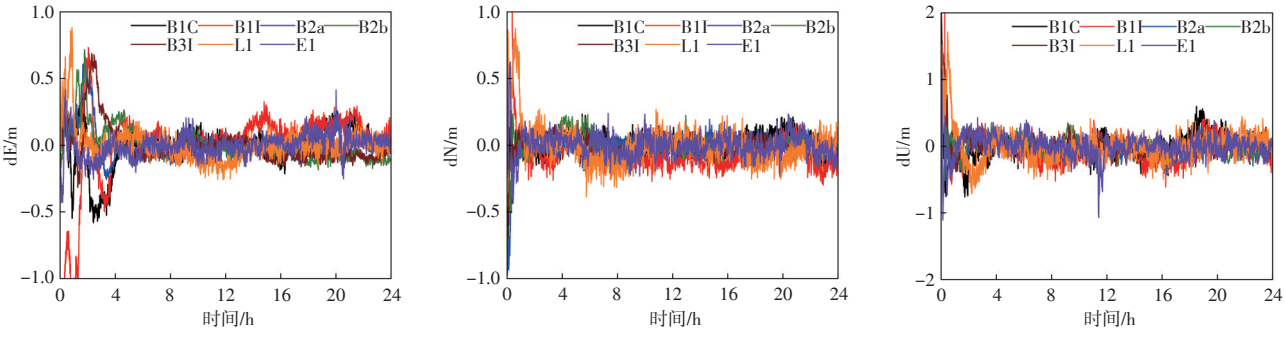


图4 KRGG站动态PPP定位偏差

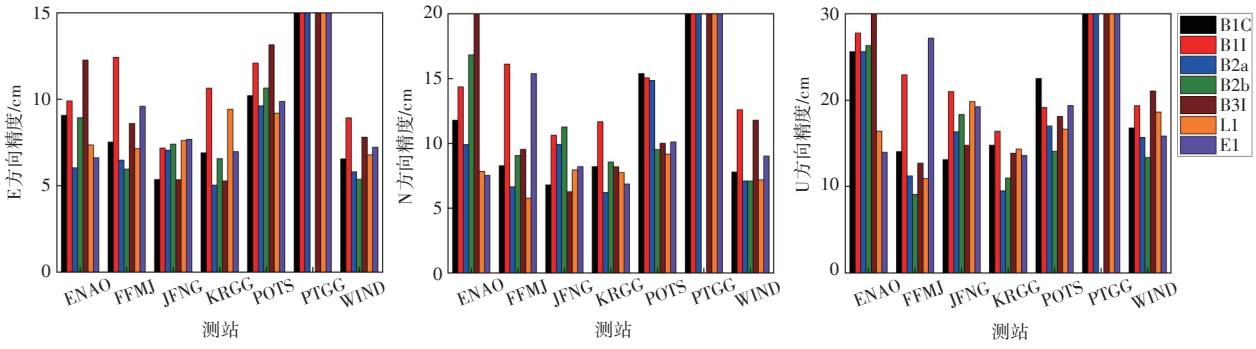


图5 单测站动态PPP定位精度

鉴于不同测站单频动态PPP定位精度与首次收敛时间不同，因此表2进一步计算出7个测站连续7 d定位精度与首次收敛时间平均值，在平均值计算时，将部分测站个别频率较差的定位精度与首次收敛时间剔除。从表2可以看出，B1C频率、B2B频率、L1频率、E1频率动态PPP E方向定位精度优于8 cm，B2A频率动态PPP E方向定位精度优于7 cm，B3I频率动态PPP E方向定位精度优于9 cm，B1I频率动态PPP E

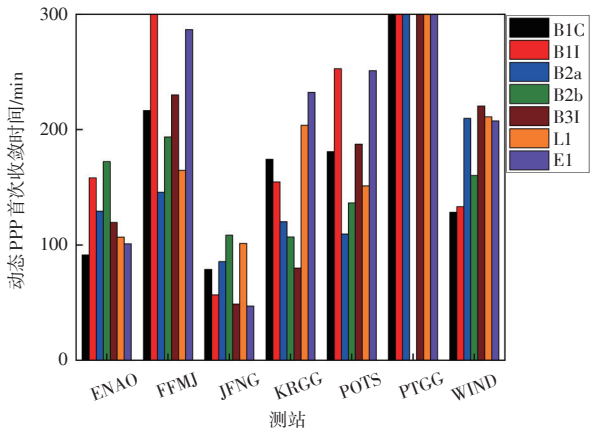


图6　单测站动态PPP首次收敛时间

表2　单频动态PPP多测站定位精度与首次收敛时间平均值

频率	平均定位精度/cm				平均收敛时间/min
	E	N	U	3D	
B1C	7.60	9.70	17.80	21.65	145.02
B1I	10.19	13.41	21.10	27.00	177.18
B2A	6.67	7.96	13.95	17.39	133.31
B2B	7.48	10.39	13.17	18.37	146.29
B3I	8.74	9.16	16.11	20.49	147.69
L1	7.92	7.61	16.13	19.51	156.48
E1	7.99	9.52	18.20	22.04	187.64

方向定位精度优于11 cm；B1C频率、B3I频率、E1频率动态PPP N方向定位精度优于10 m，B2A频率、L1频率动态PPP N方向定位精度优于8 m，B1I频率动态PPP N方向定位精度优于14 cm，B2B频率动态PPP N方向定位精度优于11 cm；B1C频率动态PPP U方向定位精度优于18 cm，B1I频率动态PPP U方向定位精度优于22 cm，B2A频率和B2B频率动态PPP U方向定位精度优于14 cm，B3I频率和L1频率动态PPP U方向定位精度优于17 cm，E1频率动态PPP U方向定位精度优于19 cm。B1C频率、B2B频率、B3I频率动态PPP首次收敛时间在150 min以内，B1I频率动态PPP首次收敛时间在180 min以内，B2A频率动态PPP首次收敛时间在140 min以内，L1频率动态PPP首次收敛时间在160 min以内，E1频率动态PPP首次收敛时间在190 min以内。7种单频动态PPP 3D方向定位精度由高到底为B2A、B2B、L1、B3I、B1C、E1、B1I。

3　结　论

本文利用2021年7 d多个MGEX跟踪站数据，进行了BDS-3单频静态与仿动态PPP解算实验，并且以GPS系统L1频率和Galileo系统E1频率作为对比，得到结论如下：

1）BDS-3单频静态PPP定位精度较优，水平和高程定位精度都在厘米级，部分频率水平定位精度优于2 cm，高程定位精度优于3 cm，收敛时间都在90 min以内甚至更短。BDS-3部分单频定位精度与收敛性略优于L1和E1频率，所选7种单频静态PPP 3D方向定位精度由高到底为B2b、E1、L1、B1C、B2a、B3I、B1I。

2）BDS-3单频动态PPP定位精度较差，除B1I频率和B2b频率N方向定位精度达到了分米级，其余频率水平定位精度都在厘米级，高程方向定位精度都在分米级，收敛时间整体都在190 min以内甚至更短，BDS-3部分单频定位精度与收敛性略优于L1和E1频率，所选单频动态PPP 3D方向定位精度由高到底为B2a、B2b、L1、B3I、B1C、E1、B1I。

参考文献

[1] 李艳红,成芳,沈朋礼,等. 固体潮对BDS精密单点定位的影响研究[J]. 测绘科学,2022,47(1):66-75

[2] 朱松,李玮. BDS-3卫星信号质量及RTK定位分析[J]. 测绘科学,2022,47(1):1-8

[3] 李树文,王潜心,武威. BDS-3单双频信号全球定位精度分析[J]. 测绘科学,2021,46(12):67-74

[4] 罗杰. 不同截止高度角下BDS-2/BDS-3短基线RTK定位性能分析[J]. 地理空间信息,2021,19(11):44-47

[5] 李建刚,李红慧,柴祥君,等. GPS、BDS、GPS+BDS精密单点定位精度评估[J]. 测绘通报,2021(9):124-129

[6] 刘明亮,丁克良,刘亚杰,等. BDS精密单点定位在桥梁变形监测中的应用[J]. 全球定位系统,2019,44(2):98-102

[7] 张锡越,赵春梅,王权,等. 多系统融合单频精密单点定位[J]. 测绘科学,2018,43(3):29-34

[8] 师思超,武文锐. BDS-2/BDS-3/GPS精密单点定位精度分析[J]. 地理空间信息,2021,19(6):68-71

[9] 王利军,焦文海,贾小林,等. BDS-3精密单点定位性能比较分析[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(4):357-361

[10] 刘生锋,杨文龙,谷涛. BDS-3双频组合精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报,2021(3):7-11

[11] 谢明德. BDS-3三频精密单点定位精度分析[J]. 全球定位系统,2020,45(1):71-76

[12] 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

[13] 马会林,吴文坛,吴秀丽. 亚太区域北斗三号对北斗二号精密单点定位的增强效果分析[J]. 测绘通报,2022(1):56-60

[14] 严义强. 单频GPS实时精密单点定位的一种算法[J]. 工程勘察,2017,45(6):43-46

[15] 廖福忠,胡冰峰,胡卫华,等. 电离层约束的BDS单频精密单点定位研究[J]. 测绘地理信息,2021,46(增刊):122-125

[16] 徐宗秋,丁新展,徐彦田,等. BDS静态精密单点定位模糊度固定解精度分析[J]. 测绘科学,2019,44(7):30-34