引文格式：杨世超. BDS-3 三频 PPP 收敛速度与定位精度分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(6): 79-81. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.06.020

BDS-3 三频 PPP 收敛速度与定位精度分析

杨世超[1]
（1. 西宁市国土勘测规划研究院有限公司，青海 西宁 810000）

摘　要：为详细评估BDS-3三频精密单点定位性能，基于多个MGEX跟踪站数据，采用三频无电离层两两组合模型进行数据解算，从定位精度与收敛性两个方面分析了BDS-3三频PPP定位性能。实验结果表明，2种三频组合PPP静态模式下水平定位精度优于2 cm，高程精度在2 cm左右，收敛时间在60 min左右；PPP动态模式E方向精度在2 cm左右，N方向精度在2 cm左右，高程精度优于4 cm，收敛时间在140 min左右。无论哪种模式下三频组合定位精度收敛时间与定位精度相比双频都有较明显的改善，可为今后BDS-3精密单点定位提供新的频率组合定位思路。

关键词：BDS-3；三频；PPP；精度；收敛时间
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）06-0079-03

Convergence Speed and Positioning Accuracy Analysis of BDS-3 Triple-frequency PPP

YANG Shichao[1]
（1.Xining Land Surveying and Planning Research Institute Co., Ltd., Xining 810000, China）

Abstract: In order to evaluate the performance of BDS-3 triple-frequency PPP in detail, based on the data of multiple MGEX tracking stations, we used the triple-frequency non-ionospheric pairwise combination model to solve the data, and analyzed the positioning performance of BDS-3 triple-frequency PPP from the two aspects of positioning accuracy and convergence. The experimental results show that the horizontal positioning accuracy of two triple-frequency combined PPP static modes is better than 2 cm, the elevation accuracy is about 2 cm, and the convergence time is about 60 min. The PPP dynamic mode E direction accuracy is about 2 cm, N direction accuracy is about 2 cm, the elevation accuracy is better than 4 cm, and the convergence time is about 140 min. No matter which mode, the convergence time of triple-frequency combination positioning accuracy is significantly improved compared with the dual-frequency positioning accuracy, which can provide a new frequency combination positioning idea for the future BDS-3 PPP.

Key words: BDS-3, triple-frequency, PPP, accuracy, convergence time

精密单点定位（precise point positioning，PPP）是当前GNSS精密定位技术之一，主要利用伪距和载波相位观测值进行定位，根据外部提供的精密轨道和钟差产品，使用一台GNSS接收机即可实现快速定位[1-3]。随着PPP技术的不断发展，大多数学者对PPP的研究主要集中在双频定位模型，而BDS-3可以播发B1I、B1C、B2a以及B3I多个频点信号，因此多频PPP组合定位研究将是今后的重点[4-8]。鉴于当前对组网完成之后的BDS-3三频组合精密单点定位研究的不全面，本文基于多个MGEX跟踪站数据，对比分析了BDS-3双频无电离层组合以及三频无电离层两两组合精密单点定位性能。

1　精密单点定位模型

一般伪距观测值与载波相位观测值表示如下[9]：

$$\begin{cases} P_i^j = \rho^j + c\mathrm{d}t - c\mathrm{d}t^j + V_{\mathrm{orb}} + V_{\mathrm{trop}} + V_{\mathrm{ion}} + \varepsilon_P \\ \Phi_i^j = \rho^j + c\mathrm{d}t - c\mathrm{d}t^j + V_{\mathrm{orb}} + V_{\mathrm{trop}} + V_{\mathrm{ion}} + N_i^j + \varepsilon_\Phi \end{cases} \tag{1}$$

式中，j 为卫星号；i 为频率；P_i^j 为伪距观测值；Φ_i^j 为载波相位观测值；ρ^j 为站星间几何距离；c 为真空中光速；dt 为接收机钟差；dt^j 为卫星钟差；V_{orb} 为卫星轨道误差；V_{trop} 为对流层延迟；V_{ion} 为电离层延迟；N_i^j 为整周模糊度；ε_P 为伪距观测值噪声；ε_Φ 为载波相位观测噪声。

收稿日期：2021-12-31；修回日期：2022-04-07。
项目来源：西宁市科技计划项目（2019-Y-12）。
作者简介：杨世超（1987—），工程师，从事工程测量工作，E-mail：zhaojinxiajx@163.com。

在式（1）的基础上，组成B1I（B1C）/B3I双频无电离层组合模型[10]：

$$\begin{cases} P^j_{r,\mathrm{IF}_{13}} = \alpha_{13}P^j_{r,1} + \beta_{13}P^j_{r,3} \\ \Phi^j_{r,\mathrm{IF}_{13}} = \alpha_{13}\Phi^j_{r,1} + \beta_{13}\Phi^j_{r,3} \end{cases} \tag{2}$$

式中，r 为测站数；$P^j_{r,\mathrm{IF}_{13}}$ 为无电离层组合伪距观测值；$\Phi^j_{r,\mathrm{IF}_{13}}$ 为无电离层组合载波相位观测值；α_{13} 和 β_{13} 为相关频率放大因子；

在无电离层组合模型的基础上，可进一步得到三频无电离层两两组合模型[11]：

$$\begin{cases} P^j_{r,12} = \rho^j_r + dt_{r,12} + V_{\mathrm{trop}} + \varepsilon_{P_{12}} \\ P^j_{r,13} = \rho^j_r + dt_{r,12} + ifb^j_{r,\mathrm{IF}} + V_{\mathrm{trop}} + \varepsilon_{P_{13}} \\ \Phi^j_{r,12} = \rho^j_r + dt_{r,12} + V_{\mathrm{trop}} + N^j_{r,12} + \varepsilon_{\Phi_{12}} \\ \Phi^j_{r,13} = \rho^j_r + dt_{r,12} + V_{\mathrm{trop}} + N^j_{r,13} + \varepsilon_{\Phi_{13}} \end{cases} \tag{3}$$

式中，$dt_{r,12}$ 为原始的接收机钟差，吸收了伪距码延迟后12频率无电离层组合的接收机钟差；$ifb^j_{r,\mathrm{IF}}$ 为无电离层两两组合的伪距频间偏差参数；其余符号表示含义与前式一致。

2 实验分析

2.1 实验数据介绍

为具体分析BDS-3三频精密单点定位的性能，本文分别进行了静态与模拟动态精密单点定位实验，并且从定位精度与收敛时间2个方面对比分析三频无电离层两两组合BDS-3系统B1C/B2a/B3I和B1I/B2a/B3I定位性能，并与传统双频无电离层组合模型BDS-3系统B1C /B3I和B1I/B3I定位性能对比。静态与动态PPP实验数据随机选取了两段时间2021年10月21日—2021年10月25日和2021年11月20日—2021年11月24日ENAO、JFNG、FFMJ等9个在全球均匀分布的MGEX跟踪网30 s测站数据进行解算，数据解算软件为Net_Diff软件，各测站真实坐标为IGS中心提供的周解算坐标，以便计算得到E、N、U3个方向分量的坐标偏差。

2.2 静态精密单点定位性能分析

图1给出了9个测站连续5 d静态精密单点定位平均定位精度，其中B1C/B3I和B1I/B3I采用双频无电离层模型进行解算，B1C/B2a/B3I和B1I/B2a/B3I采用三频无电离层两两组合模型进行解算，两两组合频率分别为B1C/B2a+B1C/B3I和B1I/B2a+B1I/B3I。图1横坐标表示参与数据解算9个测站英文名字缩写，纵坐标表示E、N、U3个方向定位精度平均值。从图1可以看出，除个别测站外，2种双频和2种三频组合静态精密单点定位E方向定位精度优于2 cm，N方向定位精度优于2 cm，U方向定位精度优于3 cm，且三频组合定位精度优于对应的双频组合定位精度。

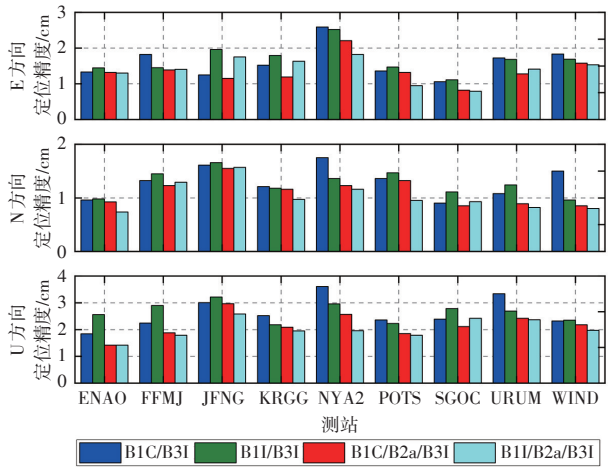


图1 9个测站单天静态精密单点定位精度平均值

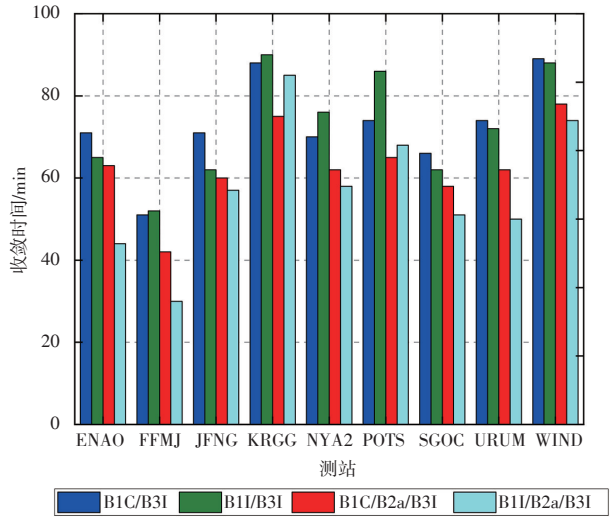


图2 9个测站单天静态精密单点定位收敛时间平均值

图2给出了9个测站连续5 d静态精密单点定位收敛时间，横坐标表示9个测站，纵坐标表示收敛时间，收敛时间统计方式为E、N、U 3个方向定位偏差连续20个历元均优于1 dm所需要的观测时间[14]。从图2可以看出，除个别测站外，2种双频和2种三频组合静态精密单点定位收敛时间在90 min以内，而大部分测站收敛时间在80 min以内，且三频组合收敛时间要少于对应的双频组合。个别测站静态精密单点定位精度与收敛时间出现差异，这可能是受到测站观测数据质量、周边观测环境以及接收到的BDS-3卫星可用数的影响。

表1进一步统计了9个测站连续5 d静态精密单点定位平均定位精度与收敛时间，其中去除了部分测站

异常值，从表1可以看出，B1C/B3I、B1I/B3I、B1C/B2a/B3I、B1I/B2a/B3I水平定位精度均优于2 cm，高程定位精度优于3 cm。B1C/B3I、B1I/B3I收敛时间在70 min左右，B1C/B2a/B3I收敛时间在70 min以内，B1I/B2a/B3I收敛时间在60 min以内。三频组合定位精度和收敛时间较双频都有较明显提升，B1C/B2a/B3I相比B1C/B3I定位精度在E、N、U 3个方向分别提升了14.42%、15.99%、17.51%，收敛时间缩短了13.61%；B1I/B2a/B3I相比B1I/B3I定位精度在E、N、U 3个方向分别提升了19.12%、14.89%、23.54%，收敛时间缩短了20.83%。

表1　静态精密单点定位平均定位精度与收敛时间

频率	定位精度/cm			收敛时间/min
	E	N	U	
B1C/B3I	1.30	1.60	2.63	72.67
B1I/B3I	1.27	1.67	2.65	72.56
B1C/B2a/B3I	1.11	1.35	2.17	62.78
B1I/B2a/B3I	1.03	1.42	2.03	57.44

2.3　动态精密单点定位性能分析

图3给出了9个测站连续5 d动态精密单点定位平均定位精度，解算模型与静态精密单点定位相同。图3横坐标表示参与数据解算9个测站英文名字缩写，纵坐标表示E、N、U 3个方向定位精度平均值。从图3可以看出，除个别测站外，2种双频和2种三频组合静态精密单点定位E方向定位精度优于3 cm，N方向定位精度优于3 cm，U方向定位精度优于5 cm，且三频组合定位精度优于对应的双频组合定位精度。

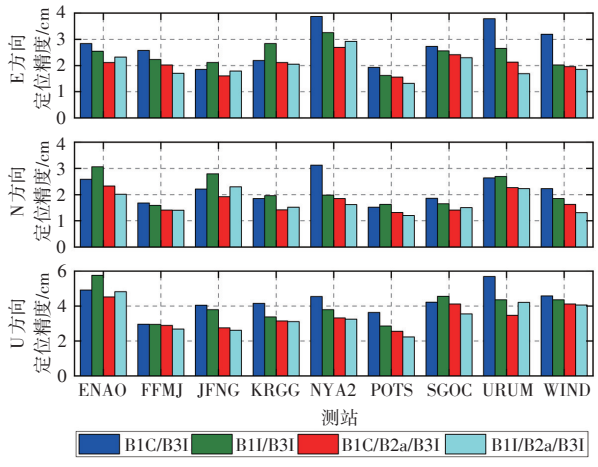


图3　9个测站单天动态精密单点定位精度平均值

图4给出了9个测站连续5 d动态精密单点定位收敛时间，横坐标表示9个测站，纵坐标表示收敛时间，收敛时间统计方式与静态精密单点定位一致。从图4可以看出，除个别测站外，2种双频和2种三频组合静态精密单点定位收敛时间在200 min以内，且三频组合收敛时间要少于对应的双频组合。

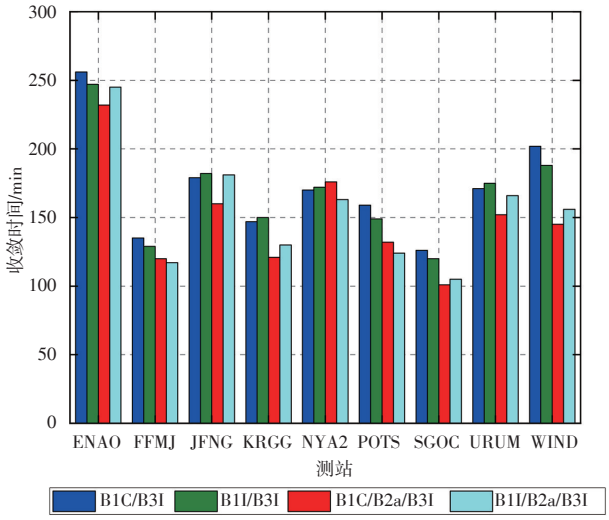


图4　9个测站单天动态精密单点定位收敛时间平均值

表2进一步统计了9个测站连续5 d动态精密单点定位平均定位精度与收敛时间，其中去除部分测站异常值，从表2可以看出，B1C/B3I、B1I/B3I水平定位精度均优于3 cm，高程定位精度优于5 cm，收敛时间在160 min左右。B1C/B2a/B3I组合E方向精度优于2 cm，N方向精度优于3 cm，U方向精度优于4 cm，B1I/B2a/B3I水平定位精度均优于2cm，高程定位精度优于4 cm，2种三频组合收敛时间均在140 min左右。三频组合定位精度和收敛时间较双频都有较明显提升，B1C/B2a/B3I相比B1C/B3I定位精度在E、N、U 3个方向分别提升了20.96%、25.78%、20.27%，收敛时间缩短了14.12%；B1I/B2a/B3I相比B1I/B3I定位精度在E、N、U 3个方向分别提升了21.41%、17.79%、15.46%，收敛时间缩短了9.72%。

表2　动态精密单点定位平均定位精度与收敛时间

频率	定位精度/cm			收敛时间/min
	E	N	U	
B1C/B3I	2.19	2.77	4.30	161.13
B1I/B3I	2.13	2.42	4.01	158.13
B1C/B2a/B3I	1.73	2.07	3.43	138.38
B1I/B2a/B3I	1.68	1.99	3.39	142.75

3　结　语

基于全球均匀分布的MGEX跟踪网数据，研究了三频无电离层组合模型下BDS-3三频精密单点定位精

（下转第123页）