

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.06.010

全球精密单点定位性能评估

王林伟¹, 周长江¹, 余海锋¹, 岳彩亚²

(1. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222;

2. 聊城大学地理与环境学院, 山东 聊城 252000)

摘要:随着中国北斗三号卫星导航系统(BDS-3)全面建成与开通,北斗卫星导航系统已步入了新发展阶段,基于BDS-3实现全方位、多层次、高精度应用已成为地学研究中一项基本任务。利用全球最新均匀分布的10个MGEX跟踪站,分别从24h内接收到的卫星数、卫星位置精度因子(PDOP)、卫星数据解算完整率和双频非组合精密单点定位(PPP)静态/动态定位精度等方面系统深入地评估了BDS-3在全球范围内的可用性。结果表明,测站对卫星跟踪能力与配备的接收机类型和区域位置有强相关性,单BDS-3卫星在全球范围内具有较强的连续定位能力,当使用SEPT POLARX5和JAVAD TRE_3接收机的情况下,数据解算完整率可达100%。此外,水平方向和高程方向定位精度分别优于2cm和3cm,并且在联合使用BDS-2和BDS-3定位的条件下,可使得静态定位精度在东、北和高程方向进一步提升37.6%,25.3%和38.9%。

关键词:北斗三号卫星导航系统;非组合精密单点定位;位置精度因子;解算完整率;定位精度

中图分类号:P208; TP751 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-8110(2023)06-0086-07

Evaluation of global precise point positioning performance for BDS-3

WANG Linwei¹, ZHOU Changjiang¹, YU Haifeng¹, YUE Caiya²

(1. China Water Resource Beifang Investigation, Design & Research Co., Ltd., Tianjin 300222, China;

2. School of Geography and Environment, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, China)

Abstract: With the full completion and opening of China's BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3), the BeiDou navigation satellite system has entered a new stage of development. The all-around, multi-level and high-precision application based on BDS-3 has become a basic task in geological research. 10 MGEX tracking stations evenly distributed around the world are used to comprehensively evaluate the global availability of BDS-3 in terms of the number of satellites in 24 h, position dilution of precision (PDOP), satellite data solution completeness rate and dual-frequency uncombined precise point positioning (PPP) static/dynamic positioning solution. The results show that the satellite tracking capability of the station is strongly correlated with the type of equipped receiver and the regional location, the single BDS-3 satellite has strong continuous positioning capability worldwide, and the data solution completion rate can reach 100% when using the SEPT POLARX5 and JAVAD TRE_3 receiver. The horizontal and vertical direction positioning accuracy are better than 2 cm and 3 cm, respectively. Besides, under the condition of combining BDS-2 and

收稿日期: 2023-08-28; 修订日期: 2023-09-16

基金项目: 国家自然科学基金(20154424)

作者简介: 王林伟(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事大地测量、水利工程测量、智慧水利等方面的研究。

通信作者: 周长江(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事 GNSS 在智慧水利方面的应用研究。

BDS-3 positioning, the static positioning accuracy is further improved by 37.6%, 25.3% and 38.9% in the east, north and elevation directions.

Key words: BeiDou-3 navigation satellite system(BDS-3); Uncombined precise point positioning (PPP); Position dilution of precision(PDOP); Solution completeness rate; Positioning accuracy

0 引言

随着北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system,BDS-3)的建成与开通,中国卫星导航系统已正式迈入全球服务新时代,实现全方位、多层次、高精度应用已成为当前和未来北斗卫星导航系统的重要任务^[1]。新组网完成的 BDS-3 卫星在信号体制上,除了继续播发北斗二号卫星导航系统(BeiDou-2 navigation satellite system,BDS-2)的 B1 和 B3 信号外,还增加了两个兼容互操作性能更强的信号 B1C 和 B2a,其频率分别与美国全球定位系统(global positioning system,GPS)和欧洲伽利略卫星导航定位系统(Galileo)相同,极大地增强了各卫星系统的兼容与互操作能力^[2]。

精密单点定位(precise point positioning,PPP)是指利用高精度的卫星星历数据,在综合考虑各项误差改正的基础上,利用载波相位和伪距观测值实现单台接收机定位的一项新技术^[3]。基于 GPS、格洛纳斯卫星系统(global navigation satellite system,GLONASS)、Galileo 和 BDS-2 的 PPP 技术已得到快速发展和多层次应用,主要体现在 PPP 技术已由初始浮点解状态转变成固定解状态^[4-5],单系统双频定位转向多频多系统融合定位^[6-7]。对于新建立的 BDS-3,其在 PPP 方面的研究当前主要集中在模型偏差的构建、与其他系统融合的定位性能分析以及新频点数据的可用性评估等方面,如潘林等^[8]基于实时改正数信息,利用北斗监测站广播星历和观测数据,分别进行了双频静态、双频仿动态、单频静态和单频仿动态仿实时精密单点定位,并评估其性能;刘永正等^[9]基于全球分布的连续观测站解算了 BDS-3 卫星 FCB 产品并实现了模糊度固定,结果表明模糊度固定后静态解在东、北和天 3 个方向的均方根误差可达 0.94 cm,0.73 cm 和 1.39 cm;李浩东等^[10]在顾及 BDS-3 与其他 GNSS 频间偏差的基础上开展了多频非组合 PPP 变形监测研究,结果表明监测精度可分别提升 12%,13%和 14%;宋伟伟等^[11]和王乐等^[12]基于 PPP 模型分别对 BDS-3 新频点信号服务性能进行了评估,结果表明其在定位精度和收

敛时间方面相对于旧频点信号均具有一定的改善。尽管关于 BDS-3 方面的 PPP 已存在大量研究,然而多层面系统性地评估其在全球范围内精密单点定位性能的研究较少,特别是在当前国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)分析中心已基本具备发布全部 BDS-3 卫星精密星历数据的背景下(ftp://ftp.gfz-potsdam.de/),利用真实观测数据客观评估其在全球范围内精密单点定位性能显得迫切需要。

本文利用全球均匀分布的 10 个可接收 BDS-3 观测数据的 MGEX 跟踪站,分别从 24 h 内接收到的卫星数、卫星位置精度因子(position dilution of precision,PDOP)、卫星数据可用率和双频非组合 PPP 静态/动态定位性能全面系统性地评估了 BDS-3 在全球范围内精密单点定位性能。

1 双频非组合 PPP 方程

在充分考虑各种测量误差的情况下,原始双频伪距和载波相位观测方程可表示为^[13]

$$\begin{cases} P_{r,j}^{s,C} = \bar{\rho}_r^{s,C} + dt_r^C - dt^{s,C} + M_r^{s,C} \cdot T_r^{s,C} + \\ \quad \gamma_j^C \cdot I_{r,1}^{s,C} + (b_{r,j}^{s,C} - b_j^{s,C}) + \epsilon_{r,j}^{s,C} \\ L_{r,j}^{s,C} = \bar{\rho}_r^{s,C} + dt_r^C - dt^{s,C} + M_r^{s,C} \cdot T_r^{s,C} - \gamma_j^C \cdot \\ \quad I_{r,1}^{s,C} + \lambda_j^{s,C} (N_{r,j}^{s,C} + B_{r,j}^{s,C} - B_j^{s,C}) + e_{r,j}^{s,C} \end{cases} \quad (1)$$

式中:C 表示 BDS-3 系统,s 为导航卫星的 PRN 号(pseudo-random noise),r 为接收机,j=1,2 为观测值频率; $P_{r,j}^{s,C}$ 为伪距观测值, $L_{r,j}^{s,C}$ 为载波观测值; $\bar{\rho}_r^{s,C}$ 表示站星几何距离; dt_r^C 和 $dt^{s,C}$ 分别为接收机钟差和卫星钟差; $\gamma_j^C = (f_1^C/f_j^C)^2$ 为与频率相关的电离层延迟放大因子; $I_{r,1}^{s,C}$ 为基于频率 f_1^C 上的倾斜电离层延迟; $M_r^{s,C}$ 和 $T_r^{s,C}$ 分别为湿投影函数和接收机处天顶湿延迟; $\lambda_j^{s,C}$ 为 f_j^C 频率对应的波长, $N_{r,j}^{s,C}$ 为 f_j^C 频率上的整周模糊度; $B_{r,j}^{s,C}$ 和 $B_j^{s,C}$ 分别表示接收机端和卫星端相位硬件延迟偏差; $b_{r,j}^{s,C}$ 和 $b_j^{s,C}$ 分别表示与频率相关的接收机端和卫星端码硬件延迟偏差; $\epsilon_{r,j}^{s,C}$ 和 $e_{r,j}^{s,C}$ 分别为伪距和载波上的观测噪声、多路径效应以及其他未模型化的误差之和。

假设卫星端天线相位中心偏差已通过天线文

件信息改正,相位缠绕误差已通过附加天线外部姿态信息改正,对流层干延迟误差已通过 Saastamoninen 模型改正,以及相对论效应已通过引力延迟偏差模型和轨道偏心率周期性偏差模型改正^[2]。鉴于苗维凯等^[14]详细地给出了多频非组合 PPP 推导过程,本文直接给出适用于 BDS-3 的双频非组合 PPP 伪距和相位观测方程实用公式

$$\begin{cases} \tilde{P}_{r,1}^{s,C} = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + \bar{d}t_r^C + M_r^{s,C} \cdot T_r^{s,C} + \tilde{I}_{r,1}^{s,C} + \epsilon_{r,1}^{s,C} \\ \tilde{L}_{r,1}^{s,C} = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + \bar{d}t_r^C + M_r^{s,C} \cdot T_r^{s,C} - \\ \quad \tilde{I}_{r,1}^{s,C} + \lambda_1^{s,C} \tilde{N}_{r,1}^{s,C} + e_{r,1}^{s,C} \\ \tilde{P}_{r,2}^{s,C} = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + \bar{d}t_r^C + M_r^{s,C} \cdot T_r^{s,C} + \\ \quad \gamma_2^C \cdot \tilde{I}_{r,1}^{s,C} + \epsilon_{r,2}^{s,C} \\ \tilde{L}_{r,2}^{s,C} = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + \bar{d}t_r^C + M_r^{s,C} \cdot T_r^{s,C} - \\ \quad \gamma_2^C \cdot \tilde{I}_{r,1}^{s,C} + \lambda_2^{s,C} \tilde{N}_{r,2}^{s,C} + e_{r,2}^{s,C} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $\tilde{P}_{r,1}^{s,C}$ 、 $\tilde{L}_{r,1}^{s,C}$ 、 $\tilde{P}_{r,2}^{s,C}$ 和 $\tilde{L}_{r,2}^{s,C}$ 分别为第一频率和第二频率上的伪距和载波相位观测值,其已经过站星几何距离和卫星钟差改正; $\bar{d}t_r^C$ 为待估的接收机钟差参数; \mathbf{u}_r^s 为方向余弦矢量; \mathbf{x} 为初始坐标改正矢量; $\tilde{I}_{r,1}^{s,C}$ 为吸收了接收机端码硬件延迟偏差的电离层参数; $\tilde{N}_{r,j}^{s,C}$ ($j=1,2$)为相应频率上的模糊度参数,吸收了相位硬件延迟和无电离层组合形式的码硬件延迟。其余参数代表的含义与式(1)相同。

因此,在 BDS-3 双频非组合 PPP 中,待估参数 \mathbf{A} 包括初始坐标改正矢量 \mathbf{x} 、接收机钟差 $\bar{d}t_r^C$ 、对流层湿延迟 $T_r^{s,C}$ 、倾斜电离层延迟 $\tilde{I}_{r,1}^{s,C}$ 和浮点模糊度 $\tilde{N}_{r,j}^{s,C}$ 等五种类型参数,如式(3)所示,PPP 详细解算策略如表 1 所示。

$$\mathbf{A} = [\mathbf{x}, \bar{d}t_r^C, T_r^{s,C}, \tilde{I}_{r,1}^{s,C}, \tilde{N}_{r,j}^{s,C}] \quad (3)$$

表 1 PPP 数据处理策略

Tab. 1 PPP data processing strategies

项目	策略
观测值频点	B1I, B3I
随机模型	码/相位观测值精度: 0.3/3 mm
卫星截止高度角/(°)	7
接收机钟差	白噪声估计
对流层延迟	对流层干延迟模型改正, 湿延迟随机游走模型估计
电离层延迟	白噪声估计
相位模糊度	弧段常数估计

2 BDS-3 全球定位性能分析

为了详细分析 BDS-3 在全球范围内精密单点定位性能,本文从 MEGX 官网上下载得到了全球均匀分布的 10 个连续跟踪站(如图 1 所示)。所有测站均可最大限度地接收到 BDS-3 卫星,数据采样时间为 30 s,年积日为 2023 年 038~040 天。由于当前德国地学研究中心(Geo Forschungs Zentrum, GFZ)发布的精密星历产品中 BDS-3 卫星已更新到 PRN60,是当前精密星历数据中 BDS-3 卫星数最多的产品,因此,本研究中拟采用的卫星轨道和钟差为该分析中心发布的事后精密产品,卫星 PCO/PCV 采用 IGS 发布的产品进行改正^[3]。评估过程中,分别从卫星接收数、卫星定位 PDOP、BDS-3 卫星数据可用率和双频非组合 PPP 浮点解定位性能四个方面进行分析研究。

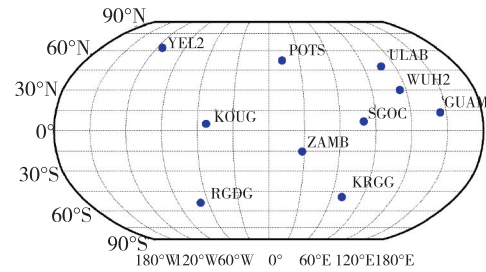


图 1 BDS-3 MGEX 跟踪站分布(<https://igs.org/>)

Fig. 1 Distribution of the BDS-3 MGEX tracking stations(<https://igs.org/>)

2.1 卫星可见数和 PDOP 值分析

卫星精密定位中,充足的卫星数量可增强定位精度和提升解算可靠性,而定位 PDOP 值是衡量卫星导航系统定位精确程度的另一重要指标。为了分析全球范围内 BDS-3 卫星系统的定位性能,本文解算了全球均匀分布的 10 个 MGEX 跟踪站,并提取相应测站的卫星接收数和 PDOP 值(如图 2 所示)。

图 2 中展示了 GUAM, POTS, SGOC, YEL2, RGDG 和 KRGG 六个测站年积日(day of year, DOY) 038 天的 24 h 卫星数量和 PDOP 值。表 2 中给出了 3 天 10 个测站 24 h 内的平均卫星可接收数和 PDOP 值。统计时以 3 倍的中误差为阈值剔除解算较差的历元。整体分析可知,BDS-3 卫星接收数量和接收机类型具有强相关性,其中美国生产的 JAVAD TRE_3

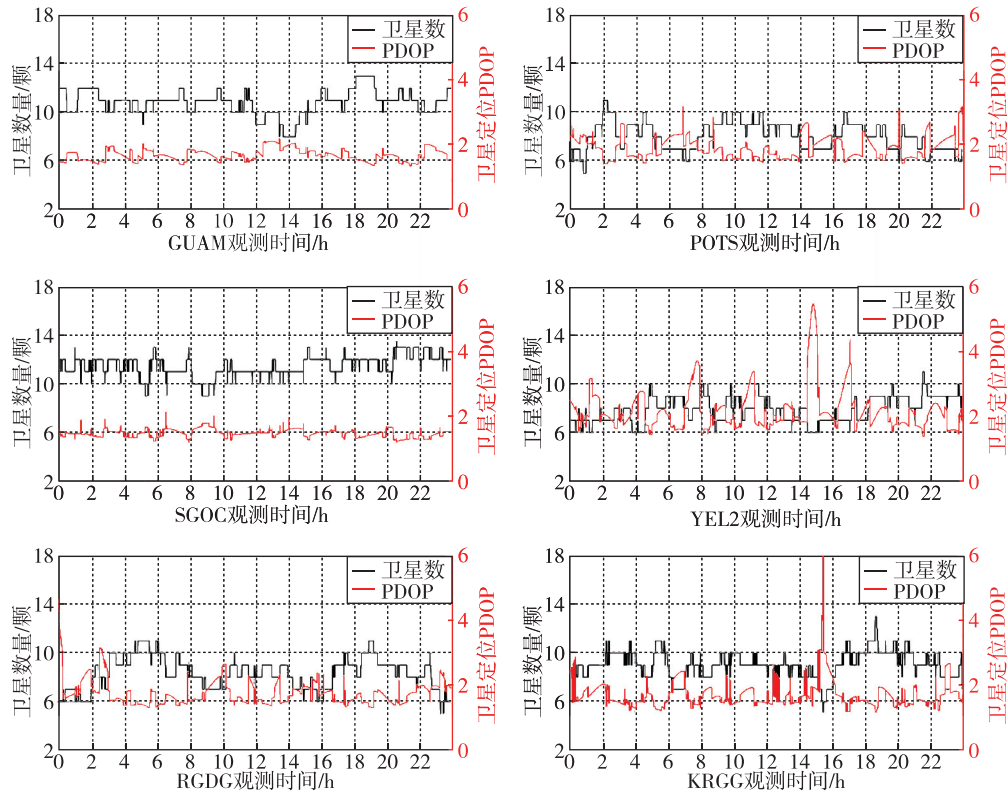


图 2 年积日 038 天的 6 个测站 BDS-3 卫星接收数量和定位 PDOP

Fig. 2 Number of satellite receptions and PDOP of BDS-3 satellites of the six stations in DOY 038

型接收机和比利时生产的 SEPT POLARX5 型接收机可最大程度地接收 BDS-3 卫星,平均分别约为 11.06 颗和 11.14 颗卫星,而美国生产的 TRIMBLE ALLOY 接收机对卫星跟踪能力相对较弱,平均约为 7.66 颗。此外,同样配备有 SEPT POLARX5 型接收机的 KOUG 和 YEL2 测站跟踪到的卫星数量相对较少,主要原因是这两个站位于美洲地区(经度:210°~330°,纬度:-70°~60°),空中可视 BDS-3 卫星数较少,与 BDS-3 卫星系统全球覆盖率有关系^[15]。实际上,无论采用哪种接收机类型,均可满足全球范围内单点定位,并且在大部分时间内可满足 PPP 需求。

对于 PDOP 值,其表现出的规律和卫星数呈负相

关关系,即当卫星可用数多时,PDOP 值呈现出低值特征,但表明卫星定位具有较高的精确程度。经统计表明,在去除美洲地区测站后,SEPT POLARX5, JAVAD TRE_3 和 TRIMBLE ALLOY 三种类型接收机 24 h 内的平均 PDOP 值分别为 1.57, 1.69 和 2.24。无论是卫星接收数,还是 PDOP 值均表明 TRIMBLE ALLOY 接收机性能相对较低。因此,在进行 BDS-3 卫星定轨、定位或其他应用时应重点选择另外两种接收机,并对美洲地区的测站进行更为严格的质量控制。值得说明的是,本文在统计 PDOP 值和卫星数时之所以将卫星高度角阈值设置为 7°,是因为 PPP 解算时也是将卫星高度角阈值设置为 7°。

表 2 2023 年 038~040 天不同测站 BDS-3 平均卫星数、PDOP 和接收机类型

Tab. 2 Average number of satellites, PDOP and receiver types of BDS-3 of DOY 038~040 in 2023

测站	卫星数量/颗	PDOP	接收机类型	测站	卫星数量/颗	PDOP	接收机类型
GUAM	11.23	1.65	SEPT POLARX5	SGOC	11.83	1.44	JAVAD TRE_3
KOUG	7.95	2.31	SEPT POLARX5TR	ULAB	10.98	1.67	JAVAD TRE_3
KRGG	8.03	2.24	TRIMBLE ALLOY	WUH2	11.04	1.85	JAVAD TRE_3
POTS	8.50	1.88	JAVAD TRE_3	YEL2	8.30	2.14	SEPT POLARX5TR
RGDG	7.29	2.17	TRIMBLE ALLOY	ZAMB	9.06	1.93	JAVAD TRE_3

2.2 BDS-3 PPP 定位性能和数据完整率分析

为了有效分析 BDS-3 全球精密单点定位性能, 本文对上述 10 个测站三天数据分别实施了 24 h 静态和动态双频非组合 PPP 解算。为了便于对比, 同时实施了 BDS-2 和 BDS-3 融合 PPP 解算。分析过程中, 以 IGS 发布的 SNX 文件中的各测站坐标作为真值, 表 3 中统计了 10 个连续跟踪站三天解的平均定位残差, 统计时对各测站最后 30 min 的定位解残差进行平均。在此说明的是, 为了保证 PPP 定位精度, 本文将倾斜地球同步轨道卫星、地球中圆轨道卫星和地球静止轨道卫星权重设置为 4 : 4 : 1^[16]。

对于静态解(如表 3 所示), 总体分析可知, 除了 YEL2 测站外, 其余测站均可满足水平方向定位精度优于 2 cm, 高程方向优于 3 cm, 并且在加入 BDS-2 后可进一步提升测站三维位置精度。对除 YEL2 测站外所有测站定位残差取平均分析, 单 BDS-3 在东方向、北方向和 高程方向定位残差 ν_E, ν_N 和 ν_U 分别为 1.42 cm, 0.83 cm 和 1.84 cm, 加入 BDS-2 系统后, 三个方向定位残差分别为 0.84 cm, 0.47 cm 和 1.10 cm, 分别提高约 37.6%、25.3% 和 38.9%。对 YEL2 测站进行质量分析发现, 该测站观测数据中缺少频点观测值和验前、验后残差大于阈值的卫星较多, 进而导致在定位过程中剔除过多的卫星, 尽管从卫星数量和卫星 PDOP 值上仍可满足解算要求, 但其空间定位几何构型强度有一定程度减弱。

表 3 非组合 PPP 东方向(E), 北方向(N)和高程方向(U)静态定位残差

Tab. 3 Static uncombined PPP east(E), north(N) and elevation direction(U) positioning residuals cm

测站	BDS-3			BDS-2 和 BDS-3		
	ν_E	ν_N	ν_U	ν_E	ν_N	ν_U
GUAM	0.65	0.49	1.68	0.56	0.22	1.46
KOUG	1.03	0.91	1.42	0.96	0.73	1.12
KRGG	0.94	0.84	1.38	0.80	0.92	1.15
POTS	1.25	0.56	1.50	0.68	0.17	0.68
RGDG	1.29	0.51	0.53	0.70	0.25	0.45
SGOC	1.98	1.28	2.14	1.15	0.69	1.87
ULAB	1.17	0.91	1.05	1.04	0.27	0.58
WUH2	1.51	0.53	2.04	0.72	0.66	1.56
YEL2	3.29	2.10	4.91	1.08	0.31	1.22
ZAMB	1.13	0.14	2.71	0.70	0.51	0.91

对于动态解(如表 4 所示), 测站坐标参数被当成白噪声进行逐历元估计, 可较好地反映所建立的 PPP

模型的性能。图 3 中以 GUAM 测站为例展示了 BDS-3, DS-2 和 BDS-3 单天动态解残差时间序列。对 10 个测站进行均方根(root mean square, RMS)统计分析可知, 单 BDS-3 系统在东方向、北方向和 高程方向定位残差 RMS 分别为 2.62 cm, 1.63 cm 和 3.27 cm, BDS-2 和 BDS-3 融合的三个方向定位残差分别为 1.95 cm, 1.17 cm 和 2.24 cm。通过静态和动态非组合 PPP 解可知, 单 BDS-3 卫星系统可满足全球范围内精密单点定位需求, 且具有较高的解算精度, 但在联合使用 BDS-2 和 BDS-3 进行融合定位的条件下, 可进一步提升测站定位性能和可靠性。值得说明的是, 本文在精度统计时剔除了收敛时间段内数据, 并以 3 倍中误差为阈值进行全时段异常值探测和剔除。

表 4 非组合 PPP 在 E, N 和 U 方向动态定位残差 RMS
Tab. 4 Positioning residual RMS of kinematic uncombined PPP in E, N and U direction cm

测站	BDS-3			BDS-2 和 BDS-3		
	RMS _E	RMS _N	RMS _U	RMS _E	RMS _N	RMS _U
GUAM	1.55	1.35	2.28	0.78	1.15	1.24
KOUG	2.23	2.02	2.60	2.07	1.92	2.01
KRGG	3.30	2.40	3.97	3.09	1.93	3.70
POTS	2.06	1.61	2.67	1.96	1.44	2.40
RGDG	2.95	1.96	3.36	2.61	1.81	2.98
SGOC	3.03	1.98	2.99	2.58	1.88	2.14
ULAB	2.88	1.95	6.23	1.50	1.73	5.60
WUH2	1.40	1.38	2.36	1.04	1.17	1.91
YEL2	4.37	3.27	5.53	2.85	2.20	3.42
ZAMB	2.77	1.73	3.01	2.23	1.65	2.74

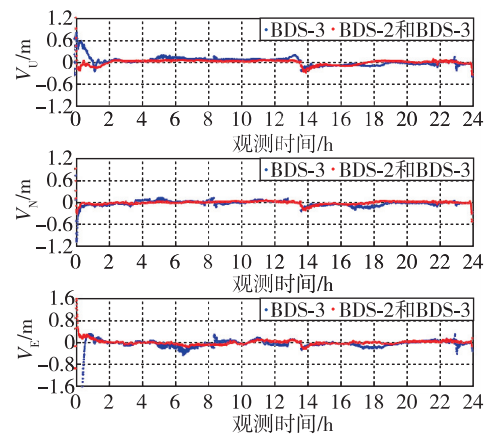


图 3 年积日 038 天的 GUAM 测站三维方向 24 h 动态定位残差

Fig. 3 24-hour dynamic residual in the three directions of the GUAM station in DOY 038

为了进一步分析 BDS-3 全球定位性能,本文统计了各测站的数据解算完整率(如图 4 所示),其计算方法为 24 h 静态 PPP 解算历元总数与总历元数的比值,该项指标可有效反映 BDS-3 卫星数据连续定位能力。统计表明,KRGG 测站和 RGDG 测站数据解算完整率分别为 96.6%和 99.2%,其余测站解算完整率均接近 100%,表明单 BDS-3 卫星在全球范围内具有较强的连续定位能力和极高的可用性。其中 KRGG 和 RGDG 站解算完整率低的原因是这两个测站采用的是 TRIMBLE ALLOY 接收机,接收到的 BDS-3 卫星相对较少,且在定位解算过程中剔除了具有单频点观测值、小高度角和地球阴影等卫星,导致在某些历元无法实现解算,如图 2 中的 KRGG 站,其在 14 时至 16 时期间,某个历元卫星数量为 5 颗,卫星 PDOP 已经超过阈值 10,必须加以剔除。通过表 3 可知,尽管这两个测站数据解算完整率低,但其仍然可以达到较高的定位精度,主要原因是在剔除了某些异常历元后,解算结果在静态滤波过程中并未受到显著影响,仍保持较强的稳定性。

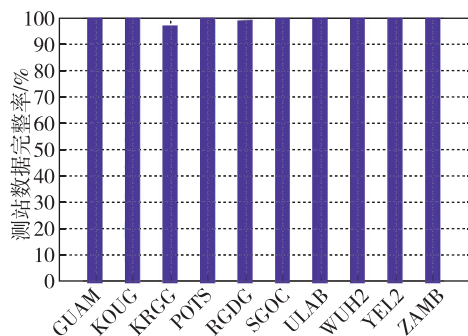


图 4 各测站数据解算完整率

Fig. 4 The completeness rate of the data solution for each test station

3 结论

本文以全球均匀分布的 10 个 MGEX 跟踪站评估了 BDS-3 卫星系统的全球可用性,并与 BDS-2 和 BDS-3 融合系统定位性能进行对比。结果表明:

1) 测站跟踪到的卫星数和定位 PDOP 与接收机类型和区域特征具有较强的相关性,但均可较好地满足全球精密单点定位需求。

2) 通过静态和动态非组合 PPP 解可知,单 BDS-3 卫星系统在全球范围内具有较高的定位精度,水平方向优于 2 cm,高程方向优于 3 cm,并且在

联合使用 BDS-2 和 BDS-3 定位的条件下,可进一步提升测站定位性能和可靠性。

3) 通过计算各测站的数据解算完整率发现,BDS-3 卫星在全球范围内具有较强的连续定位能力,当使用 SEPT POLARX5 和 JAVAD TRE_3 接收机的情况下,数据解算完整率可达 100%。

参考文献

- [1] 杨宇飞,杨元喜,陈金平,等. 北斗三号星座拟稳钟差测定及其预报[J]. 测绘学报, 2021, 50(12): 1728-1737.
YANG Yufei, YANG Yuanxi, CHEN Jinping, et al. Pseudo-stable constellation bias error of BDS-3 and its high-precision prediction[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(12): 1728-1737(in Chinese).
- [2] 赖文,黄观文,解世超,等. 北斗三号 B1C/B2a 新信号精密定轨性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(2): 158-163.
LAI Wen, HUANG Guanwen, XIE Shichao, et al. Performance analysis of precise orbit determination for BDS-3 B1C/B2a new signal[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(2): 158-163(in Chinese).
- [3] 任雨,李军阔,刘建,等. 顾及 ISB 参数的 BDS-2/BDS-3 精密单点定位性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2023, 43(4): 351-355+363.
REN Yu, LI Junkuo, LIU Jian, et al. Performance analysis of BDS-2/BDS-3 precise point positioning considering parameters[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2023, 43(4): 351-355+363(in Chinese).
- [4] GE M, GENDT G, ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning(PPP) with daily observations[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82: 389-399.
- [5] 耿江辉,常华,郭将,等. 面向城市复杂环境的 3 种多频多系统 GNSS 单点高精度定位方法及性能分析[J]. 测绘学报, 2020, 49(1): 1-13.
GENG Jianghui, CHANG Hua, GUO Jiang, et al. Three multi-frequency and multi-system GNSS high-precision point positioning methods and their performance in complex urban environment[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(1): 1-13(in Chinese).
- [6] 杨兴华,高成发,王志斌,等. BDS-3 四频组合精密单点定位方法比较及结果分析[J]. 测绘工程, 2022, 31(5): 33-40.

- YANG Xinghua, GAO Chengfa, WANG Zhibin, et al. Comparison and performance analysis of BDS-3 four-frequency combination PPP[J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2022, 31(5): 33-40(in Chinese).
- [7] 祝会忠,李骏鹏,李军. 智能手机 GNSS 多系统多频实时动态定位方法[J]. *测绘科学*,2022,47(9):8-19.
ZHU Huizhong, LI Junpeng, LI Jun. Study on GNSS multi-system dual-frequency real-time dynamic positioning method for smart phones[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(9): 8-19(in Chinese).
- [8] 潘林,李选平,戴吾蛟,等. 顾及频间偏差的 GNSS 多频非组合 PPP 变形监测[J]. *导航定位与授时*,2023, 10(1):65-73.
PAN Lin, LI Xuanping, DAI Wujiao, et al. Deformation monitoring with GNSS multi-frequency uncombined PPP considering inter-frequency biases [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023, 10(1): 65-73(in Chinese).
- [9] 刘永正,蔡昌盛,崔先强,等. BDS-3 新频点 B1C/B2a 动态数据特性及 PPP 精度分析[J]. *全球定位系统*, 2022,47(5):22-27.
LIU Yongzheng, CAI Changsheng, CUI Xianqiang, et al. Dynamic data characteristics and PPP accuracy analysis of B1C/B2a at new frequency points of BDS-3 [J]. *GNSS World of China*, 2022, 47(5): 22-27(in Chinese).
- [10] 李浩东,赵齐乐,陶钧,等. 北斗三号卫星 FCB 估计及其模糊度固定[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022,47(9):1439-1446.
LI Haodong, ZHAO Qile, TAO Jun, et al. FCB estimation and ambiguity resolution of BDS-3[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(9): 1439-1446(in Chinese).
- [11] 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)*,2023,48(3):408-415.
SONG Weiwei, ZHAO Xinke, LOU Yidong, et al. Performance evaluation of BDS-3 PPP-B2b service[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 408-415(in Chinese).
- [12] 王乐,解世超,王浩浩,等. 利用改正数信息的北斗三号实时精密单点定位及性能分析[J]. *导航定位与授时*,2020,7(6):37-44.
WANG Le, XIE Shichao, WANG Haohao, et al. BDS-3 real-time precise point positioning using correction information and performance analysis [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(6): 37-44(in Chinese).
- [13] 黄观文,雷哲哲,王进,等. 亚太区域不同遮挡情形下多系统组合 PPP 定位效能分析[J]. *大地测量与地球动力学*,2018,38(6):562-567.
HUANG Guanwen, LEI Zhezhe, WANG Jin, et al. Efficiency analysis of multi-GNSS combined PPP in complex conditions of Asia-Pacific region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2018, 38(6): 562-567 (in Chinese).
- [14] 苗维凯,陈旭升,刘洋洋. GNSS 多系统组合 PPP 解算方法与成果分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2019,39(5):521-527.
MIAO Weikai, CHEN Xusheng, LIU Yangyang. Processing method and result analysis of GNSS multi-system combined precise point positioning [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2019, 39(5): 521-527(in Chinese).
- [15] 刘明亮,安家春,王泽民,等. BDS-3 多频伪距定位性能分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*,2023,4(4): 1-19.
LIU Mingliang, AN Jiachun, WANG Zemin, et al. Performance analysis of BDS-3 multi-frequency pseudorange positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 4(4): 1-19(in Chinese).
- [16] ZHOU F, DONG D, LI W, et al. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations [J]. *GPS Solution*, 2018, 22(2):33.

(编辑:黄利华)