

引用格式：呼宇航，成芳，沈朋礼，等. BDS-3 精密轨道和钟差产品质量评估及其 PPP 性能分析[J]. 时间频率学报, 2025, 48(2): 143-156.

BDS-3 精密轨道和钟差产品质量评估 及其 PPP 性能分析

呼宇航^{1,2}, 成芳^{1,3†}, 沈朋礼¹, 李晓婉^{1,2}, 孙文硕^{1,2}, 卢晓春^{1,3}

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. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600

摘要: 随着北斗三号卫星导航系统的不断发展, 多家 MGEX (multi-GNSS experiment) 分析中心陆续提供北斗卫星精密轨道及钟差产品, 而不同分析中心的解算策略不同导致了产品之间存在差异。为促进北斗系统的应用发展及下一代 MGEX 产品的优化, 通过两两对比的方式, 对德国地学研究中心 (GFZ)、中国武汉大学 (WHU)、俄罗斯信息分析中心 (IAC)、中国科学院上海天文台 (SHAO) 4 个分析中心的 4 种事后精密产品 (gbm、wum、iac、sha) 及法国空间研究中心 (CNES) 的实时精密产品 (cnt) 进行卫星轨道和钟差一致性评估, 并分析其静态、仿动态 PPP (precise point positioning) 性能。结果显示, 4 种事后精密产品的钟差差异的 STD (standard deviation) 值在 0.164 1 ~ 0.314 5 ns 之间, 同时其 MEO (medium earth orbit) 与 IGS0 (inclined geosynchronous satellite orbit) 卫星轨道差异的 3D RMS (root mean square) 值分别处于 3.81 ~ 10.14 cm、9.72 ~ 19.19 cm 之间; 相比之下, CNES 的实时精密产品在轨道、钟差方面展现出较大差异, 这也凸显了深入研究实时数据处理策略的重要性。尽管产品存在差异, 5 种产品在静态、仿动态 PPP 试验中均展现出可靠的定位性能, 其中 iac 表现最佳, gbm、wum 次之, 而 sha、cnt 稍弱。

关键词: 北斗三号卫星导航系统; 精密单点定位 (PPP); 精密轨道及钟差; 定位性能

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2025-02-0143-14

Quality assessment and PPP performance analysis of BDS-3 precise orbit and clock products

HU Yu-hang^{1,2}, CHENG Fang^{1,3†}, SHEN Peng-li¹,

LI Xiao-wan^{1,2}, SUN WEN-shuo^{1,2}, LU Xiao-chun^{1,3}

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China

收稿日期: 2024-04-25; 接受日期: 2024-05-26; †: chengfang@ntsc.ac.cn

基金项目: 黑土地保护与利用科技创新工程专项 (XDA28040300); 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD22035957); 中国科学院网信专项 (CAS-WX2021SF-0304); 中国科学院“西部之光”人才培养计划 (XAB2021YN19)

Abstract: With the continuous development of the BDS-3 Satellite Navigation System, various multi-GNSS experiment (MGEX) analysis centers have successively offered BDS satellite precise orbit and clock products. However, the different resolution strategies adopted by different analysis centers lead to certain discrepancies among these products. To promote the application development of the BDS and the optimization of the next generation of MGEX products, through pair-to-pair comparison, the satellite orbit and clock difference consistency assessment of four kinds of post-event precision products (gbm, wum, iac, sha) and CNES real-time precise products (cnt) from the four analysis centers of GFZ, WHU, IAC, and SHAO are carried out. The static and para-dynamic PPP performance is analyzed. The results indicate that the standard deviation (STD) values for clock difference among the four post-processed precise products range from 0.164 1 ns to 0.314 5 ns. At the same time, the 3D RMS values of the orbit differences for MEO and IGSO satellites are between 3.81~10.14 cm and 9.72~19.19 cm, respectively. In comparison, the cnt product shows larger discrepancies in terms of orbit and clock, which highlights the importance of in-depth research on real-time data processing strategies. Despite these differences, all five products demonstrate reliable positioning performance in static and kinematic PPP tests, with iac showing the best performance, followed by gbm and wum, while sha and cnt are slightly weaker.

Key words: BDS-3; precise point positioning (PPP); precise orbit and clock; positioning performance

北斗三号卫星导航系统作为中国自主发展的全球卫星导航系统,自 2020 年 7 月 31 日起向全球用户提供全天候、高精度、高可靠性的定位、导航和授时服务。该系统采用混合星座模式,包括 24 颗中圆地球轨道卫星 (medium earth orbit, MEO)、3 颗倾斜地球同步轨道卫星 (inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO) 和 3 颗地球同步轨道卫星 (geosynchronous orbit, GEO),共计 30 颗卫星^[1]。北斗三号在保留 B1I 和 B3I 频点的基础上,新增 B1C、B2a 和 B2b 3 个新频点,通过多频信号的组合进一步提高服务精度。精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 已成为绝对定位发展的主流^[2],在高精度测量、海洋测绘、形变监测、低轨卫星定轨等领域取得了广泛应用^[3]。在 PPP 过程中,精密轨道和精密钟差产品至关重要,直接决定其服务性能。

自 2012 年起,国际全球导航卫星系统服务 (International GNSS Service, IGS) 启动了多系统 GNSS (Global Navigation Satellite System) 实验项目 (multi-GNSS experiment, MGEX)^[4],多家 MGEX 分析中心定期生成多 GNSS 精密钟差和轨道产品^[5]。随着 BDS-3 的不断组网与完善,国内外各大机构纷纷开展了 BDS-3 精密轨道和精密钟差的研究^[6-8],目

前国际公开提供北斗事后精密轨道和精密钟差产品的有德国地学研究中心 (GFZ)、中国武汉大学 (WHU)、俄罗斯信息分析中心 (IAC)、中国科学院上海天文台 (SHAO) 等,提供北斗实时精密轨道和精密钟差产品的有法国空间研究中心 (CNES/CLS) 等,各分析中心采用的数据处理方法和策略的不同,导致其精密轨道和钟差产品之间存在差异。

近年来,众多学者在精密产品质量评估方面投入大量精力。具体而言,杨徐、李梦梦等^[9-10]学者对 GFZ、WHU 所提供的事后精密轨道和钟差产品进行深入分析,Kazmierski、Hadas、程春等^[11-12]学者在性能评估中引入 CNES 的实时产品,发现 WHU 和 GFZ 所提供事后产品的轨道和钟差一致性较优,相较之下,CNES 的实时产品在轨道、钟差一致性和定位精度上稍显不足。前述学者的研究主要聚焦于 GPS (Global Positioning System) 和 BDS-2,对 BDS-3 的探讨相对有限。针对这一空白,徐欣彤、李成贤、王天润等^[13-15]学者对不同 BDS-3 实时产品在 PPP 定位性能方面的表现进行分析;曹新运等^[16]学者全面地比较了众多分析中心所提供的 BDS-3 精密轨道和钟差产品,评估其整体一致性及 PPP 定位性能,指出 SHAO 所提供产品相比其余事后产

品略显逊色。前述学者的研究为精密产品质量评估提供了丰富的视角和数据支持,但大都基于3 d、一周的短期数据包,未能全面描绘轨道和钟差的中长期特性,同时都存在着对 BDS-3 精密轨道和钟差产品分析不足的局限。

本文旨在拓展和深化前述研究成果,通过时间跨度为3个月的数据,全面评估 GFZ、WUM、IAC、SHAO 提供的 BDS-3 事后精密轨道和钟差产品,及 CNES 提供的 BDS-3 实时精密轨道和钟差产品。从精密轨道产品的一致性、精密钟差产品的一致性、静态精密单点定位性能以及伪动态精密单点定位性能4个维度,全方位评估不同 BDS-3 精密产品对于 PPP 定位性能的影响。其研究结果不仅对推动 BDS-3 的应用发展、促进下一代 MGEX 产品的优化,以及满足 GNSS 终端用户的需求具有重要意义,也为 GNSS 精密产品质量评估提供了新的视角。

1 BDS-3/GNSS 精密单点定位模型与数据处理策略

1.1 BDS-3 无电离层组合精密单点定位模型

GNSS 伪距和载波观测方程可表示为:

$$P_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + I_{r,i}^s + T_r^s + B_{r,i} - B_i^s + M_{p,i} + \varepsilon_p, \quad (1)$$

$$L_{r,i}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) - I_{r,i}^s + T_r^s + b_{r,i} - b_i^s + M_{L,i} + \lambda_i N_{r,i}^s + \varepsilon_L. \quad (2)$$

式(1)和(2)中: i 代表频点; s 和 r 分别表示卫星和接收机标号; P_r^s 、 L_r^s 分别代表伪距和载波相位观测值; ρ_r^s 表示卫星到接收机的几何距离; dt_r 、 dt^s 分别表示接收机和卫星钟差; $I_{r,i}^s$ 代表电离层延迟; T_r^s 代表对流层延迟; $B_{r,i}$ 、 B_i^s 分别代表接收机和卫星端的伪距硬件延迟偏差; $b_{r,i}$ 、 b_i^s 分别表示接收机和卫星端的载波相位硬件延迟偏差; $M_{p,i}$ 、 $M_{L,i}$ 分别表示其余误差改正之和; λ_i 表示频点载波波长; $N_{r,i}^s$ 表示模糊度参数; ε_p 、 ε_L 分别表示伪距和载波相位观测噪声。

在精密单点定位中,无电离层组合模型出现频率最高^[17],具体表达为:

$$P_{r,IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} P_{r,2}^s, \quad (3)$$

$$L_{r,IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{r,1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{r,2}^s. \quad (4)$$

式(3)和(4)中 f_1 和 f_2 分别表示第一频点及第二频点的载波频率。进一步可将式(3)和(4)表达为:

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_{r,IF}^s + B_{r,IF} - B_{IF}^s + M_{p,IF} + \varepsilon_p, \quad (5)$$

$$L_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + T_{r,IF}^s + b_{r,IF} - b_{IF}^s + M_{L,IF} + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + \varepsilon_L. \quad (6)$$

式(6)中: λ_{IF} 代表无电离层组合的波长,具体表达为

$$\lambda_{IF} = \frac{c}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (7)$$

$N_{r,IF}^s$ 表示无电离层组合载波相位的模糊度,具体表示为

$$N_{r,IF}^s = f_1 N_1 - f_2 N_2. \quad (8)$$

式(8)中 N_1 和 N_2 分别表示第一频点及第二频点的载波相位模糊度。同理, $M_{p,IF}$ 、 $M_{L,IF}$ 分别为上述各参数对应的无电离层组合值,其余参数意义不变。

其中,卫星钟差以及卫星端的伪距硬件延迟可以通过精密星历文件改正,接收机端硬件延迟被接收机钟差所吸收,卫星端的相位硬件延迟被模糊度所吸收,对流层干延迟可以通过模型改正,海洋潮汐等误差也可通过模型或文件改正,则最终待估参数仅含接收机位置(x, y, z)、接收机钟差 dt_r 、对流层湿延迟 $T_{r,w}^s$ 、无电离层组合模糊度 $N_{r,IF}^s$,待估参数表达式为

$$X = [x, y, z, dt_r, T_{r,w}^s, N_{r,IF}^s]. \quad (9)$$

1.2 BDS-3 的 PPP 处理方案

本研究中,所有的 PPP 解算均依托于开源软件 GAMP^[18],数据处理方案基于无电离层组合模型,具体的解算策略如表1所示。分别对不同分析中心提供的精密产品进行 PPP 解算,以 IGS 周解 SINEX 文件所提供的测站坐标作为参考值,将其结果与参考值进行比较,通过收敛时间、均方根误差值等指标评价不同精密产品所对应的精密单点定位性能^[19-21]。

表 1 PPP 解算策略

参数	策略
观测值	伪距、载波无电离层组合观测值
采样间隔	30 s
截止高度角	7°
电离层延迟	无电离层组合
对流层延迟	Saastamoinen 模型+随机游走参数估计
	GMF 投影函数
PCO 和 PCV	igs14.atx
天线缠绕	模型改正
潮汐改正	固体潮+海潮+极潮（IERS2010）
测站坐标	静态：常数估计/动态：随机游走
接收机钟差	白噪声估计
相位模糊度	常数估计

2 BDS-3 精密产品的一致性

2.1 MGEX 精密产品介绍

本研究对 GFZ、WHU、IAC、SHAO 的事后精密产品和 CNES/CLS 的实时精密产品共 5 种产品进行质量评估分析，5 个分析中心的精密产品详情见

表 2。研究选取 2022 年 6 月 1 日至 2022 年 8 月 31 日（年积日 DOY 152~243）共计 92 d 的多系统 GNSS 数据，评估 BDS-3 精密轨道、钟差产品的一致性，并分别采用 gbm、wum、iac、sha、cnt 5 种精密产品进行 BDS-3 PPP 静态及仿动态解算，并对解算结果进行分析评估。

表 2 MGEX 分析中心及其精密产品简介

分析中心	产品	卫星系统	BDS-3 最大 PRN	轨道采样率/min	钟差采样率	产品类型	说明
GFZ	gbm	GRCE	C60	5	30 s	事后精密产品	“卫星系统”
WHU	wum	GRCE	C46	15	30 s	事后精密产品	一栏中的 G、
IAC	iac	GRCE	C46	5	30 s	事后精密产品	R、C、E 分别
SHAO	sha	GRCE	C59	5	5 min	事后精密产品	代表 GPS、
CNES/CLS	cnt	GRCE	C46	5	30 s	实时精密产品	GLONASS、
							BDS 和 Galileo
							系统

2.2 精密轨道产品的一致性

GNSS 精密轨道产品是基于地固坐标系给出的卫星坐标，而描述卫星轨道误差通常采用 3 个方向的分量：径向（radial，R）、法向（cross，C）以及切向（along，A）。因此分析卫星轨道产品时需要

对轨道误差进行从地固坐标系到轨道坐标系的转化^[22-23]。为了分析不同分析中心所提供的精密轨道产品一致性，本研究将 GFZ 分析中心精密产品作为参考，其他分析中心所提供的精密轨道产品以 15 min 间隔与参考作差，将误差结果由地固坐标系转化至轨道坐标系，最后对比 5 种精密轨道产品在轨道径向、法向和切向的差异。

将误差结果转化至轨道坐标系的公式如下。

$$e_R = -\frac{X_{\text{sat}}}{|X_{\text{sat}}|}, \quad (10)$$

$$e_C = -\frac{X_{\text{sat}} \times V_{\text{sat}}}{|X_{\text{sat}} \times V_{\text{sat}}|}, \quad (11)$$

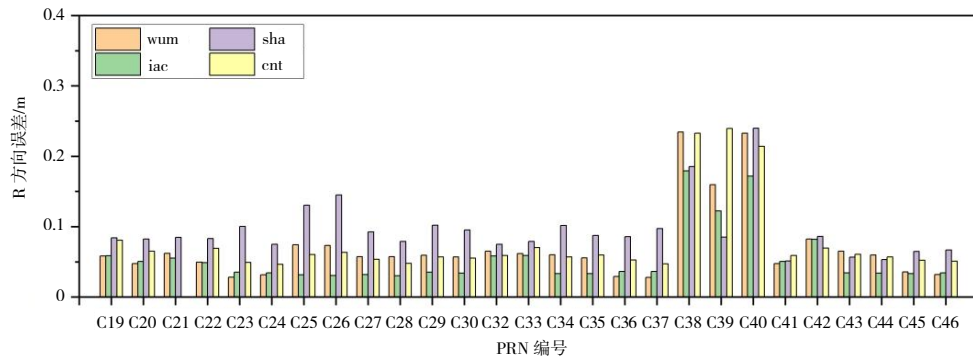
$$e_A = e_C \times e_R, \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta R \\ \Delta A \\ \Delta C \end{bmatrix} = [e_R, e_A, e_C]^T \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix}. \quad (13)$$

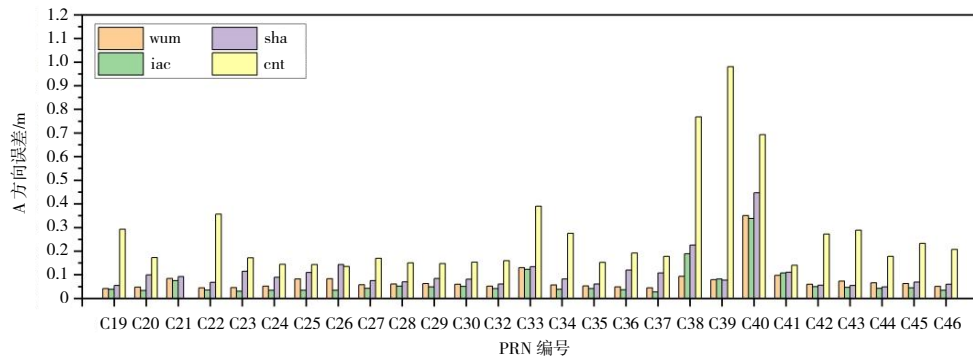
式(10)至(13)中: e_R 、 e_C 、 e_A 分别表示轨道

径向、法向和切向三轴的单位矢量; X_{sat} 是卫星位置矢量; V_{sat} 是卫星速度矢量; ΔR 、 ΔA 、 ΔC 分别表示不同精密轨道产品的轨道径向、切向和法向误差; dx 、 dy 、 dz 分别表示不同精密轨道产品所提供的卫星位置的差值。

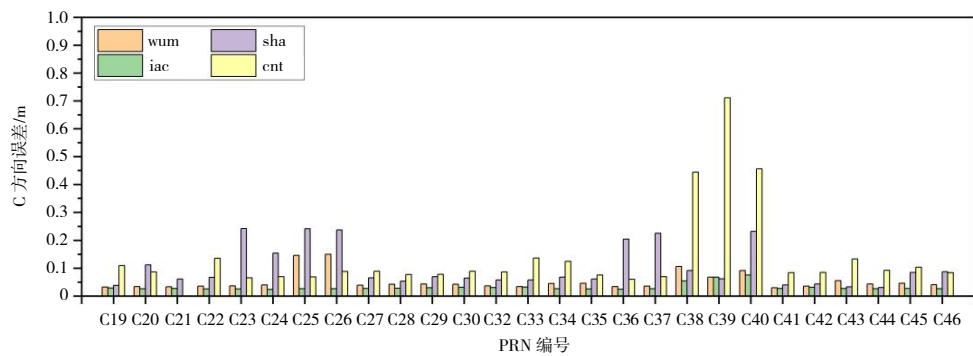
针对 BDS-3 的星座特点,采用单星对轨道精度进行评估。本节中所提到的 gbm、wum、iac、sha 均为其事后精密轨道产品, cnt 为其实时精密轨道产品。将 gbm 的各卫星位置作为参考,其他 4 家分析中心的精密轨道产品与其在轨道径向、切向和法向的一致性如图 1 所示。



(a) R 方向



(b) A 方向



(c) C 方向

图1 各精密产品 BDS-3 卫星轨道 RMS 值(以 gbm 产品为参考)

由图 1 可发现：① 属于 BDS-3 IGSO 卫星的 C38-C40 卫星，其轨道质量略差于 BDS-3 MEO 卫星，可能原因是 MGEX 站对 IGSO 卫星的跟踪能力相对 MEO 卫星略差，因此后续将 BDS-3 的 MEO 卫星和 IGSO 卫星进行单独分析；② cnt 的 IGSO 卫星轨道数据不一致性明显，值得进一步探究其背后原因；③ BDS-3 卫星径向轨道差异最小且一致性较好，切向轨道误差最大，此现象是由于 BDS-3 卫星观测值的径向变化比切向变化更易于地面跟踪站捕获，进而导致卫星轨道径向精度优于切向预报精度。

表 3 汇总了不同产品之间 BDS-3 MEO 卫星轨道差异的三维均方根（root mean square, RMS）统计结果，结果显示：① gbm、wum、iac 的轨道一致性较好，三维 RMS 值为 3.81~5.46 cm，其中 gbm 和 iac 的轨道一致性最优；② sha、cnt 与上述 3 种产品一致性稍差，其中 cnt 的轨道一致性最差，此现象主要是由于 cnt 采用的实时数据处理策略与事后精密产品的处理策略有较大不同^[24]。

表 3 5 种精密产品的 BDS-3 MEO 卫星轨道差异的三维 RMS 值 单位：cm

产品	cnt	sha	iac	wum	gbm
cnt	—	16.2	13.1	14.26	13.85
sha	—	—	9.03	10.14	9.38
iac	—	—	—	5.05	3.81
wum	—	—	—	—	5.46
gbm	—	—	—	—	—

表 4、5 和 6 分别呈现了对 BDS-3 IGSO 卫星轨道差异的三维 RMS 值统计结果，具体而言，表 4 呈现了不同事后精密产品之间的差异，表 5 特别突出了在 DOY 192~202 期间，cnt 与其余事后精密产品之间的轨道差异，而表 6 覆盖了除此之外的其余时间段。由表 4 可知：对于 BDS-3 IGSO 卫星，wum 和 iac 的轨道一致性最佳，为 9.72 cm，其次是 gbm，而 sha 表现相对较差。而根据表 5 和表 6 的数据分

析，在 DOY 192~202 期间，cnt 与其余事后精密产品在 BDS-3 IGSO 卫星轨道误差上显著增大，三维 RMS 值达到 86~95 cm。相比之下，在其他时间段内，cnt 与其余产品在 BDS-3 IGSO 卫星轨道差异的三维 RMS 值维持在 17.16~19.13 cm 之间。这一趋势表明，尽管 cnt 实时产品通常表现优异，但在处理力学模型精度相对较低的 IGSO 卫星，仍会出现误差增大的情况，这强调了深入分析实时数据处理策略及误差建模的重要性。

表 4 4 种事后精密产品的 BDS-3 IGSO 卫星轨道差异的三维 RMS 值 单位：cm

产品	sha	iac	wum	gbm
sha	—	14.83	12.88	17.59
iac	—	—	9.72	15.03
wum	—	—	—	15.71
gbm	—	—	—	—

表 5 cnt 与其余精密产品的 BDS-3 IGSO 卫星轨道差异的三维 RMS 值（DOY 192~202） 单位：cm

产品	sha	iac	wum	gbm
cnt	94.72	88.39	90.08	88.58

表 6 cnt 与其余精密产品的 BDS-3 IGSO 卫星轨道差异的三维 RMS 值（除 DOY 192~202） 单位：cm

产品	sha	iac	wum	gbm
cnt	19.13	17.16	17.94	18.52

2.3 精密钟差产品的一致性

为更客观地评价不同分析中心所提供的精密钟差产品的一致性，本研究采用二次差法消除不同分析中心的钟差基准^[19-20]。首先将不同分析中心精密钟差产品提供的卫星钟差与 GFZ 分析中心精密钟差产品的卫星钟差以 5 min 为间隔作一次差，在此基础上随机选取 C19 卫星作为基准卫星进行二

次差计算，以消除基准钟所引起的系统性偏差。

BDS-3 钟差产品的一致性评估与轨道一致性的评估相同，分别对单星进行评估，本节中所提到的 gbm、wum、iac、sha 均为其事后精密钟差产品，

cnt 为其实时精密钟差产品。图 2 展示了不同分析中心的 BDS-3 精密钟差产品与 gbm 差异的标准差（standard deviation，STD），表 7 给出了不同精密产品之间 BDS-3 卫星钟差差异的平均 STD 值。

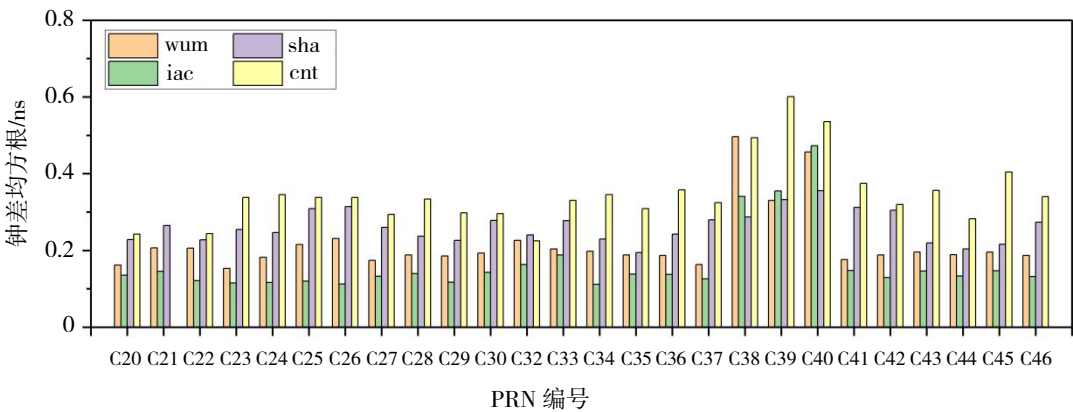


图 2 各精密产品 BDS-3 卫星钟差 STD 值（以 gbm 产品为参考）

表 7 5 种精密产品的 BDS-3 卫星钟差差异的平均 STD 值 单位：ns

产品	cnt	sha	iac	wum	gbm
cnt	—	0.434 5	0.390 1	0.395 1	0.346 5
sha	—	—	0.298 2	0.314 5	0.252 1
iac	—	—	—	0.201 6	0.164 1
wum	—	—	—	—	0.209 1
gbm	—	—	—	—	—

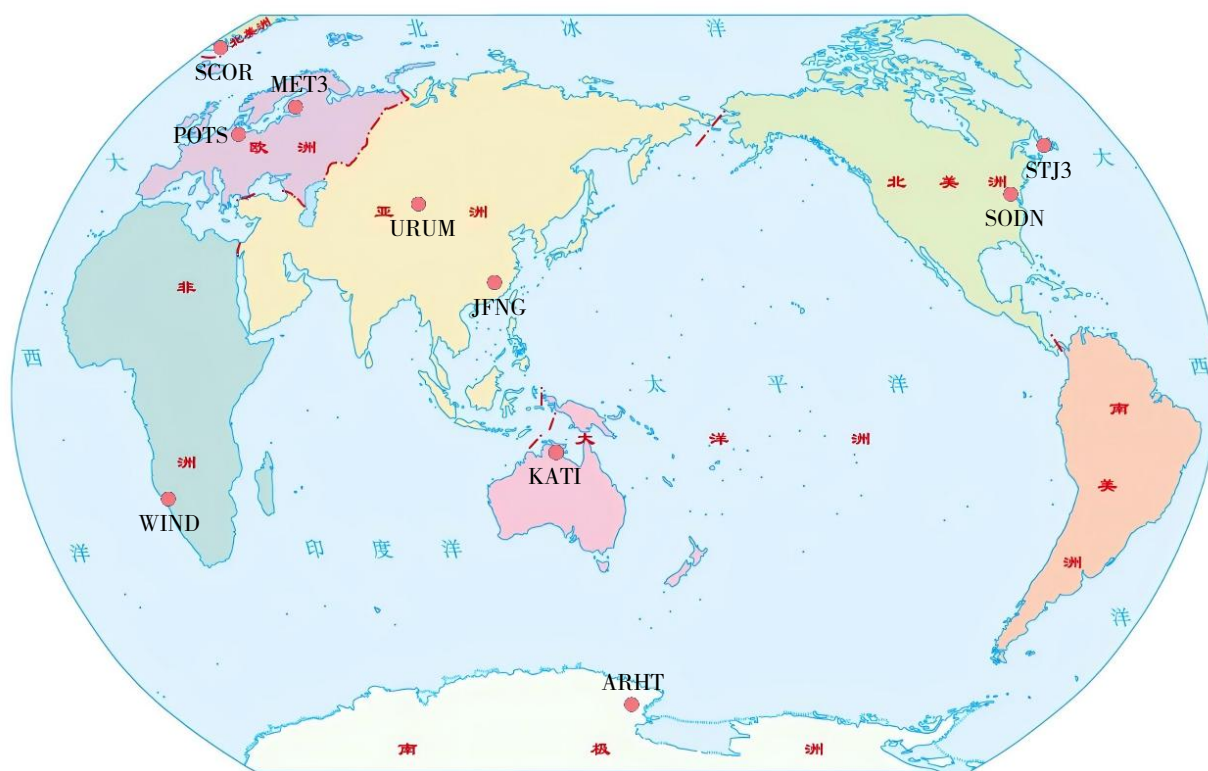
从图 2、表 7 可以得到 3 个结论：① 5 家分析中心所提供的精密钟差产品，BDS-3 IGSO 卫星的钟差精度相对于 MEO 卫星略有不足，此结论与轨道一致性的结果具有相似性；② 以 gbm 的卫星钟差作为参考，iac 与其钟差差异的 STD 值最小，展现出较高的一致性，其次是 wum，随后是 sha，而 cnt 一致性最差；③ gbm、wum、iac 和 sha 的钟差一致性较优，钟差差异的 STD 值处于 0.164 1~0.314 5 ns，其中 gbm 和 iac 的钟差一致性最佳，为 0.164 1 ns；④ cnt 与上述事后精密钟差产品的钟差差异的 STD 值处于 0.346 5~0.434 5 ns 之间，相对较大，其原因可能是受质量控制算法以及具体的数据解算

策略影响^[25]。

3 精密单点定位性能

3.1 试验数据概况

为全面评估 BDS-3 使用不同分析中心精密产品的定位性能，随机选取 10 个 MGEX 测站 2022 年 DOY 152 ~ 243 共计 92 d 的观测数据进行静态与仿动态 PPP 解算，所选测站均可接收 BDS-3 卫星信号，观测文件采样间隔为 30 s，测站分布如图 3 所示。同时，为了进一步验证 BDS-3 的定位性能，对 GPS 进行 PPP 解算，比较两系统的收敛时间和定位精度。



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的
审图号为 GS(2016)1566 号的标准地图制作，底图无修改

图 3 所选 10 个 MGEX 测站地理分布

3.2 静态精密单点定位解算分析

本研究对 10 个 MGEX 测站 2022 年 92 d (DOY 152~243) 的观测数据分别应用不同的精密产品进行单天静态 PPP 解算, 并进行深入分析, 本节中所提到的 gbm、wum、iac、sha 均代指其参与静态 PPP 解算的事后精密轨道及钟差产品, cnt 代指其参与静态 PPP 解算的实时精密轨道及钟差产品。在统计收敛时间时, 定义连续 20 个历元 E、N、U 方向定位误差均小于 0.1 m 作为收敛条件。

为了量化 BDS-3 使用不同精密产品的静态 PPP 定位性能, 对其静态 PPP 解算结果的收敛时间以及定位精度进行统计。图 4 展示了 5 种精密产品收敛时间的箱线图, 在本文的箱线图中, 中心横线标记代表中位数, 方框标记代表均值, 箱体的底部和顶部边缘分别代表下四分位数 (25%) 和上四分位数 (75%)。由图 4 可知, gbm、wum、iac、sha、cnt 收敛时间的中位数分别为 23.5、35、20.5、26.5 和 28.5 min, 下四分位数和上四分位数分别为 16、21、

14、17 和 17.5 min, 38、47.5、34、40 和 48.5 min。其中 gbm、iac 收敛时间的中位数、下四分位数和上四分位数均优于其余产品, 展现出集中的数据分布和最佳的 BDS-3 静态 PPP 收敛时间表现, 且 iac 的表现略好于 gbm。

此外, 5 种产品进行 BDS-3 静态 PPP 解算后各方向定位精度的 RMS 值统计结果如图 5 所示。分析图 5 可以得到 3 个结论: ① 多数时刻各测站的定位精度在 E 方向可达到 0.9~3.03 cm, 在 N 方向上可达到 0.61~2 cm, 在 U 方向上可达到 1.72~4.65 cm, 总体而言 N 方向的定位精度最好, 这是由于在南北方向上能观测到的 BDS-3 卫星数量更多, 因此定位结果更加稳定, 而 U 方向定位精度最差; ② gbm、wum、iac 定位精度的中位数在 E 方向上为 1.39、1.26 和 1.17 cm, 在 N 方向上为 0.9965、0.947 和 0.794 cm, 在 U 方向上为 2.559、2.303 和 2.477 cm, 各方向均优于 sha、cnt。相对来说, iac 在 E、N 方向的平面精度相对最优, wum 在 U 方向

的高程精度最优, 3 种产品在各方向定位精度的差异均为 mm 级; ③ sha、cnt 的定位精度相比其余产品略显不足, 其中 cnt 相对更差, 此现象的可能解释是 sha 在轨道、钟差精度上与其事后精密产

品展现出相对更差的一致性, 而 cnt 作为实时精密产品在 PPP 上的表现仍有增长空间, 但两种产品的定位精度仍可达到 cm 至 mm 级, 表明 5 种产品均有可靠的定位性能。

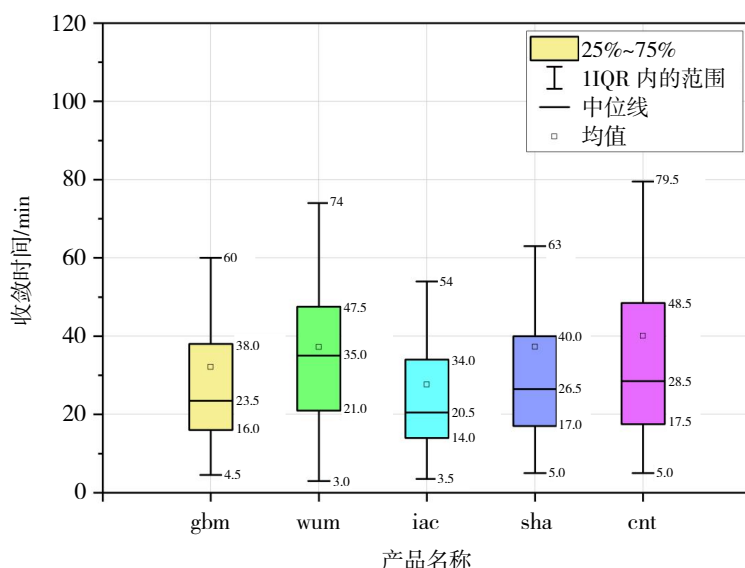
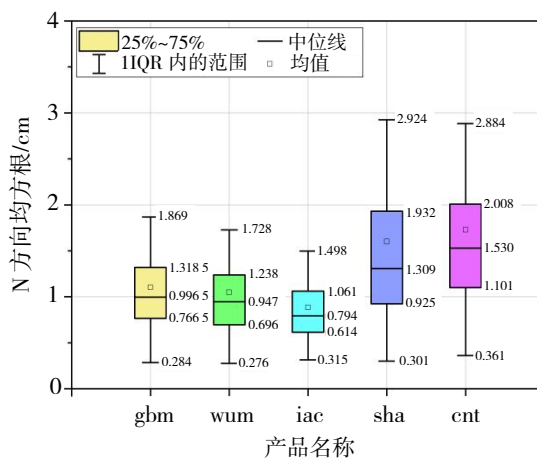
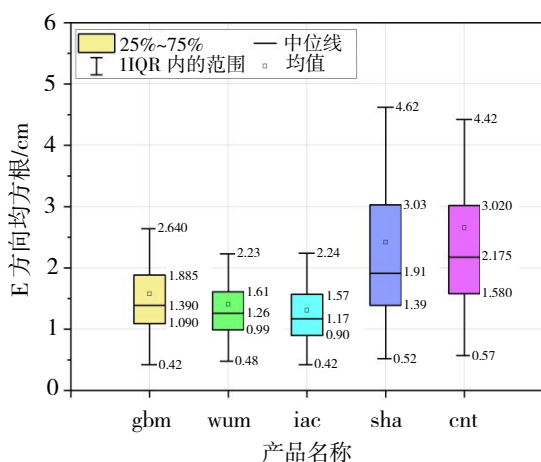


图4 BDS-3 使用不同精密产品静态 PPP 解算的收敛时间箱线图 (DOY 152~243)

为了深入评估 BDS-3 的定位性能, 选取相同测站相同时间的 GPS 静态 PPP 解算进行对比。图 6 为部分测站采用 gbm 得到 2022 年 6 月 (DOY 152~182) BDS-3 以及 GPS 静态 PPP 解算的收敛时间对比, 可知尽管 BDS-3 在某些时刻的收敛时间短于 GPS, 但整体上与 GPS 存在微弱差距。表 8 对比了 BDS-3 和 GPS 使用不同精密产品的各方向定

位精度 RMS 值, 可知: ① 尽管 BDS-3 表现优异, 但其静态 PPP 在 E、N 方向的平面精度和 U 方向的高程精度均稍弱于 GPS; ② 如果剔除定位精度稍低的 sha、cnt, BDS-3 静态 PPP 平面精度优于 2 cm, 高程精度优于 3 cm; 而 GPS 平面精度优于 1.5 cm, 高程精度优于 2 cm。两个系统都具备卓越的定位性能, 平面及高程精度的差异均小于 1 cm。



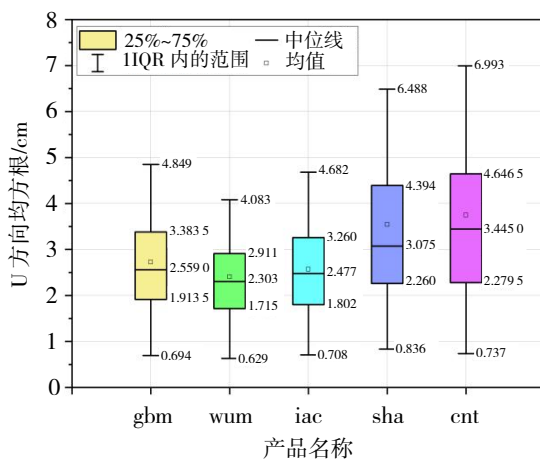


图 5 BDS-3 使用不同精密产品静态 PPP 解算的各方向定位精度箱线图 (DOY 152~243)

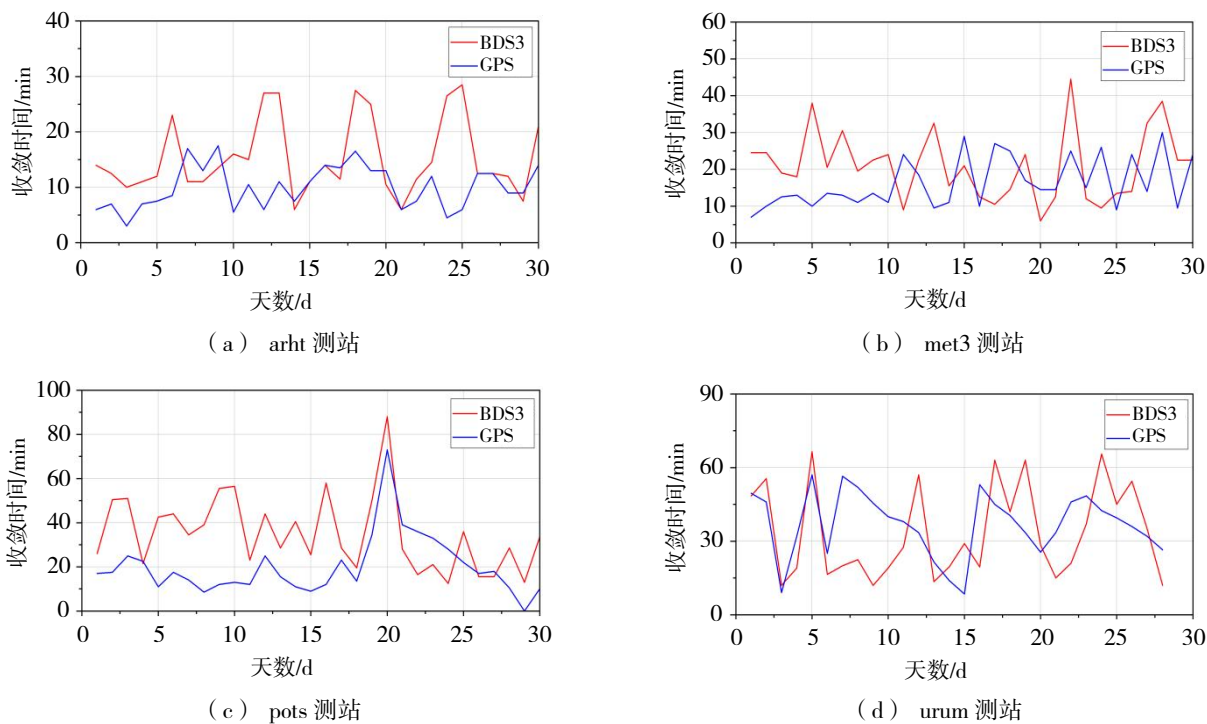


图 6 基于 gbm 产品的 BDS-3、GPS 部分测站静态 PPP 收敛时间对比 (DOY 152~182)

表 8 5 种精密产品静态 PPP 定位误差 RMS (DOY152~243)

单位: cm

系统	E 方向					N 方向					U 方向				
	gbm	wum	iac	sha	cnt	gbm	wum	iac	sha	cnt	gbm	wum	iac	sha	cnt
BDS-3	1.73	1.57	1.44	2.88	2.93	1.21	1.17	0.97	1.78	1.85	2.92	2.59	2.75	3.86	3.92
GPS	1.12	1.21	1.03	1.58	1.34	0.98	0.96	0.93	1.44	1.23	1.88	1.83	1.78	2.31	2.23

3.3 仿动态精密单点定位解算分析

采用与静态精密单点定位解算中相同的方法, 分析 10 个 MGEX 测站 92 d (DOY 152~243) 的仿

动态 PPP 解算结果, 本节中所提到的 gbm、wum、iac、sha 均代指其参与仿动态 PPP 解算的事后精密轨道及钟差产品, cnt 代指其参与仿动态 PPP 解算

的实时精密轨道及钟差产品。

图7是5种精密产品在BDS-3仿动态PPP解算下的收敛时间箱线图,其中,gbm、iac的收敛时间中位数分别为37、39 min,表现最优;wum、sha、cnt收敛时间的中位数分别为55.5、39.75、52 min,进一步结合上四分位数及下四分位数进行分析,可发现wum在收敛时间上与sha、cnt处于同一梯队,但从箱体长度可知,其收敛时间在稳定性上优于后两者。此外,sha在BDS-3两种定位模式下的收敛性能都略优于cnt。

图8统计了5种精密产品进行BDS-3仿动态PPP解算后各方向定位精度的RMS值,可得到以

下结论:① N方向的定位精度最好,多数时刻可达到1.65~5.93 cm,其次是E方向,为1.73~7.62 cm,最差是U方向,为4.25~13.59 cm;② gbm、wum、iac、sha、cnt定位精度的中位数在E方向为3.68、3.15、2.99、4.4、4.99 cm,在N方向为3.411 5、2.939、2.467 5、4.212、3.974 5 cm,在U方向为8.557、6.164、6.115 5、9.371、10.149 cm,可知gbm、wum、iac在各方向的定位精度均明显优于sha、cnt;③ 由定位精度的中位数结合其下四分位数和上四分位数进行分析,iac在BDS-3仿动态PPP定位精度方面表现最好,其次是wum,然后是gbm,sha稍逊,cnt相对最差。

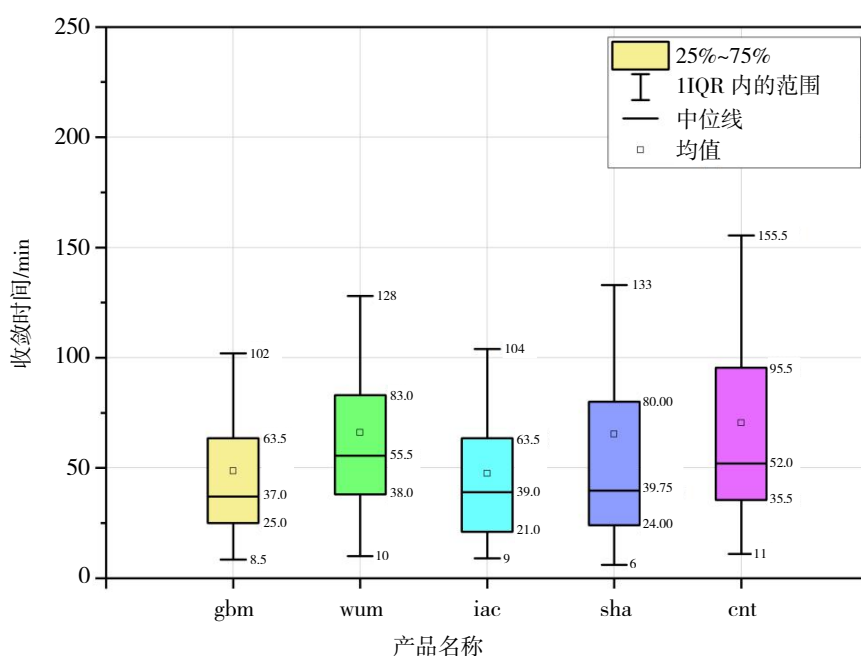
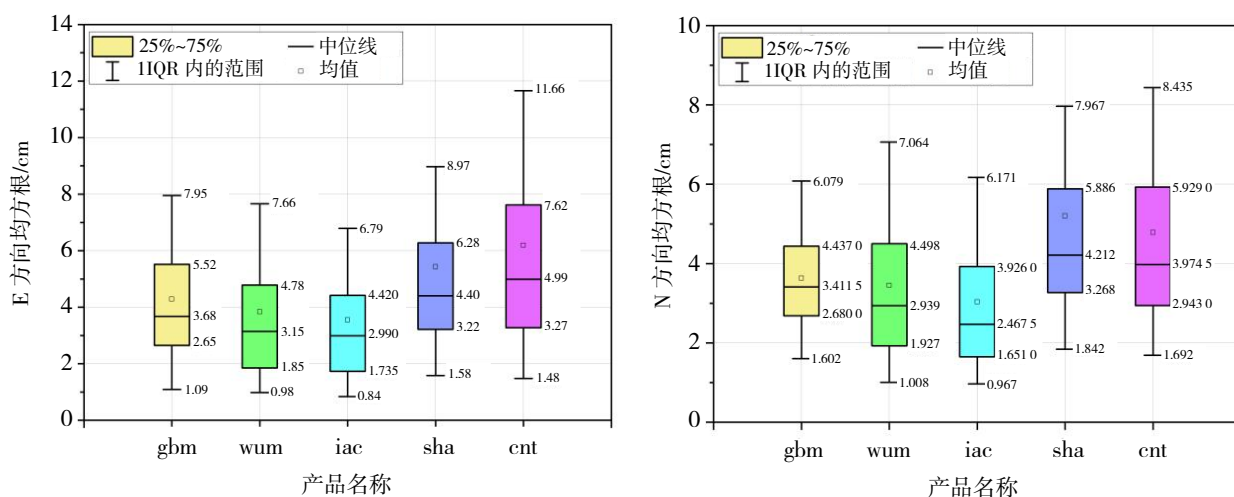


图7 BDS-3 使用不同精密产品仿动态 PPP 解算的收敛时间箱线图 (DOY 152~243)



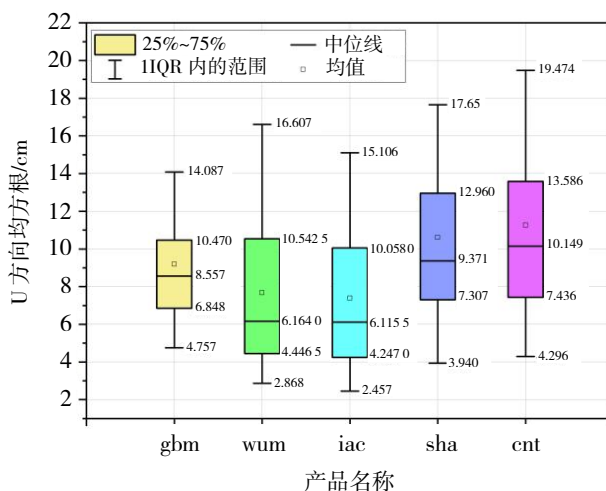
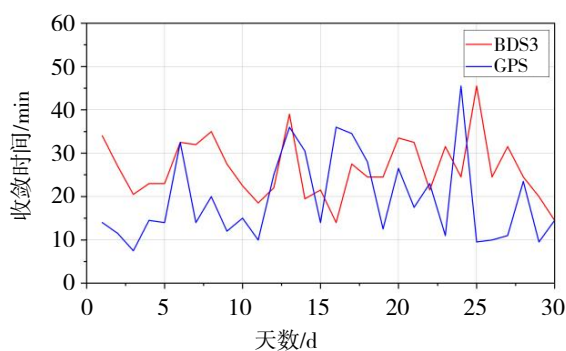


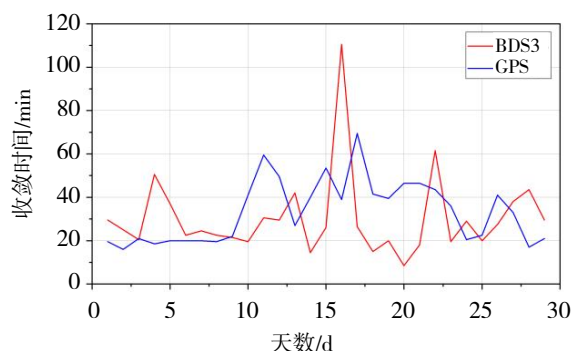
图 8 BDS-3 使用不同精密产品伪动态 PPP 解算的各方向定位精度箱线图 (DOY 152~243)

通过相同测站相同时间的 GPS 伪动态 PPP 解算结果进一步评估 BDS-3 的定位性能,图 9 展示了 2022 年 6 月 (DOY 152~182) 部分测站采用 gbm 进行 BDS-3 及 GPS 伪动态 PPP 解算的收敛时间对比,表 9 统计了使用不同精密产品进行 BDS-3 及 GPS 伪动态 PPP 解算后的各方向定位精度的 RMS 值。分析图 9、表 9,可得到以下结论:① BDS-3 伪动

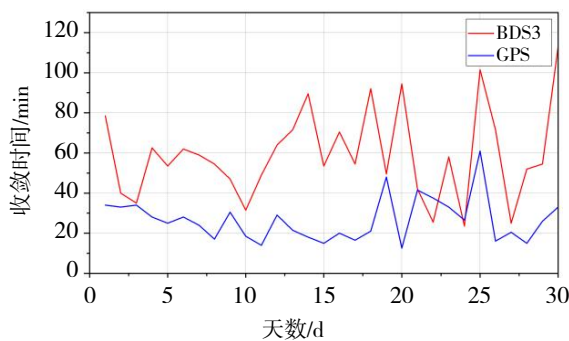
态 PPP 的收敛性能稍弱于 GPS,但差距并不显著;② BDS-3 伪动态 PPP 解算的平面精度可达 cm 级,高程精度可达 dm 至 cm 级,定位性能优异,但相比 GPS 仍有轻微差距,若排除定位精度较差的 sha、cnt, BDS-3 伪动态 PPP 在平面精度上优于 6 cm,高程精度优于 9.5 cm,均可达到 cm 级。



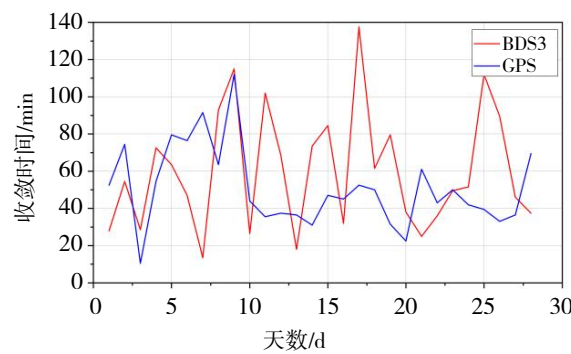
(a) arht 测站



(b) met3 测站



(c) pots 测站



(d) urum 测站

图 9 基于 gbm 产品的 BDS-3、GPS 部分测站伪动态 PPP 收敛时间对比 (DOY 152~182)

表 9 5 种精密产品仿动态 PPP 定位误差 RMS (DOY 152~243)

单位：cm

系统	E 方向					N 方向					U 方向				
	gbm	wum	iac	sha	cnt	gbm	wum	iac	sha	cnt	gbm	wum	iac	sha	cnt
BDS-3	4.71	4.35	4.16	6.04	7.53	3.84	4.06	3.52	5.65	5.65	9.24	8.59	8.28	11.42	12.18
GPS	2.86	2.91	4.01	5.66	3.66	2.23	2.14	2.91	5.56	2.66	4.66	4.32	7.51	10.95	5.44

4 结论

本文首先对 5 个 MGEX 分析中心 2022 年 DOY 152~243 的 BDS-3 精密轨道和钟差产品进行一致性评估，然后基于随机选取的 MGEX 测站综合评估了 5 种精密产品的静态以及仿动态 PPP 定位性能，得到以下结论。

① 在 BDS-3 精密轨道产品中，gbm、wum、iac 在轨道一致性上表现出色，其 MEO 卫星轨道差异的三维 RMS 值为 3.81~5.05 cm，IGSO 则为 9.72~15.71 cm，而 sha 的表现稍逊一筹；cnt 作为实时精密产品与其他事后精密产品相比，轨道差异更大，但其 MEO 卫星轨道精度相比前述学者的分析结果有所提升，不过 IGSO 卫星遭遇误差增大的情况也凸显了继续对实时数据处理策略深入研究的重要性。

② 在 BDS-3 精密钟差产品中，4 种事后精密产品的钟差一致性较优，钟差差异的 STD 值处于 0.164 1~0.314 5 ns，其中 gbm 和 iac 的钟差一致性最好；cnt 实时精密产品的钟差一致性相对较差，这可能受限于钟差估计模型的精度。

③ 在 BDS-3 静态 PPP 解算中，收敛性能方面：iac 表现最好，其次是 gbm，wum、sha、cnt 稍弱；定位精度方面：iac 表现最优，wum、gbm 次之，sha 稍弱、cnt 最差，但 5 种产品均具有优异的定位性能；排除定位精度稍弱的 sha、cnt，BDS-3 静态 PPP 的平面精度优于 2 cm，高程精度优于 3 cm，定位性能卓越，但与 GPS 存在微弱差距。

④ 在 BDS-3 仿动态 PPP 解算中，收敛性能方面：gbm 表现最佳，收敛时间的中位数为 37 min，其次是 iac，为 39 min，wum、sha、cnt 稍弱；定位精度方面：5 种产品在 U 方向定位精度的 RMS 处于 8.28~12.18 cm，在 E、N 方向处于 3.52~7.53 cm，

均达到 dm 至 cm 级定位，其中 iac 最优，wum 次之，之后是 gbm，sha 稍逊，cnt 最差；如果排除定位性能稍弱的 sha、cnt，BDS-3 仿动态 PPP 的平面精度优于 6 cm，高程精度优于 9.5 cm。

参考文献：

[1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0 版)[R]. 北京: 中国卫星导航系统管理办公室, 2019.

[2] 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.

[3] 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.

[4] DOW M J, NEILAN E R, RIZOS C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(7): 689-689.

[5] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, PRANGE L, et al. The multi-GNSS experiment(MGEX) of the international GNSS service (IGS)-achievements, prospects and challenges[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(7): 1671-1697.

[6] ZHANG X H, WU M K, LIU W K, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-3: new-generation navigation signals[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(10): 1225-1240.

[7] YANG Y F, YANG Y X, HU X G, et al. Inter satellite link enhanced orbit determination for BeiDou-3[J]. Journal of navigation, 2020, 73(1): 115-130.

[8] YAN X Y, HUANG G W, ZHANG Q, et al. Early analysis of precise orbit and clock offset determination for the satellites of the Gglobal BeiDou-3 system[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(3): 1270-1279.

- [9] 杨徐, 徐爱功, 祝会忠, 等. 北斗卫星精密轨道与钟差精度分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(12): 7-13.
- [10] 李梦梦, 李玮, 朱松. 北斗卫星精密产品的评估分析[J]. 测绘科学, 2022, 47(2): 47-54.
- [11] KAZMIERSKI K, SOSNICA K, HADAS T. Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1):1-12.
- [12] 程春, 赵玉新, 李亮, 等. 北斗卫星实时和事后精密星历产品的性能评估[C] // 第九届中国卫星导航学术年会论文集——S04 卫星轨道与钟差, 哈尔滨: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2018.
- [13] 徐欣彤, 杨志鑫, 张林杰, 等. BDS-3 实时精密产品质量评估及其 PPP 性能分析[J]. 测绘通报, 2021(3): 18-22+74.
- [14] 王尚祺, 黄张裕, 孙瑞, 等. 不同 IGS 产品精密单点定位性能分析[J]. 测绘工程, 2022, 31(6): 60-67
- [15] 李成贤, 吕豆豆, 胡秀峰. 基于不同精密产品 BDS-3 PPP 解算性能分析[J]. 工程勘察, 2023, 51(10): 61-66.
- [16] 曹新运, 沈飞, 李建成, 等. BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 92-100.
- [17] 李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(7): 734-740.
- [18] 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 Solutions, 2018, 22(2): 1-10.
- [19] YU C, ZHANG Y, CHEN J, et al. Performance assessment of multi-GNSS real-time products from various analysis centers[J]. Remote Sensing, 2023, 15(1): 140.
- [20] SHEN P L, CHENG F, LU X C, et al. An investigation of precise orbit and clock products for BDS-3 from different analysis centers[J]. Sensors, 2021, 21(5): 1596-1610.
- [21] 张小红, 左翔, 李盼, 等. BDS/GPS 精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 250-256.
- [22] 敦力民, 王天文, 祝会忠. BDS 精密产品精度分析[J]. 城市勘测, 2021(4): 68-73.
- [23] 刘东亮, 成芳, 沈朋礼, 等. 北斗三号全球卫星导航系统空间信号精度评估[J]. 全球定位系统, 2022, 47(2): 114-125.
- [24] DENG Z G, SCHUH H. Improvement of multi-GNSS orbit and clock prediction at GFZ[J]. Geophysical Research Abstracts, 2018(20): 898.
- [25] LAURICHESSE D, CERRI L, BERTHIAS J P, et al. Real time precise GPS constellation and clocks estimation by means of a Kalman filter[C] // Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Nashville: ION GNSS, 2013: 1155-1163.