



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: GPS/BDS 实时 SSR 产品质量评估及其 PPP 性能分析
作者: 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 田云青, 雷体俊, 穆雪枫, 王利
DOI: 10.13203/j.whugis20220760
收稿日期: 2023-04-05
网络首发日期: 2023-06-16
引用格式: 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 田云青, 雷体俊, 穆雪枫, 王利. GPS/BDS 实时 SSR 产品质量评估及其 PPP 性能分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220760>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220760

引用格式：

苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 等. GPS/BDS实时SSR产品质量评估及其PPP性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220760 (SU Chunyang, SHU Bao, ZHENG Lei, et al. Quality evaluation and PPP performance analysis of GPS/BDS real-time SSR products[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220760)

GPS/BDS 实时 SSR 产品质量评估及其 PPP 性能分析

苏春阳¹ 舒宝¹ 郑蕾⁴ 田云青¹ 雷体俊¹ 穆雪枫¹ 王利^{1,2,3}

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安, 710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西, 西安, 710054

4 西安应用光学研究所, 陕西, 西安, 710065

摘要：近年来随着多系统GNSS的迅速发展以及实时高精度应用需求的日益增长，国际GNSS服务分析中心（International GNSS Service, IGS）提供的状态空间表述（State Space Representation, SSR）产品越来越丰富。评估不同分析中心的GNSS实时产品及其定位性能对用户具有重要参考价值。本文对CAS（Chinese Academy of Sciences）、CNE（Centre National d’Etudes Spatiales）、DLR（Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt）、GMV（GMV Aerospace and Defense）、GFZ（Deutsches GeoForschungsZentrum）、WHU（Wuhan University）6家分析中心的GPS/BDS SSR产品的可用性、精度和实时精密单点定位性能进行了评估。实验结果表明：CAS播发的GPS卫星可用性最高，提供了所有的32颗GPS卫星的SSR改正数；CAS、GFZ、WHU三家分析中心的BDS卫星可用性相对较高，提供了15（BDS-2）+27（BDS-3）卫星的SSR改正数。在6家分析中心中，WHU的GPS卫星的三维轨道精度（3DRMS为3.3 cm）和钟差精度（STD为0.05 ns）均为最佳；不同分析中心GPS卫星的信号空间测距误差（Signal-In-Space Ranging Errors, SISRE）普遍优于5 cm，不同分析中心GPS卫星的SISRE值的大小顺序为：WHU < GMV < CNE < DLR < GFZ < CAS；BDS卫星轨道钟差精度相对较差，表现最优的WHU分析中心的BDS-2和BDS-3的MEO卫星精密产品的SISRE值分别为8.83和5.91 cm。在单GPS动态PPP模式下，DLR的收敛速度最慢（38.9 min），GFZ收敛速度最快（26.7 min）；加入BDS卫星以后，定位精度无显著差异，但能够有效提升收敛速度（6%~25%）。
关键词：精密单点定位；实时轨道钟差；状态空间表述；分析中心；北斗三号

中图分类号：P228

文献标识码：A

Quality evaluation and PPP performance analysis of GPS/BDS real-time SSR products

SU Chunyang¹ SHU Bao¹ ZHENG Lei⁴ TIAN Yunqing¹ LEI Tijun¹ MU Xuefeng¹ WANG Li^{1,2,3}

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang’an University, Xi’an 710054, PR China

2 State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi’an 710054, PR China

3 Key Laboratory of Western China’s Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi’an 710054, PR China

收稿日期：2023-04-05

项目资助：国家自然科学基金（42004024, 41877289, 42174006, 42127802）；国家重点研发计划（2021YFC3000501, 2021YFC3000503）；中国博士后科学基金（2020M673321）；长安大学研究生科研创新实践项目（300103723044）。

第一作者：苏春阳，硕士，主要从事实时精密单点快速收敛技术研究。sucyuh@foxmail.com

通讯作者：舒宝，博士，副教授。主要从事GNSS高精度定位算法和应用研究。baos613@163.com

Abstract: Objectives: In recent years, with the rapid development of multi-system GNSS and the growing demand for real-time and high-precision applications, the State Space Representation (SSR) products provided by International GNSS Service (IGS) are more and more abundant. Evaluating GNSS real-time precise products and their positioning performance in different analysis centers is of important reference value for users. This paper aims to evaluate the availability and accuracy of real-time SSR products and their impact on real-time precise point positioning (RT-PPP) from six commonly-used ACs. **Methods:** After evaluating the epoch availability and satellite availability of SSR corrections and the accuracy of GPS/BDS precise orbit clock products, simulated kinematic GPS and GPS/BDS PPP positioning experiments were carried out to explore the relationship between SSR product accuracy and three-dimensional (3D) position accuracy. **Results:** CAS has the highest availability of GPS satellites, providing SSR corrections for all 32 GPS satellites; CAS, GFZ and WHU had the highest availability of BDS satellites, all of which provided SSR corrections for all 15+27 BDS satellites (excluding BDS-3 GEO). Among the SSR products of the six ACs, WHU's GPS satellite has the best 3D orbit accuracy (3D RMS was 3.3cm) and clock difference accuracy (STD was 0.05ns). The Signal-In-Space Ranging Errors (SISRE) of GPS satellites are generally better than 5cm in these six ACs. The SISREs of GPS satellites from six ACs are in the following order: WHU < GMV < CNE < DLR < GFZ < CAS. Compared with GPS, BDS orbit and clock accuracy is relatively poor, the SISRE values of MEO satellite precise products of BDS-2 and BDS-3 in WHU analysis center with the best performance were 8.83 cm and 5.91 cm, respectively. In GPS-only kinematic PPP mode, DLR has the slowest convergence speed (38.9 min), while GFZ has the fastest convergence speed (26.7 min). After adding BDS satellite, there is no significant difference in positioning accuracy, but it can effectively improve the convergence speed (6%-25%). **Conclusions:** Therefore, it can be concluded that SISRE can reflect the 3D position accuracy of GPS-only kinematic PPP. The addition of BDS satellite can significantly improve the convergence speed.

Key words: precise point positioning; real-time orbits and clocks; State Space Representation; analysis center; BDS-3 system

精密单点定位(PPP)是全球卫星导航系统(GNSS)高精度定位应用中的一种流行且应用广泛的技术,可以实现厘米级动态定位精度^[1],具有无需依赖密集参考站网、作业灵活、无作业范围限制的优点^[2],在智能交通^[3,4]、精密农业^[5]、海洋资源勘探^[6]等诸多领域有着广阔的应用前景。该技术需依赖高精度的轨道钟差产品,由于IGS产品发布滞后时间长,在过去较长一段时间内其主要用于地壳形变监测^[7]、坐标框架维持等大地测量事后应用。早期的PPP技术主要用于单系统GPS,自从2012年12月27日起,北斗卫星导航系统(BDS-2)开始为亚太地区用户提供区域定位、导航和授时服务^[8]。北斗三号系统(BDS-3)已于2020年7月31日全面实施,BDS-3卫星共有30颗,由3颗地球同步轨道卫星(GEO)、3颗倾斜地球同步轨道卫星(IGSO)和24颗中地球轨道卫星(MEO)组成^[9],随着BDS-3组网工作完成,能够跟踪到BDS-3信号的地面测站日益增多,且越来越多的国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)的多系统实验项目(Multi-GNSS Experiment, MGEX)分析中心开始提供基于B1I和B3I双频信号的精密轨道和钟差产品^[10],北斗系统在国际导航定位领域扮演愈发重要的角色。

为了满足广大实时用户的导航定位需求,IGS于2007年6月正式启动了实时计划项目(Real-Time Pilot Project, RTPP),并于2013年4月正式提供实时精密产品^[11],各分析中心实时估计得到卫星轨道误差和卫星钟差,基于NTRIP协议通过Internet播发,注册用户通过IP和端口实时接收广播星历、精密轨道、钟差改正数即可恢复实时轨道和钟差^[12]。服务端提供的是基于状态空间表述(State Space Representation, SSR)的改正数,将GNSS定位误差源进行分离,如卫星轨道、钟差改正、卫星信号偏差等^[13]。对于直接依赖于精密产品的PPP技术而言,这些产品的质量很大程度上决定了PPP定位性能的准确性和可靠性。在最近的研究中,一些学者对使用不同分析中心播发的多系统精密产品的定位导航授时(PNT)性能进行了比较和研究。由于并非所有分析中心均支持多系统SSR产品,Zhang等^[14]评估了9个分析中心的GPS产品,不同SSR产品的GPS SISRE值在1.3~5.5 cm,动态PPP定位实验表明CLK90具

有最佳定位性能（3.2 cm、6.6 cm，8.5 cm）。

2015年11月，法国太空研究中心（Centre National d'Etudes Spatiales, CNE）率先为北斗卫星提供 SSR 改正数，这使 BDS RT-PPP 得以实施^[15]，鉴于此，Wang 等^[16]评估了 CLK93 的 BDS-2 SSR 产品以及其他 7 个分析中心的 SSR 产品，仿动态 PPP 定位结果表明 CLK93 和 CLK51 挂载点的产品优于其余的挂载点，所有分析中心产品的定位精度水平方向上均优于 6 cm，高程方向上均优于 10 cm，GPS/BDS 组合 PPP 的定位精度优于单 GPS。自从北斗三号全面建成以来，CNE 开始提供对 BDS-3 卫星的支持，Shen 等^[17]首次提出了对 BDS-3 精密产品的质量评估，研究了 5 家分析中心的精密产品（gbm, wum, iac, sha, cnt）BDS-3 的对流层延迟恢复及定位性能，轨道比较结果表明：不同分析中心的最终产品中，C19-C37 卫星的轨道一致性（0.09-0.22 m）优于 C38-C46 卫星的轨道一致性（0.5-1.2 m）；iac 钟差的 STD 值与 gbm 的最为一致，其次是 wum、sha。Pan 等^[18]初步评估了 CLK93 的 BDS-2/BDS-3 的全球定位性能，BDS-3/BDS-2 实时 PPP 在 ENU 三个方向上静态模式的定位精度分别为 1.8、1.2 和 2.5 cm，动态模式的定位精度分别为 6.7、5.1 和 10.4 cm，而静态模式 PPP 在三个方向上的收敛时间分别为 32.9、23.7 和 32.8 min，动态模式 PPP 的收敛时间分别为 66.9、42.9 和 69.1 min。近年来随着多系统 GNSS 的迅速发展及实时高精度应用需求的日益增长，国际 GNSS 服务分析中心及其提供的 SSR 产品越来越丰富，截至目前，已有 6 家分析中心 CAS（Chinese Academy of Sciences）、CNE、DLR（Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt）、GMV（GMV Aerospace and Defense）、GFZ（Deutsches GeoForschungsZentrum^[19]）、WHU（Wuhan University^[20]）开始提供多系统 SSR 改正数，评估不同分析中心的多系统实时产品及其定位性能对用户具有重要参考价值。

目前已有较多文献对 GPS、GLONASS 和 GALILEO 的 SSR 产品进行了评估^[14,16]，而对于 BDS SSR 产品质量的分析研究尚不充分，另一方面，由于 GPS 实时轨道和钟差数据流运行稳定且精度较高，且为了直观了解 BDS SSR 产品质量，因此我们拟进行 BDS 与 GPS 的对比试验。基于以上考虑，本文对上述 6 家分析中心的 GPS/BDS SSR 产品的可用性和精度及其对实时 PPP 的影响进行评估。首先介绍了由 SSR 改正数恢复得到精密轨道和钟差的方法以及精密产品质量评估方法。然后采用实测数据评估了 SSR 改正数的可用性与完整率，并通过与事后精密产品对比评估了轨道钟差精度、空间信号测距误差等指标。最后，采用全球 38 个 MGEX 测站数据进行了仿动态 PPP 试验，对比分析了使用不同分析中心产品的单 GPS 以及 GPS/BDS 组合 PPP 的定位性能。

1 实时精密轨道钟差的评估方法

由于精密产品的恢复方法目前较为成熟，文献[21-23]已有详细介绍，在此不再赘述。本文对常用的 6 家 IGS 分析中心的实时 SSR 产品进行评估，各分析中心 SSR 产品信息如表 1 所示。

表 1 SSR 产品信息

Tab. 1 SSR Product Information

挂载点	卫星系统	轨道更新	钟差更新	轨道参考基准	机构
		间隔/s	间隔/s		
SSRC00CAS0	GPS+GLO+GAL+BDS	5	5	CoM	CAS
SSRC00CNE0	GPS+GLO+GAL+BDS	5	5	CoM	CNE
SSRC00DLR0	GPS+GLO+GAL+BDS	30	5	CoM	DLR
SSRC00GFZ0	GPS+GLO+GAL+BDS	5	5	CoM	GFZ
SSRC00GMV0	GPS+GLO+GAL+BDS	5	5	CoM	GMV
SSRC00WHU0	GPS+GLO+GAL+BDS	5	5	CoM	WHU

实时数据的接收完整率部分反映了网络传输是否通畅，接收软件是否稳定，完整率太低将导致 PPP 定位的重收敛，是判断数据质量的标准之一。实时数据的接收完整率公式为：

$$w = \frac{n}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中, w 是实时数据的接收完整率; n 是实际接收到的历元数; N 是观测时段的总历元数。

通常采用实时与事后精密产品之间的一致性来评价实时精密产品的质量。本文中, 实时轨道和事后轨道以 5 min 的采样率进行比较, 计算 RAC 方向上轨道差异值的均方根误差(Root Mean Square, RMS)。对于精密钟差的比较, 计算实时钟差与事后钟差差异值的 RMS 和标准差 (Standard Deviation, STD), 其中钟差的 RMS 值一定程度上反映了 PPP 定位的收敛速度, 而钟差的 STD 值反映了 PPP 定位精度。实时钟差和事后钟差以 30 s 的采样率进行比较^[14], 为了避免作为参考基准的那颗卫星的钟差精度信息丢失, 本文采用当前历元的所有指定系统的卫星钟差的平均值作为参考基准以消除系统误差。RMS 和 STD 的计算公式如下:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} \Delta^2}{n}} \quad (2)$$

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (\Delta - ave)^2}{n}} \quad (3)$$

式中, n 是样本个数, Δ 是实时轨道/钟差与事后轨道/钟差的差值, ave 是平均值。

通过计算空间信号测距误差来分析 GPS/BDS 卫星实时精密轨道和时钟产品的精度, 该值表示轨道钟差误差对距离测量的贡献^[24-26]。在 SISRE 计算公式中, 由于径向轨道分量与卫星时钟直接相关, 而且轨道误差的主要来源是径向分量的误差, 因此将径向轨道分量与卫星钟差结合在一起。SISRE 值的计算方法表示为:

$$SISRE = \sqrt{[RMS(\omega_R \cdot \Delta r_R - c \cdot \Delta dt)]^2 + \omega_{A,C}^2 \cdot \{[RMS(\Delta r_A)]^2 + [RMS(\Delta r_C)]^2\}} \quad (4)$$

式中, $RMS(\cdot)$ 表示计算均方根值; ω_R 和 $\omega_{A,C}^2$ 是把径向切向法向上的轨道误差转化到视线方向(line of sight, LOS)的加权因子, 这两个加权因子的值跟导航系统与轨道类型有关; $\Delta r_R, \Delta r_A, \Delta r_C$ 分别是实时轨道和事后轨道在径向切向法向上的轨道差异, $c \cdot \Delta dt$ 和是实时钟差和事后钟差的差值, 不同导航系统和轨道类型的 SISRE 加权因子不同^[27-29], 见表 2。

表 2 将轨道 RAC 方向上的误差转化到视线 LOS 方向上的 SISRE 加权因子

Tab. 2 SISRE weight factors for statistical contribution of radial (R) as well as along-track (A) and cross-track (C) errors to the line-of-sight ranging error

导航系统	ω_R	$\omega_{A,C}^2$
GPS	0.98	1/49
BDS (IGSO)	0.99	1/126
BDS (MEO)	0.98	1/54

2 GPS/BDS 实时数据流质量评估

2.1 可用性分析

本文采用 BKG NTRIP Client(BNC, <https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download>)软件接收和解码实时数据流, 从挂载点 RTCM3EPH-MGEX 获取广播星历, 从挂载点 SSRC00CAS0、SSRC00CNE0、SSRC00DLR0、SSRC00GFZ0、SSRC00GMV0、SSRC00WHU0 获取 6 家分析中心的 SSR 改正数。由于 BNC 软件在解码 CNE 的 BDS 产品时存在问题, 成功解码的 BDS 卫星数较少, 因此采用事后保存的实时 CNE 产品

(http://www.ppp-wizard.net/products/REAL_TIME)。实际应用中,受数据源、播发机构、传输网络和 BNC 软件的稳定性的影响,实时接收到的数据流并不一定完整,SSR 改正数的可用性直接影响实时用户的定位精度和定位结果的稳定性。

本文统计了连续 11 天(2022 年年积日第 100 到 110 天)的 6 家分析中心的 SSR 产品的历元完整率,各个分析中心的天历元完整率如图 1 所示。在第 107 天,除了 CNE、DLR 和 GMV 外,其他分析中心天历元完整率出现骤降(65%),其他时间各分析中心天历元完整率较高,维持在 98%以上。表 3 统计了各个分析中心的平均历元完整率,所有分析中心的平均历元完整率均在 99%以上。

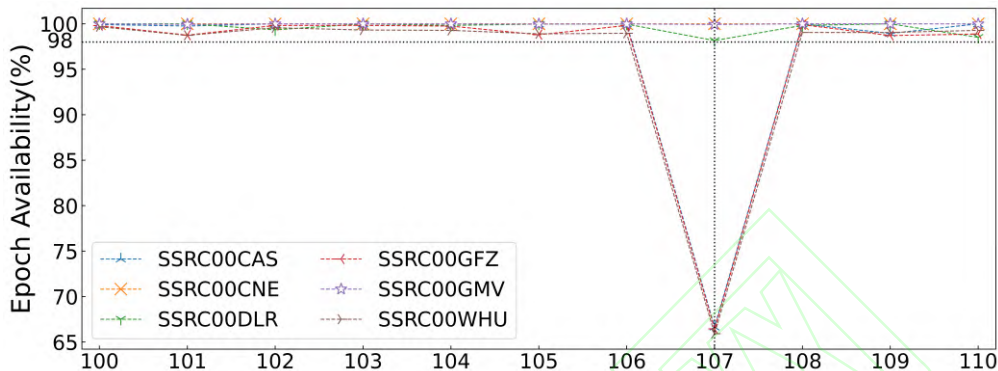


图 1 各分析中心 SSR 产品的天历元完整率(2022 年年积日第 100~110 天)

Fig. 1 Epoch availability of six ACs' SSR products from DOY 100 to DOY 110 of 2022

表 3 各分析中心 SSR 产品的平均历元完整率(2022 年年积日第 100~110 天)

Tab. 3 Mean Epoch Availability of the real-time precise orbit and clock corrections in percent for DOY 100 to DOY 110 of 2022

AC name	CAS	CNE	DLR	GFZ	GMV	WHU
percent	99.86	100.00	99.6	99.43	99.98	99.16

各分析中心 GPS 系统分卫星完整率统计结果如图 2 所示, CAS 的卫星可用性最高,提供了所有的 32 颗 GPS 卫星的 SSR 改正数,但有 3 颗卫星(G11、G21、G28)的完整率低于平均水平;其余四家分析中心的 GPS 卫星的可用性相同,均为 30 颗。5404 分析中心 BDS 系统分卫星完整率统计结果如图 3 所示,图中不同颜色的柱状图表示不同的北斗轨道类型。由图 3 可知,不同分析中心 BDS SSR 改正数的可用性 & 完整率差异较大,其中 CAS、GFZ、WHU 的 BDS 卫星可用性最高,均播发了所有的 15+27 颗 BDS 卫星(不包括 BDS-3 GEO)的 SSR 改正数,这三个分析中心的 BDS-3 卫星完整率均在 99%以上, BDS-2 卫星的完整率劣于 BDS-3; CNE BDS 卫星可用性较高,仅缺失了一颗 BDS 卫星(C03); DLR 只播发了 BDS MEO 卫星的 SSR 改正数; GMV 的 SSR 产品中, C01 卫星的完整率为 80.48%,其余 BDS 卫星均不足 14%。

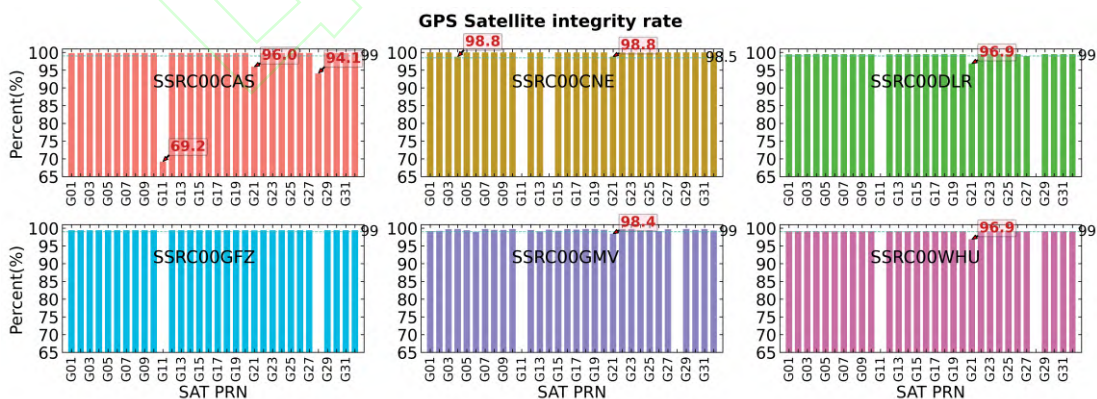


图 2 各分析中心 GPS 卫星完整率统计(2022 年年积日第 100~110 天)

Fig. 2 GPS satellite availability of six ACs' SSR products from DOY 100 to DOY 110 of 2022

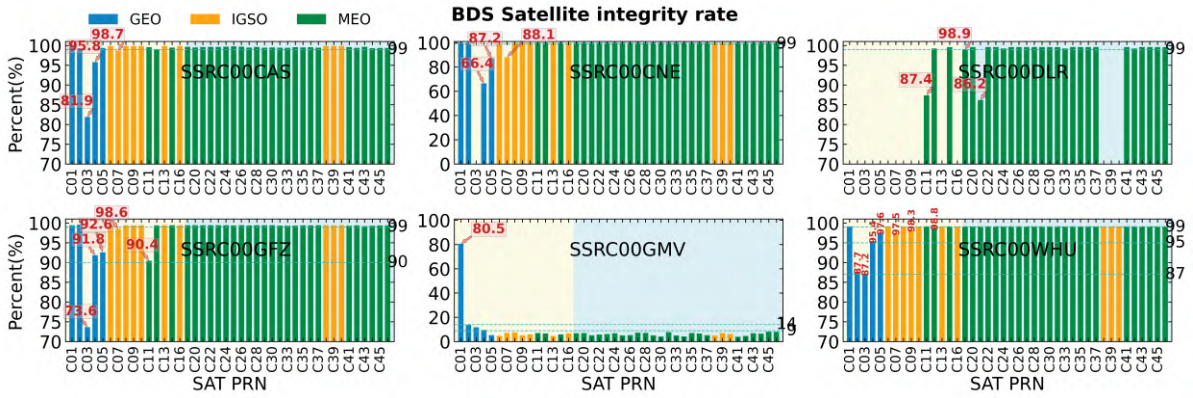


图3 各分析中心 BDS-2/BDS-3 卫星完整率统计 (2022 年第 100~110 天)

Fig. 3 BDS-2/BDS-3 satellite availability of six ACs' SSR products from DOY 100 to DOY 110 of 2022

2.2 GPS 实时轨道钟差精度性能

选取 IGS 事后精密产品作为参考, 6 家分析中心的 GPS 实时轨道在 RAC 方向上的 RMS 如图 4 所示。GPS 实时钟差的 STD 和 RMS 如图 5 所示。各分析中心 GPS 卫星轨道钟差的平均精度见表 4。

由表 4 和图 4 可知, GPS 卫星轨道的径向分量 (R) 分量优于切向分量 (A) 和法向分量 (C)。在轨道的 3D-RMS 比较中, WHU 的实时 GPS 轨道精度最佳 (3.3 cm), CNE 和 GMV 的轨道精度相当 (3.8cm 左右), CAS 表现相对较差 (4.2 cm)。对于实时 GPS 钟差, 在精度指标 STD 方面, 6 家分析中心的 GPS 钟差精度均优于 0.11 ns, 其中, WHU 的实时 GPS 钟差精度最高, STD 为 0.05 ns, GMV 和 CNE 的钟差精度相当, STD 在 0.07 ns 左右, DLR、GFZ 和 CAS 的钟差精度相当, STD 在 0.1 ns 左右。由于各分析中心在估计 GPS 卫星钟差时, 选取的测站不同, 所采取的策略也不同, 这可能导致了这钟差精度上的些微差异。在精度指标 RMS 方面, DLR 的钟差精度最差 (2.34 ns), 其余分析中心的 GPS 钟差均优于 0.6 ns。

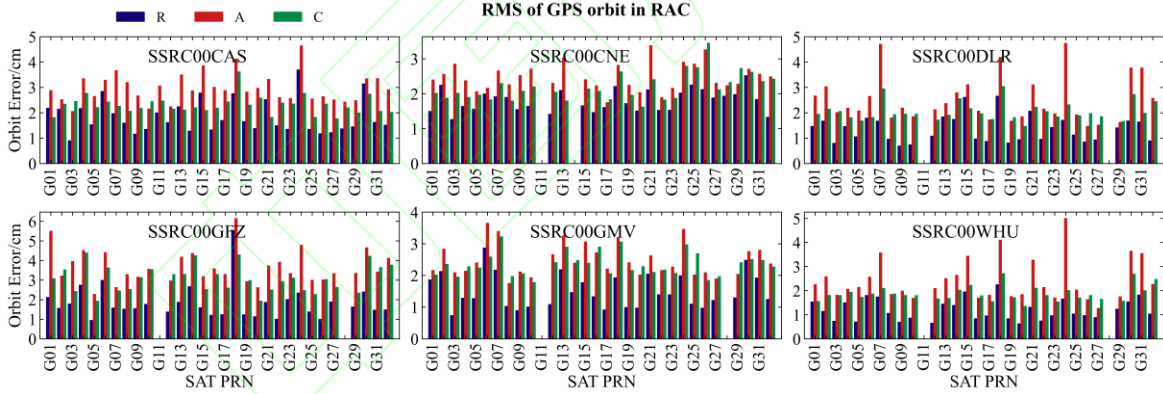


图 4 各分析中心 GPS 实时轨道 RAC 分量的 RMS 值 (与 IGS 事后精密产品比较)

Fig. 4 The RMS of the differences of real-time GPS orbit between the six selected analysis centers' (ACs') products and the IGS final product

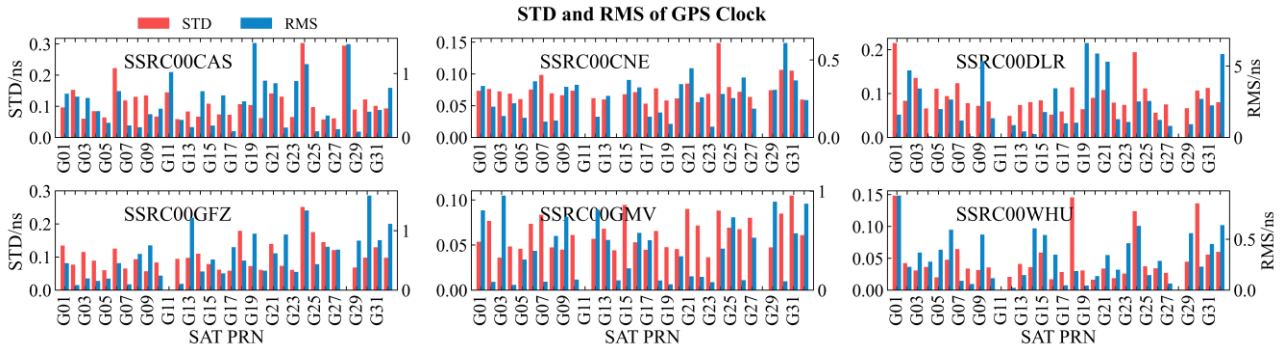


图 5 各分析中心 GPS 实时钟差 STD 和 RMS 值 (与 IGS 事后精密产品比较)

Fig. 5 The STD (red bar) and RMS (blue bar) of the differences of real-time GPS clock between the six ACs' products and IGS final product

表 4 6 家分析中心 GPS 实时轨道钟差平均精度统计 (与 IGS 事后精密产品比较)

Tab. 4 The mean accuracies of GPS real-time precise products from the six selected ACs with respect to the IGS final products during the test period

Products	Orbits (cm)				Clocks (ns)	
	R	A	C	3D-RMS	STD	RMS
CAS	1.8	3.0	2.3	4.2	0.11	0.54
CNE	1.8	2.5	2.2	3.8	0.07	0.26
DLR	1.4	2.5	2.1	3.5	0.09	2.34
GFZ	1.3	2.9	2.5	4.0	0.10	0.47
GMV	1.5	2.5	2.4	3.8	0.06	0.40
WHU	1.2	2.4	1.9	3.3	0.05	0.32

2.3 BDS 实时轨道钟差精度性能

选取 COM (CODE MGEX) 事后精密产品作为参考。因 GMV 的北斗 SSR 改正数完整率较低, 故仅统计另外 5 个分析中心的北斗实时轨道钟差的精度, 因 BDS GEO 卫星的轨道钟差产品误差过大而不参与统计。各分析中心的 BDS 实时轨道在 RAC 方向上的 RMS 如图 6 所示, BDS 实时钟差的 STD 和 RMS 如图 7 所示, 各分析中心的 BDS 卫星轨道钟差的平均精度见表 5。

由图 6 和表 5 可知, 不同分析中心的 BDS-2 和 BDS-3 实时轨道的一致性存在差异。对于轨道的三维精度 (3DRMS), BDS 的 IGSO 卫星轨道精度普遍劣于 MEO 卫星; BDS-3 的 IGSO 卫星轨道精度普遍劣于 BDS-2 的 IGSO 卫星; BDS-3 的 MEO 卫星轨道精度与 BDS-2 的 MEO 卫星表现出较好的一致性; 所有分析中心 BDS MEO 卫星三维轨道精度均优于 12 cm; 相比 GPS 卫星, 所有分析中心 BDS 卫星的三维轨道精度明显偏低。由图 7 和表 5 可知, 不同分析中心的 BDS-2 和 BDS-3 实时钟差的一致性存在差异。在精度指标 STD 方面, 除了 GFZ 以外, 其余分析中心的 BDS-2 和 BDS-3 的 IGSO 卫星钟差表现出较好的一致性, GFZ 的 BDS-3 IGSO 卫星钟差存在异常 (见图 7), 所有分析中心的 BDS-3 MEO 卫星钟差均优于 BDS-2, 和轨道结果一致, 所有分析中心 BDS 卫星钟差均劣于 GPS 卫星。在 BDS 钟差的精度指标 RMS 方面, WHU 钟差精度最差, 其余分析中心的精度在 8 ns 以内。

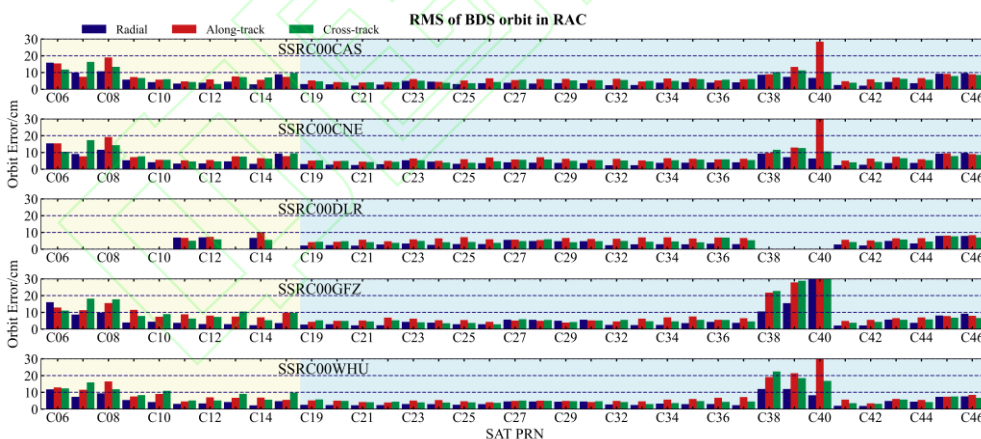


图 6 各分析中心 BDS 实时轨道 RAC 分量的 RMS 值 (与 COM 事后精密产品比较)

Fig. 6 The RMS of the differences of real-time BDS orbit between the five selected ACs' products and the COM final product

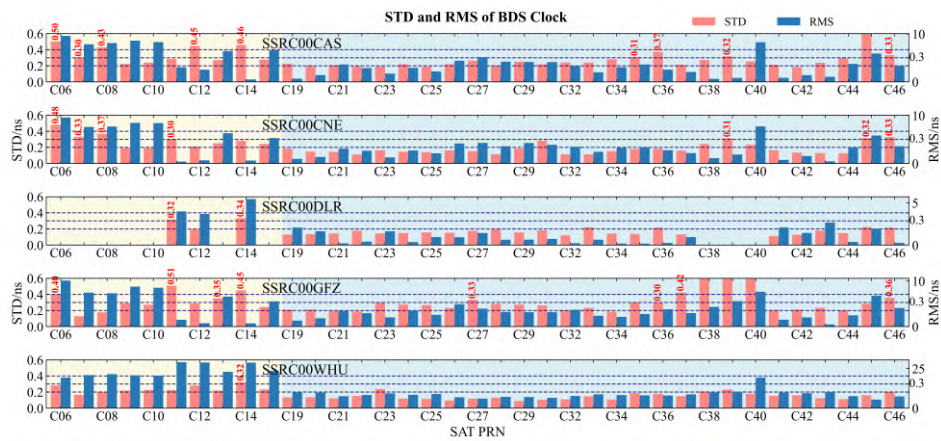


图 7 各分析中心 BDS 实时钟差 STD 和 RMS 值 (与 COM 事后精密产品比较)

Fig. 7 The STD (red bar) and (RMS) (blue bar) of the differences of real-time BDS clock between the five ACs' products and COM final product

表 5 5 家分析中心 BDS 实时轨道钟差平均精度统计 (与 COM 事后精密产品比较)

Tab. 5 The mean accuracies of BDS real-time precise products from the five selected ACs with respect to the COM final products during the test period

Products	BDS2/3 orbit	Orbits (cm)			Clocks (ns)		
		R	A	C	3D-RMS	STD	RMS
CAS	BDS-2 IGSO	8.6	10.0	10.2	16.7	0.32	7.93
	BDS-3 IGSO	7.6	16.9	10.7	21.4	0.28	3.25
	BDS-2 MEO	3.4	5.4	4.9	8.1	0.40	2.05
	BDS-3 MEO	4.0	5.9	5.3	8.8	0.27	2.95
CNE	BDS-2 IGSO	8.5	10.1	10.3	16.8	0.29	7.63
	BDS-3 IGSO	7.6	17.6	11.6	22.5	0.26	3.58
	BDS-2 MEO	3.4	5.8	5.2	8.5	0.27	0.57
	BDS-3 MEO	4.0	6.2	5.3	9.1	0.17	2.81
DLR	BDS-2 MEO	6.9	8.1	5.5	12.0	0.28	4.38
	BDS-3 MEO	3.7	6.2	4.9	8.7	0.16	0.95
GFZ	BDS-2 IGSO	7.1	10.9	12.0	17.7	0.27	7.76
	BDS-3 IGSO	19.7	28.8	29.9	46.0	2.29	5.86
	BDS-2 MEO	3.1	8.0	6.3	10.6	0.42	0.99
	BDS-3 MEO	4.0	5.8	4.9	8.6	0.26	2.97
WHU	BDS-2 IGSO	6.7	10.0	11.2	16.4	0.22	21.39
	BDS-3 IGSO	10.8	23.7	19.3	32.4	0.21	13.25
	BDS-2 MEO	2.9	6.1	5.3	8.6	0.28	28.90
	BDS-3 MEO	3.5	5.3	4.6	7.8	0.14	8.16

2.4 信号空间测距误差

图 8 显示了 6 家分析中心 SSR 产品的每颗 GPS/BDS 卫星的 SISRE 值。多数 GPS 卫星的 SISRE 值均在 5 cm 以内，且在 2.5 cm 的水平上下浮动；同一颗 GPS 卫星的不同分析中心的 SISRE 值的一致性较好。北斗卫星的 SISRE 值相对较大，多数 BDS 卫星的在 15 cm 以内，同一颗 BDS 卫星不同分析中心的 SISRE 值符合较好。

表 6 统计了 6 家分析中心所有的 GPS/BDS 卫星 SISRE 的平均值。GPS 卫星的 SISRE 平均值在 5cm 以内。其中，WHU 的 SISRE 值最小 (2.12 cm)；CNE 和 DLR 的 SISRE 值差异不大 (约 3.3 cm)，CNE 略优于 DLR；GFZ 和 CAS 的 SISRE 值差异不大 (约 4.1 cm)，GFZ 略优于 CAS。不同分析中心的 GPS 卫星的 SISRE 值的大小顺序为：WHU<GMV<CNE<DLR<GFZ<CAS。对于 BDS IGSO 卫星，CAS 和 CNE 的 SISRE 值表现出较好的一致性；GFZ 和 WHU 的 BDS-3 IGSO 卫星的 SISRE 值劣于 BDS-2。对于 BDS MEO

卫星，所有分析中心的 BDS-3 MEO 卫星均优于 BDS-2；WHU BDS-2 和 BDS-3 的 MEO 卫星精密产品均是五家分析中心中最优的（8.83、5.91 cm）。

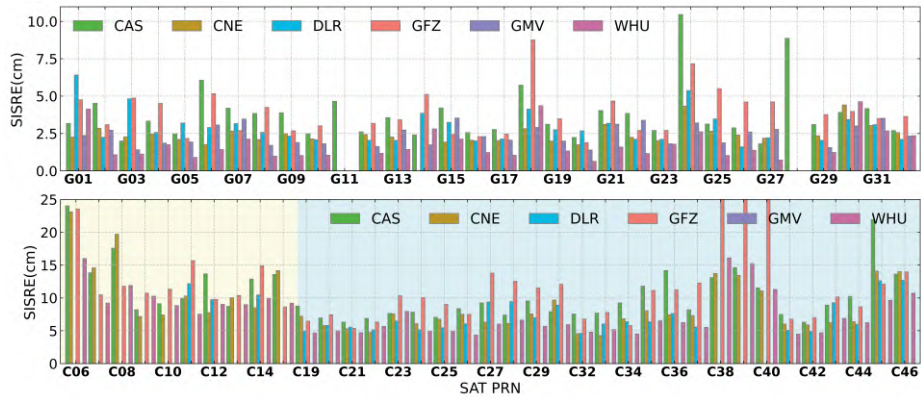


图 8 各分析中心 SSR 产品的每颗 GPS/BDS 卫星的空间信号测距误差（SISRE）

Fig. 8 Satellite-specific SISRE values of GPS and BDS for six ACs' SSR products

表 6 各分析中心所有 GPS/BDS 卫星的平均 SISRE（2022 年第 100~110 天）

Tab. 6 Mean SISRE of GPS/BDS satellite of SSR products on DOY 100 to DOY 110 of 2022

	CAS	CNE	DLR	GFZ	GMV	WHU
GPS	4.17	3.14	3.42	4.06	2.74	2.12
BDS-2 IGSO	13.57	13.74	-	12.41	-	10.62
BDS-3 IGSO	13.07	12.74	-	72.33	-	14.19
BDS-2 MEO	12.17	8.85	10.78	13.45	-	8.83
BDS-3 MEO	9.21	7.15	6.93	9.42	-	5.91

3 GPS/BDS 实时 PPP 定位分析

3.1 数据描述与 PPP 处理策略

为了验证不同分析中心的 SSR 产品质量，试验选取了 11 天（2022 年年积日第 100~110 天）的 38 个精确坐标已知的全球均匀分布的 MGEX 测站，使用 GAMP 软件以仿动态模式进行 PPP 定位试验^[30]，来评估基于不同分析中心 SSR 产品的定位性能，测站分布如图 9 所示，测站点的颜色代表 BDS 可见卫星数，各测站观测到的 BDS2+3 卫星数在 8~23 颗，GPS 卫星数在 9~10 颗。试验中 PPP 观测值模型采用非差非组合，具体的处理策略见表 7。

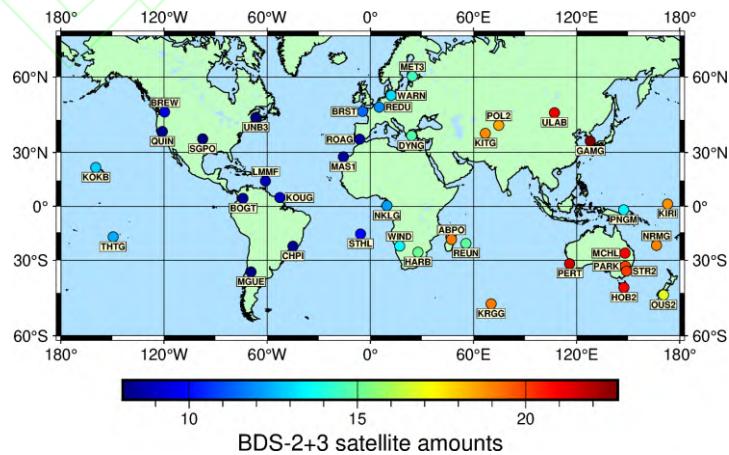


图 9 MGEX 测站分布及 2022 年年积日第 105 天的各测站上北斗卫星可见数统计，测站点的颜色代表 BDS 可见卫星数

Fig. 9 Distribution of the 38 MGEX stations selected for the experiments and the color of station point indicates relationship between visible BDS-2/3 satellite amounts and station locations on DOY 105, 2022

表 7 实时 PPP 处理策略

Tab. 7 Real-time PPP processing strategy

类别	处理策略
参数估计方法	卡尔曼滤波
观测值	非差非组合
频点	GPS: L1 和 L2; BDS: B1I 和 B3I
采样率	30 秒
截止高度角	7°
相位缠绕	改正
对流层延迟	天顶干延迟: Saastamoinen 模型改正 天顶湿延迟: 估计, GMF 投影函数
电离层	估计
相对论效应	改正
卫星 PCO 和 PCV 改正	igs14.atx
卫星轨道、钟差	SSR 改正+广播星历
模糊度	浮点解

3.2 实时 PPP 动态定位性能分析

基于 6 家分析中心的实时轨道钟差产品, 分别统计单 GPS 和 GPS/BDS 组合模式的动态 PPP 收敛时间和定位精度。收敛性定义为 E 和 N 方向小于 10 cm, U 方向小于 20 cm, 并连续保持 10 min。定位精度为 ENU 方向收敛后的均方根误差 (RMSE), 以 IGS 周解的测站坐标为参考值。图 10 代表性地展示了 REDU 测站 2022 年第 105 天使用各分析中心实时轨道钟差产品的单 GPS (子图 a) 和 GPS/BDS 组合 (子图 b) 动态 PPP 坐标估值在 E、N、U 3 个方向的定位误差序列, 图 11 统计了 11 天 38 个测站的单 GPS 和 GPS/BDS 动态 PPP 在 E、N、U 方向上的平均定位精度及平均收敛时间, 图 12 的箱线图统计了 11 天 38 个测站的单 GPS 和 GPS/BDS 动态 PPP 的收敛情况 (收敛时间的中位数, 25%分位数, 75%分位数等)。

由图 10 可知, BDS 卫星的加入, 对收敛速度有明显的促进效果, 但也存在部分历元定位精度下降的现象。由图 11 深红色柱状图可知, 所有 SSR 产品的单 GPS PPP 动态定位结果中, DLR 的收敛速度最慢 (38.9 min), 一个可能的原因是 DLR 钟差 RMS 精度较差 (2.34 ns); 即使 WHU 的 GPS 轨道钟差精度是最优的, 但 GFZ 的收敛速度最快 (26.7 min), 这是由于 GFZ 的可用 GPS 卫星 (约 9 颗) 多于 WHU (约 8 颗) 导致的。加入 BDS 卫星后, 各个分析中心的收敛速度均有提升, 平均收敛时间缩短约 6%~25%, 其中 WHU 的收敛速度提升最为明显, 平均收敛时间缩短了 25% 左右, DLR 的收敛速度提升最不明显 (6%), 可能的原因是 DLR 只支持 BDS 的 MEO 卫星, 对 BDS-2 卫星的支持尤为不好; 在收敛时间的中位数指标方面 (见图 12) 也有类似的结论, 所有分析中心的 GPS/BDS 组合定位的收敛时间均小于 40 min。由图 11 可知, PPP 收敛后, 各个分析中心产品的定位结果在 E、N 方向优于 6 cm, U 方向上优于 10 cm。在单 GPS 的三维定位精度中, WHU 有最佳的定位性能 (7.5 cm), 三维定位精度 (3D RMS) 的大小顺序为: WHU < GMV < CNE < DLR < GFZ < CAS, 这与不同分析中心产品 GPS 卫星的 SISRE 值呈现正相关。加入 BDS 卫星以后, CAS、DLR 和 GFZ 的三维位置精度均有一定程度的提升; 相反地, 对于 CNE 和 WHU 产品, 北斗卫星的加入导致 ENU 三个方向上的定位精度有毫米级降低。所有分析中心的 GPS/BDS 定位结果在水平方向上均可达到 5cm 的动态定位精度, 在高程方向上均达到 10 cm 的动态定位精度。

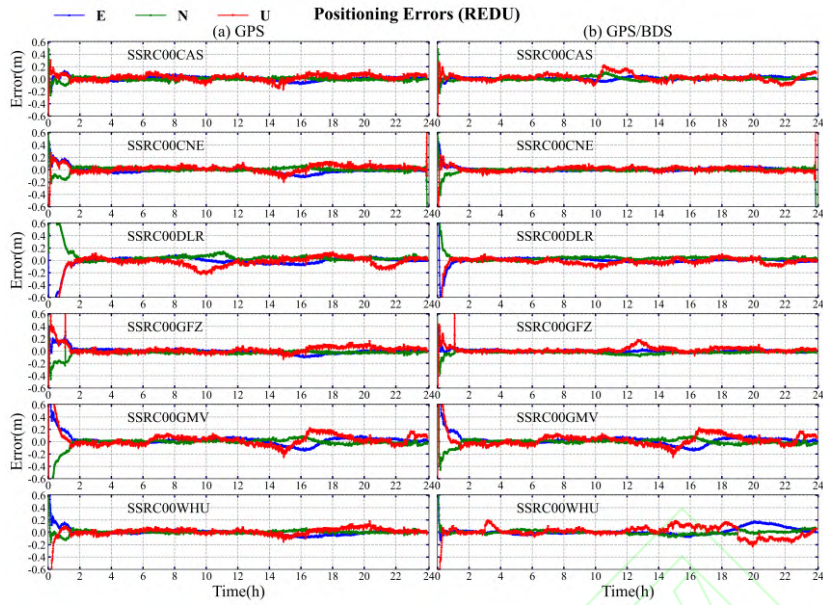


图 10 测站 REDU 动态 PPP 与 IGS 周解在 ENU 方向上差异的时间序列 (2022 年第 105 天), 左边的 6 个子图和右边的 6 个子图分别代表不同分析中心产品的单系统 GPS 和 GPS/BDS 组合 PPP 的定位结果

Fig. 10 Time series of the differences between PPP-estimated (kinematic mode) and IGS-released coordinates in E (East-West), N (North-South), U (Up-Down) directions at REDU station on DOY 105, 2022. The six subfigures on the left and the six subfigures on the right represent the positioning results of GPS-only and GPS/BDS combined PPP for different ACs' products, respectively.

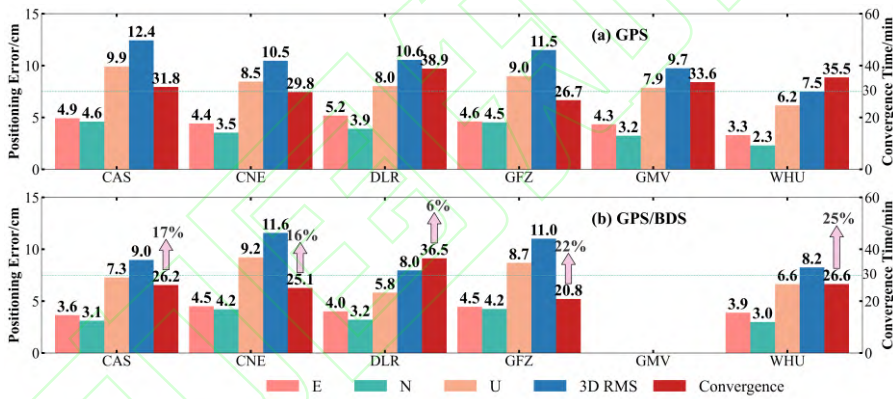


图 11 单 GPS 和 GPS/BDS 组合动态 PPP 各分析中心产品 NEU 平均定位误差及平均收敛时间 (2022 年第 100~110 天)

Fig. 11 The average positioning accuracy and convergence time after convergence of GPS and GPS/BDS kinematic PPP utilizing different ACs' orbit/clock products from DOY 100 to DOY 110 of 2022

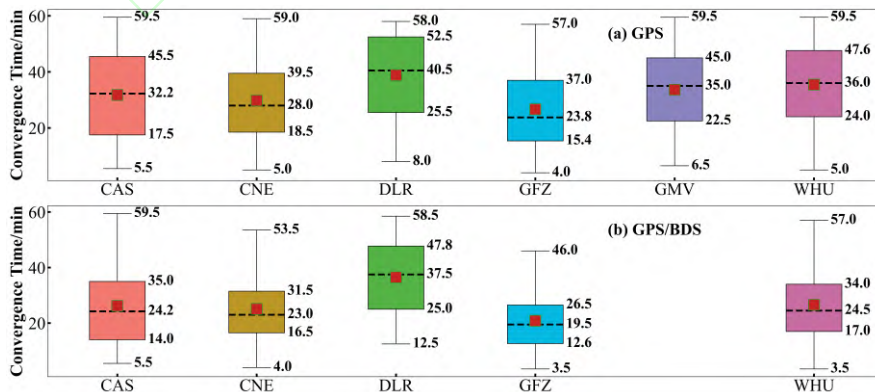


图 12 单 GPS 和 GPS/BDS 组合动态 PPP 各分析中心收敛时间的箱线图统计 (2022 年第 100~110 天)

Fig. 12 Boxplot of the convergence time calculated from GPS and GPS/BDS kinematic PPP with six ACs' precise products from DOY 100 to DOY 110 of 2022

4 结 语

本文评估了 6 家分析中心播发的 GPS/BDS SSR 实时轨道和钟差产品的精度，并通过 PPP 验证了实时轨道和钟差的定位性能，得到如下结论：

(1) 所有分析中心的平均天历元完整率均在 99%以上，存在个别天个别分析中心的历元完整率骤降的情况。卫星可用性方面，CAS 的 GPS 卫星可用性最高，提供了所有的 32 颗 GPS 卫星的 SSR 改正数，其余的分析中心缺失 2 颗 GPS 卫星。CAS、GFZ、WHU 的 BDS 卫星可用性最高，均提供了所有的 15+27 颗 BDS 卫星（不包括 BDS-3 GEO）的 SSR 改正数，且 BDS-3 卫星的历元完整率优于 BDS-2；CNE 的 BDS 卫星可用性次之，缺失了一颗卫星（C03）；DLR 只播发了 BDS MEO 卫星的 SSR 改正数，多数 MEO 卫星历元完整率优于 99%；GMV 的 BDS 卫星的完整率普遍较低（14%）。

(2) WHU 的 GPS 卫星的三维轨道精度（3D RMS 为 3.3 cm）和钟差精度（STD 为 0.05 ns）均为最佳；各分析中心的 GPS 卫星 SISRE 值普遍优于 5 cm，不同分析中心的 GPS 卫星的空间信号测距误差的大小顺序为：WHU<GMV<CNE<DLR<GFZ<CAS。所有分析中心的 BDS MEO 卫星三维轨道精度均优于 12 cm，且 BDS 的 IGSO 卫星轨道精度普遍劣于 MEO 卫星，BDS-3 的 IGSO 卫星轨道精度普遍劣于 BDS-2 的 IGSO 卫星，BDS-3 的 MEO 卫星三维轨道精度与 BDS-2 的 MEO 卫星表现出较好的一致性。对于实时 BDS 钟差，BDS-2 和 BDS-3 IGSO 卫星钟差一致性较好，BDS-3 的 MEO 卫星钟差优于 BDS-2。与 GPS 相比，BDS 卫星轨道钟差精度相对较差，表现最优的 WHU 分析中心的 BDS-2 和 BDS-3 的 MEO 卫星精密产品的 SISRE 值分别为 8.83 和 5.91cm。

(3) 实时 PPP 结果表明，单 GPS PPP 定位时，DLR 的收敛速度最慢（38.9 min），GFZ 的收敛速度最快（26.7 min），BDS 卫星的加入能够提升 PPP 收敛时间（6%~25%）。收敛后各分析中心产品的单 GPS 动态 PPP ENU 方向上的定位精度优于 10 cm，三维定位精度（3D RMS）与 GPS SISRE 值呈正相关；加入 BDS 卫星以后收敛速度加快，而定位精度无显著差异。

参考文献

- [1] Geng J, Chen X, Pan Y, et al. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4):91-115.
- [2] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Guo Fei, et al. GNSS Precise Point Positioning Theory Methods and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021. (张小红, 李星星, 郭斐, 李盼. GNSS 精密单点定位理论方法及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2021)
- [3] Du Y, Wang J, Rizos C, et al. Vulnerabilities and integrity of precise point positioning for intelligent transport systems: overview and analysis[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1):3-25.
- [4] Li X, Wang H, Li S, et al. GIL: a tightly coupled GNSS PPP/INS/LiDAR method for precise vehicle navigation[J]. Satellite Navigation, 2021, 2(1):26-43.
- [5] Zhang Baocheng, Ke Cheng, Zha Jiuping, et al. Undifferenced and uncombined PPP-RTK: algorithmic models, prototype terminals and field-test results[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(8):1725-1735. (张宝成, 柯成, 查九平, 等. 非差非组合 PPP-RTK: 模型算法、终端样机与实测结果[J]. 测绘学报, 2022, 51(8):1725-1735.)
- [6] Luo Youan, Jiang Aiguo, Yang Fuxin, et al. Application research of BDS precise point positioning on dynamic positioning system of offshore oil drilling rig[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(4):111-116. (罗幼安, 蒋爱国, 杨福鑫, 等. BDS 精密单点定位在海洋石油钻井平台动力定位系统的应用研究[J]. 测绘通报, 2022(4):111-116.)
- [7] Ye Shirong, Zhao Lewen, Chen Dezhong, et al. Real-Time Deformation Monitoring Data Processing Based on BDS Triple-frequency Observations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016. (叶世榕, 赵乐文, 陈德忠, 等. 基于北斗三频的实时变形监测数据处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016.)
- [8] China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou Navigation Satellite System[R]. Version 2.1, 2012
- [9] Yang Y, Gao W, Guo S, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. NAVIGATION, 2019, 66(1):7-18.
- [10] Cao Xinyun, Shen Fei, Li Jiancheng, et al. BDS-3/GNSS Uncombined Precise Point Positioning[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1): 92-100. (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.)

- [11] S. Gu, R. Guo, X. Gong, S. Zhang, Y. Lou, and Z. Li, Real-time precise point positioning based on BDS-3 global short message communication[J]. *GPS Solution*, 2022, 26(4):107-121.
- [12] Song W, Zhao X, Lou Y, et al. Performance Evaluation of BDS-3 PPP-B2b Service[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(3): 408-415. (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.)
- [13] Shu Bao, Wang Li, Zhang Qin, et al. Evaluation of multi-GNSS orbit and clock extrapolating error and their influence on real-time PPP during outages of SSR correction[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(12):1738-1750. (舒宝, 王利, 张勤, 等. SSR 延迟下的轨道钟差外推误差及其对多 GNSS 实时精密单点定位的影响评估[J]. *测绘学报*, 2021, 50(12):1738-1750.)
- [14] Zhang L, Yang H, Gao Y, et al. Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12):2942-2954.
- [15] Wang L, Li Z, Ge M, et al. Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service[J]. *GPS Solution*, 2019, 23(3):66-78.
- [16] Wang Z, Li Z, Wang L, et al. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers[J]. *IJGI*, 2018, 7(3):85-105.
- [17] Shen P, Cheng F, Lu X, et al. An Investigation of Precise Orbit and Clock Products for BDS-3 from Different Analysis Centers[J]. *Sensors*, 2021, 21(5):1596-1611.
- [18] Pan L, Li X, Yu W, et al. Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning with Both BDS-3 and BDS-2 Observations[J]. *Sensors*, 2020, 20(21):6027-6047.
- [19] Uhlemann M, Gendt G, Ramatschi M, et al. GFZ Global Multi-GNSS Network and Data Processing Results[J]. in *IAG 150 Years*, 2015, 143(1):673-679.
- [20] Guo J, Xu X, Zhao Q, et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison[J]. *J Geod*, 2016, 90(2):143-159.
- [21] Zhao Shuang. Research on BDS/GPS Real-Time Precise Point Positioning Method[D]. Zhengzhou: PLA Strategic Support Force Information Engineering University, 2018 (赵爽. BDS/GPS 实时精密单点定位方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2018)
- [22] Hadas T, Bosy J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. *GPS Solution*, 2015, 19(1):93-105.
- [23] Elsobeiey M and Al-Harbi S, Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service[J]. *GPS Solution*, 2016, 20(3):565-571.
- [24] Montenbruck O, Steigenberger P, and Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective[J]. *GPS Solution*, 2015, 19(2):321-333.
- [25] Zhang Y, Kubo N, Chen J, et al. Initial Positioning Assessment of BDS New Satellites and New Signals[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(11):1320-1338.
- [26] Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment – Methodology and results[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(12):3020-3038.
- [27] Liu L, Guo J, Zhou M, et al. Accuracy Analysis of GNSS Broadcast Ephemeris Orbit and Clock Offset[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(7):1122-1132. (刘路, 郭金运, 周茂盛, 等. GNSS 广播星历轨道和钟差精度分析[J]. *武汉大学学报（信息科学版）*, 2022, 47(7):1122-1132.)
- [28] Zhang X, Liu C, Zhang F, et al. Accuracy Evaluation and Comparative Analysis of Four Major GNSS Broadcast Ephemeris[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(2):208-218. (张熙, 刘长建, 章繁, 等. 四大 GNSS 广播星历精度评估与对比分析[J]. *武汉大学学报（信息科学版）*, 2022, 47(2):208-218.)
- [29] Kazmierski K, Hadas T, Sośnica K. Weighting of Multi-GNSS Observations in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2):84-99.
- [30] 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):33-43.

网络首发:

标题: GPS/BDS实时SSR产品质量评估及其PPP性能分析

作者: 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 田云青, 雷体俊, 穆雪枫, 王利

DOI: 10.13203/j.whugis20220760

收稿日期: 2023-04-05

网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

北斗三号PPP-B2b服务性能评估

宋伟伟, 赵新科, 楼益栋, 孙唯彬, 赵正予

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 408-415

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200686>

