引文格式: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),2025,50(4):714-726.DOI:10.13203/j.whugis20220760

Citation: 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, 2025, 50(4): 714-726. 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,随着多系统全球导航卫星系统(global navigation satellite system,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。对中国科学院(Chinese Academy of Sciences,CAS)、法国太空研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNE)、德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt,DLR)、西班牙航天与防务公司(GMV Aerospace and Defense,GMV)、德国地学研究中心(Deutsches GeoForschungsZentrum,GFZ)、武汉大学(Wuhan University,WHU)6个分析中心的GPS/北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system,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32颗GPS卫星的SSR改正数;CAS、GFZ、WHU 3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个分析中心中,WHU的GPS卫星的三维轨道精度和钟差精度均为最佳;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的中地球轨道卫星精密产品的SISRE值分别为8.83、5.91 cm。在单GPS动态PPP模式下,DLR的收敛速度最慢,GFZ收敛速度最快;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。

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 **收稿日期**:2023-01-15

DOI:10.13203/j.whugis20220760 **文章编号**:1671-8860(2025)04-0714-13

Quality Evaluation and PPP Performance Analysis of GPS/BDS Real-Time SSR Products

SU Chunyang[1] *SHU Bao*[1] *ZHENG Lei*[4] *TIAN Yunqing*[1] *LEI Tijun*[1]
MU Xuefeng[1] *WANG Li*[1,2,3]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 State Key Laboratory of Geographic Information Engineering, Xi'an 710054, China
3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China
4 Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: In recent years, the rapid development of multi-system global navigation satellite

基金项目: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)。

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。sucyyh@foxmail.com

通信作者:舒宝,博士,副教授。baos613@163.com

systems (GNSS) and the growing demand for real-time, high-precision applications have led to an increasing variety of state space representation (SSR) products provided by the International GNSS Service (IGS). Evaluating the accuracy and availability of GNSS real-time precise products and their positioning performance across different analysis centers is of great importance for users. We aim to assess the availability and accuracy of real-time SSR products and their impact on real-time precise point positioning (PPP) from six commonly used analysis centers. **Methods:** We evaluated the epoch availability and satellite availability of SSR corrections, as well as the accuracy of GPS and BeiDou satellite navigation system (BDS) precise orbit and clock products. Simulated kinematic GPS and GPS/BDS PPP experiments were conducted to investigate the relationship between SSR product accuracy and three-dimensional (3D) position accuracy. **Results:** The Chinese Academy of Sciences (CAS) exhibited the highest availability for GPS satellites, providing SSR corrections for all 32 GPS satellites. CAS, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ), and Wuhan University (WHU) demonstrated the highest availability for BDS satellites, with all three providing SSR corrections for all 15 BDS-2 and 27 BDS-3 satellites, excluding BDS-3 geostationary Earth orbit (GEO) satellites. Among the SSR products from the six analysis centers, WHU's GPS satellites achieved the best 3D orbit and clock accuracy. The signal-in-space ranging errors (SISRE) for GPS satellites across all six centers were generally better than 5 cm. The SISRE ranking for GPS satellites was as follows: WHU < GMV Aerospace and Defense (GMV) < Centre National d' Études Spatiales (CNE) < Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) < GFZ < CAS. In contrast, the orbit and clock accuracy of BDS satellites was comparatively lower. For WHU, the best-performing analysis center, SISRE values for medium Earth orbit satellites of BDS-2 and BDS-3 were 8.83 cm and 5.91 cm, respectively. In GPS-only kinematic PPP, DLR exhibited the slowest convergence speed, while GFZ achieved the fastest. Adding BDS satellites did not significantly improve positioning accuracy but effectively enhanced convergence speed. **Conclusions:** SISRE is shown to reliably reflect the 3D position accuracy of GPS-only kinematic PPP. Moreover, incorporating BDS satellites can significantly improve convergence speed, even if their impact on positioning accuracy is minimal.

Key words: precise point positioning; real-time orbits and clocks; state space representation; analysis center; BDS-3

精密单点定位(precise point positioning, PPP)是全球导航卫星系统(global navigation satellite system, 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],具有无须依赖密集参考站网、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,由于国际GNSS服务分析中心(International GNSS Service, 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,北斗二号卫星导航系统(BeiDou-2 satellite navigation system, 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]。北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou-3 global satellite navigation system, BDS-3)已于2020年7月31日全面实施,BDS-3共有30颗卫星,由3颗地球同步轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星、3颗倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit, IGSO)卫星和24颗中地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星组成[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,且越来越多的多模GNSS实验跟踪网(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,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的卫星轨道误差和卫星钟差,注册用户实时接收广播星历、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 representa-

tion,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,文献[14]评估了9个分析中心的GPS产品,不同SSR产品的GPS信号空间测距误差(signal-in-space ranging errors,SISRE)为1.3~5.5 cm,动态PPP定位实验表明CLK90具有最佳定位性能。

2015年11月,法国太空研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNE)率先为BDS卫星提供SSR改正数,这使BDS实时PPP得以实施[15],因此,文献[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在水平方向上均优于6 cm,在高程方向上均优于10 cm,GPS/BDS组合PPP的定位精度优于单GPS。自从BDS-3全面建成以来,CNE开始提供对BDS-3卫星的支持,文献[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。文献[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在东(east,E)、北(north,N)、天(up,U)3个方向上静态模式的定位精度分别为1.8、1.2、2.5 cm,动态模式的定位精度分别为6.7、5.1、10.4 cm,而静态模式PPP在3个方向上的收敛时间分别为32.9、23.7、32.8 min,动态模式PPP的收敛时间分别为66.9、42.9、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,IGS提供的SSR产品越来越丰富,截至目前,已有6家分析中心(中国科学院(Chinese Academy of Sciences,CAS)、法国太空研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales,CNE)、德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt,DLR)、西班牙航天与防务公司(GMV Aerospace and Defense,GMV)、德国地学研究中心(Deutsches GeoForschungsZentrum,GFZ)[19]、武汉大学(Wuhan University,WHU)[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、全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GLONASS)和伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system,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。另外,由于GPS实时轨道和钟差数据流运行稳定且精度较高,为了直观了解BDS SSR产品质量,因此本文拟进行BDS与GPS的对比实验。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实验,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个IGS分析中心的实时SSR产品进行评估,各分析中心的SSR产品信息如表1所示。所有SSR产品的轨道参考基准均为卫星质心(center of mass,CoM)。

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的计算公式为:

$$w=\frac{n}{N}\times 100\% \tag{1}$$

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,计算径向(radial,R)、切向(along-track,A)和法向(cross-track,C)上轨道差异值的均方根(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一定程度上反映了PPP定位的收敛速度,而钟差的

表 1　SSR产品信息

Table 1　SSR Product Information

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

STD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的计算公式为:

$$f_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta_i^2} \tag{2}$$

$$f_{\mathrm{STD}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta_i-\bar{\Delta}\right)^2} \tag{3}$$

式中,f_{RMS}表示计算样本的RMS;f_{STD}表示计算样本的STD;n是样本数量;Δ_i是实时轨道/钟差与事后轨道/钟差的差值;$\bar{\Delta}$是样本的平均值。

通过计算SISRE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的计算公式为:

$$f_{\mathrm{SISRE}}\left(\Delta_{r_{\mathrm{R}}},\Delta_{r_{\mathrm{A}}},\Delta_{r_{\mathrm{C}}},\Delta_t\right)=\sqrt{f_{\mathrm{RMS}}^2\left(\omega_{\mathrm{R}}\Delta_{r_{\mathrm{R}}}-c\Delta_t\right)+\omega_{\mathrm{A,C}}^2\left[f_{\mathrm{RMS}}^2\left(\Delta_{r_{\mathrm{A}}}\right)+f_{\mathrm{RMS}}^2\left(\Delta_{r_{\mathrm{C}}}\right)\right]} \tag{4}$$

式中,$f_{\mathrm{SISRE}}(\cdot)$表示计算样本的信号空间测距误差;$\omega_{\mathrm{R}}$和$\omega_{\mathrm{A,C}}$是加权因子,用于将R、A、C上的轨道误差$\Delta_{r_{\mathrm{R}}}$、$\Delta_{r_{\mathrm{A}}}$、$\Delta_{r_{\mathrm{C}}}$转化到视线方向上,这两个加权因子的值跟导航系统与轨道类型有关,不同导航系统和轨道类型的SISRE加权因子不同[27-29],见表2;Δ_t是实时钟差和事后钟差的差值;c是真空的光速。

表 2　将轨道R、A、C方向上的误差转化到视线方向上的SISRE加权因子

Table 2　SISRE Weight Factors Used to Convert Errors in R, A, and C Directions of the Orbit to Line-of-Sight Direction

导航系统	ω_{R}	$\omega_{\mathrm{A,C}}^2$
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BNC软件(https://igs.bkg.bund.de/ntrip/download)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个分析中心的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 d(2022年年积日第100—110天)的6个分析中心的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6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。

各分析中心的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;其余分析中心的GPS卫星可用性相同,均为30颗。各分析中心的BDS系统分卫星完整率统计结果如图3所示,图3中不同颜色的柱状图表示不同

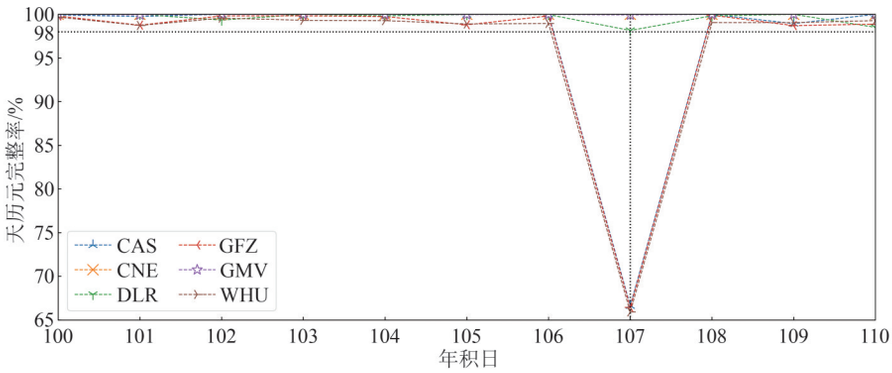


图1 各分析中心SSR产品在2022年年积日第100—110天的天历元完整率

Fig. 1 Day Epoch Availability of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 2022

表3 各分析中心SSR产品在2022年年积日第100—110天的平均天历元完整率/%

Table 3 Mean Day Epoch Availability of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 2022/%

分析中心	平均天历元完整率
CAS	99.86
CNE	100.00
DLR	99.60
GFZ	99.43
GMV	99.98
WHU	99.16

的北斗轨道类型。由图3可知,不同分析中心BDS SSR改正数的可用性及完整率差异较大,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3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%。

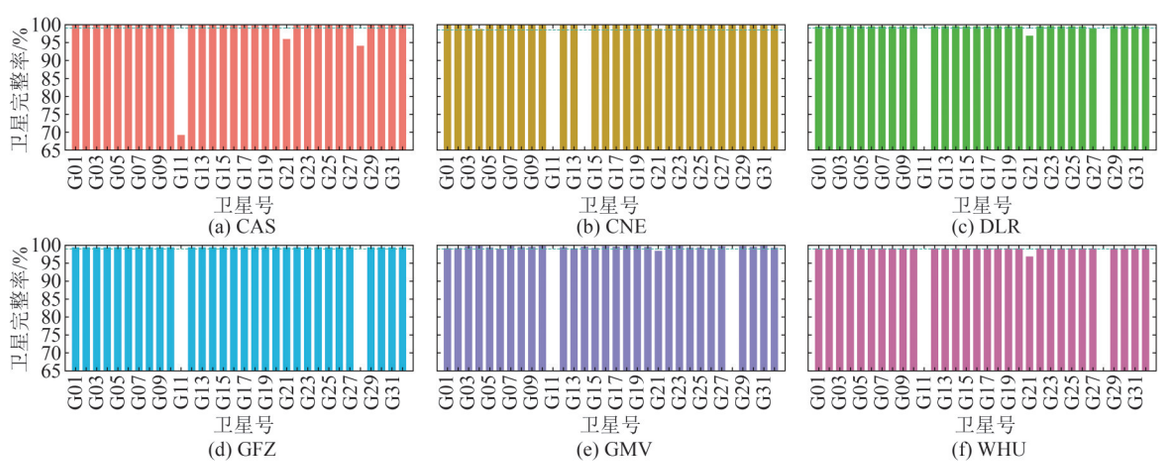


图2 各分析中心SSR产品在2022年年积日第100—110天的GPS卫星完整率

Fig. 2 GPS Satellite Availability of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 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个分析中心的GPS实时轨道在R、A、C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R分量优于A和C分量。在轨道的三维(3 dimensional,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(3.8 cm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个分析中心的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约0.06~0.07 ns,DLR、GFZ和CAS的钟差精度相当,STD在0.10 ns左右。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,这可能导致了钟差精度上的些微差异。在精

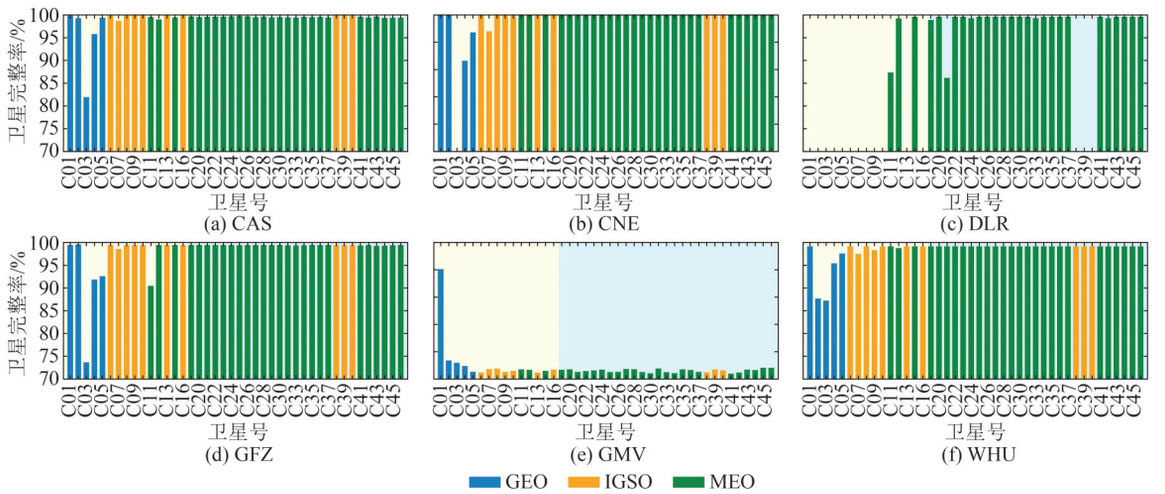


图3　各分析中心SSR产品2022年年积日第100—110天的BDS-2/BDS-3卫星完整率统计

Fig. 3　BDS-2/BDS-3 Satellite Availability of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 2022

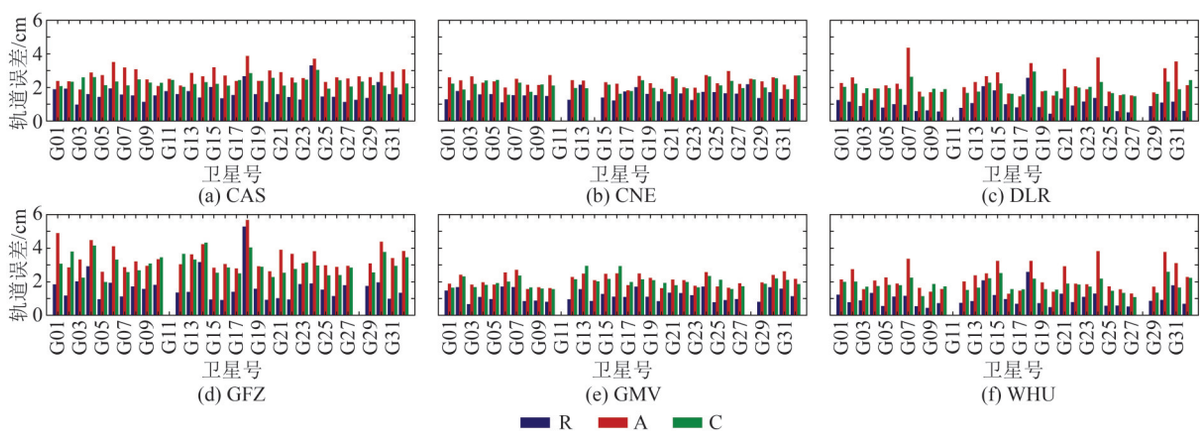


图4　各分析中心SSR产品GPS实时轨道R、A、C分量的RMS(与IGS事后精密产品比较)

Fig. 4　RMS of the R, A, C Components of GPS Real-Time Orbits for SSR Products from Each Analysis Center (Compared with IGS Final Product)

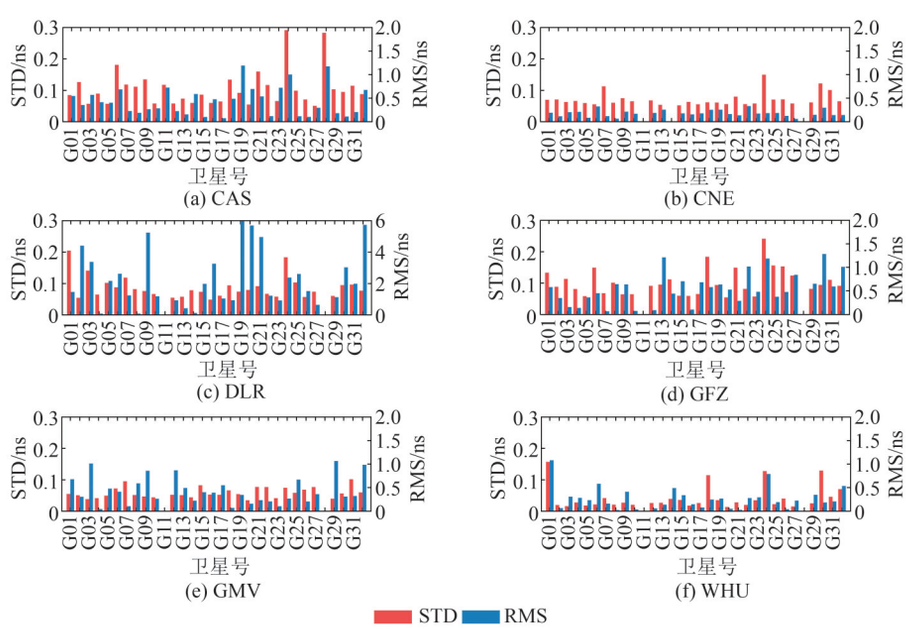


图5　各分析中心SSR产品GPS实时钟差STD和RMS(与IGS事后精密产品比较)

Fig. 5　STD and RMS of GPS Real-Time Clock for SSR Products from Each Analysis Center (Compared with IGS Final Product)

表4 各分析中心SSR产品GPS实时轨道与钟差的平均精度(与IGS事后精密产品比较)

Table 4 Mean Accuracy of Real-Time GPS Orbit and Clock for SSR Products from Each Analysis Center (Compared with IGS Final Product)

SSR产品代号	轨道误差/cm				钟差误差/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

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。

2.3 BDS实时轨道钟差精度性能

选取欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe,CODE)发布的事后MGEX精密产品(记作COM)作为参考。因为GMV的BDS SSR改正数完整率较低,故仅统计另外5个分析中心的BDS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R、A、C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。

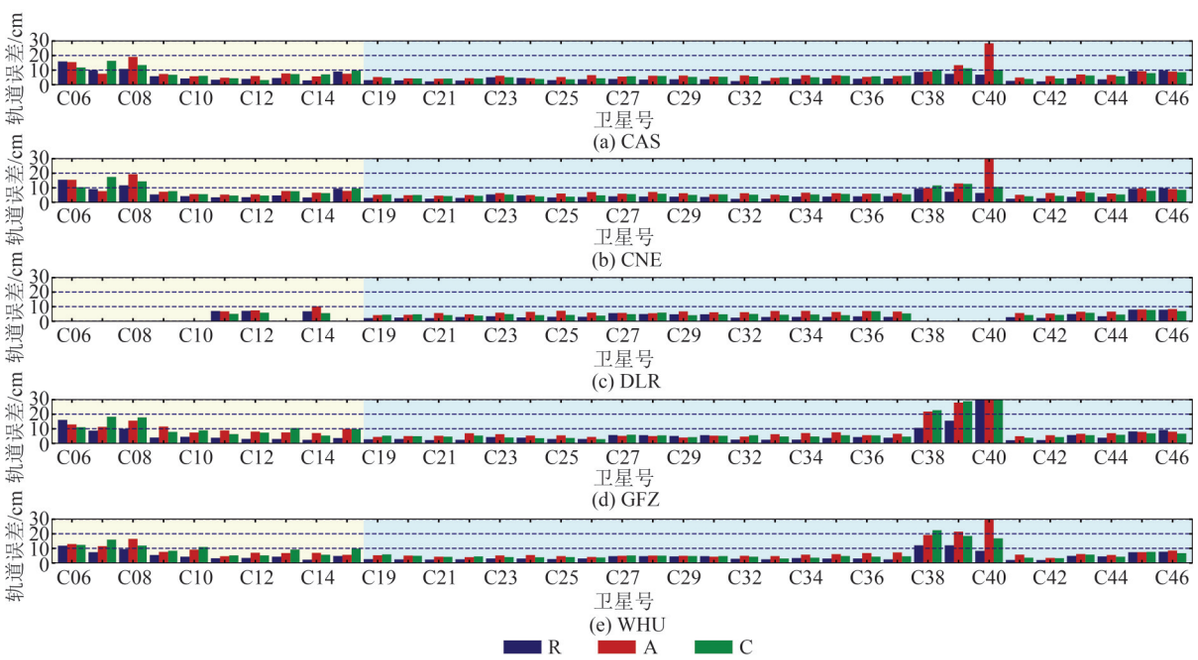


图6 各分析中心SSR产品BDS实时轨道R、A、C分量的RMS(与COM事后产品比较)

Fig. 6 RMS of R, A, and C Components of BDS Real-Time Orbits for SSR Products from Each Analysis Center (Compared with COM Final Product)

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3D RMS,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3D轨道精度均优于12 cm;相比GPS卫星,所有分析中心BDS卫星的3D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。

2.4 信号空间测距误差

图8显示了6个分析中心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

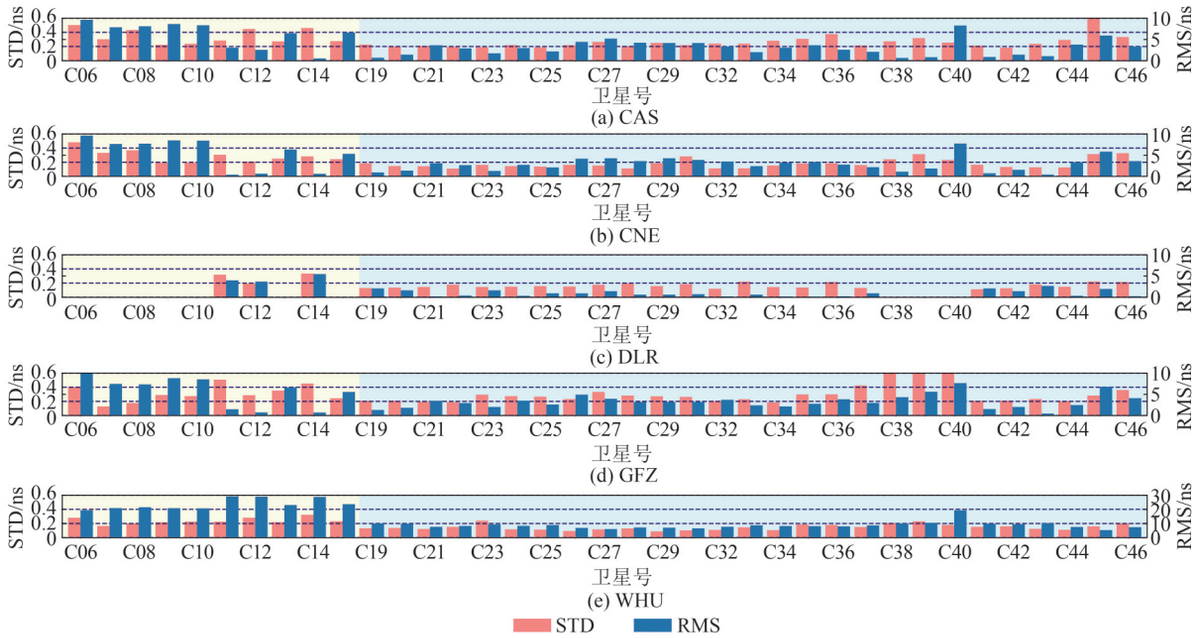


图7　各分析中心SSR产品BDS实时钟差STD和RMS(与COM事后产品比较)

Fig. 7　STD and RMS of BDS Real-Time Clock for SSR Products from Each Analysis Center (Compared with COM Final Product)

表5　各分析中心SSR产品BDS实时轨道与钟差的平均精度(与COM事后产品比较)

Table 5　Mean Accuracy of Real-Time BDS Orbit and Clock for SSR Products from Each Analysis Center (Compared with COM Final Product)

SSR产品代号	BDS轨道类型	轨道误差/cm				钟差误差/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

卫星不同分析中心的SISRE值符合较好。

表6统计了6个分析中心所有的GPS/BDS卫星的SISRE平均值。GPS卫星的SISRE平均值在5 cm以内。其中,WHU的SISRE最小(2.12 cm);CNE和DLR的SISRE差异不大,CNE略优于DLR;GFZ和CAS的SISRE差异不大(约4.10 cm),GFZ略优于CAS。不同分析中心的GPS卫星的SISRE的大小顺序为:WHU<GMV<CNE<DLR<GFZ<CAS。对于BDS IGSO卫星,CAS和CNE的SISRE表现出较好的

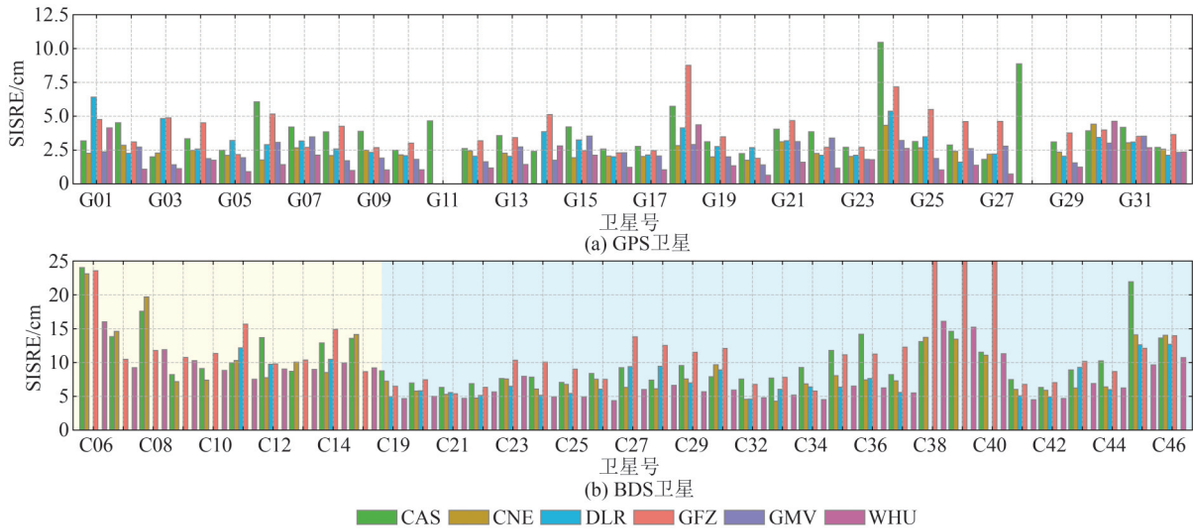


图8 各分析中心SSR产品的每颗GPS/BDS卫星的SISRE

Fig. 8 SISRE for Each GPS/BDS Satellite of SSR Products from Each Analysis Center

一致性;GFZ和WHU的BDS-3 IGSO卫星的SISRE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5个分析中心中最佳的。

表6 各分析中心SSR产品在2022年年积日第100—110天的GPS/BDS卫星的平均SISRE/m

Table 6 Mean SISRE of GPS/BDS Satellites of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 2022/m

卫星类型	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,实验选取了11 d(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定位实验[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卫星数为8~23颗,GPS卫星数为9~10颗。实验中PPP观测值模型采用非差非组合,具体的处理策略见表7。

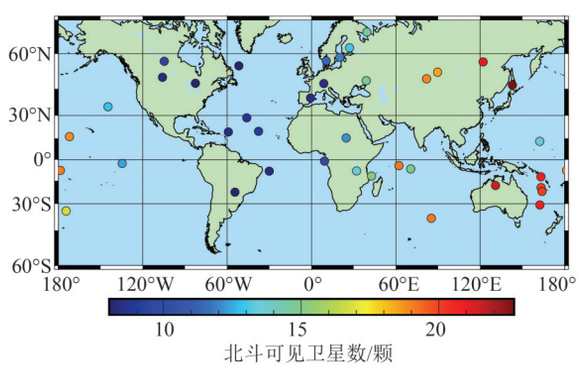


图9 MGEX测站分布及2022年年积日第105天的各测站上北斗卫星可见数统计

Fig. 9 Distribution of MGEX Stations and Statistics of the Number of Visible BDS Satellites at Each Station on Day of Year 105 in 2022

3.2 实时PPP动态定位性能分析

根据6个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E、N、U方向收敛后的均方根误差(root mean square error,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年年积日第105天使用各分析中心实时轨道钟差产品的单GPS和GPS/BDS组合动态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 d 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 d 38个测站的单GPS和GPS/BDS动态PPP的收敛情况(包括收敛时间的中位数、25%

表 7　实时PPP处理策略

Table 7　Real-Time PPP Processing Strategy

处理内容	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/s	30
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

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钟差的平均精度较差（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。

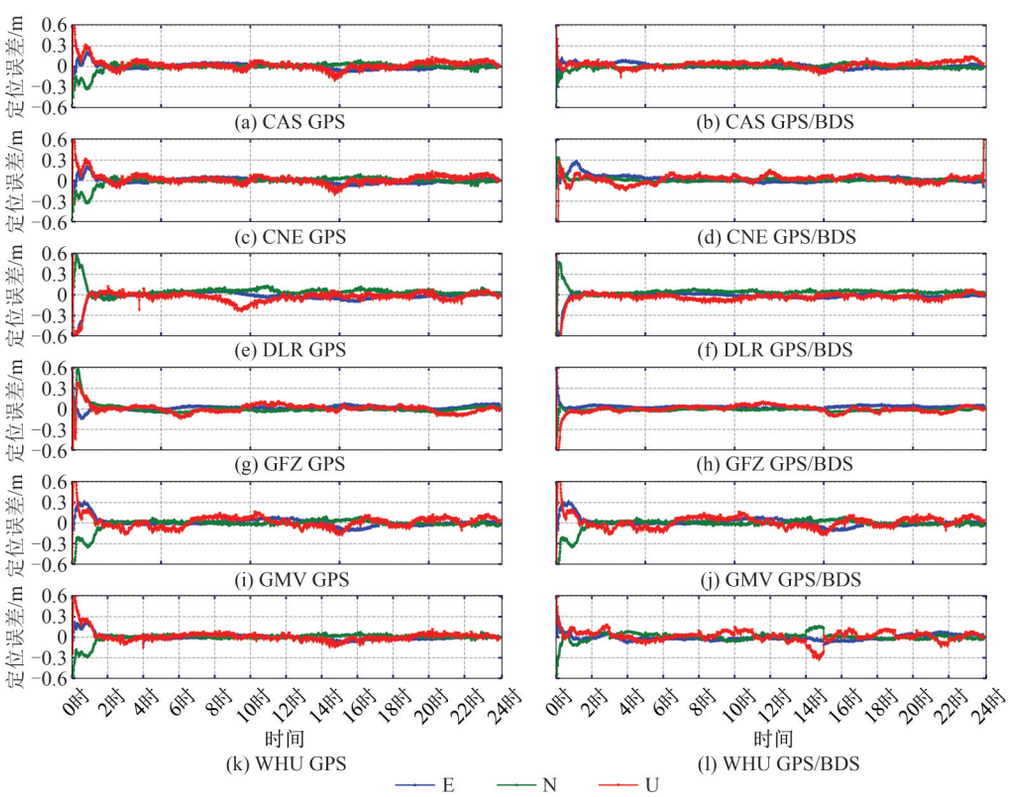


图10　REDU测站在2022年第105天的动态PPP结果在E、N、U方向上的时间序列（与IGS周解比较）

Fig. 10　Time Series of the Kinematic PPP Results in the E, N, and U Directions from REDU on Day of Year 105 in 2022 (Compared with IGS Weekly Solution)

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3D定位精度中，WHU有最佳的定位性能（7.5 cm），3D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3D位置精度均有一定

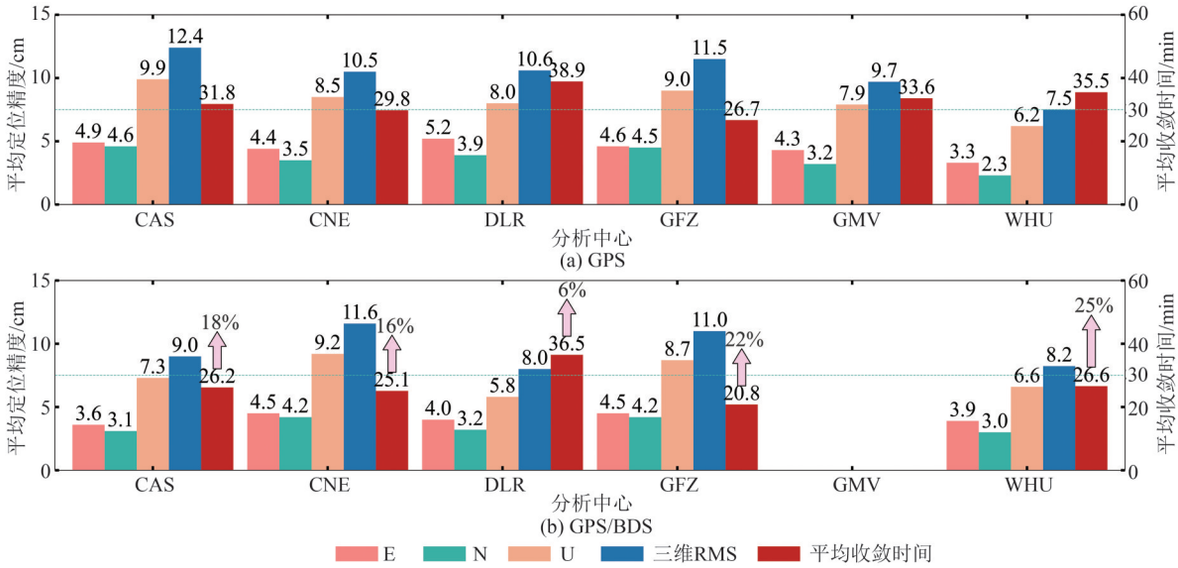


图11 各分析中心SSR产品在2022年第100—110天的单GPS和GPS/BDS组合动态PPP结果在E、N、U方向上的平均定位精度及平均收敛时间

Fig. 11 Average Positioning Accuracy and Average Convergence Time in the E, N, and U Directions for GPS-Only and GPS/BDS Combined Kinematic PPP Results of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 2022

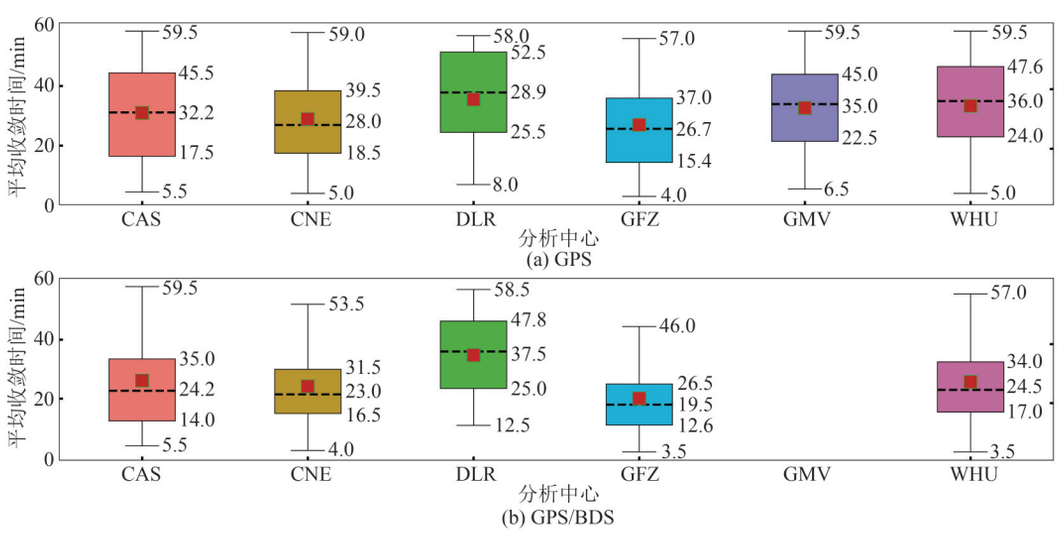


图12 各分析中心SSR产品在2022年第100—110天的单GPS和GPS/BDS组合动态PPP收敛时间的箱线图统计

Fig. 12 Boxplot Statistics of Convergence Time for GPS-Only and GPS/BDS Combined Kinematic PPP Results of SSR Products from Each Analysis Center for Day of Year 100 to 110 in 2022

程度的提升;相反地,对于CNE和WHU产品,北斗卫星的加入导致E、N、U 3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5 cm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。

4 结 语

本文评估了6个分析中心播发的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3D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3D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3D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、5.91 cm。

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 E、N、U方向上的定位精度优于10 cm,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 H, CHEN X Y, PAN Y X, et al. PRIDE PPP-AR: An Open-Source Software for GPS PPP Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 91.

[2] 张小红,李星星,郭斐,等.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.
ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, GUO Fei, et al. GNSS Precise Point Positioning Theory, Methods and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2021.

[3] DU Y J, WANG J L, 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 X, WANG H D, LI S Y, et al. GIL: A Tightly Coupled GNSS PPP/INS/LiDAR Method for Precise Vehicle Navigation[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 26-43.

[5] 糜晓龙,袁运斌,张宝成. BDS-3和Galileo组合的RTK定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 113-118.
MI Xiaolong, YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng. RTK Positioning Performance Analysis for Combined BDS-3 and Galileo[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(1): 113-118.

[6] 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.
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.

[7] 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, 41(6): 722-728.
YE Shirong, ZHAO Lewen, CHEN Dezhong, et al. Real-Time Deformation Monitoring Date Processing Based on BDS Triple-Frequency Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2016,41(6): 722-728.

[8] China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou Navigation Satellite System[M]. Beijing: China Satellite Navigation Office, 2019.

[9] YANG Y X, GAO W G, GUO S R, et al. Introduction to BeiDou-3 Navigation Satellite System [J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.

[10] 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.
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.

[11] GU S F, GUO R X, GONG X P, et al. Real-Time Precise Point Positioning Based on BDS-3 Global Short Message Communication[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(4): 107.

[12] 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.

[13] 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.
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.

[14] ZHANG L, YANG H Z, 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 S, GE M R, et al. Investigation of the Performance of Real-Time BDS-Only Precise Point Positioning Using the IGS Real-Time Service [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 66.

[16] WANG Z Y, LI Z S, WANG L, et al. Assessment of Multiple GNSS Real-Time SSR Products from Different Analysis Centers[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(3): 85.

[17] 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.

[18] PAN L, LI X P, YU W K, et al. Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning with Both BDS-3 and BDS-2 Observations[J]. *Sensors*, 2020, 20(21): 6027.

[19] UHLEMANN M, GENDT G, RAMATSCHI M, et al. GFZ Global Multi-GNSS Network and Data Processing Results[C]//IAG Scientific Assembly, Postdam, Germany,2013.

[20] GUO J, XU X L, ZHAO Q L, et al. Precise Orbit Determination for Quad-Constellation Satellites at Wuhan University: Strategy, Result Validation, and Comparison[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(2): 143-159.

[21] 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.
ZHAO Shuang. Research on BDS/GPS Real-Time Precise Point Positioning Method[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2018.

[22] HADAS T, BOSY J. IGS RTS Precise Orbits and Clocks Verification and Quality Degradation over Time[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(1): 93-105.

[23] ELSOBEIEY M, AL-HARBI S. Performance of Real-Time Precise Point Positioning Using IGS Real-Time Service[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 565-571.

[24] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast Versus Precise Ephemerides: A Multi-GNSS Perspective[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(2): 321-333.

[25] ZHANG Y Z, KUBO N, CHEN J P, et al. Initial Positioning Assessment of BDS New Satellites and New Signals[J]. *Remote Sensing*,2019,11(11):1320.

[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] 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.
LIU Lu, GUO Jinyun, ZHOU Maosheng, 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.

[28] 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.
ZHANG Xi, LIU Changjian, ZHANG Fan, 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.

[29] KAZMIERSKI K, HADAS T, SOŚNICA K. Weighting of Multi-GNSS Observations in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 84-99.

[30] ZHOU F, DONG D N, LI W 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): 33-43.