



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: CNES 多系统 OSB 产品质量分析及实时精密单点定位性能评估
作者: 许国振, 任晓东, 张小红
DOI: 10.13203/j.whugis20230376
收稿日期: 2024-01-18
网络首发日期: 2024-02-29
引用格式: 许国振, 任晓东, 张小红. CNES 多系统 OSB 产品质量分析及实时精密单点定位性能评估[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20230376>



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.whugis20230376

引用格式：

许国振, 任晓东, 张小红. CNES 多系统 OSB 产品质量分析及实时精密单点定位性能评估 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230376 (XU Guozhen, REN Xiaodong, ZHANG Xiaohong. Quality Analysis Of Multi-GNSS OSB Products from CNES and Its Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230376)

CNES 多系统 OSB 产品质量分析及实时精密单点定位性能评估

许国振¹, 任晓东^{1,2}, 张小红^{1,2,3}

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

2 湖北珞珈实验室, 湖北 武汉, 430079

3 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘要：面向原始观测值的绝对信号偏差 (observable-specific signal bias, OSB) 为多频多模 GNSS 数据处理提供了一种简单、统一的相位/伪距偏差修正方式, 其实时产品质量直接决定了整数解实时精密单点定位 (real time precise point positioning with ambiguity resolution, RT PPP-AR) 效果。法国国家空间研究中心 (centre national d'études spatiales, CNES) 作为目前唯一公开提供实时 OSB 产品的研究机构, 推动了多频多系统 RT PPP-AR 的实际应用。本文详细分析并评估了 CNES 实时 OSB 产品的质量及其 RT PPP-AR 定位性能, 以便为更多实时精密定位用户应用提供参考。实验结果表明: 在 CNES 实时 OSB 产品质量方面, 其产品可用率、稳定性以及精度均具有较好表现。其中, GPS/Galileo/BDS 三系统的相位/伪距 OSB 产品可用率达 90% 以上, 但部分卫星 (如 G28、E02、E07、E21) 可用率仅在 40%~80%; GPS/Galileo 相位 OSB 产品稳定性均优于 0.15 周, BDS 稳定性略差于前两者, 其 GPS/Galileo/BDS 日平均标准差 (standard deviation, STD) 分别为 0.085、0.117、0.228 周; 通过 OSB 修正以后, GPS/Galileo/BDS 卫星宽巷 (wide lane, WL) 与窄巷 (narrow lane, NL) 模糊度残差较小, 其在 ± 0.25 周以内的百分比分别为 92.4%、95.9%、86.6% 和 88.4%、91.5%、87.4%, 可满足 PPP 模糊度固定的需求。利用 MGEX 实测数据验证其 RT PPP-AR 定位效果, 结果表明: 基于 CNES 实时 OSB 产品可实现动态厘米级 RT PPP-AR 的定位精度, GPS+Galileo+BDS 三系统 RT PPP-AR 定位误差在东、北、天方向分别为 1.16 cm、0.95 cm 和 2.78 cm, 相比未做 OSB 修正的浮点解 PPP 结果, RT PPP-AR 的收敛时间可缩短 40% 以上; 基于 CNES 实时 OSB 产

收稿日期：2024-01-18

项目资助：国家自然科学基金 (42174031, 42230104); 湖北珞珈实验室开放基金资助项目 (2201000038); 武汉市知识创新专项-曙光计划项目; 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目。

第一作者：许国振, 硕士生, 主要从事实时精密单点定位方面的研究。guozxu@whu.edu.cn

通讯作者：任晓东, 副教授。xdren@whu.edu.cn

品可实现 BDS 单系统模糊度固定，定位精度相比浮点解有显著提升，模糊度固定成功率约为 94%。

关键词：实时精密单点定位；模糊度固定；绝对信号偏差；多频多系统

Quality Analysis Of Multi-GNSS OSB Products from CNES and Its Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning

XU Guozhen¹, REN Xiaodong^{1,2}, ZHANG Xiaohong^{1,2,3}

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Hubei LuoJia Laboratory, Wuhan 430079, China

3 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The Observable-specific Signal Bias (OSB) provides a simple and unified way for phase/pseudo-range bias correction in multi-frequency and multi-constellation GNSS data processing. The quality of real-time OSB products directly affects the performance of Real Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution (RT PPP-AR). The Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) is currently the only research institution that publicly releases real-time OSB products which promote the practical applications of multi-frequency and multi-constellation RT PPP-AR. This study first evaluate and analyze the quality of real-time OSB products from CNES and their impact on RT PPP-AR solution, aiming to provide a reference for increasing RT PPP users.

Method: After evaluating the availability and stability of real-time OSB Products from CNES, the ambiguity residual distribution situation were statistically analyzed. Simulated kinematic and static positioning experiment were carried out to verify the positioning performance of RT PPP-AR based on real-time OSB Products from CNES for several different system combinations.

Results: Experimental results show that real-time OSB products from CNES demonstrate high availability, good stability and high accuracy. As for the availability of phase/pseudo-range OSB products for GPS/Galileo/BDS systems reaches over 90%, but for some satellites (such as G28, E02, E07, E21), the availability ranges from 40% to 80%. The stability of GPS/Galileophase OSB products is better than 0.1 cycles, while that of BDS is slightly lower. The daily average standard deviations (STD) for GPS/Galileo/BDS systems is 0.085, 0.117, and 0.228 cycles, respectively. After applying OSB corrections, the residual ambiguity for wide-lane (WL) and narrow-lane (NL) of GPS/Galileo/BDS satellites is small, with percentages within ± 0.25 cycles as follows: 92.4%, 95.9%, 86.6% for WL, and 88.4%, 91.5%, 87.4% for NL, which satisfies the requirements for ambiguity fixing in PPP. The real-time PPP-AR positioning accuracy using OSB products from CNES is validated with Multi-GNSS Experiment (MGEX) observations. The results show that RT PPP-AR using real-time OSB

products from CNES can achieve centimeter-level positioning accuracy in dynamic mode. The positioning errors in the east, north, and up directions for GPS+Galileo+BDS RT PPP-AR are 1.16 cm, 0.95 cm, and 2.78 cm, respectively. Compared to float PPP results without OSB correction, RT PPP-AR significantly reduces the convergence time by more than 40%. **Conclusion:** Ambiguity resolution can be achieved under BDS single system based on real-time OSB products from CNES. And the positioning accuracy is significantly improved compared to float solution, while the fixing rate is around 94%.

Keywords: real-time precise point positioning; ambiguity resolution; observable specific signal bias; multi-frequency and multi-constellation

精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术^[1-3]是利用全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 实现高精度定位服务的一种重要途径。因具有单机作业、机动灵活、全球覆盖等诸多优势, 被广泛用于精密农业、海洋测绘、卫星精密定轨等领域^[4]。

为满足大众用户实时精密定位需求, 国际 GNSS 服务组织 (international GNSS Service, IGS) 在 2001 年成立实时工作组 (real time working group, RTWG) 并定义实时服务 (real time service, RTS) ^[5]。2007 年 RTWG 正式启动实时计划项目 (real time pilot project, RTPP), 并于 2013 年开始提供实时精密产品^[6]。随后, 多家 IGS 分析机构 (analysis center, AC) 开始提供实时产品^[7]。其中, 德国联邦制图和大地测量局 (Federal Agency for Cartography and Geodesy, BKG) 提供 GPS、GLONASS、Galileo 的实时精密轨道、钟差和伪距信号偏差, 中国科学院 (Chinese Academy of Sciences, CAS) 提供 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 的实时精密轨道、钟差、伪距信号偏差和电离层天顶方向总电子含量 (vertical total electron content, VTEC) 等改正参数, 法国国家空间研究中心 (Centre National d'Etudes Spatiales, CNES) 提供 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 的实时精密轨道、钟差、伪距信号偏差、相位信号偏差和电离层 VTEC 等。相关机构播发实时精密产品的详细情况如表 1 所示。

国内外学者针对实时精密单点定位 (real time precise point positioning, RT PPP) 开展了大量研究^[8-11], 研究结果表明, 实时精密轨道和钟差产品的精度能够满足用户需要, 且 RT PPP 收敛后能够达到厘米级的定位精度。同时, 动态定位模式下, 多系统 RT PPP 仍需要 15 分钟使 E、N、U 方向的定位精度分别收敛至 0.1 m、0.1 m、0.2 m。为了缩短 PPP 收敛时间, 提高定位精度, PPP 模糊度固定技术 (precise point positioning with ambiguity resolution, PPP-AR) 应运而生, 成为 GNSS 精密定位领域的研究热点^[12-14]。PPP-AR 实现的关键是消除伪距和相位偏差的影响。传统伪距偏差和相位偏差以差分码偏差 (differential code bias, DCB) ^[15]

和相位小数周偏差 (fractional cycle bias, FCB) [16] 形式表达, 是一种相对形式。随着 GNSS 卫星频率数量的增多, DCB 和 FCB 的种类越来越多, 组合形式愈发复杂, 为了提供简便、统一的偏差产品, 避免因频率选择和观测值组合形式不同带来产品使用的不便, IGS 工作组在 2016 年提出了基于原始观测值的绝对信号偏差 [17] (observable-specific signal bias, OSB), 用于 RTCM 标准 [18], 是实时伪距和相位信号偏差播发的唯一形式。目前, 针对 OSB 产品及 PPP 定位主要以事后产品解算和定位性能分析为主 [19,20,21]。近年来, CNES 机构已经开始提供实时 OSB 产品, 也是目前唯一一个提供实时 OSB 产品的研究机构。但是, 针对其实时 OSB 产品质量及 RT PPP-AR 定位性能的评估和研究非常少 [22]。因此, 有必要对其进行深入研究。

本文首先介绍了 CNES 提供的实时 OSB 产品生成方式及其参数含义, 以及非差非组合模糊度固定的方法和原理。然后, 从可用率、稳定性、非差模糊度残差分布三个方面对 CNES 提供的实时 OSB 产品的质量进行全面评估与分析。最后, 基于全球多系统实验网 (multi-GNSS experiment, MGEX) 测站, 验证基于实时 OSB 产品的 RT PPP-AR 定位性能。

表 1 不同分析机构提供的实时精密产品

Tab.1 Real-time Products Provided by Different ACs

机构	卫星系统	产品	间隔/s
GMV	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit	5
		Clock	5
		Code bias	5
BKG	GPS/GLONASS/Galileo	Orbit	60
		Clock	5
		Code bias	60
ESA	GPS	Orbit	5
		Clock	5
GFZ	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit	5
		Clock	5
		Code bias	5
CNES	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit	5
		Clock	5
		Code bias	5
		Phase bias	5
		Ionosphere VTEC	60
CAS	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit	5
		Clock	5
		Code bias	5
		Ionosphere VTEC	60
WHU	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit	5

		Clock	5
DLR	GPS/GLONASS/Galileo/BDS	Orbit	30
		Clock	5
		Code bias	30

1. CNES 实时 OSB 产品生成方法及 PPP-AR 定位

1.1 CNES 实时 OSB 产品生成方法

CNES 在服务端以整数相位钟的形式^[14-15]估计生成伪距信号偏差和宽巷偏差、相位钟。整数相位钟法生成的产品基于特定的观测值组合,严重制约了用户对非差定位模型和观测值组合形式的选择。因此, Laurichesse 等人提出一种方法^[8], 服务端通过网络接收全球 MGEX 测站实时观测值, 根据广播星历和卫星精密定轨的输出, 进行无电离层 (ionosphere free, IF) 组合 PPP 解算, 通过整数相位钟法生成相位钟差和宽巷偏差之后, 将两者转化为各频率的非组合相位信号偏差, CNES 基于此提供非组合相位信号偏差并通过网络播发给用户, 其实现流程如图 1 所示。用户可以根据海事无线电技术委员会 (Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM) 制定的标准, 通过 RTCM 网络传输协议 (networked transport of rtm via internet protocol, NTRIP) 从 NTRIP 服务器上实时接收 CNES 播发的非组合相位信号偏差产品, 同时还有伪距信号偏差、实时精密轨道钟差改正数产品。

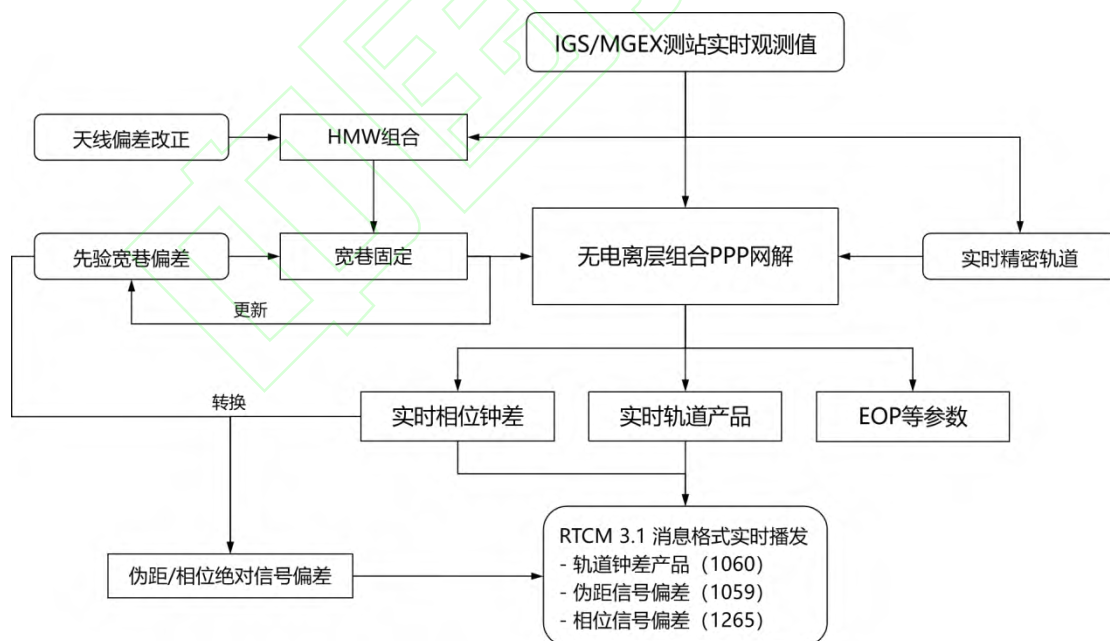


图 1 CNES 的 OSB 产品实时生成与播发流程

Fig.1 Real-time Generation and Broadcasting Process of CNES's OSB Products

下面首先给出非组合 PPP 定位模型, 然后推导由 CNES 整数相位钟产品至非组合信号偏差产品的转化过程, 最后给出基于此的非组合模糊度固定策略。

伪距和载波相位原始观测方程为

$$\begin{aligned} P_{r,f}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s + \gamma_f \cdot I_{r,1}^s + T_r^s + b_{r,f} - b_f^s + \varepsilon_{r,f}^s \\ L_{r,f}^s &= \rho_r^s + dt_r - dt^s - \gamma_f \cdot I_{r,1}^s + T_r^s + \lambda_f \cdot (N_{r,f}^s + B_{r,f} - B_f^s) + \zeta_{r,f}^s \end{aligned} \quad (1)$$

式中, s, r, f 分别表示卫星、接收机和载波频率, $P_{r,f}^s$ 和 $L_{r,f}^s$ 分别表示伪距和载波相位观测值, ρ_r^s 表示接收机天线相位中心到卫星天线相位中心的几何距离, dt_r 和 dt^s 分别表示接收机钟差和卫星钟差, γ_f 表示电离层映射因子 ($\gamma_f = \lambda_f^2 / \lambda_1^2$), $I_{r,1}^s$ 表示第一个载波频率上的电离层延迟, T_r^s 表示对流层延迟, $b_{r,f}$ 和 b_f^s 分别表示第 f 个载波频率上的接收机端和卫星端伪距硬件延迟, $B_{r,f}$ 和 B_f^s 分别表示第 f 个载波频率上的接收机端和卫星端相位延迟, 单位为周 (cycle), λ_f 表示第 f 个载波频率对应的载波波长, $N_{r,f}^s$ 表示第 f 个载波频率对应的相位观测值的整周模糊度, 单位为周 (cycle), $\varepsilon_{r,f}^s$ 和 $\zeta_{r,f}^s$ 分别表示伪距和载波相位观测值的测量噪声与多路径效应之和。

精密钟差改正后得到的重参数化方程的形式为:

$$\begin{aligned} p_{r,1}^s &= \mu_r^s \cdot x + \hat{dt}_r + \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \varepsilon_{r,1}^s \\ p_{r,2}^s &= \mu_r^s \cdot x + \hat{dt}_r + \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \varepsilon_{r,2}^s \\ l_{r,1}^s &= \mu_r^s \cdot x + \hat{dt}_r - \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \lambda_1 \cdot \hat{N}_{r,1}^s + \zeta_{r,1}^s \\ l_{r,2}^s &= \mu_r^s \cdot x + \hat{dt}_r - \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \lambda_2 \cdot \hat{N}_{r,2}^s + \zeta_{r,2}^s \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $p_{r,i}^s$ 和 $l_{r,i}^s$ 分别表示伪距和相位观测值的 OMC (observe minus computed), μ_r^s 表示接收机到卫星的单位向量, x 表示接收机位置的状态增量, $m_{r,w}^s$ 表示对流层天顶湿延迟的投影函数, $Z_{r,w}$ 表示天顶对流层湿延迟, 部分参数的展开形式如下:

$$\begin{aligned} \hat{dt}_r &= t_r + b_{r,IF} = t_r + (\alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2}) \\ \hat{I}_{r,1}^s &= I_{r,1}^s + \beta \cdot DCB_{r,12} - \beta \cdot DCB_{12}^s \\ \hat{N}_{r,1}^s &= N_{r,1}^s + (B_{r,1} - B_1^s) + [b_{IF}^s - b_{r,IF} + \beta \cdot (DCB_{r,12} - DCB_{12}^s)] / \lambda_1 \\ \hat{N}_{r,2}^s &= N_{r,2}^s + (B_{r,2} - B_2^s) + [b_{IF}^s - b_{r,IF} + \gamma_2 \cdot \beta \cdot (DCB_{r,12} - DCB_{12}^s)] / \lambda_2 \\ \alpha &= f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2), \beta = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ DCB_{r,12} &= b_{r,1} - b_{r,2}, DCB_{12}^s = b_1^s - b_2^s \\ b_{r,IF} &= \alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2}, b_{IF}^s = \alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} DCB_{r,12} &= b_{r,1} - b_{r,2}, DCB_{12}^s = b_1^s - b_2^s \\ b_{r,IF} &= \alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2}, b_{IF}^s = \alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s \end{aligned} \quad (4)$$

非组合相位信号偏差 \bar{B}_1^s 和 \bar{B}_2^s 可以通过伪距信号偏差 \bar{b}_1^s 、 \bar{b}_2^s 和宽巷偏差 μ_{WL}^s 、相位钟 dt_{IRC}^s 进行转化得到。

利用 HMW (Hatch–Melbourne–Wübbena) [23] 组合计算宽巷模糊度：

$$\varphi_1 - \varphi_2 + \eta_1 \cdot P_1 + \eta_2 \cdot P_2 = N_{WL} + \mu_{r,WL} - \mu_{WL}^s \quad (5)$$

理论上，将伪距和相位 OSB 改正到原始观测值上之后，计算得到的宽巷模糊度不再包含卫星端硬件延迟：

$$(\varphi_1 + \bar{B}_1^s) - (\varphi_2 + \bar{B}_2^s) + \eta_1 \cdot (P_1 + \bar{b}_1^s) + \eta_2 \cdot (P_2 + \bar{b}_2^s) = N_{WL} + \mu_{r,WL} \quad (6)$$

相位观测值的无电离层组合形式为：

$$\alpha \cdot \lambda_1 \cdot \varphi_1 + \beta \cdot \lambda_2 \cdot \varphi_2 = \rho_r^s + dt_r - dt^s + \lambda_{IF} \cdot (N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s) \quad (7)$$

用 IGS 精密钟差改正的方程形式为：

$$\alpha \cdot \lambda_1 \cdot \varphi_1 + \beta \cdot \lambda_2 \cdot \varphi_2 = \rho_r^s + dt_r - dt_{IGS}^s + \lambda_{IF} \cdot (N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s) \quad (8)$$

$$dt_{IGS}^s = dt^s + b_{r,IF} = dt^s + \alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s \quad (9)$$

若将相位 OSB 改正到原始相位观测值上之后，方程右边应不再包含卫星端相位硬件延迟，此时用相位钟改正卫星钟差，得到方程：

$$\alpha \cdot \lambda_1 \cdot (\varphi_1 + \bar{B}_1^s) + \beta \cdot \lambda_2 \cdot (\varphi_2 + \bar{B}_2^s) = \rho_r^s + dt_r - dt_{IRC}^s + \lambda_{IF} \cdot (N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s) \quad (10)$$

$$dt_{IRC}^s = dt^s + B_{r,IF} = dt^s + \alpha \cdot B_1^s + \beta \cdot B_2^s \quad (11)$$

分别将式 (5) 代入式 (6)，式 (8) 代入式 (10)，可以得到：

$$\begin{bmatrix} \bar{B}_1^s \\ \bar{B}_2^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 & \gamma_2 - 1 \\ \lambda_2 - \lambda_1 & \gamma_2 \cdot \lambda_1 - \lambda_2 \\ -\lambda_2 & \gamma_2 - 1 \\ \lambda_2 - \lambda_1 & \gamma_2 \cdot \lambda_1 - \lambda_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{WL}^s - \eta_1 \cdot \bar{b}_1^s - \eta_2 \cdot \bar{b}_2^s \\ dt_{IGS}^s - dt_{IRC}^s \end{bmatrix} \quad (12)$$

基于式 (12)，服务端可以利用伪距信号偏差 \bar{b}_1^s 、 \bar{b}_2^s 和宽巷偏差 μ_{WL}^s 、相位钟 dt_{IRC}^s 转化得到非组合相位信号偏差 \bar{B}_1^s 和 \bar{B}_2^s ，然后通过网络播发给用户，用户端使用非组合伪距和相位信号偏差产品进行改正时，无需顾及服务端的数学模型和观测值组合形式，可以根据自身需要任意选择。式 (12) 简化后，可以得到 OSB 产品的含义：

$$\begin{aligned}
\bar{b}_1^s &= \beta \cdot (b_1^s - b_2^s) \\
\bar{b}_2^s &= -\alpha \cdot (b_1^s - b_2^s) \\
\bar{B}_1^s &= B_1^s - b_{IF}^s / \lambda_1 = B_1^s - (\alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s) / \lambda_1 \\
\bar{B}_2^s &= B_2^s - b_{IF}^s / \lambda_2 = B_2^s - (\alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s) / \lambda_2
\end{aligned} \tag{13}$$

将 OSB 产品直接改正到原始伪距和相位观测值上，能够消除原始观测值中存在的卫星端伪距和相位硬件延迟，改正后式（3）中模糊度参数的含义为：

$$\begin{aligned}
\hat{N}_{r,1}^s &= N_{r,1}^s + B_{r,1} + [-b_{r,IF} + \beta \cdot DCB_{r,12}] / \lambda_1 \\
\hat{N}_{r,2}^s &= N_{r,2}^s + B_{r,2} + [-b_{r,IF} + \gamma_2 \cdot \beta \cdot DCB_{r,12}] / \lambda_2
\end{aligned} \tag{14}$$

1.2 多系统 PPP-AR 定位及模糊度固定策略

经过 OSB 产品修正后，模糊度参数中不再包含卫星端伪距和相位硬件延迟。采用逐级模糊度固定策略实现 PPP-AR 定位，首先固定宽巷，利用 HMW(Hatch - Melbourne - Wübbena) 组合^[24,25,26]计算宽巷模糊度：

$$\begin{aligned}
\lambda_{MW} \cdot \hat{N}_{MW} &= (f_1 L_1 - f_2 L_2) / (f_1 - f_2) - (f_1 P_1 + f_2 P_2) / (f_1 + f_2) \\
\lambda_{MW} &= c / (f_1 - f_2), \hat{N}_{MW} = N_1 - N_2 + B_{r,MW} - B_{MW}^s
\end{aligned} \tag{15}$$

式中， λ_{MW} 为宽巷波长， \hat{N}_{MW} 为宽巷浮点模糊度。

经过 OSB 产品修正后，宽巷模糊度中存在的卫星端硬件延迟部分已经被消除，进一步通过星间单差消除其中存在的接收机端硬件延迟，恢复其整数特性：

$$SD(\hat{N}_{s_i, MW}^{s_j}) = (\hat{N}_{s_i, 1} - \hat{N}_{s_i, 2}) - (\hat{N}_{s_j, 1} - \hat{N}_{s_j, 2}) \tag{16}$$

式中， $\hat{N}_{s_i, MW}^{s_j}$ 表示卫星 s_i 和 s_j 的宽巷模糊度的星间单差值。

HMW 组合波长较长（约 86 cm），式（16）具备整数特性，采用 Round 方法取整固定^[27]。宽巷固定之后，构造虚拟观测方程，对状态量进行滤波。从滤波后的状态量中取出 \hat{N}_1 的值，计算 \hat{N}_1 的星间单差值。值得注意的是，虽然式（17）同样具备整数特性，但由于 \hat{N}_1 的波长较短（约 19 cm），测量噪声和多路径效应的影响导致 \hat{N}_1 和 N_1 的差值可能高达 10 周^[15]，同时必须充分考虑不同卫星 \hat{N}_1 模糊度之间的相关性，因此使用 LAMBDA 方法^[28,29,30]来固定 N_1 。

$$SD(\hat{N}_{s_i, N_1}^{s_j}) = \hat{N}_{s_i, 1} - \hat{N}_{s_j, 2} \tag{17}$$

固定 N_1 之后，将其作为虚拟观测值，构建虚拟观测方程对状态量进行滤波，即可得到固定解。

2. 实验和结果分析

2.1 实验数据和处理策略

为了评估 CNES 机构提供的实时 OSB 产品质量及其 RT PPP-AR 全球定位性能，本文选取全球均匀分布的 50 个 MGEX 测站，2022-10-18 (DOY 291) 到 2022-11-17 (DOY 321) 共计 31 d 的观测数据，实时精密产品为 CNES 的实时轨道、钟差及 OSB 产品。观测数据和实时精密产品均通过 BNC (BKG Ntrip Client) 软件实时接收并保存。实验测站全球分布如图 2 所示。

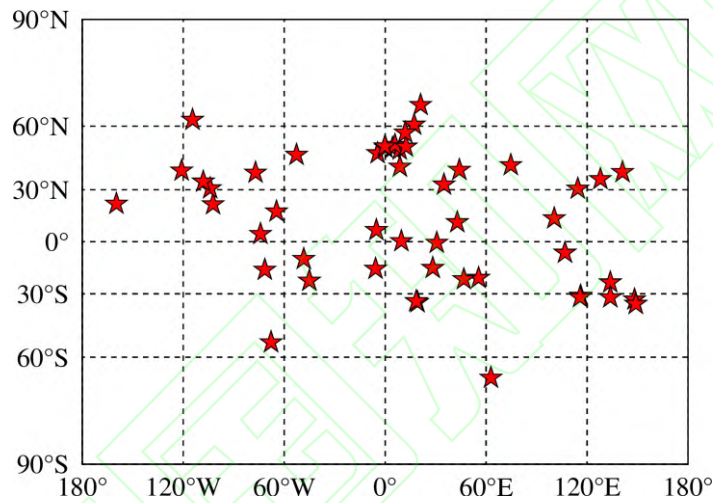


图 2 MGEX 测站的全球分布图

Fig.2 Global Distribution Map of MGEX Stations

本文的数据处理策略如表 2 所示。采用扩展卡尔曼滤波 (extended kalman filter, EKF) 对状态量进行估计。静态定位模式下，接收机坐标当作随机常数估计，动态定位模式下，则视作白噪声估计。相位缠绕采用模型改正^[31]，天线相位中心偏差 (phase center offset, PCO) 和天线相位中心变化 (phase center variation, PCV) 采用 IGS 提供的 igs14_www.atx 文件进行改正^[32-34]。由于天线文件中并未给出 Galileo 和 BDS 的接收机端天线相位中心改正值，因此，使用信号频率最近的 GPS 接收机天线相位中心改正值替代。部分模糊度固定采用数据驱动的高度角优先固定方法，将模糊度子集按照卫星高度角排序，循环剔除高度角最小的卫星直至固定，Ratio 检验和 Bootstrapping 成功率作为判断模糊度固定是否成功的标准。表 3 为本文 RT PPP-AR 定位实验采用的各 GNSS 系统观测值情况。

表 2 PPP AR 实验的参数配置

Tab.2 Parameter Configuration for PPP AR Experiments

参数	配置
观测值类型	双频伪距和相位观测值
卫星系统	GPS/Galileo/BDS

观测值定权模型	GPS/Galileo/BDS 的观测值定权比为 1:2:2; 伪距和相位观测值先验精度分别为 0.3m and 1mm; 高度角定权模型 $\sigma^2 = a^2 + b^2 / \sin^2(E)$
数学模型	非差非组合
滤波器	扩展卡尔曼滤波
采样率	30s
截止高度角	7°
精密轨道钟差	CNES 实时精密轨道和钟差产品
OSB 产品	CNES 实时伪距和相位偏差产品
接收机坐标	白噪声
接收机钟差	白噪声
系统间偏差	随机游走
对流层延迟	干延迟部分使用 Saastamonien 模型改正; 湿延迟部分视作随机游走估计; 对流层投影函数 : GMF
电离层延迟	随机游走
天线改正	igs14_www.atx
模糊度固定检核	Bootstrapping 成功率不低于 95%; Ratio 值不小于 3.0

表 3 多系统 GNSS PPP 定位的观测值选择

Tab.3 Selection of GNSS Measurements for Multi-system PPP

系统	观测值类型
GPS	C1W, L1C; C2W, L2W
Galileo	C1X, L1X; C5X, L5X
BDS	C2I, L2I; C6I, L6I

2.2 OSB 产品质量评估

实时 OSB 产品的可用性 (data availability, DA) 是评估其质量的一个重要指标, 指 OSB 产品可用历元数量与总历元数量的比值。图 3 与图 4 分别给出了实验期间 GPS、Galileo、BDS 系统卫星伪距和相位 OSB 产品的平均可用率情况。可以看到, 大部分卫星伪距 OSB 产品的可用率均为 100%, 对应相位 OSB 产品的可用率不足 100%。G28、E02、E07、E21 卫星伪距 OSB 产品的可用率在 40%~90%之间。C01~C05 均为地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星, 其轨道产品质量较差, 导致北斗 GEO 卫星相位 OSB 产品实时估计精度差, 暂不提供实时 OSB 产品^[35-36]。此外, 由于实验数据段内 C15、C17、C18、C31 卫星处于不可用状态, 因此 CNES 也未提供实时 OSB 产品。

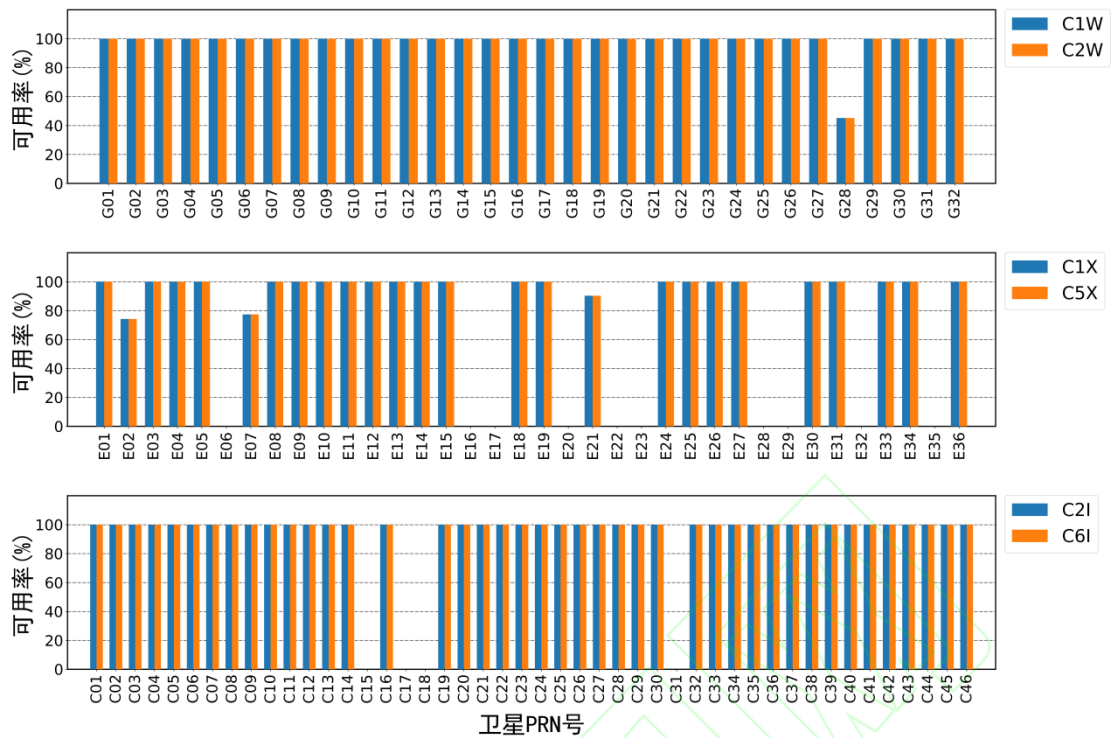


图 3 GPS/Galileo/BDS 三系统的伪距 OSB 可用率情况

Fig. 3 Availability of Pseudorange OSB Products for GPS/Galileo/BDS

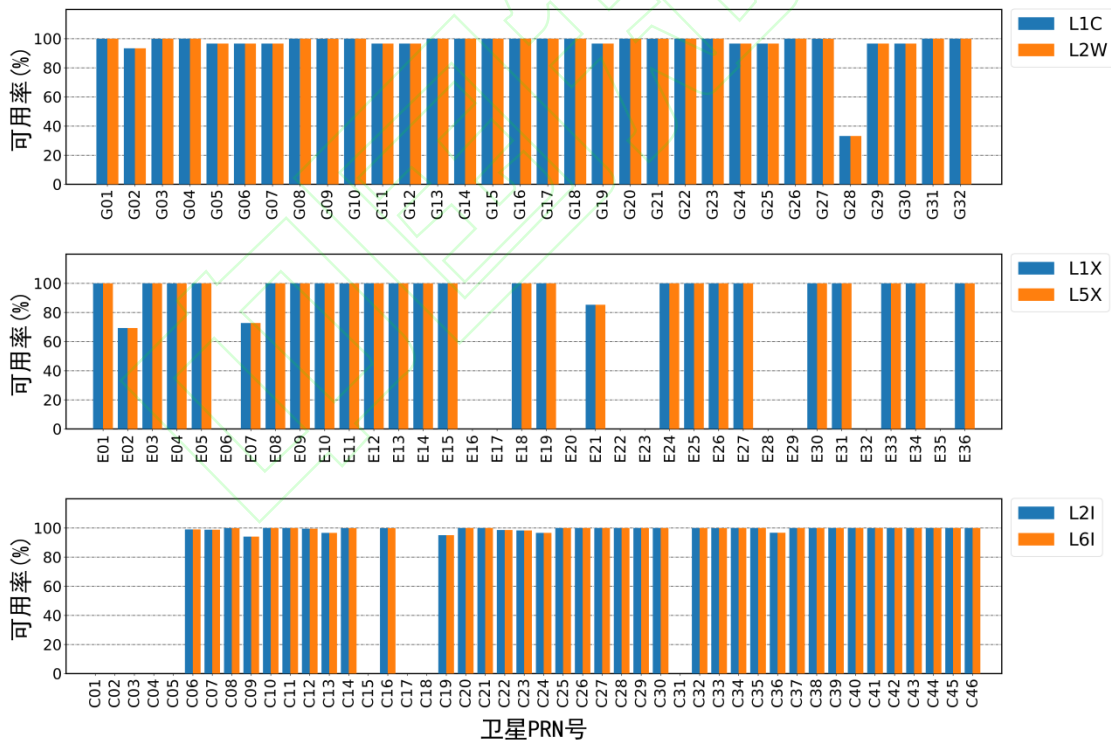


图 4 GPS/Galileo/BDS 三系统的相位 OSB 可用率情况

Fig. 4 Availability of Phase OSB Products for GPS/Galileo/BDS

图 5 给出了 2022/291 至 2022/321 共 31 d 的实时 OSB 产品时序图。由图可以看出，伪距 OSB 的值非常稳定，几乎不变，相位 OSB 的值则有轻微波动。图 6 给出了 2022/291 至 2022/321 共 31 d WUM 提供的事后 OSB 产品时序图，事后 OSB 产品无论伪距还是相位，一天内都只有一个值。表 4 给出了实验日期内 CNES 的相位 OSB 产品的日平均标准差(standard

deviation, STD) 值, WUM 提供的事后 OSB 产品由于一天只有一个值, 因此并未进行统计。可以看出, GPS、Galileo、BDS 卫星两个频率上相位 OSB 产品的 STD 值是相等的。GPS、Galileo 相位 OSB 产品的 STD 值均不超过 0.2 周, 优于 BDS 系统的 0.228 周, 说明 GPS 和 Galileo 相位 OSB 产品的稳定性优于 BDS。

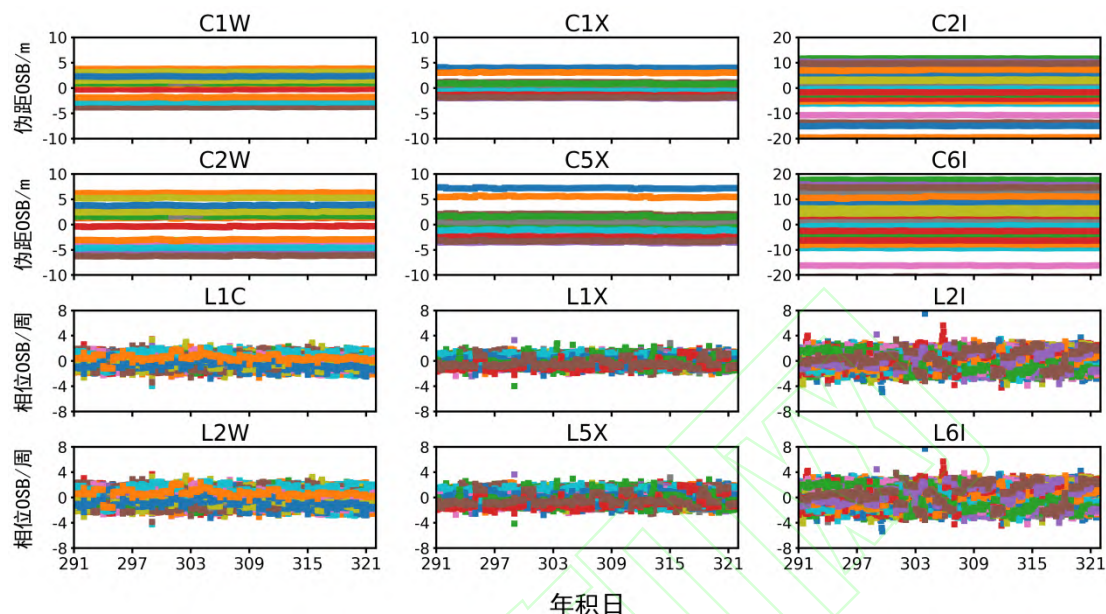


图 5 CNES 提供的 2022/291-2022/321 共 31 天的实时 OSB 产品时间序列

Fig. 5 Time Series of CNES's Real Time OSB Products from 2022/291 to 2022/321

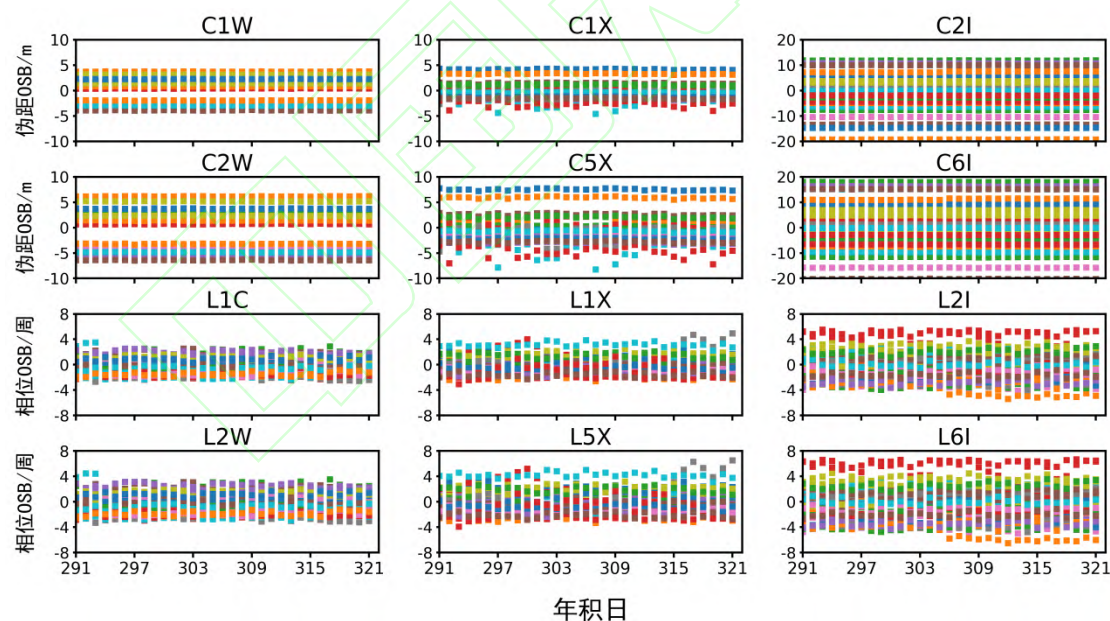


图 6 WUM 提供的 2022/291-2022/321 共 31 天的事后 OSB 产品时间序列

Fig. 6 Time Series of WUM's Post OSB Products from 2022/291 to 2022/321

表 4 CNES 相位 OSB 产品的日平均 STD 值/周

Tab. 4 Daily Average STD Value of CNES's Phase OSB Products

系统	GPS		Galileo		BDS	
观测值类型	L1C	L2W	L1X	L5X	L2I	L6I
标准差	0.085	0.085	0.117	0.117	0.228	0.228

2.3 模糊度残差分布

伪距和相位 OSB 产品消除的是卫星端硬件延迟，为了恢复模糊度参数的整数特性，还需要对模糊度参数作星间单差处理，消除接收机端硬件延迟。具体做法是每个历元选取高度角最大的卫星作为基准星，计算其他卫星与基准星模糊度参数的单差值。这个单差值理论上已经具备整数特性，由于大气残余误差、多路径效应等因素的存在，导致单差值不是严格的整数。经过 OSB 改正的模糊度星间单差值的小数部分，即模糊度残差，理论上符合零均值的正态分布^[37]。图 7 给出了实验日期内宽巷和窄巷模糊度残差的分布情况，表 5 给出了相应的统计结果。综合图 7 和表 5 的结果可以看出，经 CNES 实时 OSB 产品修正后，GPS、Galileo、BDS 宽巷和窄巷的模糊度残差均符合标准正态分布。对于宽巷模糊度残差，GPS、Galileo、BDS 在 ± 0.25 周内的占比分别为 92.37%、95.88%、86.58%，在 ± 0.15 周内的占比分别为 78.69%、86.47%、74.32%。对于窄巷模糊度残差，GPS、Galileo、BDS 在 ± 0.25 周内的占比分别为 88.40%、91.53%、87.42%，在 ± 0.15 周内的占比分别为 71.14%、82.39%、75.27%。

为了对 CNES 实时 OSB 产品的质量进行全面评估，利用 WUM 提供的事后 OSB 产品在进行同样的实验。图 8 给出了模糊度残差的分布情况，表 6 给出了相应的统计结果。综合图 8 和表 6 的结果可以看出，经 WUM 事后 OSB 产品修正后，GPS、Galileo、BDS 宽巷和窄巷的模糊度残差均同样符合标准正态分布。对于宽巷模糊度残差，GPS、Galileo、BDS 在 ± 0.15 周内的占比分别为 84.26%、85.30%、76.26%。对于窄巷模糊度残差，GPS、Galileo、BDS 在 ± 0.15 周内的占比分别为 79.55%、83.36%、76.99%。可以看到，CNES 实时 OSB 产品在恢复模糊度整数特性方面的性能已与 WUM 事后 OSB 产品接近。

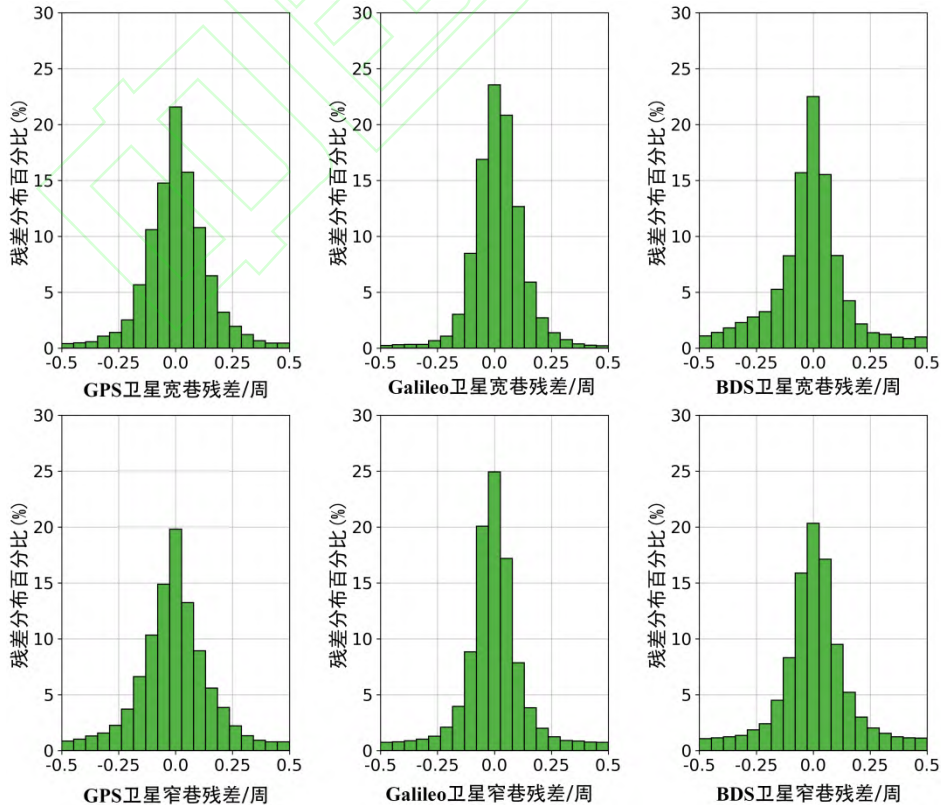


图 7 经 CNES 实时 OSB 产品修正的 GPS/Galileo/BDS 模糊度单差值的小数部分

Fig. 7 Fractional Part of Single Differenced Ambiguity for GPS/Galileo/BDS Corrected by CNES's OSB

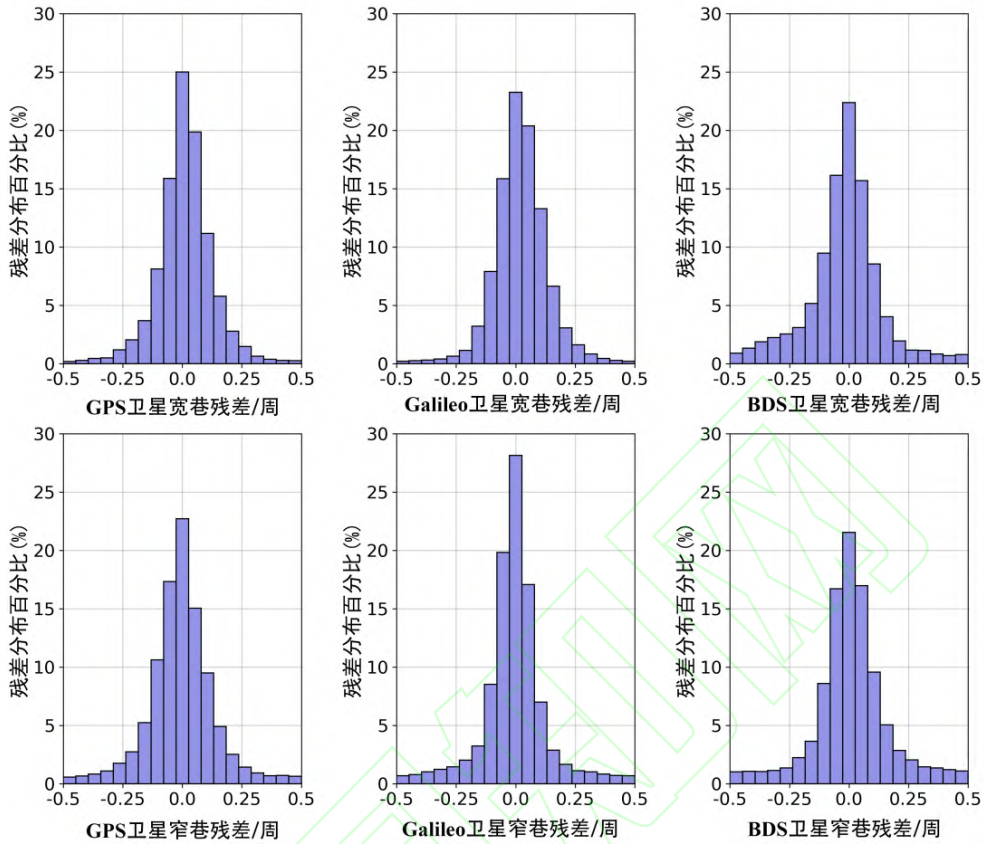


图 8 经 WUM 事后 OSB 产品修正的 GPS/Galileo/BDS 模糊度单差值的小数部分

Fig. 8 Fractional Part of Single Differenced Ambiguity for GPS/Galileo/BDS Corrected by WUM's OSB

表 5 经 CNES 实时 OSB 产品修正的宽巷和窄巷模糊度残差的统计结果

Tab.5 Statistic Results of Ambiguity Residuals of Wide Lane and Narrow Lane Corrected By CNES's OSB

系统	宽巷/周			窄巷/周		
	均值	±0.25	±0.15	均值	±0.25	±0.15
GPS	0.006	92.37%	79.69%	-0.007	88.40%	79.14%
Galileo	0.017	95.88%	86.47%	-0.004	91.53%	82.39%
BDS	-0.017	86.58%	74.32%	0.006	87.42%	75.27%

表 6 经 WUM 事后 OSB 产品修正的宽巷和窄巷模糊度残差的统计结果

Tab.6 Statistic Results of Ambiguity Residuals of Wide Lane and Narrow Lane Corrected By WUM's OSB

系统	宽巷/周			窄巷/周		
	均值	±0.25	±0.15	均值	±0.25	±0.15
GPS	0.011	95.19%	84.26%	-0.005	91.65%	81.55%
Galileo	0.022	95.51%	85.30%	-0.007	91.08%	83.36%
BDS	-0.020	87.57%	76.26%	0.010	88.20%	76.99%

2.4 基于 CNES 实时 OSB 的 RT PPP-AR 定位验证

本文利用 CNES 提供的实时轨道、钟差以及 OSB 产品，分别进行不同组合的静态/动态实时 PPP-AR 实验，并进行定位精度统计，计算定位误差的均方根（root mean square, RMS）值。各测站坐标的参考真值以 IGS 提供的坐标文件（SNX 文件）为准，收敛准则以各方向定位精度连续 10 个历元优于 0.1 m 为准。

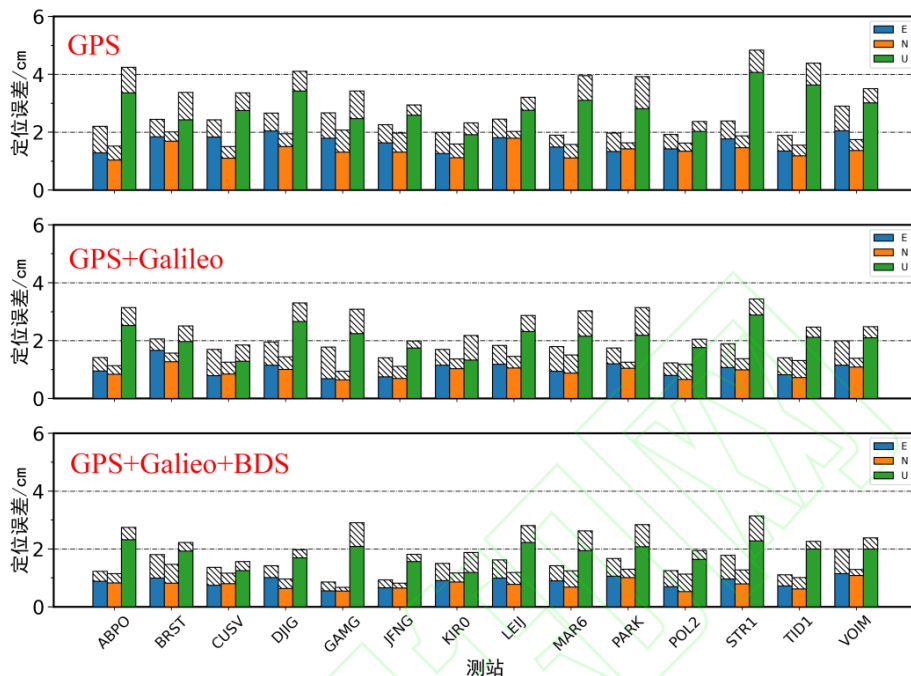


图 9 动态 PPP 浮点解与固定解定位精度对比

Fig. 9 Comparison Between Float and Fixed Solution of Dynamic Test

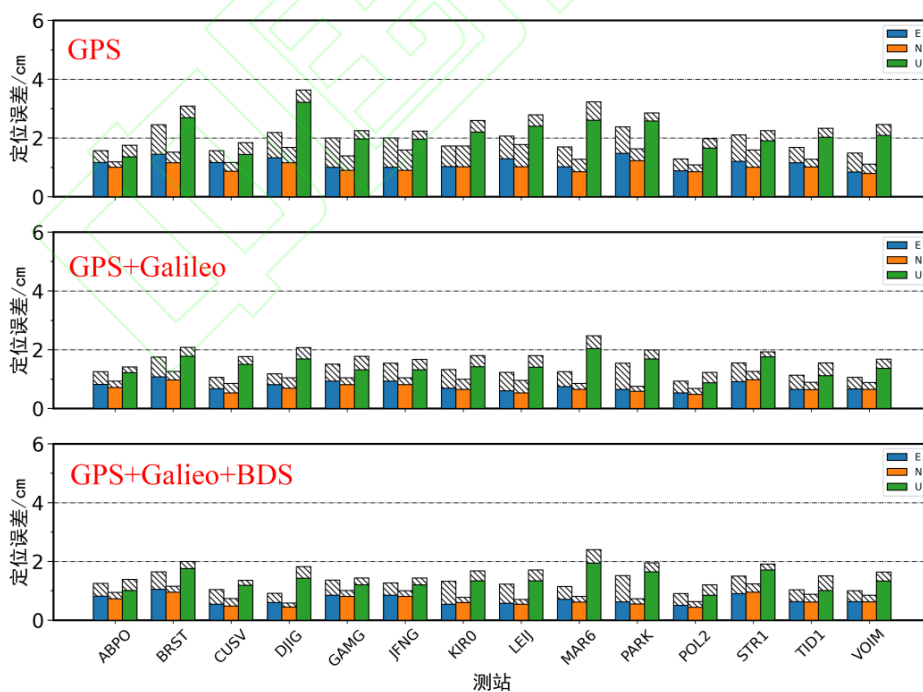


图 10 静态 PPP 浮点解与固定解定位精度对比

Fig. 10 Comparison Between Float and Fixed Solution of Static Test

图 9 和图 10 分别为动态和静态 PPP 模型下各测站不同处理策略的精度统计情况。受篇幅限制，图中只给出 14 个测站的定位结果。表 7 和表 8 分别给出了动态和静态实时 PPP 定位误差统计值。由表 7 和表 8 可以看出，对单 GPS 而言，动态定位模式下浮点解和固定解的定位误差在 E、N、U 方向分别为 3.03、1.93、4.47 cm 和 2.14、1.58、4.00 cm，定位精度提升分别为 29.4%、18.2%、10.6%；静态定位模式下浮点解和固定解的定位误差在 E、N、U 方向分别为 2.42、1.22、3.12 cm 和 1.60、1.04、2.74 cm，定位精度提升分别为 33.8%、14.8%、12.2%。加入 Galileo 后，定位精度有小幅提升，提升主要体现在 U 方向。继续加入 BDS 后，定位精度仍有一定提升。固定解相比浮点解，定位精度提升非常明显，动态 PPP 固定解收敛后的水平精度优于 3 cm，高程精度优于 4 cm；静态 PPP 固定解收敛后的水平精度优于 2 cm，高程精度优于 3 cm。在固定率方面，三种系统组合的平均固定率均高于 98%，GPS、GPS+Galileo、GPS+Galileo+BDS 动态定位模式的固定率分别为 98.53%、99.10%、98.87%，静态定位模式的固定率分别为 98.60%、99.30%、99.01%。

表 7 动态模式浮点解和固定解的定位误差 RMS/cm

Tab.7 Positioning Errors RMS of Float and Fixed Solution of Dynamic Test

系统 组合	浮点解			固定解			提升比例			固定率
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	
G	3.03	1.93	4.47	2.14	1.58	4.00	29.4%	18.2%	10.6%	98.53%
GE	2.48	1.32	3.58	1.42	1.07	3.03	42.7%	18.9%	15.4%	99.10%
GEC	2.04	1.16	3.22	1.16	0.95	2.78	43.2%	18.1%	13.6%	98.87%

表 8 静态模式浮点解和固定解的定位误差 RMS/cm

Tab.8 Positioning Errors RMS of Float and Fixed Solution of Static Test

系统 组合	浮点解			固定解			提升比例			固定率
	E	N	U	E	N	U	E	N	U	
G	2.42	1.22	3.12	1.60	1.04	2.74	33.8%	14.8%	12.2%	98.60%
GE	1.96	0.95	2.50	1.15	0.76	2.24	41.3%	20.0%	10.4%	99.30%
GEC	1.92	0.91	2.31	1.10	0.72	2.06	42.7%	20.8%	10.8%	99.01%

为了直观反映浮点解和固定解收敛速度的差异，每隔 3 h 重置 RT PPP-AR 滤波器。图 11 给出了 ABPO 测站 2022 年第 291 d 天定位结果的时序图，红色为固定解，蓝色为浮点解。表 9 给出了定位误差和收敛时间的统计值。值得注意的是，浮点解中并未使用 OSB 产品或者 DCB 产品进行改正，这是因为伪距频间偏差并不影响其收敛时间，而根据表 3 可以看到本文使用的 GPS 观测值均为精码，因此不需要修正 GPS 伪距观测值的频内偏差。由图 11 可以看出，固定解相比浮点解显著缩短了收敛时间。由表 9 可以看出，GPS、GPS/Galileo、GPS/Galileo/BDS 三种组合静态模式下浮点解的收敛时间分别为 18.25 min、14.87 min、14.37 min，固定解的收敛时间分别为 11.75 min、8.87 min、8.50 min。

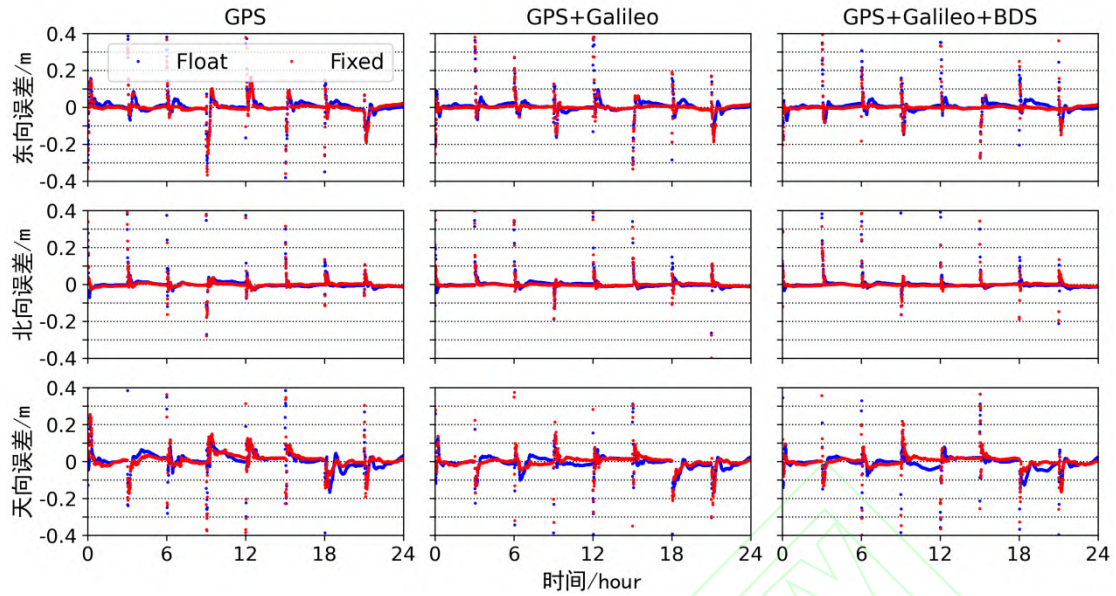


图 11 ABPO 测站 2022/291 天浮点解与固定解定位结果（静态解）

Fig. 11 Positioning Results of Float and Fixed Solution for ABPO in 2022/291 (Static Test)

表 9 静态模式浮点解与固定解的平均定位误差 RMS 和收敛时间

Tab.9 Average Positioning Errors RMS and Convergence Time of Float and Fixed Solution of Static Test

系统 组合	浮点解				固定解			
	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min
G	2.31	1.04	3.09	18.25	1.52	0.69	2.55	11.75
GE	1.81	0.77	2.30	14.87	0.82	0.50	1.71	8.87
GEC	1.79	0.67	2.30	14.37	0.56	0.50	1.68	8.50

鉴于 BDS 的实时 OSB 产品在可用率和模糊度残差分布方面的良好表现, 本文在实验日期内进行了 BDS 单系统的 RT PPP-AR 定位实验。图 12 给出了 ALIC、LICC、ONSA 三个测站 2022 年第 291 天 BDS 单系统定位结果的时序图。表 10 给出了定位误差和固定率的统计值。由图 12 可以看出, 固定解相比浮点解在定位精度方面有显著提升, 收敛后定位误差更小。由表 10 可以看出, BDS 单系统模糊度固定成功率约为 94%, 说明 CNES 的 OSB 产品已经可以实现 BDS 单系统模糊度固定。

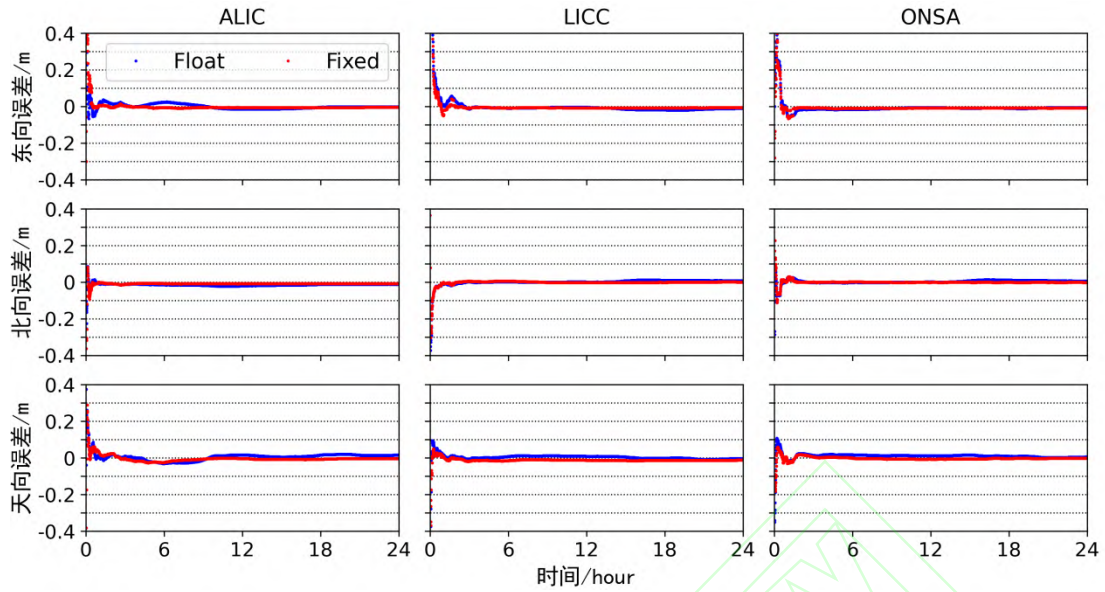


图 12 ALIC、LICC、ONSA 测站 2022/291 天浮点解与固定解定位结果（静态解）

Fig. 12 Positioning Results of Float and Fixed Solution for ALIC, LICC and ONSA in 2022/291 (Static Test)

表 10 静态模式浮点解与固定解的平均定位误差 RMS

Tab.10 Average Positioning Errors RMS and Convergence Time of Float and Fixed Solution of Static Test

测站	浮点解			固定解			固定率
	E/cm	N/cm	U/cm	E/cm	N/cm	U/cm	
ALIC	1.14	1.45	1.61	0.58	0.82	1.05	94.49%
LICC	1.31	0.58	0.73	0.95	0.32	1.30	94.33%
ONSA	1.25	0.63	1.23	1.10	0.21	0.54	94.83%

3. 结语

本文详细分析并评估了 CNES 提供的实时 OSB 产品质量，特别是 CNES 最新提供的 BDS 实时 OSB 产品。在此基础上，验证了基于该 OSB 产品的 RT PPP-AR 定位性能。该工作可为诸多实时精密定位应用和用户提供重要参考。通过本文实验分析，得出以下主要结论：

1) 在实时 OSB 产品质量方面，CNES 提供的实时 OSB 产品在可用性、稳定性以及产品精度等方面均相对较好，其中 GPS 优于 Galileo，BDS 次之。总体而言，可以满足 RT PPP-AR 的应用需求。具体而言，在实时 OSB 产品可用率方面，GPS 系统除 G28 卫星外，其实时 OSB 产品可用率均在 90% 以上；Galileo 系统有 3 颗卫星（E02、E07、E21）实时 OSB 产品的可用率在 60% ~ 90% 之间，其他均在 90% 以上；BDS 系统除 C01 ~ C05 卫星缺少实时相位 OSB 产品外，其他卫星实时 OSB 产品的可用率均在 90% 以上。GPS、Galileo、BDS 卫星实时相位 OSB 产品日均 STD 值分别为 0.085 周、0.117 周、0.228 周。实时相位 OSB 产品稳定性方面，GPS 略优于 Galileo，远好于 BDS。模糊度残差分析结果显示，GPS、Galileo、BDS 的宽巷模糊度残差在 ± 0.25 周内的分布占比为 92.4%、95.9%、86.6%。GPS、Galileo、BDS 的窄巷模糊度残差在 ± 0.25 周内的分布占比为 88.4%、91.5%、87.4%。

2) 在 RT PPP 定位性能评估方面, 利用 CNES 提供的实时 OSB 产品单 GPS 可以实现 N、E、U 方向 2.14 cm、1.58 cm、4.00 cm 的动态定位精度, 相比未进行 OSB 修正的浮点解 PPP 定位结果, 定位精度提升分别为 29.4%、18.2%、10.6%。而 GPS+Galileo+BDS 三系统组合动态 RT PPP-AR 定位精度在 N、E、U 方向分别为 1.16 cm、0.95 cm 和 2.78 cm, 相比于单 GPS 或 GPS+Galileo 定位, 三系统组合 RT PPP-AR 可以显著提高定位精度, 定位精度可分别提升 45.8%、39.9%、30.5%和 18.9%、11.2%、8.3%。在收敛时间方面, 基于 CNES 实时 OSB 产品的 GPS、GPS+Galileo、GPS+Galileo+BDS PPP-AR 定位收敛时间分别为 11.75 min、8.87 min、8.50 min, 相比未做 OSB 修正的浮点解 PPP 结果, 收敛时间可缩短 40%以上。基于 CNES 实时 OSB 产品实现的 BDS 单系统模糊度固定解, 其定位精度相比浮点解有显著提升, 模糊度固定成功率约为 94%。

参考文献

- [1] Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102, 5005-5017.
- [2] Kouba, J., Héroux, P. (2001). Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS Solutions*, 5, 12-28.
- [3] 张小红, 李星星, 李盼 (2017). GNSS 精密单点定位技术及应用进展. *测绘学报*, 46,9. (Zhang, X., Li, X., Li, P. (2017). Review of GNSS PPP and Its Application. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. 46,9)
- [4] Yang, F., Zhao, L., Li, L., Feng, S., Cheng, J. (2019). Performance evaluation of kinematic BDS/GNSS real-time precise point positioning for maritime positioning. *The Journal of Navigation*, 72, 34-52.
- [5] Elsobeiey, M., Al-Harbi, S. (2016). Performance of real-time Precise Point Positioning using IGS real-time service. *GPS Solutions*, 20, 565-571.
- [6] Alcaay, S., Turgut, M. (2021). Evaluation of the positioning performance of multi-GNSS RT-PPP method. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-19.
- [7] Li, B., Ge, H., Bu, Y., Zheng, Y., Yuan, L. (2022). Comprehensive assessment of real-time precise products from IGS analysis centers. *Satellite Navigation*, 3, 12.
- [8] Laurichesse, D., Blot, A. (2016). Fast PPP convergence using multi-constellation and triple-frequency ambiguity resolution. In *Proceedings of the 29th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016)*(pp. 2082-2088).
- [9] Kazmierski, K., Hadas, T., Sośnica, K. (2018). Weighting of multi-GNSS observations in real-time precise point positioning. *Remote Sensing*, 10, 84.
- [10] Liu, T., Zhang, B., Yuan, Y., Li, M. (2018). Real-Time Precise Point Positioning (RTPPP) with raw observations and its application in real-time regional ionospheric VTEC modeling. *Journal of Geodesy*, 92, 1267-1283.
- [11] 苏春阳, 舒宝, 郑蕾, 田云青, 雷体俊, 穆雪枫, 王利 (2023). GPS/BDS 实时 SSR 产品质量评估及其 PPP 性能分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 1-14. (Su C., Shu B., Zheng L., et al. (2023). Quality evaluation and PPP performance analysis of GPS/BDS real-time SSR products. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-14)

- [12] Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M. A., Shi, C., Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in precise point positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy*, 82, 389-399.
- [13] Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J. P., Broca, P., Cerri, L. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation-Journal of the Institute of Navigation*, 56, 135-149.
- [14] Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F., Héroux, P. (2010). Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. *Navigation-Journal of the Institute of Navigation*, 57, 123-135.
- [15] Ren, X., Chen, J., Li, X., Zhang, X. (2020). Multi-GNSS contributions to differential code biases determination and regional ionospheric modeling in China. *Advances in Space Research*, 65, 221-234.
- [16] Hu, J., Zhang, X., Li, P., Ma, F., Pan, L. (2020). Multi-GNSS fractional cycle bias products generation for GNSS ambiguity-fixed PPP at Wuhan University. *GPS Solutions*, 24, 1-13.
- [17] Schaer, S. (2016). Bias-SINEX format and implications for IGS bias products. In *IGS Workshop*(pp. 8-12).
- [18] Schaer, S., Villiger, A., Dach, R., Prange, L., Jäggi, A., Arnold, D. (2018). New ambiguity-fixed IGS clock analysis products at CODE.
- [19] Melbourne, W. G. (1985). The case for ranging in GPS-based geodetic systems. In *Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the Global Positioning System*(pp. 373-386).
- [20] Wübbena, G. (1985). Software developments for geodetic positioning with GPS using TI-4100 code and carrier measurements. In *Proceedings of the first international symposium on precise positioning with the global positioning system*(Vol. 19, pp. 403-412).
- [21] Li, X., Li, X., Jiang, Z., Xia, C., Shen, Z., Wu, J. (2022). A unified model of GNSS phase/code bias calibration for PPP ambiguity resolution with GPS, BDS, Galileo and GLONASS multi-frequency observations. *GPS Solutions*, 26, 84.
- [22] Du, S., Shu, B., Xie, W., Huang, G., Ge, Y., Li, P. (2022). Evaluation of Real-time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Based on Multi-GNSS OSB Products from CNES. *Remote Sensing*, 14, 4970.
- [23] Hatch, R. (1983). The synergism of GPS code and carrier measurements. In *International geodetic symposium on satellite doppler positioning*(Vol. 2, pp. 1213-1231).
- [24] Liu, T., Jiang, W., Laurichesse, D., Chen, H., Liu, X., Wang, J. (2020). Assessing GPS/Galileo real-time precise point positioning with ambiguity resolution based on phase biases from CNES. *Advances in Space Research*, 66, 810-825.
- [25] Geng, J. (2009). Rapid Re-convergence in Real-time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution. In *Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009)*(pp. 2437-2448).
- [26] Li, X., Ge, M., Zhang, H., Wickert, J. (2013). A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning. *Journal of Geodesy*, 87, 405-416.
- [27] Liu, X., Goode, M., Tegedor, J., Vigen, E., Oerpen, O., Strandli, R. (2015). Real-time multi-constellation precise point positioning with integer ambiguity resolution. In *2015 International association of institutes of navigation world congress (IAIN)*(pp. 1-7).

- [28] Temiissen, J. G. (1995). The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, 70, 65-82.
- [29] Qin, H., Liu, P., Cong, L., Xue, X. (2020). Ambiguity of Residual Constraint-Based Precise Point Positioning with Partial Ambiguity Resolution under No Real-Time Network Corrections Using Real Global Positioning System (GPS) Data. *Sensors*, 20, 3220.
- [30] 闫忠宝, 张小红 (2022). GNSS 非组合 PPP 部分模糊度固定方法与结果分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47, 979-989. (Yan Z., Zhang X.. (2022). Partial Ambiguity Resolution Method and Results Analysis for GNSS Uncombined PPP. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47, 979-989)
- [31] Kouba, J. (2009). A guide to using International GNSS Service (IGS) products.
- [32] Loyer, S., Banville, S., Geng, J., Strasser, S. (2021). Exchanging satellite attitude quaternions for improved GNSS data processing consistency. *Advances in Space Research*, 68, 2441-2452.
- [33] Wu, J., Wu, S. C., Hajj, G. A., Bertiger, W. I., Lichten, S. M. (1992). Effects of antenna orientation on GPS carrier phase. *Astrodynamics* 1991, 1647-1660.
- [34] 尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 肖国锐 (2022). Galileo 校正卫星天线参数特性及对 PPP 定位的影响. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47, 526-532. (Yin X., Chai H., Qi W., et al. (2022). Characteristics of Galileo Calibrated Satellite Antenna Parameter and Their Impacts on Precise Point Positioning. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-14)
- [35] Zhang, L., Yang, H., Gao, Y., Yao, Y., Xu, C. (2018). Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers. *Advances in Space Research*, 61, 2942-2954.
- [36] Wang, J., Zhang, Q., Huang, G. (2021). Estimation of fractional cycle bias for GPS/BDS-2/Galileo based on international GNSS monitoring and assessment system observations using the uncombined PPP model. *Satellite Navigation*, 2, 1-11.
- [37] Wang, J., Huang, G., Yang, Y., Zhang, Q., Gao, Y., Xiao, G. (2019). FCB estimation with three different PPP models: Equivalence analysis and experiment tests. *Gps Solutions*, 23, 1-14.

网络首发:

标题: CNES 多系统 OSB 产品质量分析及实时精密单点定位性能评估

作者: 许国振, 任晓东, 张小红

收稿日期: 2024-01-18

DOI:10.13203/j.whugis20230376

引用格式:

许国振, 任晓东, 张小红. CNES 多系统 OSB 产品质量分析及实时精密单点定位性能评估 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230376 (XU Guozhen, REN Xiaodong, ZHANG Xiaohong. Quality Analysis Of Multi-GNSS OSB Products from CNES and Its Performance Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230376)

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:

北斗三号卫星差分码偏差稳定性分析及其对单点定位的影响

袁海军, 章浙涛, 何秀凤, 徐天扬, 徐学永
武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(3): 425-432.
<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200517>

BDS-3/GNSS 非组合精密单点定位

曹新运, 沈飞, 李建成, 张守建
武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 92-100.
<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210198>

BDS-2/BDS-3 融合三频精密单点定位模型及偏差特性分析

朱少林, 岳东杰, 何丽娜, 陈健, 刘胜男
武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(12): 2049-2059.
<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20210273>

