



引文格式: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),2025,50(11):2352-2364.DOI:10.13203/j.whugis20230376

Citation: 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, 2025, 50(11): 2352-2364. 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)为多频多模全球导航卫星系统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'Etudes 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。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%~90%;GPS/Galileo相位OSB产品稳定性均优于0.1周,BDS稳定性略差于前两者,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卫星宽巷和窄巷模糊度残差较小,其在±0.25周以内的百分比分别为92.37%、95.88%、86.58%和88.40%、91.53%、87.42%,可满足PPP模糊度固定的需求。利用多GNSS实验站实测数据验证其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三系统的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

中图分类号:P228

文献标识码:A

收稿日期:2024-06-18

DOI:10.13203/j.whugis20230376

文章编号:1671-8860(2025)11-2352-13

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 global navigation satellite system (GNSS) data processing. The quality of real-time OSB products directly affects the performance of real-time precise point positioning (PPP) with ambiguity resolution (RT PPP-AR). The Centre National

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3903902);国家自然科学基金(42388102,42230104);中央高校基本科研业务费专项资金(2042025kf0026)。

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

通信作者:任晓东,博士,教授。xdren@whu.edu.cn

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 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 experiments 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/Galileo phase 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 are 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 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%.

Key words: 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、北斗卫星导航系统 (BeiDou satellite navi-

gation system, 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 PPP, RT PPP) 开展了大量研究^[8-11], 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 min 使东 (E)、北 (N)、天 (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 (PPP 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),用于海事无线电技术委员会(radio technical commission for maritime services, 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^[19-21]。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。

表1 不同分析机构提供的实时精密产品

Table 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/Clock/Code bias	5
BKG	GPS/GLONASS/ Galileo	Orbit/ Code bias	60
		Clock	5
ESA	GPS	Orbit/Clock	5
GFZ	GPS/GLONASS/ Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias	5
CNES	GPS/GLONASS/ Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias/Phase bias	5
		电离层 VTEC	60
CAS	GPS/GLONASS/ Galileo/BDS	Orbit/Clock/Code bias	5
		电离层 VTEC	60
WHU	GPS/GLONASS/ Galileo/BDS	Orbit/Clock	5
DLR	GPS/GLONASS/ Galileo/BDS	Orbit/ Code bias	30
		Clock	5

注: GMV(GMV Innovating Solutions): GMV 分析中心; ESA(European Space Agency): 欧洲空间局; GFZ(Deutsches Geo-Forschungs Zentrum Potsdam): 波茨坦德国地球科学研究中心; WHU(Wuhan University): 武汉大学; DLR(German Aerospace Center): 德国宇航中心。

本文首先介绍了CNES提供的实时OSB产品的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3个方面对CNES提供的实时OSB产品质量进行全面评估与分析;最后基于多GNSS系统实验(multi-GNSS experiment, MGEX)测站,验

证基于实时OSB产品的RT PPP-AR定位性能。

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

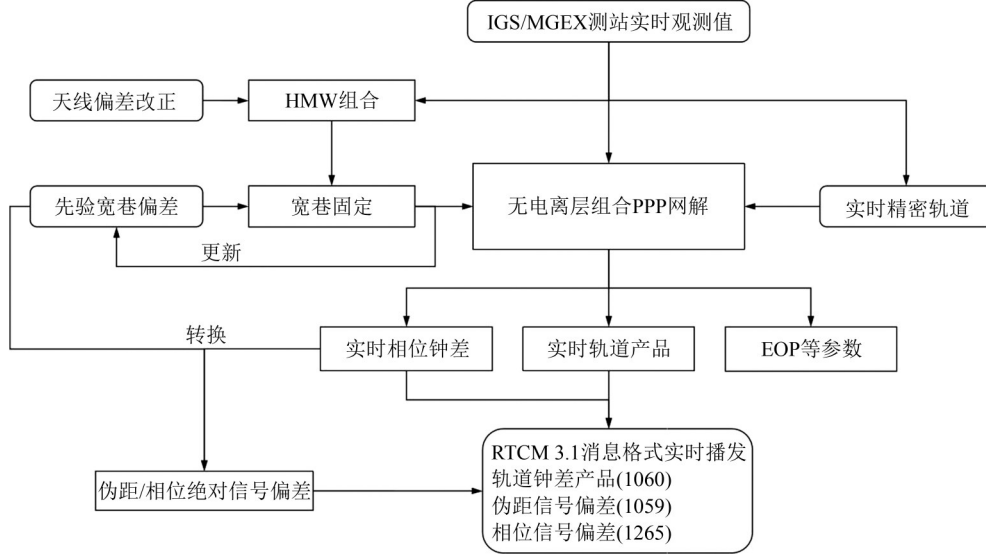
CNES在服务端以整数相位钟的形式^[14-15]估计生成伪距信号偏差和宽巷(wide-lane, WL)偏差、相位钟。整数相位钟法生成的产品基于特定的观测值组合,严重制约了用户对非差定位模型和观测值组合形式的选择。因此,LAU-RICHESSE等^[8]提出一种方法,服务端通过网络接收全球MGEX测站实时观测值,根据广播星历和卫星精密定轨的输出,进行无电离层组合PPP解算,通过整数相位钟法生成相位钟差和宽巷偏差之后,将两者转化为各频率的非组合相位信号偏差,CNES基于此提供非组合相位信号偏差并通过网络播发给用户,其实现流程如图1所示。用户可以根据RTCM制定的标准,从RTCM网络传输协议(networked transport of RTCM via internet protocol, 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。

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:

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

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($\gamma_f = \lambda_f^2 / \lambda^2$); $I_{r,1}^s$ 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; 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; $\epsilon_{r,f}^s$ 和 $\xi_{r,f}^s$ 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:



注: HMW 为 Hatch-Melbourne-Wübbena 的缩写; EOP (earth orientation parameter): 地球定向参数。

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

$$\begin{cases} p_{r,1}^s = \mu_r^s \cdot x + d\hat{t}_r + \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \epsilon_{r,1}^s \\ p_{r,2}^s = \mu_r^s \cdot x + d\hat{t}_r + \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \epsilon_{r,2}^s \\ l_{r,1}^s = \mu_r^s \cdot x + d\hat{t}_r - \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \\ \quad \lambda_1 \cdot \hat{N}_{r,1}^s + \xi_{r,1}^s \\ l_{r,2}^s = \mu_r^s \cdot x + d\hat{t}_r - \gamma_2 \cdot \hat{I}_{r,1}^s + m_{r,w}^s \cdot Z_{r,w}^s + \\ \quad \lambda_2 \cdot \hat{N}_{r,2}^s + \xi_{r,2}^s \end{cases} \quad (2)$$

式中, $p_{r,i}^s$ 和 $l_{r,i}^s$ ($i=1,2$) 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:

$$\begin{cases} d\hat{t}_r = t_r + b_{r,IF} = t_r + (\alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2}) \\ \hat{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s + \beta \cdot DCB_{r,12} - \beta \cdot DCB_{12}^s \\ \hat{N}_{r,1}^s = N_{r,1}^s + (B_{r,1} - B_1^s) + \\ \quad [b_{IF}^s - b_{r,IF} + \beta \cdot (DCB_{r,12} - DCB_{12}^s)] / \lambda_1 \\ \hat{N}_{r,2}^s = N_{r,2}^s + (B_{r,2} - B_2^s) + \\ \quad [b_{IF}^s - b_{r,IF} + \beta \cdot (DCB_{r,12} - DCB_{12}^s)] / \lambda_2 \end{cases} \quad (3)$$

式中, IF (ionosphere free) 表示无电离层组合;

$$\begin{cases} \alpha = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ \beta = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ DCB_{r,12} = b_{r,1} - b_{r,2} \\ DCB_{12}^s = b_1^s - b_2^s \\ b_{r,IF} = \alpha \cdot b_{r,1} + \beta \cdot b_{r,2} \\ b_{IF}^s = \alpha \cdot b_1^s + \beta \cdot b_2^s \end{cases} \quad (4)$$

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 WL 偏差 μ_{WL}^s 、相位钟 (integer recovery clock, IRC) dt_{IRC}^s 进行转化得到。

利用 HMW^[23] 组合计算 WL 模糊度:

$$\phi_1 - \phi_2 + \eta_1 \cdot P_1 + \eta_2 \cdot P_2 = N_{WL} + \mu_{r,WL} - \mu_{WL}^s \quad (5)$$

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 WL 模糊度不再包含卫星端硬件延迟:

$$\begin{aligned} & (\phi_1 + \bar{B}_1^s) - (\phi_2 + \bar{B}_2^s) + \eta_1 \cdot (P_1 + \bar{b}_1^s) + \\ & \eta_2 \cdot (P_2 + \bar{b}_2^s) = N_{WL} + \mu_{r,WL} \end{aligned} \quad (6)$$

相位观测值的无电离层组合形式为:

$$\begin{aligned} & \alpha \cdot \lambda_1 \cdot \phi_1 + \beta \cdot \lambda_2 \cdot \phi_2 = \rho_r^s + dt_r - dt^s + \\ & \lambda_{IF} \cdot (N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s) \end{aligned} \quad (7)$$

用 IGS 精密钟差改正的方程形式为:

$$\begin{aligned} & \alpha \cdot \lambda_1 \cdot \phi_1 + \beta \cdot \lambda_2 \cdot \phi_2 = \rho_r^s + dt_r - dt_{IGS}^s + \\ & \lambda_{IF} \cdot (N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s) \end{aligned} \quad (8)$$

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

若将相位 OSB 改正到原始相位观测值上之后, 等式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:

$$\begin{aligned} & \alpha \cdot \lambda_1 \cdot (\phi_1 + \bar{B}_1^s) + \beta \cdot \lambda_2 \cdot (\phi_2 + \bar{B}_2^s) = \rho_r^s + dt_r - \\ & dt_{IRC}^s + \lambda_{IF} \cdot (N_{IF} + B_{r,IF} - B_{IF}^s) \end{aligned} \quad (10)$$

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

分别将式 (5) 代入式 (6)、式 (8) 代入式 (10), 可以得到:

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

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 WL 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。将式(12)简化后, 可以得到 OSB 产品的含义:

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

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:

$$\begin{cases} \hat{N}_{r,1}^s = N_{r,1}^s + B_{r,1} + [-b_{r,\text{IF}} + \beta \cdot \text{DCB}_{r,12}] / \lambda_1 \\ \hat{N}_{r,2}^s = N_{r,2}^s + B_{r,2} + [-b_{r,\text{IF}} + \gamma_2 \cdot \beta \cdot \text{DCB}_{r,12}] / \lambda_2 \end{cases} \quad (14)$$

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 WL, 利用 HMW 组合^[24-26]计算 WL 模糊度:

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

式中, λ_{MW} 为 WL 波长; \hat{N}_{MW} 为 WL 浮点模糊度。

经过 OSB 产品修正后, WL 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(single difference, SD)消除其中存在的接收机端硬件延迟, 恢复其整数特性:

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

式中, $\hat{N}_{s_i, \text{MW}}^{s_j}$ 表示卫星 s_i 和 s_j 的 WL 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]。WL 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

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

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, 因此使用最小二乘模糊度降相关平差法^[28-30]来固定 N_1 。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 提供的实时 OSB 产品质量及其 RT PPP-AR 全球定位性能, 选取全球均匀分布的 50 个 MGEX 测站, 2022-10-18—2022-11-17 年积日(day of year, DOY) 291~321 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。

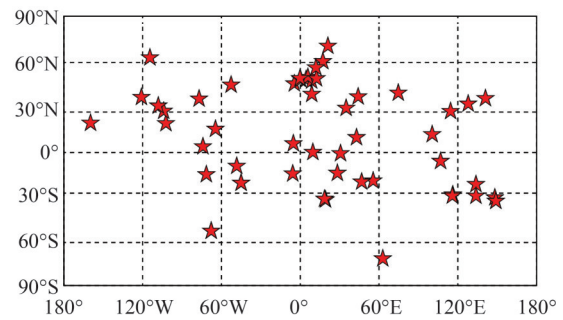


图2 MGEX测站的全球分布图

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], 天线相位中心偏差和天线相位中心变化采用 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

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。本文 RT PPP-AR 定位实验采用的各 GNSS 系统观测值如下:GPS: C1W、L1C、C2W、L2W; Galileo: C1X、L1X、C5X、L5X; BDS: C2I、L2I、C6I、L6I。

表 2 PPP AR 实验的参数配置

Table 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 0.3 m 和 1 mm; 高度角定权模型为 $\sigma^2 = a^2 + b^2 / \sin^2 E$
数学模型	非差非组合
滤波器	扩展卡尔曼滤波
采样率/s	30
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/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 Saastamoinen 模型改正; 湿延迟部分视作随机游走估计; 对流层投影函数: 全球投影函数
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

2.2 OSB 产品质量评估

实时 OSB 产品的可用性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 BDS 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 5 给出了 CNES 提供的 2022 年 DOY 291~321 共 31 天的实时 OSB 产品时序图。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 WUM 提供的 2022 年 DOY 291~321 共 31 天的事后 OSB 产品时序图,事后 OSB 产品无论是伪距还是相位,一天内都只有一个值。表 3 给出了实验日期内 CNES 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。

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做星间单差处理,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 WL 和窄巷 (narrow-lane, NL) 模糊度残差的分布情况,表 4 给出了相应的统计结果。综合图 7 综和表 4 的结果可以看出,经 CNES 实时 OSB 产品修正后, GPS、Galileo、BDS WL 和 NL 的模糊度残差均符合标准正态分布。对于 WL 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 NL 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 产品进行同样的实验。图 8 给出了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 8 和表 5 的结果可以看出,经 WUM 事后 OSB 产品修正后, GPS、Galileo、BDS WL 和 NL 的模糊度残差均同样符合标准正态分布。对于 WL 和 NL 模糊度残

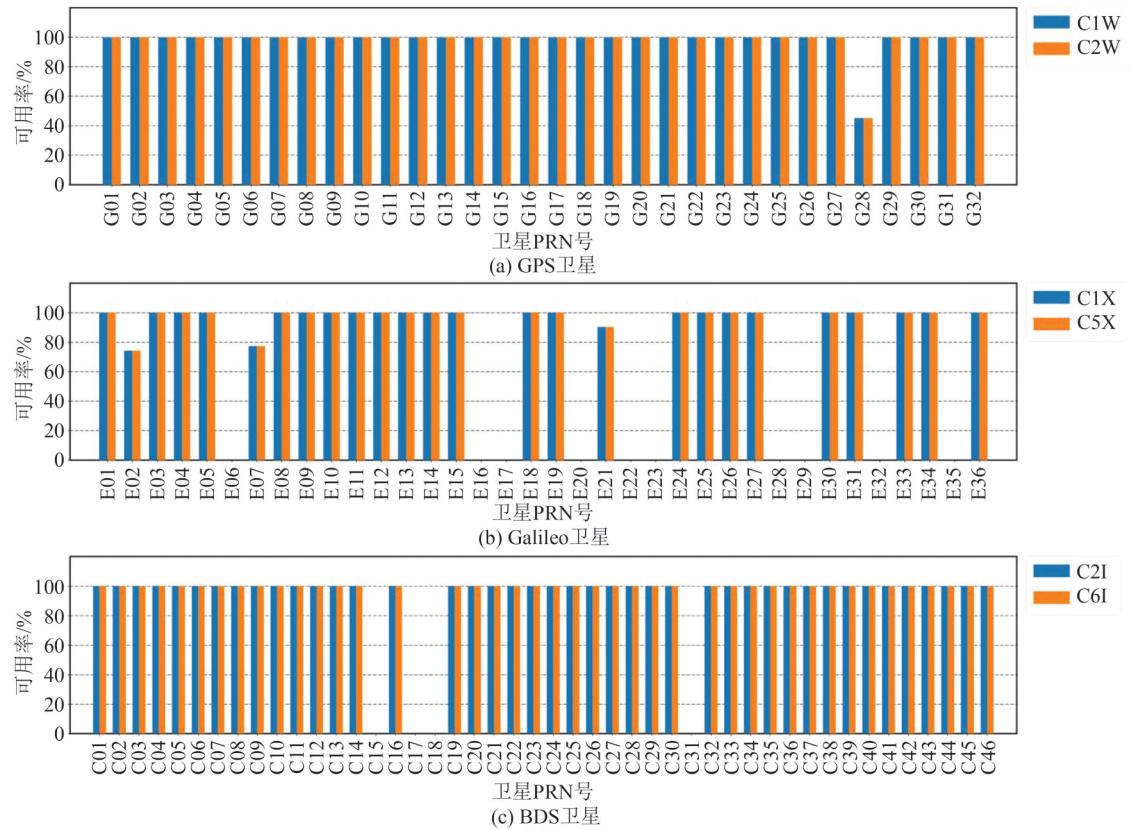


图3 GPS/Galileo/BDS 三系统的伪距 OSB 可用率情况
Fig. 3 Availability of Pseudo-range OSB Products for GPS/Galileo/BDS

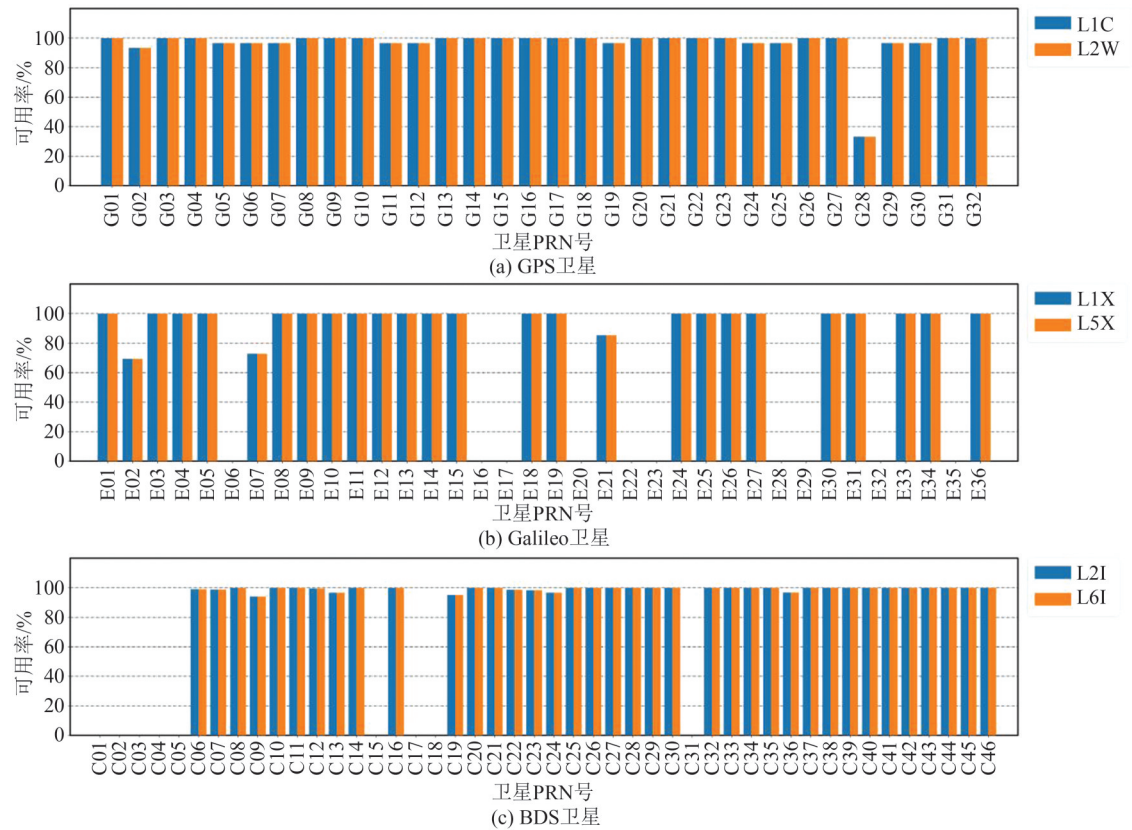


图4 GPS/Galileo/BDS 三系统的相位 OSB 可用率情况
Fig. 4 Availability of Phase OSB Products for GPS/Galileo/BDS

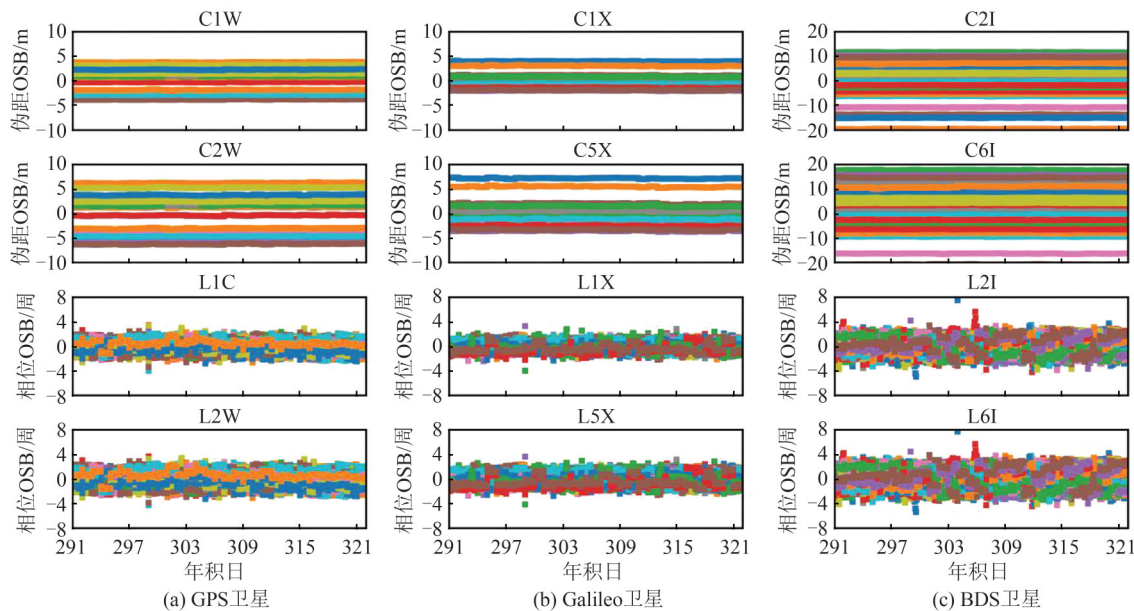


图 5 CNES 提供的 2022 年 DOY 291~321 共 31 天的实时 OSB 产品时间序列

Fig. 5 Time Series of CNES's Real-Time OSB Products from DOY 291—321, 2022

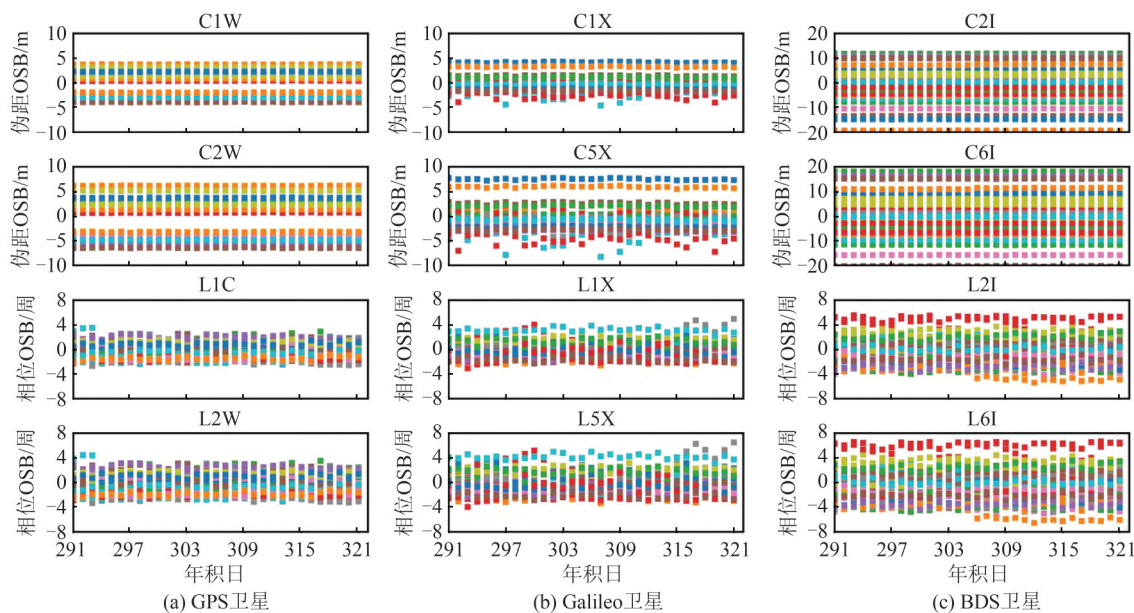


图 6 WUM 提供的 2022 年 DOY 291~321 共 31 天的事后 OSB 产品时间序列

Fig. 6 Time Series of WUM's Post OSB Products from DOY 291—321, 2022

表 3 CNES 相位 OSB 产品的日平均 STD 值/周						
Table 3 Daily Average STD Value of CNES's Phase OSB Products/cycle						
统计项	GPS		Galileo		BDS	
	L1C	L2W	L1X	L5X	L2I	L6I
STD	0.085	0.085	0.117	0.117	0.228	0.228

差, GPS、Galileo、BDS 在 ± 0.15 周内的占比分别为 84.26%、85.30%、76.26% 和 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。

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 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 9 中只给出 14 个测站的定位结果。

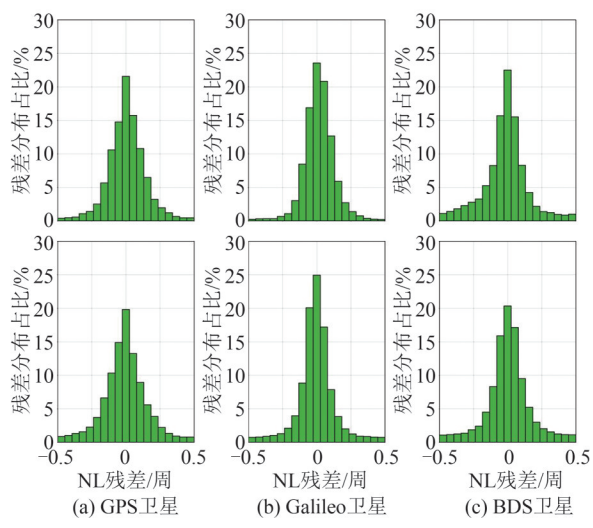


图7 经CNES实时OSB产品修正的GPS/Galileo/BDS模糊度单差值的小数部分

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

表4 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

系统	WL			NL		
	均值	± 0.25	± 0.15	均值	± 0.25	± 0.15
	/周	周内占比/%	周内占比/%	/周	周内占比/%	周内占比/%
GPS	0.006	92.37	78.69	-0.007	88.40	71.14
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

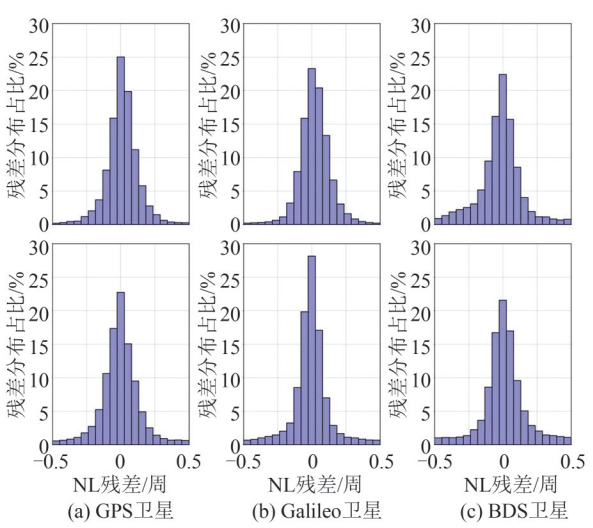


图8 经WUM事后OSB产品修正的GPS/Galileo/BDS模糊度单差值的小数部分

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

表5 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

系统	WL			NL		
	均值	± 0.25	± 0.15	均值	± 0.25	± 0.15
	/周	周内占比/%	周内占比/%	/周	周内占比/%	周内占比/%
GPS	0.011	95.19	84.26	-0.005	91.65	79.55
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

表6给出了动态和静态实时PPP定位误差统计值。由表6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,3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%。

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10给出了ABPO测站2022年DOY 291天定位结果的时序图,红色为固定解,蓝色为浮点解。表7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10可以看出,固定解相比浮点解显著缩短了收敛时间。由表7可以看出,GPS、GPS+Galileo、GPS+Galileo+BDS 3种组合静态模式下浮点解的收敛时间分别为18.25、14.87、14.37 min,固定解的收敛时间分别为11.75、8.87、8.50 min。

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11

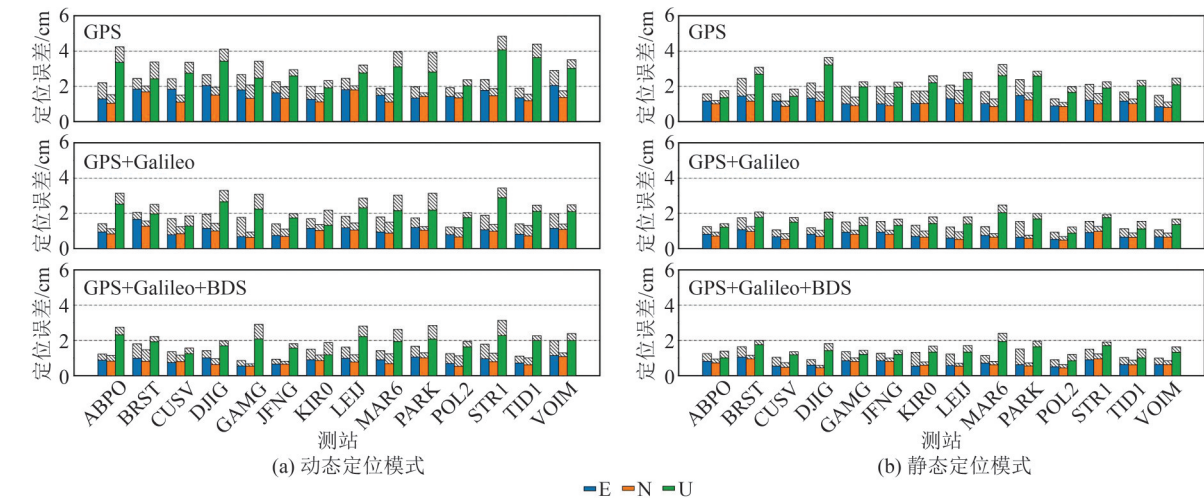


图 9 动态和静态 PPP 浮点解与固定解定位精度对比

Fig. 9 Precision Comparison Between PPP Float and Fixed Solutions of Dynamic Test and Static Test

表 6 动态和静态模式浮点解和固定解的定位误差 RMS

Table 6 Positioning Errors RMS of Float and Fixed Solutions of Dynamic Test and Static Test

模式	系统组合	浮点解/cm			固定解/cm			提升比例/%			固定率/%
		E	N	U	E	N	U	E	N	U	
动态	GPS	3.03	1.93	4.47	2.14	1.58	4.00	29.4	18.2	10.6	98.53
	GPS+Galileo	2.48	1.32	3.58	1.42	1.07	3.03	42.7	18.9	15.4	99.10
	GPS+Galileo+BDS	2.04	1.16	3.22	1.16	0.95	2.78	43.2	18.1	13.6	98.87
静态	GPS	2.42	1.22	3.12	1.60	1.04	2.74	33.8	14.8	12.2	98.60
	GPS+Galileo	1.96	0.95	2.50	1.15	0.76	2.24	41.3	20.0	10.4	99.30
	GPS+Galileo+BDS	1.92	0.91	2.31	1.10	0.72	2.06	42.7	20.8	10.8	99.01

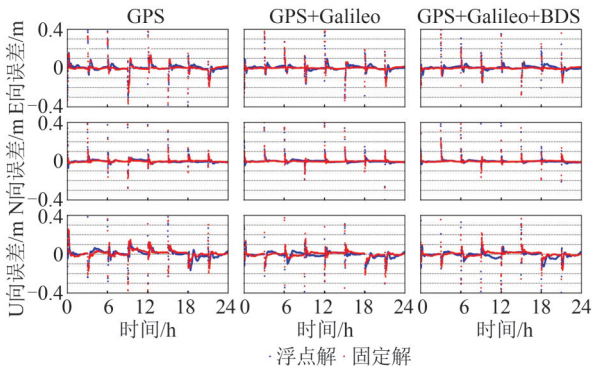


图 10 ABPO 测站 2022 年 DOY 291 天浮点解与固定解定位结果(静态解)

Fig. 10 Positioning Results of Float and Fixed Solutions for ABPO in DOY 291, 2022 (Static Test)

给出了 ALIC、LICC、ONSA 3 个测站 2022 年 DOY 291 天 BDS 单系统定位结果的时序图,表 8 给出了定位误差和固定率的统计值。由图 11 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 8 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。

表 7 静态模式浮点解与固定解的平均定位误差 RMS 和收敛时间

Table 7 Average Positioning Errors RMS and Convergence Time of Float and Fixed Solutions of Static Test

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

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。研究结果可为诸多实时精密定位应用和用户提供重要参考。

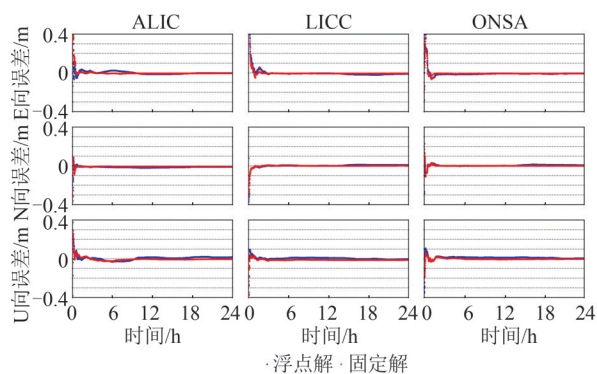


图 11 ALIC、LICC、ONSA 测站 2022 年 DOY 291 天
浮点解与固定解定位结果(静态解)

Fig. 11 Positioning Results of Float and Fixed Solutions for ALIC, LICC and ONSA in DOY 291, 2022(Static Test)

表 8 静态模式浮点解与固定解的平均定位误差
RMS和固定率

Table 8 Average Positioning Errors RMS and Fixed
Rate of Float and Fixed Solutions 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

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 WL 和 NL 模糊度残差在 ± 0.25 周内的分布占比分别为 92.37%、95.88%、86.58% 和 88.40%、91.53%、87.42%。

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 E、N、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 E、N、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,定位精度提升分别为 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, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data From Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B3): 5005-5017.

[2] KOUBA J, HÉROUX P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28.

[3] 张小红,李星星,李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1399-1407. ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and Its Application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407.

[4] YANG F X, ZHAO L, LI L, et al. Performance Evaluation of Kinematic BDS/GNSS Real-Time Precise Point Positioning for Maritime Positioning [J]. *Journal of Navigation*, 2019, 72(1): 34-52.

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

[6] ALCAY S, TURGUT M. Evaluation of the Positioning Performance of Multi-GNSS RT-PPP Method [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(3): 155.

[7] LI B F, GE H B, BU Y H, et al. Comprehensive Assessment of Real-Time Precise Products From IGS Analysis Centers [J]. *Satellite Navigation*, 2022, 3(1): 12.

[8] LAURICHESSE D, BLOT A. Fast PPP Convergence Using Multi-Constellation and Triple-Frequency Ambiguity Resolution[C]// The 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2016), Portland, Oregon, USA, 2016.

- [9] KAZMIERSKI K, HADAS T, SOŚNICA K. Weighting of Multi-GNSS Observations in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(1): 84.
- [10] LIU T, ZHANG B C, YUAN Y B, et al. Real-Time Precise Point Positioning (RT PPP) with Raw Observations and Its Application in Real-Time Regional Ionospheric VTEC Modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(11): 1267-1283.
- [11] 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.
- 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.
- [12] GE M, GENDT G, ROTHACHER M, et al. Resolution of GPS Carrier-Phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399.
- [13] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination [J]. *NAVIGATION*, 2009, 56(2): 135-149.
- [14] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing [J]. *NAVIGATION*, 2010, 57(2): 123-135.
- [15] REN X D, CHEN J, LI X X, et al. Multi-GNSS Contributions to Differential Code Biases Determination and Regional Ionospheric Modeling in China[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(1): 221-234.
- [16] HU J H, ZHANG X H, LI P, et al. Multi-GNSS Fractional Cycle Bias Products Generation for GNSS Ambiguity-Fixed PPP at Wuhan University [J]. *GPS Solutions*, 2019, 24(1): 15.
- [17] SCHAER S. Bias-SINEX Format and Implications for IGS Bias Products [C]//IGS Workshop, Sydney, Australia, 2016.
- [18] SCHAER S, VILLIGER A, ARNOLD D, et al. New Ambiguity-Fixed IGS Clock Analysis Products at CODE[C]//IGS Workshop, Wuhan, China. 2018.
- [19] MELBOURNE W G. The Case for Ranging in GPS-Based Geodetic Systems[C]// The 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, USA, 1985.
- [20] WÜBBENA G. Software Developments for Geodetic Positioning with GPS Using TI-4100 Code and Carrier Measurements[C]//The 1st International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System, Rockville, Maryland, USA, 1985.
- [21] LI X, LI X X, JIANG Z H, et al. A Unified Model of GNSS Phase/Code Bias Calibration for PPP Ambiguity Resolution with GPS, BDS, Galileo and GLONASS Multi-Frequency Observations [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(3): 84.
- [22] DU S, SHU B, XIE W, et al. Evaluation of Real-Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Based on Multi-GNSS OSB Products from CNES[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4970.
- [23] HATCH R. The Synergism of GPS Code and Carrier Measurements[C]// The Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Las Cruces, New Mexico, USA, 1982.
- [24] LIU T J, JIANG W P, LAURICHESSE D, et al. Assessing GPS/Galileo Real-Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Based on Phase Biases From CNES[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 66(4): 810-825.
- [25] GENG J. Rapid Re-convergence in Real-Time Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution [C]//The 22nd International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009), Savannah, USA, 2009.
- [26] LI X X, GE M R, ZHANG H P, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-Fixing in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 405-416.
- [27] LIU X L, GOODE M, TEGEDOR J, et al. Real-Time Multi-Constellation Precise Point Positioning with Integer Ambiguity Resolution[C]// International Association of Institutes of Navigation World Congress (IAIN), Prague, Czech Republic, 2015.
- [28] TEUNISSEN P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1): 65-82.
- [29] QIN H L, LIU P, CONG L, et al. 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[J]. *Sensors*, 2020, 20(11): 3220.
- [30] 闫忠宝, 张小红. GNSS 非组合 PPP 部分模糊度固定方法与结果分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(6): 979-989.

- YAN Zhongbao, ZHANG Xiaohong. Partial Ambiguity Resolution Method and Results Analysis for GNSS Uncombined PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(6): 979-989.
- [31] KOUBA J. A Guide to Using International GNSS Service (IGS) Products[EB/OL]. https://files.igs.org/pub/resource/pubs/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf, 2009.
- [32] LOYER S, BANVILLE S, GENG J H, et al. Exchanging Satellite Attitude Quaternions for Improved GNSS Data Processing Consistency[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(6): 2441-2452.
- [33] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. *Manuscripta Geodetica*, 1993, 18(2): 91-98.
- [34] 尹潇, 柴洪洲, 齐文龙, 等. Galileo 校正卫星天线参数特性及对 PPP 定位的影响[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(4): 526-532.
- YIN Xiao, CHAI Hongzhou, QI Wenlong, et al. Characteristics of Galileo Calibrated Satellite Antenna Parameter and Their Impacts on Precise Point Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(4): 526-532.
- [35] 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.
- [36] WANG J, ZHANG Q, HUANG G W. Estimation of Fractional Cycle Bias for GPS/BDS-2/Galileo Based on International GNSS Monitoring and Assessment System Observations Using the Uncombined PPP Model[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 9.
- [37] WANG J, HUANG G W, YANG Y X, et al. FCB Estimation with Three Different PPP Models: Equivalence Analysis and Experiment Tests[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 93.
-
- (上接第 2259 页)
- 学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1557-1565.
- LI Deren. From the Luojia Series Satellites to the Oriental Smart Eye Constellation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1557-1565.
- [16] 刘会增, 石铁柱, 王俊杰, 等. 利用区域土壤光谱库研究土壤有机碳反演模型传递性[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(7): 889-895.
- LIU Huizeng, SHI Tiezhu, WANG Junjie, et al. Transferability of Retrieval Models for Estimating Soil Organic Carbon Contents Based on Regional Soil Spectral Libraries[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(7): 889-895.
- [17] 王宇, 杨丽萍, 任杰, 等. 联合 ALOS-2 和 Landsat 8 的绿洲土壤水分反演模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(9): 1630-1638.
- WANG Yu, YANG Liping, REN Jie, et al. An Oasis Soil Moisture Inversion Model Using ALOS-2 and Landsat 8 Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(9): 1630-1638.
- [18] CARTER M, BENTLEY S P. Soil Properties and Their Correlations[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.
- [19] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition[C]// International Conference on Learning Representations. Banff, Canada, 2014.
- [20] HENGL T, DE JESUS J M, HEUVELINK G B M, et al. SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning[J]. *PLoS One*, 2017, 12(2): e0169748.
- [21] POGGIO L, DE SOUSA L M, BATJES N H, et al. SoilGrids 2.0: Producing Soil Information for the Globe with Quantified Spatial Uncertainty[J]. *Soil*, 2021, 7(1): 217-240.
- [22] ZOU W L, HAN Z, DING L Q, et al. Predicting Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Under Influences of Freeze-Thaw Cycles and Moisture Using Gene Expression Programming and Artificial Neural Network Approaches[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100520.
- [23] TASORA A, SERBAN R, MAZHAR H, et al. Chrono: An Open Source Multi-Physics Dynamics Engine[C]// International Conference on High Performance Computing in Science and Engineering. Solán, Czech Republic, 2015.
- [24] KRENN R, GIBBESCH A. Soft Soil Contact Modeling Technique for Multi-Body System Simulation[J]. *Trends in Computational Contact Mechanics*, 2011: 135-155.