引文格式:辜声峰,朱家熹,毛飞宇,等.面向全球快速厘米级服务的GNSS数据处理研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(11):2263-2274.DOI:10.13203/j.whugis20260351

Citation: GU Shengfeng, ZHU Jiaxi, MAO Feiyu, et al. Progress in GNSS Data Processing for Global Rapid Centimeter-Level Services[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2026, 51(11):2263-2274.DOI:10.13203/j.whugis20260351

面向全球快速厘米级服务的GNSS数据处理研究进展

辜声峰[1] 朱家熹[1] 毛飞宇[1] 郭 靖[1] 郭 将[2] 许小龙[1] 曲墨玉[1]
郭荣欣[1] 龚晓鹏[1] 戴小蕾[1] 耿江辉[3] 楼益栋[1] 赵齐乐[1]

1 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北珞珈实验室,湖北 武汉,430079
2 国际计量局,巴黎 塞夫勒,92310
3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院精密大地测量与定位全国重点实验室,湖北 武汉,430077

摘 要:北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)是国家重要的时空信息基础设施,高精度定位与授时正逐步成为基础时空服务能力,实时精密产品是全球快速厘米级服务的重要支撑。随着实时高精度定位由传统精密单点定位(precise point positioning,PPP)向PPP-AR(PPP-ambiguity resolution)发展,利用相位偏差产品实现模糊度固定、加快定位收敛已成为实时精密服务的重要发展方向。系统介绍了武汉大学国际GNSS服务组织(international GNSS service,IGS)实时分析中心多GNSS实时精密产品处理模型与算法研究进展,重点阐述实时精密定轨、高稳定星地钟协同时间基准维持与协调世界时(coodinated universal time,UTC)溯源等关键方法,并在轨道、钟差产品基础上新上线多频相位偏差产品,支撑实时PPP-AR快速模糊度固定。产品评估结果表明,GPS、GLONASS、Galileo和BDS中地球轨道卫星实时轨道三维均方根分别为2.4、4.6、3.8和4.9 cm;UTC(k)频率驾驭使GPS、BDS-3和Galileo的UTC时间传递误差标准差分别降低58.4%、32.8%和76.2%;BDS-3多频相位偏差具有良好的连续性和稳定性。全球测站GPS/Galileo/BDS-3联合PPP-AR实验表明,初始化150 s后,水平和高程误差分别降至3.6 cm和9.9 cm,95%样本误差分别优于3.9 cm和8.6 cm。武汉大学IGS实时分析中心已形成涵盖轨道、钟差和信号偏差的多GNSS实时精密产品体系,实现了由PPP厘米级定位向PPP-AR快速厘米级定位服务拓展。

关键词:全球卫星导航系统;实时;轨道;钟差;相位偏差;PPP-AR

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20260351 **文章编号**:1671-8860(2026)11-2263-12

Progress in GNSS Data Processing for Global Rapid Centimeter-Level Services

GU Shengfeng[1] *ZHU Jiaxi*[1] *MAO Feiyu*[1] *GUO Jing*[1] *GUO Jiang*[2] *XU Xiaolong*[1]
QU Moyu[1] *GUO Rongxin*[1] *GONG Xiaopeng*[1] *DAI Xiaolei*[1] *GENG Jianghui*[3]
LOU Yidong[1] *ZHAO Qile*[1]

1 GNSS Research Center, Wuhan University, Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China
2 International Bureau of Weights and Measures, Paris 92310, France
3 State Key Laboratory of Precision Geodesy, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

Abstract: BeiDou is an important national spatiotemporal information infrastructure, and high-precision positioning and timing are becoming fundamental spatiotemporal services. Real-time precise products are essential for global rapid centimeter-level positioning. With the development from conventional precise point positioning (PPP) to PPP with ambiguity resolution (PPP-AR), phase-bias products have become increasingly important for ambiguity fixing and fast convergence. This paper systematically presents the re-

基金项目:国家自然科学基金(42574036);国家自然科学基金国际合作研究与交流项目(42361134580)。

第一作者:辜声峰,博士,教授,主要从事多系统GNSS数据处理、多源传感器导航和电离层建模与监测研究。gsf@whu.edu.cn

cent progress of multi-GNSS real-time precise product processing at the Wuhan University international GNSS service (IGS) real-time analysis center, focusing on real-time precise orbit determination, highly stable satellite-ground clock coordination and coodinated universal time (UTC) traceability, and newly introduced multi-frequency phase-bias products for real-time PPP-AR. Evaluation results show that the three-dimensional root mean square errors of real-time orbits for GPS, GLONASS, Galileo, and BDS medium earth orbit satellites are 2.4, 4.6, 3.8, and 4.9 cm, respectively. UTC(k)-based frequency steering reduces the standard deviation of UTC time-transfer errors for GPS, BDS-3, and Galileo by 58.4%, 32.8%, and 76.2%, respectively. BDS-3 multi-frequency phase-bias products show good continuity and stability. Global GPS/Galileo/BDS-3 PPP-AR tests show that, after 150 s of initialization, horizontal and vertical errors reach 3.6 cm and 9.9 cm, with 95% of samples better than 3.9 cm and 8.6 cm. The IGS analysis center at Wuhan University has established a multi-GNSS real-time precise product system covering orbit, clock, and signal-bias products, extending real-time services from centimeter-level PPP to rapid centimeter-level PPP-AR.

Key words: GNSS; real-time; orbit; clock; phase bias; PPP-AR

全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)高精度服务正由传统事后处理向实时化、全球化和快速化发展[1]。精密单点定位(precise point positioning,PPP)依靠高精度卫星轨道、钟差等产品,仅利用单台接收机即可在全球范围实现厘米级定位,具有无需区域基准站支持、服务范围广和用户端处理灵活等优势,已广泛应用于大地测量、形变监测、精密授时及自动化作业等领域[2-4]。随着多GNSS和多频观测不断丰富,卫星可见性及空间几何构型得到明显改善,实时PPP的定位精度和可靠性持续提高。与此同时,自动驾驶、智能装备、精密农业等实时应用不仅要求稳定的厘米级定位精度,也更加关注接收机初始化、信号中断或观测环境变化后能否快速恢复高精度定位,因此快速收敛已成为实时GNSS高精度服务的重要性能指标。

实时PPP依赖低时延、高精度且连续可靠的卫星精密产品。国际GNSS服务组织(international GNSS service,IGS)于2013年正式提供实时服务(real-time service,RTS),通过实时数据流播发状态空间表示(state space representation,SSR)轨道和钟差改正数,为全球实时PPP提供了重要基础[5]。近年来,随着全球跟踪网不断完善和实时数据处理能力的提高,精密产品处理逐步由GPS向多GNSS扩展,轨道预报精度、实时钟差估计精度及产品更新效率均持续提升[6-8]。特别是GPS、北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system-3,BDS-3)和Galileo等卫星系统的发展,使实时轨道钟差产品已能够支撑厘米级PPP定位;同时,高稳定星载原子钟及地面时频设施的发展[9-11],也使实时钟差产品由主要服务于定位进一步向稳定时间基准和精密时间传递拓展[12-13]。

然而,仅依靠高精度轨道和钟差产品,传统浮点PPP仍需一定时间实现载波相位模糊度收敛。精密单点定位模糊度固定(PPP ambiguity resolution,PPP-AR)通过引入外部码偏差和相位偏差产品,恢复载波相位模糊度的整数特性,可显著缩短收敛时间,并提高固定解精度与稳定性[14-15]。随着实时PPP-AR的发展,实时精密产品也由早期以轨道和钟差为主,逐步扩展为包含卫星轨道、钟差、码偏差和相位偏差等在内的完整产品体系。此时,用户端快速定位性能不仅取决于单项轨道或钟差精度,还受到不同产品间一致性、相位偏差稳定性以及实时播发连续性的共同影响。IGS实时服务的发展目标也正在由实时厘米级定位进一步向快速获得高精度固定解演进,如何形成稳定、低时延且相互一致的实时精密产品体系,已成为支撑全球快速厘米级PPP-AR服务的关键。

武汉大学长期参与IGS实时分析中心建设与实时精密产品运行维护,围绕全球多GNSS实时高精度服务,逐步形成了覆盖精密卫星轨道、实时卫星钟差及信号偏差的产品处理体系。其中,实时轨道处理持续提高近实时定轨与预报能力[16-17];实时钟差处理中结合高稳定星地钟特性,在保证钟差精度的同时增强产品时间基准稳定度及协调世界时(coordinated universal time,UTC)溯源能力[18-20];在此基础上,进一步开展多GNSS、多频码偏差和相位偏差实时估计[21-22],为PPP模糊度固定提供必要的信号偏差产品。由轨道、钟差到相位偏差的协同处理,使实时精密

产品由单纯支撑厘米级浮点PPP逐步向快速PPP-AR定位及精密时间服务拓展[23-24]。

基于此，本文系统介绍了武汉大学IGS实时分析中心面向全球快速厘米级服务的多GNSS实时精密产品处理研究进展，重点阐述实时精密定轨、实时钟差与时间服务以及实时相位信号偏差产品处理的主要模型与方法，并结合2026年7月—8月实时精密产品性能评估及全球测站PPP-AR用户端实验，分析其对全球快速厘米级定位服务的支撑能力。

1　多GNSS数据源与处理流程

1.1　多GNSS数据源

武汉大学IGS实时分析中心融合IGS和iGMAS等GNSS跟踪站网数据，构建面向轨道、钟差和相位偏差解算的全球多GNSS跟踪网。图1给出了轨道、钟差和相位偏差产品处理所用测站的空间分布，其中轨道、钟差和相位偏差测站分别为166、114和146个。亚洲、欧洲及北美地区测站相对密集，海洋及南半球部分地区则相对稀疏，不同产品所用测站存在重叠。全球分布的观测网络为实时精密产品的连续运行和全球覆盖提供了基础保障。

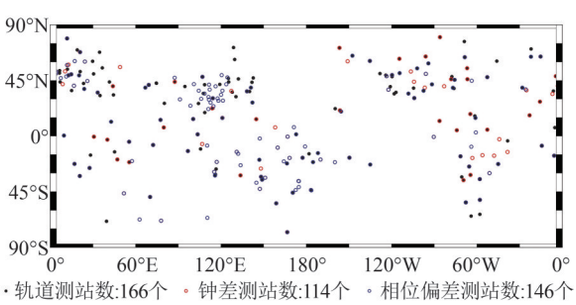


图1　武汉大学IGS实时分析中心BDS/GNSS产品处理测站分布图

Fig. 1　Station Distribution for BDS/GNSS Product Generation by the IGS Analysis Center at Wuhan University

图2进一步给出了2026年年积日(day of year，DOY)182—244期间不同产品解算所用测站数量的变化。轨道解算测站数量总体稳定在113～121个之间，平均为116.79个；钟差解算测站数量主要分布在94～100个之间，平均为97.35个；相位偏差解算正常时段保持在150～156个之间，平均为151.89个，但部分时段出现明显下降及数据中断。总体来看，采用小时观测文件的轨道处理测站数量最为稳定，而钟差和相位偏差解算受实时数据延迟与数据完整性影响，短时可出现约10个测站的波动。此外，由于相位偏差产品服务仍在试运行阶段，个别时段存在服务不可用现象。

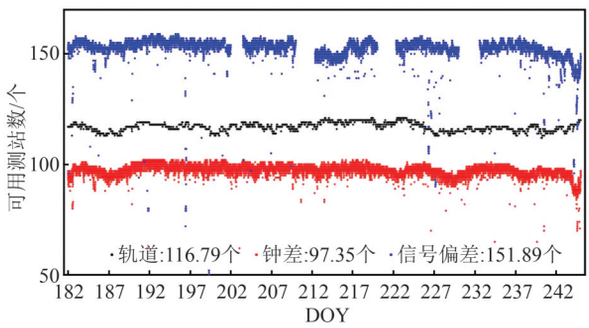


图2　武汉大学IGS实时分析中心BDS/GNSS产品解算测站可用性时序图

Fig. 2　Time Series of Station Availability for BDS/GNSS Product Generation by the IGS Analysis Center at Wuhan University

1.2　实时增强产品处理流程

图3展示了武汉大学IGS实时分析中心轨道、钟差与相位偏差产品的整体解算流程，其中OSB(observable-specific signal bias)表示绝对信号偏差。输入数据包括定时下载的观测文件、地球定向参数和IGS天线等辅助文件，定时解算的伪距偏差产品，以及实时接入的观测数据流。3个处理模块依次衔接，形成由轨道更新、钟差估计到相位偏差解算的产品处理链。

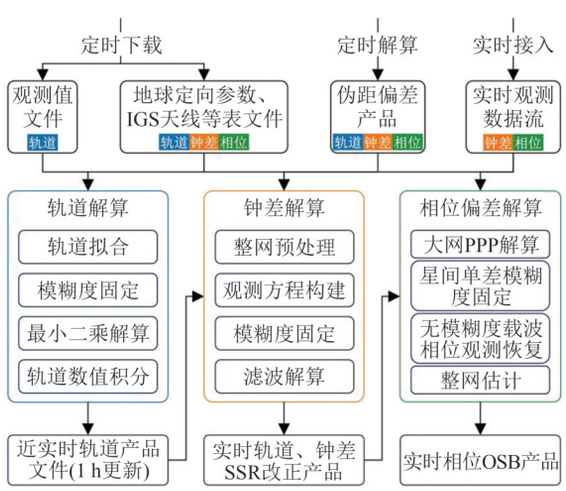


图3　武汉大学IGS实时分析中心轨道、钟差与相位偏差产品解算流程

Fig. 3　Workflow for Orbit, Clock, and Phase-Bias Processing of the IGS Analysis Center at Wuhan University

轨道解算首先进行轨道拟合和模糊度固定，随后通过最小二乘解算确定轨道参数，并经轨道数值积分生成近实时轨道产品文件，更新间隔为1 h。在最新轨道产品的支持下，钟差解算依次进行整网预处理、观测方程构建、模糊度固定和滤

波解算,生成实时轨道、钟差SSR改正产品,其中钟差更新间隔为5 s。逐小时更新的轨道与秒级更新的钟差相互配合,为用户端提供卫星状态改正信息。

相位偏差解算进一步利用实时轨道、钟差及伪距偏差产品,首先开展大网PPP解算,获取各测站的浮点模糊度;随后进行星间单差模糊度固定,恢复无模糊度载波相位观测,并通过整网估计生成实时OSB产品。相位偏差产品每300 s更新一次,即每5 min提供一组更新结果。上述流程将轨道、钟差和信号偏差产品联系起来,为用户端恢复载波相位模糊度的整数特性、实现实时PPP-AR提供配套的精密改正信息。

2 多GNSS实时精密产品处理方法模型

2.1 实时精密定轨模型与方法

BDS/GNSS卫星精密定轨需精确建模地心引力及近地空间各类摄动力扰动。在惯性坐标系下,卫星的运动方程可表述为:

$$\ddot{\boldsymbol{r}}=a_g+a_{ng}+a_{\mathrm{emp}} \tag{1}$$

式中,$\ddot{\boldsymbol{r}}$为卫星所受的加速度总和;a_g为保守力,主要包括地球非球形引力、固体潮及海潮等摄动;a_{ng}为非保守力,主要包括太阳光压、地球反照辐射压及大气阻力等;a_{emp}为经验力,用于补偿因动力学模型不完善而引入的虚拟摄动影响。其中受轨道高度限制,以光压、地球反照辐射及星体热辐射为代表的非保守力摄动是GNSS实时精密定轨的重点建模对象。针对BDS-3、Galileo等卫星采用的拉伸型平台结构及较大面质比特征导致经典ECOM(extended code orbit model)模型在不同太阳高度角下存在系统性误差的问题,通过建立先验光压模型,显著削弱精密定轨的系统性偏差[25]。同时,针对通讯、搜救等载荷天线导致的BDS卫星光压建模异常,引入载荷参数信息以增强先验模型精度,进一步提升光压摄动建模的准确性[26]。

BDS/GNSS卫星精密定轨观测方程方面,待估参数包含卫星初始状态参数、测站坐标参数、卫星和测站钟差参数、对流层天顶延迟参数、模糊度参数、地球定向参数等。按照作用时间范围分类,一般可将参数分为逐历元参数x^E、分段常量参数x^P及弧段常量参数x^C。为提升计算效率并充分发挥现代计算机中央处理器性能,本文通过优化设计矩阵结构、对时间相关参数进行聚类及法方程分块运算改善数据局部性。按照参数约化频率,将法方程中同类型参数统一归档,并依据作用时间从短到长依次排布,重新规划后的法方程表示为:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{N}^{E,E} & \boldsymbol{N}^{E,P} & \boldsymbol{N}^{E,C}\\ \boldsymbol{N}^{P,E} & \boldsymbol{N}^{P,P} & \boldsymbol{N}^{P,C}\\ \boldsymbol{N}^{C,E} & \boldsymbol{N}^{C,P} & \boldsymbol{N}^{C,C}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x^E\\ x^P\\ x^C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}^E\\ \boldsymbol{W}^P\\ \boldsymbol{W}^C\end{bmatrix} \tag{2}$$

考虑到参数间的随机游走或白噪声约束,引入逐历元参数的约化过程。在历元m处,法方程扩展为:

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{N}^{E,E}+\boldsymbol{P}_x & -\boldsymbol{P}_x & \boldsymbol{N}^{E,P} & \boldsymbol{N}^{E,C}\\ -\boldsymbol{P}_x & \boldsymbol{P}_x & 0 & 0\\ \boldsymbol{N}^{P,E} & 0 & \boldsymbol{N}^{P,P} & \boldsymbol{N}^{P,C}\\ \boldsymbol{N}^{C,E} & 0 & \boldsymbol{N}^{C,P} & \boldsymbol{N}^{C,C}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}^E_{m-1}\\ \boldsymbol{X}^E_m\\ \boldsymbol{X}^P\\ \boldsymbol{X}^C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{W}^E\\ 0\\ \boldsymbol{W}^P\\ \boldsymbol{W}^C\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{X}_m$和$\boldsymbol{X}_{m-1}$分别为历元m和$m-1$的逐历元参数;$\boldsymbol{P}_x$为参数权矩阵。为方便参数消除运算,历元$m-1$的参数可表示为:

$$\boldsymbol{X}^E_{m-1}=\left(\boldsymbol{N}^{E,E}+\boldsymbol{P}_x\right)^{-1}\cdot\left(\boldsymbol{W}^E+\boldsymbol{P}_x\boldsymbol{X}^E_m-\boldsymbol{N}^{E,P}\boldsymbol{X}^P-\boldsymbol{N}^{E,C}\boldsymbol{X}^C\right) \tag{4}$$

约去$\boldsymbol{X}^E_{m-1}$参数后,更新的法方程可表示为:

$$\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{P}_x & 0 & 0\\ 0 & \boldsymbol{N}^{P,P} & \boldsymbol{N}^{P,C}\\ 0 & \boldsymbol{N}^{C,P} & \boldsymbol{N}^{C,C}\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}-\boldsymbol{P}_x\\ \boldsymbol{N}^{P,E}\\ \boldsymbol{N}^{C,E}\end{bmatrix}\left[\boldsymbol{N}^{E,E}+\boldsymbol{P}_x\right]^{-1}\begin{bmatrix}-\boldsymbol{P}_x\\ \boldsymbol{N}^{E,P}\\ \boldsymbol{N}^{E,C}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\right)\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}^E_m\\ \boldsymbol{X}^P\\ \boldsymbol{X}^C\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0\\ \boldsymbol{W}^P\\ \boldsymbol{W}^C\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}-\boldsymbol{P}_x\\ \boldsymbol{N}^{E,P}\\ \boldsymbol{N}^{E,C}\end{bmatrix}\left[\boldsymbol{N}^{E,E}+\boldsymbol{P}_x\right]^{-1}\boldsymbol{W}^E \tag{5}$$

计算过程中,需保留$\boldsymbol{N}^{E,E}$、$\boldsymbol{W}^E$、$\boldsymbol{P}_x$、$\boldsymbol{N}^{E,P}$及$\boldsymbol{N}^{E,C}$用于恢复约化消去的过程参数。通过该方法,显著提升了多系统实时轨道产品解算效率,可将轨道更新周期缩短至1 h[17]。

武汉大学IGS实时分析中心轨道采用逐小时更新策略,融合IGS、iGMAS及武汉大学北斗试验网的小时更新多系统观测数据,参与实时精密定轨解算的测站约120个,测站分布如图1所示。通过上述参数聚类及法方程分块运算优化,基于批处理预报技术的实时轨道解算效率显著提升,可满足逐小时发布需求,产品延迟优于1 h。具体的轨道解算策略如表1所示。

以武汉大学多系统综合轨道产品为参考[38],GPS、GLONASS、Galileo、BDS系统2026年DOY

001—200 实时三维（three-dimensional，3D）轨道精度的累积分布函数如图 4 所示。统计表明，四系统 MEO 卫星的 3D 均方根（root mean square，RMS）分别为 2.4、4.6、3.8 及 4.9 cm；BDS IGSO 卫星的 3D RMS 为 11.4 cm，均满足实时钟差及相位信号偏差产品的解算精度需求。

表 1　武汉大学 IGS 实时分析中心 BDS/GNSS 轨道解算策略

Table 1　Strategy for BDS/GNSS Real-Time Orbit Determination of the IGS Analysis Center at Wuhan University

配置名称	策略配置说明
卫星姿态模型	GPS[27]、GLONASS[28]、Galileo[29]、BDS GEO：零偏模型、BDS-3 MEO/IGSO CAST 卫星[30]、BDS-3 MEO SECM 卫星[31]
重力场模型	EGM2008，12 阶×12 次
固体地球潮	IERS conventions 2010
三体引力	太阳、月亮、其他行星
光压模型	GPS/GLONASS：Box-Wing＋ECOM2[32]；Galileo：ECOM1＋先验模型[33]；BDS-2 GEO：ECOM1＋增强模型[34]；BDS-2 IGSO/MEO：ECOM1＋切向经验力[35]；BDS-3 MEO：ECOM2＋先验模型[25]；BDS-3 M23/M24：ECOM1＋增强模型[26]
地球反照辐射	Rodriguez-Solano 等[36]
天线推力	Steigenberger 模型[37]，各卫星天线发射功率为 GPS Block IIR-A/B：60 W；GPS Block IIR-M：145 W；GPS Block IIF 240 W；GPS Block IIIA：300 W；GLONASS：100 W；Galileo IOV：135 W；Galileo FOC 260 W；BDS-2 IGSO：185 W；BDS-2 MEO：130 W；BDS-3 MEO-CAST：310 W，BDS-3 MEO-SECM：280 W；QZSS-2I：550 W；QZSS-2G：550 W；QZSS-2A：460 W
相对论效应	IERS conventions 2010
地球定向参数	极移、UT1 参数：gpsrapid.daily，Desai-Sibois 模型 sub-daily 偏差项改正
系统间偏差/频率间偏差	GPS、Galileo、BDS 估计系统间偏差；GLONASS 估计系统内偏差

注：GEO（geostationary orbit satellite）表示地球静止轨道卫星；MEO（middle earth orbit）表示中地球轨道；IGSO（inclined geosynchronous orbit）表示倾斜地球同步轨道；CAST（China academy of space technology）表示中国空间技术研究院；SECM（Shanghai engineering center for microsatellites，microsat）表示上海微小卫星工程中心；IERS（international earth rotation and reference systems service）表示国际地球自转服务；QZSS（quasi-zenith satellite system）表示准天顶卫星系统。

2.2　实时钟差与时间服务产品处理

传统实时精密卫星钟差估计中将钟差作为白噪声逐历元估计，并通过固定参考钟或对齐广播星历钟差确定时间基准。该方法未充分利用新一代星载原子钟和地面高稳定时频参考的频率稳定特性，同时也容易将广播钟差基准跳变传递至用户端。为此，武汉大学针对星载原子钟和地面高稳定时频参考的时频特性，建立包含总相位 $\theta(t)$、相位 $p(t)$、频率偏差 $f(t)$ 和频率漂移 $r(t)$ 的 4 状态时钟模型：

$$\boldsymbol{x}(t)=\left[\theta(t)\quad p(t)\quad f(t)\quad r(t)\right]^{\mathrm{T}} \tag{6}$$

式中，不同状态量过程噪声参数由长期钟差序列 Hadamard 偏差辨识结果确定。进一步在实时钟差估计过程中，对参与钟组的状态修正量施加加权零和约束：

$$\sum_{i=1}^{n} w_i^{\alpha}\left(\hat{\alpha}_{i,k}-\hat{\alpha}_{i,k^-}\right)=0,\alpha\in\left\{\theta\,|\,p\,|\,f\right\} \tag{7}$$

式中，n 为参与时间基准维持的时钟数量；$\hat{\alpha}_{i,k^-}$ 和 $\hat{\alpha}_{i,k}$ 分别表示第 i 个时钟相应状态在历元 k 的一步预测值和滤波估计值；w_i^{α} 为第 i 个时钟相应状态的权重。由于部分参与钟未设置频率漂移状态，频率漂移 r 不再单独施加公共基准约束。

各时钟权重依据相应状态的过程噪声功率谱密度确定：

$$w_i^{\alpha}=\frac{S_{\alpha,i}^{-1}}{\sum_{j=1}^{n}S_{\alpha,j}^{-1}} \tag{8}$$

式中，$S_{\alpha,i}$ 为第 i 个时钟相应状态的过程噪声功率谱密度。通过约束观测对钟组公共状态的整体修正，上一历元形成的时间基准可依靠高稳定星地钟状态连续传递，并通过约束多 GNSS 不同系统间相对时间基准的变化，形成统一、连续的多 GNSS 时间基准。

由星地高稳定钟协同维持的时间基准具有较好的短期频率稳定性，但其长期频率并不天然与 UTC（coordinated universal time）保持一致。为使实时钟差产品具备 UTC 溯源能力，进一步采用 UTC(k) 外部时频参考的 GNSS 测站获取产品时间基准相对于 UTC(k) 的变化，并结合线性二次高斯（linear quadratic Gaussian，LQG）方法实施长期频率驾驭。考虑到总相位状态 θ 包含

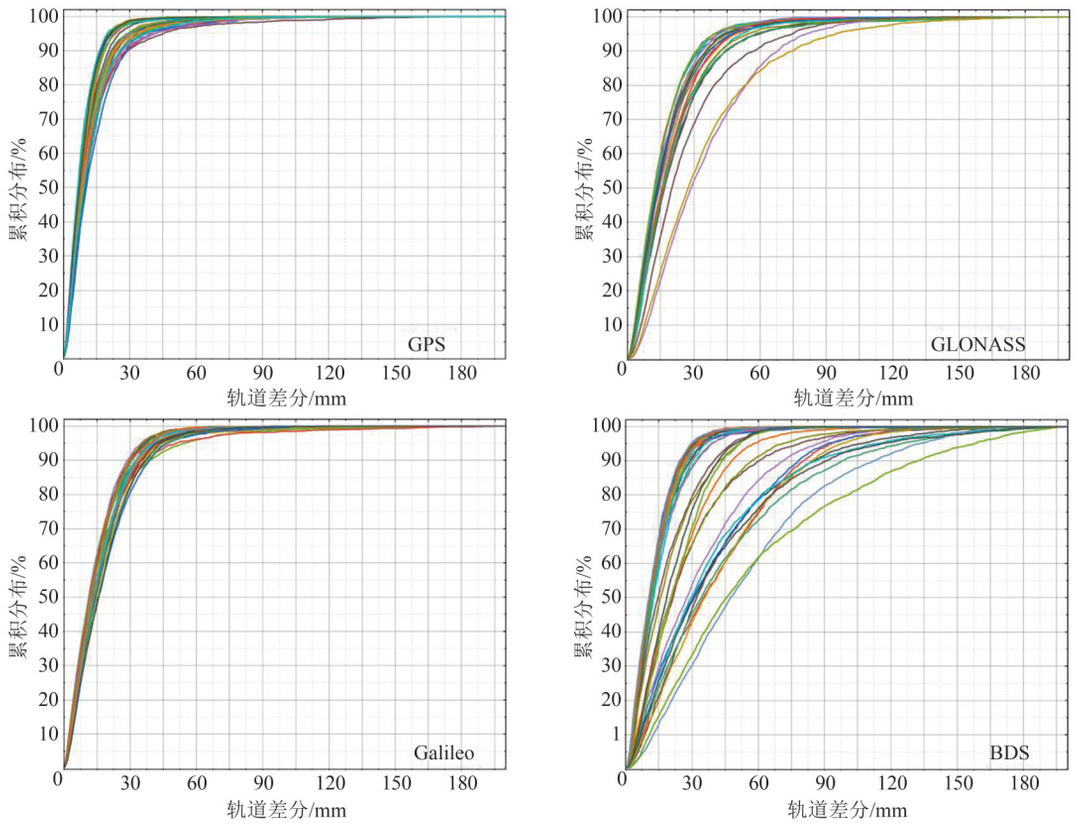


图4 武汉大学IGS实时分析中心2026年DOY 001—200轨道精度累积分布函数图

Fig. 4 Cumulative Distribution Functions of Orbit Accuracy of real-time products provided by the IGS Analysis Center at Wuhan University During DOY 001—200 in 2026

相位白噪声,驾驭过程中采用相对平滑的相位状态p和频率状态f构建控制状态向量:

$$\boldsymbol{x}_k=\begin{bmatrix}p_k\\f_k\end{bmatrix} \tag{9}$$

设滤波历元间隔为τ,相邻两次驾驭之间包含N_d个滤波历元,则驾驭间隔为$N_d\tau$,频率驾驭状态方程表示为:

$$\boldsymbol{x}_{k+1}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{B}u_k+\boldsymbol{q}_k \tag{10}$$

式中,

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & N_d\tau\\0 & 1\end{bmatrix},\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}N_d\tau\\1\end{bmatrix} \tag{11}$$

u_k为频率驾驭量;$\boldsymbol{q}_k$为过程噪声。控制量首先作用于频率状态,并通过时间积分逐渐反映至相位状态,从而避免直接对时间基准实施相位阶跃改正。

为验证上述处理策略,选取2026-06-10—2026-07-19连续40天,涵盖GPS、GLONASS、BDS-3和Galileo实时数据进行分析。武汉大学常规实时产品记为WHU,采用上述时间基准处理生成的产品记为WHU-MODEL。时间服务性能验证选取10个采用UTC(k)或氢钟等外部高稳定时频参考的GNSS测站,通过PPP获取接收机钟差。对于采用高稳定外部时频参考的测站,其Hadamard偏差可以反映实时产品时间基准在用户端的频率稳定特性。图5给出了10个测站各GNSS系统接收机钟差Hadamard偏差的平均结果,可以看出,WHU不同GNSS系统间稳定度差异较明显;采用WHU-MODEL后,四系统Hadamard偏差整体保持较低水平,且不同系统的变化特征更加一致,表明WHU-MODEL对应的产品时间基准在用户端具有更好的频率稳定度和系统间一致性。

进一步利用UTC(k)测站评价实时产品的UTC时间传递性能,并以国际计量局(bureau international des poids et mesures,BIPM)发布的快速UTC(rapid UTC,UTCr)结果作为参考。WHU常规产品分别参考各GNSS系统广播钟差基准,获得PPP接收机钟差并完成硬件延迟改正后,还需结合导航电文播发的UTC溯源参数完成系统时间至UTC的转换;WHU-MODEL则利用UTC(k)频率驾驭维持产品时间基准与UTC之间的长期联系。

图6给出了GPS、BDS-3和Galileo在40天试验时段内的UTC时间传递误差。采用WHU-

MODEL后，各系统误差序列中的时变波动明显减弱，不同系统之间的变化也更加一致。与WHU常规产品相比，GPS、BDS-3和Galileo的UTC时间传递误差标准差（standard deviation，STD）分别降低58.4%、32.8%和76.2%，表明基于UTC(k)的时间基准驾驭能够显著提高UTC时间传递稳定度。

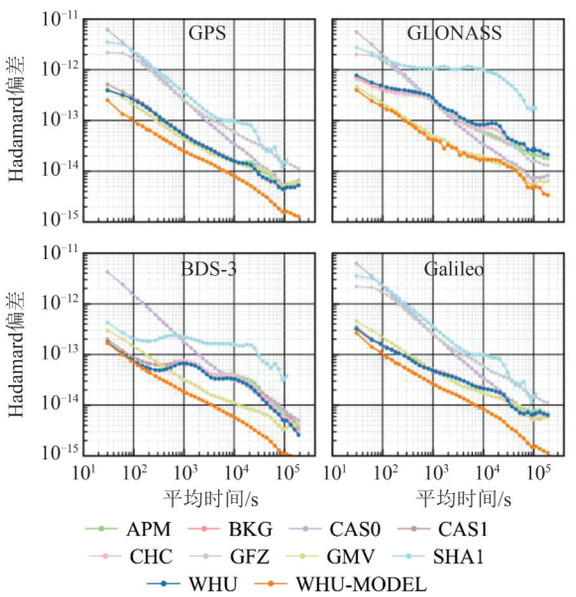


图5　不同实时产品对应的PPP接收机钟差Hadamard偏差

Fig. 5　Hadamard Deviation of PPP Receiver Clocks Using Different Real-Time Products

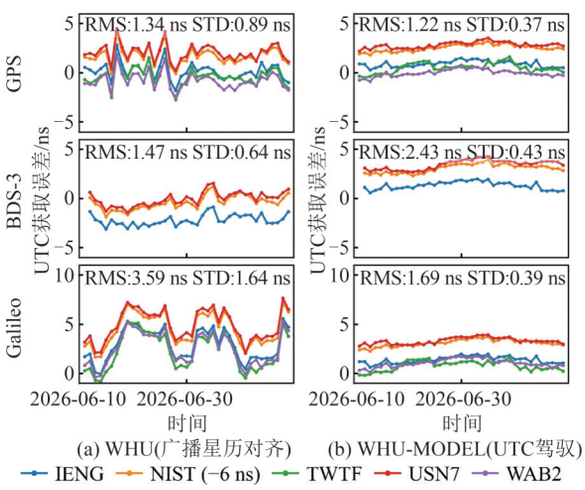


图6　WHU与WHU-MODEL产品对应的UTC时间传递误差序列

Fig. 6　UTC Time-Transfer Error Time Series Using WHU and WHU-MODEL Products

需要指出的是，UTC时间传递误差RMS还受到接收机硬件延迟标定残差等近似常值偏差影响，目前BIPM提供的接收机硬件延迟校正参数标准不确定度约为1.5～2.5 ns[39]，与本文时间传递误差RMS处于相近量级。因此，现有结果主要反映时间传递稳定度的改善，绝对时间传递精度仍受到硬件延迟标定精度限制。总体而言，武汉大学实时钟差处理中通过高稳定星地钟协同维持产品时间基准，并利用UTC(k)实施长期频率驾驭，进一步提升了实时精密钟差产品的授时频率稳定度和UTC溯源能力。

2.3　实时相位信号偏差产品解算

相位偏差产品是精密单点定位模糊度固定的关键改正信息。武汉大学IGS分析中心面向实时多GNSS应用，建立了GPS、Galileo和BDS多频相位偏差估计与服务流程。该方法以全球实时GNSS观测数据为基础，在PPP大网计算完成后，首先使用浮点模糊度计算未校准硬件延迟（uncalibrated phase delay，UPD）并固定多频点信号的整数模糊度[14]。

接收机i、卫星k和频点j对应浮点模糊度可表示为：

$$\tilde{N}_{i,j}^{k}=N_{i,j}^{k}+b_{i,j}-b_{j}^{k} \tag{12}$$

式中，$\tilde{N}_{i,j}^{k}$为PPP大网解算得到的浮点模糊度；$b_{i,j}$和b_{j}^{k}分别为接收机端和卫星端相位偏差。在同一星座内选择参考星q进行星间单差，可消除接收机端公共相位偏差，得到：

$$\tilde{N}_{i,j}^{kq}=N_{i,j}^{kq}-b_{j}^{kq} \tag{13}$$

式中，$\tilde{N}_{i,j}^{kq}$和$N_{i,j}^{kq}$分别为星间单差浮点模糊度和整数模糊度；b_{j}^{kq}为卫星k与参考卫星q之间的单差UPD。汇集全球多个测站对同一卫星对的浮点模糊度后，可利用其小数部分估计卫星端UPD；随后，将估计得到的UPD应用于PPP大网解算获得的单差浮点模糊度，恢复其整数特性，即

$$\hat{N}_{i,j}^{kq}=\mathrm{round}\left(\tilde{N}_{i,j}^{kq}+b_{j}^{kq}\right) \tag{14}$$

式中，$\hat{N}_{i,j}^{kq}$为固定后的星间单差整数模糊度。实际处理中，整数候选还需经过相应的整数搜索和可靠性检验，以保证模糊度固定结果的可靠性。对于成功固定的模糊度，在选定模糊度基准后恢复其非差整数形式$\hat{N}_{i,j}^{k}$，并将其从原始载波相位观测中消除，构造无模糊度载波距离观测：

$$\bar{L}_{i,j}^{k}=L_{i,j}^{k}-\lambda_{j}\hat{N}_{i,j}^{k} \tag{15}$$

在此基础上，固定武汉大学IGS实时分析中心卫星轨道、钟差及测站坐标，并将接收机钟差和接收机端相位硬件偏参数进行重参数化，最终得到用于卫星相位OSB估计的载波距离观测方程，直接由无模糊度载波距离观测估计，实现与函数模型自洽的相位偏差估计[40]。

采用上述方法估计获取了GPS L1/L2/L5、Galileo E1/E5a/E5b/E5/E6以及BDS-2/BDS-3 B1C/B1I/B2a/B2b/B3I等多个频点卫星相位OSB,并通过IGS实时向全球用户发布。

3 实时精密产品快速厘米级定位服务

3.1 实时精密产品评估

表2给出了武汉大学IGS实时分析中心主要精密产品的更新间隔及获取方式。其中,近实时轨道每1 h更新一次,实时钟差和相位偏差的更新间隔分别为5 s和300 s。各类产品均提供相应的实时获取方式,并在武汉大学IGS数据中心服务器进行归档存储,可用于实时处理及事后分析。

进一步,图7上图给出了DOY 182—244期间轨道和钟差产品的可用卫星数量。GPS、GLONASS、BDS和Galileo的平均可用卫星数分别为30.67、17.42、35.06和27.63颗,四系统合计平均为110.78颗。其中,GPS主要保持在30~31颗,GLONASS主要为17~18颗,BDS主要为34~36颗,Galileo在DOY 205附近由27颗增加至28颗,此后基本保持稳定。各系统可用卫星数量总体变化较小,表明轨道和钟差产品在该时段具有较稳定的卫星覆盖。

表2 武汉大学IGS实时分析中心精密产品获取信息

Table 2 Access Information for Precise Products by the IGS Analysis Center at Wuhan University

产品类型	更新间隔	实时获取挂载点	归档存储目录
近实时轨道	1 h	SSR*00WHU#	ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/gps/products
实时钟差	5 s	SSR*00WHU#	ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/MGEX/realtime
实时相位偏差	300 s	OSBC00WHU1	ftp://igs.gnsswhu.cn/pub/whu/phasebias/

注:*表示挂载点前缀SSRC/SSRA分别为质心和天线相位中心轨道产品;#表示SSR产品格式1/0分别为IGS-SSR和RTCM-SSR。

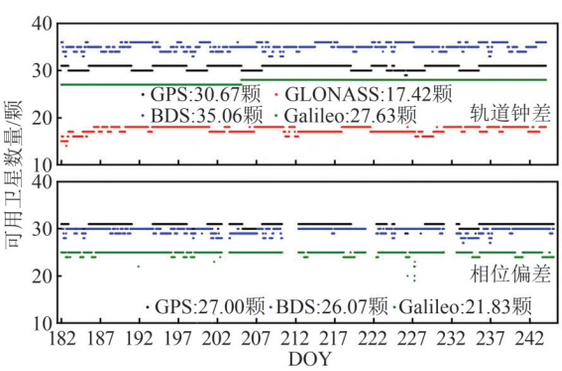


图7 武汉大学IGS实时分析中心BDS/GNSS实时产品可用性时序图

Fig. 7 Availability for BDS/GNSS Real-Time Products by the IGS Analysis Center at Wuhan University

图7下图给出了同期信号偏差产品的可用卫星数量。GPS、BDS和Galileo的平均可用卫星数分别为27.00、26.07和21.83颗,合计平均为74.90颗。正常输出时,GPS主要为30~31颗,BDS主要为29~30颗,Galileo主要为24~25颗,但图7中存在部分时段的数据缺失和卫星数量的短时下降。与轨道钟差产品相比,信号偏差产品的卫星覆盖及连续性仍有差距。

图8上图给出了同期各系统3D轨道误差RMS逐日变化。GPS、GLONASS、BDS和Galileo的平均3D RMS分别为0.05、0.08、0.09和0.07 m。其中,GPS整体精度最好,多数日期保持在约0.04~0.06 m,BDS多数日期约为0.07~0.10 m。各系统在部分日期出现短时精度下降,例如GLONASS在DOY 185附近达到约0.20 m,Galileo在DOY 213—214附近达到约0.16 m,随后均回落至原有量级。总体上,四系统平均3D轨道误差均小于0.10 m。

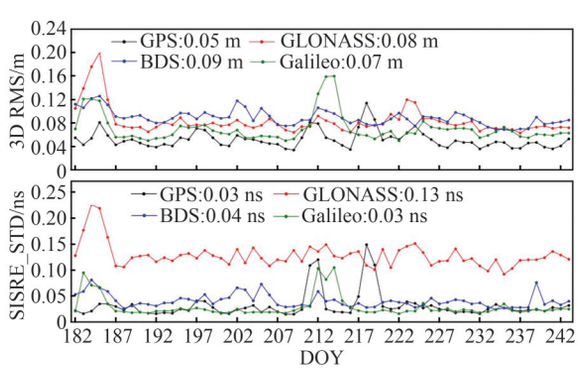


图8 武汉大学IGS实时分析中心BDS/GNSS实时轨道钟差产品精度统计图

Fig. 8 Accuracy for BDS/GNSS Real-Time Orbit and Clock by the IGS Analysis Center at Wuhan University

图8下图进一步给出了综合轨道与钟差影响的SISRE_STD时序,该指标反映轨道钟差产品对定位的综合影响。由图8可知,GPS、GLONASS、BDS和Galileo的平均值分别为0.03、0.13、0.04和0.03 ns。其中GPS与Galileo整体水平相近,多数日期约为0.02~0.03 ns,BDS主要约为0.03~0.05 ns,GLONASS则主要约为0.10~0.15 ns,其平均值约为GPS和Galileo的4.3倍。

此外,在地影、机动等轨道异常时段,部分产品精度仍存在明显退化。

图 9 展示了同时期武汉大学 IGS 实时分析中心 GPS、BDS 和 Galileo 多频相位 OSB 估计残差的逐历元 RMS。剔除实时服务调整导致相应的产品中断后,相位 OSB 产品完整率达到 97%。第一频点 L1/B1I/E1 的平均 RMS 分别为 0.54、0.50 和 0.57 cm;第二频点 L2/B3I/E5a 分别为 0.26、0.28 和 0.22 cm;第三频点 L5/B2I/E6 分别为 0.31、0.28 和 0.28 cm。除少量历元出现较大离散值外,各频点残差 RMS 在运行时段内总体保持稳定,且不同系统表现出较好的一致性。较大的离散值主要出现在产品初始化或重新初始化阶段,此时 PPP 模糊度尚未充分收敛,模糊度固定成功率和可靠性相对较低,从而导致部分历元相位 OSB 估计残差增大。总体而言,第一频点的残差水平相对较高,而第二、第三频点整体维持在约 0.2~0.3 cm,表明武汉大学 IGS 实时分析中心多系统多频相位 OSB 估计具有较好的内部一致性。

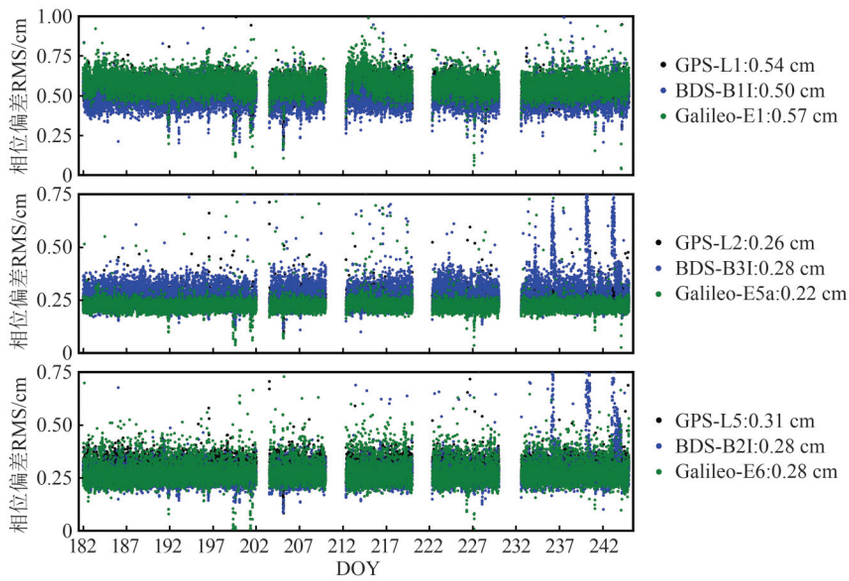


图 9　武汉大学 IGS 实时分析中心 BDS/GNSS 实时相位偏差产品精度统计图

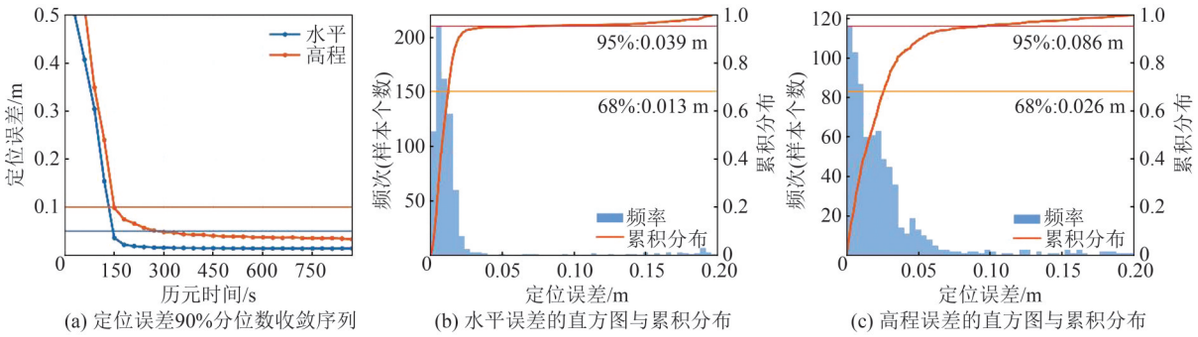
Fig. 9　Accuracy for BDS/GNSS Real-Time Phase Bias by the IGS Analysis Center at Wuhan University

3.2　实时精密产品定位验证

为验证武汉大学 IGS 实时分析中心精密产品在动态定位中的服务性能,本文实验选取 20 个全球分布的测站,采用 GPS、Galileo 和 BDS-3 多系统联合解算,开展了双频非差非组合实时仿动态 PPP-AR 定位验证。观测数据采样间隔为 30 s,每 15 min 重新初始化定位模型模拟实际动态应用中接收机重新启动或信号中断后的快速初始化场景。实时产品采用武汉大学 IGS 实时分析中心提供的 SSRC00WHU1 轨道/钟差改正数和 OSBC00WHU1 码偏差/相位偏差改正数。解算过程中截止高度角设为 10°,伪距和相位观测噪声分别设为 0.3 m 和 0.003 m。统计方面,以 90% 置信度水平/高程误差序列作为分析对象,用以评估该实时产品在快速厘米级定位服务中的整体性能。

图 10 给出了 20 个测站 PPP-AR 定位收敛序列,以及所有样本的定位误差频率分布与累积分布。图 10(a)为定位误差 90% 分位数收敛序列,图 10(b)和图 10(c)分别为水平、高程误差的直方图与累积分布。从收敛过程来看,水平和高程误差在初始化阶段均呈现快速下降趋势。150 s 时,水平误差降至 0.036 m,高程误差降至 0.099 m,首次同时满足水平误差小于 5 cm、高程绝对误差小于 10 cm 的连续稳定判据。

从图 10(b)和 10(c)的样本误差分布特征可以看出,水平误差直方图集中在 0~0.03 m 区间,峰值位于 0.01 m 附近,累积分布在 0.013 m 和 0.039 m 处分别达到 68% 和 95% 分位值。这意味着在全部统计样本中,绝大多数历元的水平定位结果已处于厘米级以内,且离散度较小。相比之下,高程误差直方图分布更宽,主峰虽仍位于 0~0.04 m,但在 0.04~0.06 m 区间仍有明显频数,累积分布在 0.026 m 和 0.086 m 处才分别达到 68% 和 95% 分位值。高程误差的两个分位值均约为水平分量的 2 倍,且尾部样本更多,说明高程方向的误差离散度和极值均大于水平方向。这一结果与收敛曲线中高程误差下降较慢、稳定后数值较大的特征一致。



(a) 定位误差90%分位数收敛序列 (b) 水平误差的直方图与累积分布 (c) 高程误差的直方图与累积分布

图10 水平和高程收敛序列及水平、高程定位误差频率与累积分布

Fig. 10 Sequences of Horizontal and Vertical Convergence, and Frequency and Cumulative Distributions of Horizontal and Vertical Positioning Errors

4 结 语

本文系统总结了武汉大学IGS实时分析中心面向全球快速厘米级服务的多GNSS实时精密产品处理模型与算法研究进展。实时精密定轨方面,通过精细化动力学建模、参数聚类及法方程分块运算,提高了多GNSS轨道解算效率,实现轨道产品逐小时更新,GPS、GLONASS、Galileo和BDS MEO卫星实时轨道精度达到厘米级。实时钟差方面,构建高稳定星地钟协同时间基准维持方法,并结合UTC(k)开展长期频率驾驭,提升了多GNSS产品时间基准的频率稳定度、系统间一致性及UTC溯源能力。

在已有实时轨道和钟差产品基础上,武汉大学IGS实时分析中心进一步上线GPS、Galileo和BDS多频相位OSB产品,使实时精密产品由支撑传统浮点PPP进一步拓展至PPP-AR。相位偏差产品通过恢复载波相位模糊度整数特性,为快速模糊度固定和缩短PPP收敛时间提供了关键支撑;近期产品运行结果表明,多频相位OSB具有较好的连续性和稳定性。由此,武汉大学IGS实时分析中心已初步形成涵盖轨道、钟差、码偏差和相位偏差的多GNSS实时精密产品体系。

全球测站GPS/Galileo/BDS-3联合PPP-AR实验表明,初始化150 s后,水平和高程误差分别降至3.6 cm和9.9 cm,95%样本误差分别优于3.9 cm和8.6 cm,表明新增相位偏差产品能够有效支撑模糊度快速固定和厘米级定位收敛。总体上,武汉大学IGS实时分析中心实时精密产品正由PPP厘米级增强服务向PPP-AR快速厘米级增强服务发展,初步具备面向全球用户提供分钟级收敛的厘米级服务能力。后续将进一步提升实时产品的完整性、跨系统一致性、异常恢复及连续服务能力,为更加快速、可靠的全球高精度定位与精密时间服务提供支撑。

参 考 文 献

[1] 陈秀德, 刘惠, 蔚保国, 等. 北斗/GNSS广域精密定位技术与服务:现状与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(3): 413-429.
CHEN Xiude, LIU Hui, YU Baoguo, et al. BeiDou/GNSS Wide-Area Precise Positioning Technology and Service: Current Situation and Prospects [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(3): 413-429.

[2] 施闯, 辜声峰, 楼益栋, 等. 广域实时精密定位与时间服务系统[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1206-1214.
SHI Chuang, GU Shengfeng, LOU Yidong, et al. Real-Time Wide-Area Precise Positioning and Precise Timing Service System[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1206-1214.

[3] 党亚民, 蒋涛, 杨元喜, 等. 中国大地测量研究进展(2019—2023)[J]. 测绘学报, 2023, 52(9): 1419-1436.
DANG Yamin, JIANG Tao, YANG Yuanxi, et al. Research Progress of Geodesy in China(2019—2023)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(9): 1419-1436.

[4] 方荣新, 陈智潜, 李大炜, 等. 基于北斗PPP-B2b改正信号的地震同震形变实时监测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2026, 51(3): 567-575.
FANG Rongxin, CHEN Zhiqian, LI Dawei, et al. A Method for Real-Time Coseismic Displacement Monitoring Based on BDS PPP-B2b Correction Signals[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2026, 51(3): 567-575.

[5] AGROTIS L, SCHÖNEMANN E, ENDERLE W, et al. The IGS Real Time Service[C]// GNSS 2017 — DVW-Seminar Kompetenz für die Zukunft, Germany, 2017.

[6] KAZMIERSKI K, SOŚNICA K, HADAS T. Quality Assessment of Multi-GNSS Orbits and Clocks for Real-Time Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 1-12.

[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: 12.

[8] 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.

[9] JADUSZLIWER B, CAMPARO J. Past, Present and Future of Atomic Clocks for GNSS [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25: 27.

[10] 毛悦, 宋小勇, 张清华, 等. BDS-3卫星钟在轨性能评估与分析[J]. 测绘学报, 2023, 52(3): 349-356.
MAO Yue, SONG Xiaoyong, ZHANG Qinghua, et al. Performance Evaluation and Comparison of On-Orbit Satellite Clocks for BDS-3[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(3): 349-356.

[11] WIDCZISK J S, MÄNNEL B, WICKERT J. Investigations into Highly Stable GNSS Ground and Space Clocks Using a Network of Globally Distributed H-Maser Stations[J]. *GPS Solutions*, 2026, 30: 21.

[12] GUO W F, SONG W W, NIU X J, et al. Foundation and Performance Evaluation of Real-Time GNSS High-Precision One-Way Timing System [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1): 1-11.

[13] KUNZI F, MONTENBRUCK O. Precise Disciplining of a Chip-Scale Atomic Clock Using PPP with Broadcast Ephemerides [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(4): 165.

[14] 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.

[15] GENG J H, GUO J, MENG X L, et al. Speeding up PPP Ambiguity Resolution Using Triple-Frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94: 6.

[16] DAI X L, GONG X P, LI C L, et al. Real-Time Precise Orbit and Clock Estimation of Multi-GNSS Satellites with Undifferenced Ambiguity Resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2022, 96(10): 73.

[17] XU X L, LI J Q, GUO J, et al. Near Real-Time Multi-GNSS Orbits, Clock and Observable-Specific Biases at Wuhan University[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(4): 191.

[18] SHI C, GUO S W, GU S F, et al. Multi-GNSS Satellite Clock Estimation Constrained with Oscillator Noise Model in the Existence of Data Discontinuity[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(4): 515-528.

[19] GU S F, MAO F Y, GONG X P, et al. Improved Short-Term Stability for Real-Time GNSS Satellite Clock Estimation with Clock Model[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(6): 61.

[20] GONG X P, ZANG M H, MAO F Y, et al. GNSS Observation Noise Analysis and Impact of Its Setting on Satellite Clock Estimation Based on the Clock Model [J]. *Measurement*, 2026, 287: 122413.

[21] GONG X P, ZHENG F, GU S F, et al. The Long-Term Characteristics of GNSS Signal Distortion Biases and Their Empirical Corrections [J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 52.

[22] LOU Y D, ZHANG Z, GONG X P, et al. Estimating GPS Satellite and Receiver Differential Code Bias Based on Signal Distortion Bias Calibration[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27: 48.

[23] GU S F, FANG L Z, JIANG W P. Multiple Integer Candidates Ambiguity Resolution: A Unification Ambiguity Resolution Algorithm[J]. *Satellite Navigation*, 2024, 5: 21.

[24] HU J Y, SUN Y Z, TARIQ M A, et al. BLAC-Q4DIM: A Bayesian Optimization and LSTM Driven Adaptive Clustering Quasi-Four-Dimensional Ionospheric Model[J]. *Satellite Navigation*, 2026, 7: 25.

[25] GUO J, WANG C, CHEN G, et al. BDS-3 Precise Orbit and Clock Solution at Wuhan University: Status and Improvement [J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(2): 15.

[26] GUO J, WANG L Y, YANG C, et al. Modeling and Comparison of Solar Radiation Pressure for Two BDS-3 MEO Satellites (C45 and C46) with SAR Payload[J]. *Advances in Space Research*, 2025, 75(1): 1163-1176.

[27] KOUBA J. A Simplified Yaw-Attitude Model for Eclipsing GPS Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(1): 92.

[28] KOUBA J. A Note on the December 2013 Version of the Eclips. f Subroutine: [R/OL]. 2013-11-23. https://acc.igs.org/orbits/eclipsDec2013note.pdf.

[29] EUSPA. Galileo Satellite Metadata [EB/OL]. [2026-09-15]. https://www.gsc-europa.eu/sup-

port-to-developers/galileo-satellite-metadata.

[30] WANG C, GUO J, ZHAO Q L, et al. Yaw Attitude Modeling for BeiDou I06 and BeiDou-3 Satellites[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(4): 1-10.

[31] YANG C, GUO J, ZHAO Q L. Yaw Attitudes for BDS-3 IGSO and MEO Satellites: Estimation, Validation and Modeling with Intersatellite Link Observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97: 6.

[32] ARNOLD D, MEINDL M, BEUTLER G, et al. CODE's New Solar Radiation Pressure Model for GNSS Orbit Determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(8): 775-791.

[33] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HUGENTOBLER U. Enhanced Solar Radiation Pressure Modeling for Galileo Satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(3): 283-297.

[34] WANG C, GUO J, ZHAO Q L, et al. Empirically Derived Model of Solar Radiation Pressure for BeiDou GEO Satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(6): 791-807.

[35] 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.

[36] RODRIGUEZ-SOLANO C J, HUGENTOBLER U, STEIGENBERGER P, et al. Impact of Earth Radiation Pressure on GPS Position Estimates[J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(5): 309-317.

[37] STEIGENBERGER P, THOELERT S, MONTENBRUCK O. GNSS Satellite Transmit Power and Its Impact on Orbit Determination[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 609-624.

[38] CHEN G, GUO J, GENG T, et al. Multi-GNSS Orbit Combination at Wuhan University: Strategy and Preliminary Products[J]. *Journal of Geodesy*, 2023, 97(5): 41.

[39] PETIT G, DEFRAIGNE P. Calibration of GNSS Stations for UTC[J]. *Metrologia*, 2023, 60(2): 025009.

[40] GUO J, GENG J H, ZENG J, et al. GPS/Galileo/BDS Phase Bias Stream from Wuhan IGS Analysis Center for Real-Time PPP Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(2): 67.