

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.03.011

多模 GNSS IFCB 产品特点分析及 精密单点定位性能评估

孔祥豪¹, 方卓², 张兵良^{2,3}, 李珊珊², 王沂萱⁴

(1. 苏交科集团股份有限公司, 南京 210019; 2. 南京数维测绘有限公司, 南京 211808;
3. 南京农业大学公共管理学院, 南京 210095; 4. 南京信息工程大学软件学院, 南京 210044)

摘要:随着多模全球卫星导航系统(GNSS)高精度应用需求的日益增长, 频间钟偏差(IFCB)问题近年来得到广泛研究。基于2023年年积日(DOY)(130~136)澳大利亚地区18个多模实验跟踪网(MGEX)观测数据的无几何无电离层(GFIF)组合, 分别估计了北斗卫星导航系统(BDS)、伽利略卫星导航系统(Galileo)和全球定位系统(GPS)卫星的IFCB产品。对比分析了BDS-2, BDS-3, Galileo和GPS卫星的IFCB的特点。评估了相位相关的IFCB(PIFCB)误差对GPS BLOCK IIF卫星超宽巷(EWL)未校准相位硬件延迟(UPD)和非组合(UC)三频精密单点定位(PPP)性能的影响。实验结果表明, PIFCB误差对Galileo卫星的影响最小, 对GPS BLOCK IIF卫星的影响最大; 对BDS-3卫星的影响低于BDS-2卫星; 不同信号频率对IFCB产品的估计结果会产生一定的影响。实验结果进一步表明, IFCB产品可以显著提高GPS BLOCK IIF卫星EWL UPD的稳定性和UC三频PPP的定位性能。EWL UPD的平均标准差(STD)从0.064周减小到0.021周, 提高了67.2%。UC三频PPP在东(E)、北(N)、天顶(U)三方向分别从4.63 cm, 3.04 cm和8.76 cm减小到3.08 cm, 2.00 cm和5.85 cm, 平均定位精度分别提高了31.5%, 34.2%和33.2%。收敛时间小于20 min的比例从66.3%提高到71.8%, 提高了5.5%。平均收敛时间从21.13 min缩短到17.24 min, 减少了18.4%。

关键词:频间钟偏差; 全球卫星导航系统; 未校准相位硬件延迟; 精密单点定位

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)03-0109-10

Characteristics analysis of inter-frequency clock bias products of multi-GNSS and its performance evaluation for precise point positioning

KONG Xianghao¹, FANG Zhuo², ZHANG Bingliang^{2,3}, LI Shanshan², WANG Yixuan⁴

(1. Jiangsu Transportation Institute Group, Nanjing 210019, China;

2. Nanjing Shuwei Surveying and Mapping Co., Ltd., Nanjing 211808, China;

3. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

4. School of Software, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: With the increasing demand for high-precision applications of multi-constellation global navigation satellite systems (GNSS), the inter-frequency clock bias (IFCB) issue has been widely studied in recent years. Based on the geometry-free and ionosphere-free (GFIF) combinations of

收稿日期: 2023-11-08; 修订日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(42271106)

作者简介: 孔祥豪(1978—), 男, 高级工程师, 主要从事大地测量学方面的研究。

通信作者: 方卓(1996—), 男, 助理工程师, 主要从事卫星导航定位与技术方面的研究。

observation data from 18 multi-GNSS experiment (MGEX) stations in the Australian region from day of year (DOY) 130 to 136 in 2023, the IFCB products of the BeiDou navigation satellite system (BDS), Galileo navigation satellite system (Galileo), and global positioning system (GPS) satellites are estimated, respectively. The characteristics of IFCB for BDS-2, BDS-3, Galileo, and GPS satellites are analyzed and compared. The impact of phase-specific IFCB (PIFCB) errors on the positioning performance of GPS BLOCK IIF satellite's extra-wide-lane (EWL) uncalibrated phase hardware delay (UPD) and uncombined (UC) triple-frequency precise point positioning (PPP) is evaluated. Experimental results show that the impact of PIFCB errors is minimal on Galileo satellites and greatest on GPS BLOCK IIF satellites; the impact on BDS-3 satellites is lower than that on BDS-2 satellites; different signal frequencies have a certain impact on the estimation results of IFCB products. Furthermore, experimental results indicate that IFCB products can significantly improve the stability of GPS BLOCK IIF satellite EWL UPD and the positioning performance of UC triple-frequency PPP. The average standard deviation (STD) of EWL UPD increases from 0.064 cycles to 0.021 cycles, an increase of 67.2%. The UC triple-frequency PPP decreases in the east (E), north (N), and up (U) directions from 4.63 cm, 3.04 cm, and 8.76 cm to 3.08 cm, 2.00 cm, and 5.85 cm, respectively, with average positioning accuracy improvements of 31.5%, 34.2% and 33.2%. The proportion of convergence time less than 20 min increases from 66.3% to 71.8%, an increase of 5.5%. The average convergence time decreases from 21.13 min to 17.24 min, a reduction of 18.4%.

Key words: Inter-frequency clock bias; Global navigation satellite system; Uncalibrated phase hardware delay; Precise point positioning

0 引言

多频全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)观测技术的快速发展推动了几种新的数学模型出现,旨在提升精密单点定位(precise point positioning,PPP)的定位性能。例如,基于未校准相位硬件延迟(uncalibrated phase hardware delay,UPD)产品的快速PPP模糊度固定(ambiguity resolution,AR)^[1-3];精密大气校正增强^[4];多模GNSS观测融合快速PPP-AR^[5-6]。利用多模GNSS观测技术可以显著提高PPP的定位性能。例如,Deo等^[7]研究了全球定位系统(global positioning system,GPS)三频PPP的定位性能。Geng等^[8]使用三频GPS观测数据实现了三频PPP-AR。部分学者研究了北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system,BDS)和伽利略卫星导航系统(Galileo navigation satellite system,Galileo)三频PPP的定位性能^[5-6,9]。Li等^[3]使用五频Galileo观测数据进一步提高了PPP-AR的定位性能。部分学者的研究表明,载波相位观测存在特定频率的时变偏差。例如, Montenbruck等^[10]首先发现了基于无几何无电离层(geometry-free and iono-

spheric-free,GFIF)组合的GPS载波相位观测的时变偏差,这些偏差被定义为频间钟偏差(inter-frequency clock bias,IFCB)。根据GPS L1/L2和L1/L5无电离层组合的结果,该偏差被证实与卫星钟差产品之间的差值相同^[11]。然而,国际GNSS服务组织(International GNSS Service,IGS)通过双频无电离层组合方法提供卫星钟差产品^[12-14],其提供的卫星钟差产品不再适用于多模GNSS PPP数据处理。Li等^[15]提出了一种历元差分(epoch difference,ED)的方法实时估计IFCB。此外,IFCB还可以通过三频精密钟差估计(precise clock estimation,PCE)生成的两种卫星钟差产品衍生而来^[16]。部分学者进一步提出了几种多模GNSS非组合(uncombined,UC)的IFCB估计方法。例如,Fan等^[17]基于多模GNSS UC模型估计了GPS卫星的IFCB。Pan等^[18]建立了IFCB估计的统一模型,该模型可用于基于UC和无电离层组合GNSS的多频PPP数据处理。

此前的研究主要集中在GPS IFCB的估计方法,缺少多模GNSS IFCB的特点分析及PPP的定位性能的研究。基于此,首先介绍了GREAT-IFCB开源软件估计IFCB产品的基本原理和方法;其次,基于

2023 年年积日 (day of year, DOY) (130~136) 澳大利亚地区 18 个多模实验跟踪网 (multi-GNSS experiment, MGEX) 测站的观测数据 GFIF 组合分别估计了 BDS, Galileo 和 GPS 卫星的 IFCB 产品, 并且对比分析了 BDS, Galileo 和 GPS 卫星的 IFCB 的特点; 随后, 评估了与相位相关的 IFCB (phase-specific IFCB, PIFCB) 误差对 GPS BLOCK IIF 卫星的超宽巷 (extra-wide-lane, EWL) UPD 和 UC 三频 PPP 性能的影响; 最后, 给出了相关的结论。

1 算法原理与观测数据

1.1 算法原理

基于无电离层组合 GNSS 载波相位和伪距观测方程可以表示为

$$L_{r,IFmn}^s = \rho_r^s + c(t_{r,IFmn} - t_{IFmn}^s) + T_r^s + N_{r,IFmn}^s + \bar{B}_{r,IFmn} + B_{r,IFmn} + \bar{B}_{r,IFmn}^s + B_{IFmn}^s + \epsilon_{r,IFmn}^s \quad (1)$$

$$P_{r,IFmn}^s = \rho_r^s + c(t_{r,IFmn} - t_{IFmn}^s) + T_r^s + d_{r,IFmn} + d_{IFmn}^s + \eta_{IFmn}^s \quad (2)$$

式中, 上标 s 和下标 r 分别表示卫星和接收机; m 和 n 表示信号频率; $L_{r,IFmn}^s$ 和 $P_{r,IFmn}^s$ 分别表示无电离层组合载波相位和伪距; ρ_r^s 表示卫星相位中心到接收机天线之间的几何距离; c 表示真空中的光速; $t_{r,IFmn}$ 和 t_{IFmn}^s 分别表示无电离层组合接收机和卫星钟差; T_r^s 表示对流层延迟; $N_{r,IFmn}^s$ 表示无电离层组合载波相位模糊度; $d_{r,IFmn}$ 和 d_{IFmn}^s 分别表示无电离层组合接收机和卫星的伪距硬件偏差; $\bar{B}_{r,IFmn}$ 和 $\bar{B}_{r,IFmn}^s$ 分别表示无电离层组合接收机和卫星相位硬件偏差的时不变部分; $B_{r,IFmn}$ 和 B_{IFmn}^s 分别表示无电离层组合接收机和卫星相位硬件偏差的时变部分; η_{IFmn}^s 和 $\epsilon_{r,IFmn}^s$ 分别表示无电离层组合未建模的伪距和相位残差。卫星伪距和相位硬件延迟的时变部分可以使用 PCE 方法从卫星钟差产品分离出来^[12-14]。因此, 基于两组不同频率无电离层组合的卫星钟差产品差值之间 IFCB 可以表示为

$$\vartheta_{123}^s = c(t_{IF12}^s - t_{IF13}^s) = \alpha_{123}^s + \beta_{123}^s \quad (3)$$

式中, ϑ_{123}^s , α_{123}^s 和 β_{123}^s 分别表示 IFCB、伪距和相位相关的 IFCB^[17]。伪距相关的 IFCB (code-specific IFCB, CIFCB) 可以使用差分码偏差 (differential code bias, DCB) 线性变换方法直接获得, PIFCB 则需要进一步研究。

GFIF 组合通常定义为两组不同频率无电离层

组合相位观测之间的差值。由于 GFIF 组合可以消除与频率无关的分量, 例如, 几何距离、接收机和卫星钟差以及对流层延迟。因此, 可以使用 GFIF 组合方法估计 IFCB。由式 (1) 和式 (2), GFIF 组合可以表示为

$$\begin{aligned} \xi_{r,123}^s &= L_{r,IF12}^s - L_{r,IF13}^s \\ &= N_{r,GFIF}^s + \bar{B}_{r,GFIF} + B_{r,GFIF} + \bar{B}_{GFIF}^s + B_{GFIF}^s + \epsilon_{r,GFIF}^s \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$\begin{cases} N_{r,GFIF}^s = N_{r,IF12}^s - N_{r,IF13}^s \\ \bar{B}_{r,GFIF} = \bar{B}_{r,IF12} - \bar{B}_{r,IF13} \\ B_{r,GFIF} = B_{r,IF12} - B_{r,IF13} \\ \bar{B}_{GFIF}^s = \bar{B}_{IF12}^s - \bar{B}_{IF13}^s \\ B_{GFIF}^s = B_{IF12}^s - B_{IF13}^s \\ \epsilon_{r,GFIF}^s = \epsilon_{r,IF12}^s - \epsilon_{r,IF13}^s \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\xi_{r,123}^s$ 表示 GFIF 组合。

由式 (3)~式 (5), PIFCB 通过 GFIF 组合可以重新表示为

$$\beta_{r,123}^s = \xi_{r,123}^s - (N_{r,GFIF}^s + \bar{B}_{r,GFIF} + B_{r,GFIF} + \bar{B}_{GFIF}^s) \quad (6)$$

通常使用 ED 方法估计 PIFCB^[19]。如果历元间不存在周跳, 由于接收机相位硬件延迟的时变部分足够小, GFIF 组合和 PIFCB 之间的差值可以认为是时不变^[15]。ED PIFCB 可以通过 ED GFIF 组合方法获得, 可以表示为

$$\Delta\beta_{r,123}^s(t, t+1) = \beta_{r,123}^s(t+1) - \beta_{r,123}^s(t) \quad (7)$$

式中, $\Delta\beta_{r,123}^s(t, t+1)$ 表示历元 t 到历元 $t+1$ 的 ED PIFCB 变化量。由式 (3) 可知, ED PIFCB 仅与卫星相位硬件偏差有关。因此, 假设存在 n 个测站, 卫星 s 在历元 t 和 $t+1$ 的 ED PIFCB 平均值可以表示为

$$\beta_{r,123}^s(t, t+1) = \sum_{i=1}^n \Delta\beta_{123}^s(t, t+1) / n \quad (8)$$

式中, $\beta_{r,123}^s(t, t+1)$ 表示 ED PIFCB 平均值。

任意历元的 ED PIFCB 可以通过累积法计算获得, 可以表示为

$$\beta_{r,123}^s(t) = \beta_{r,123}^s(t_0) + \sum_{j=0}^{t-1} \Delta\beta_{123}^s(j, j+1) \quad (9)$$

式中, $\beta_{r,123}^s(t)$ 和 $\beta_{r,123}^s(t_0)$ 分别表示历元 t 和 t_0 的非差 PIFCB; t_0 表示参考历元, 通常设为某一天的初始历元。GREAT-IFCB 软件通过零均值约束确定了一天的 $\beta_{r,123}^s(t_0)$ 。假设存在 k 个历元, $\beta_{r,123}^s(t_0)$ 可以表

示为

$$\sum_{j=0}^{k-1} \Delta\beta_{123}^s(j) = 0$$

$$\beta_{r,123}^s(t_0) = \left[-\sum_{j=1}^{k-1} (k-j) \Delta\beta_{123}^s(j-1, j) \right] / k \quad (10)$$

1.2 观测数据

本文旨在研究基于区域 MGEX 测站观测数据分别估计 BDS, Galileo 和 GPS 卫星的 IFCB 产品, 考虑到 BDS-2 主要服务于亚太地区, 以及能够接收到 BDS-3 的 B1C 信号频率测站有限, 按照连续性、稳定性、高精度性、平衡性和精度一致性等原则^[20]均匀选取了 2023 年 DOY(130~136) 澳大利亚地区 18 个 MGEX 测站如图 1 所示。

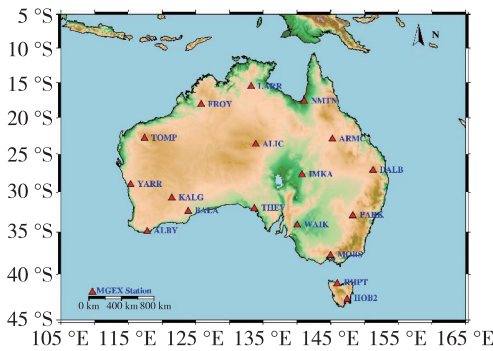


图 1 MGEX 测站分布图

Fig. 1 MGEX station distribution map

2 算例分析

多模 GNSS IFCB 产品估计的基本流程如图 2 所示, 主要包括 3 个步骤: 准备阶段、评估阶段和生产阶段。

1) 准备阶段: 输入 IFCB 产品估计的观测数据, 根据可扩展标记语言(extensible markup language, XML)格式的配置文件设置参数。XML 格式包含处理选项、解决方案选项和文件选项的配置文件。它以 XML 格式表示, 其中包含表示各种选项的“Keyword = Value”形式记录。每行以“<!--”开头并以“-->”结尾的文本被视为注释。IFCB 产品估计的输入文件包括观测文件、导航文件、DCB 文件和多频周跳文件。DCB 文件使用了中国科学院测量与地球物理研究所的 DCB 产品。多模 GNSS 信号频率如表 1 所示, 可以在 XML 格式的配置文件指定, 并且与多频 GNSS 周跳文件保持一致。多频 GNSS 周跳文件是一个自定义文件, 它包

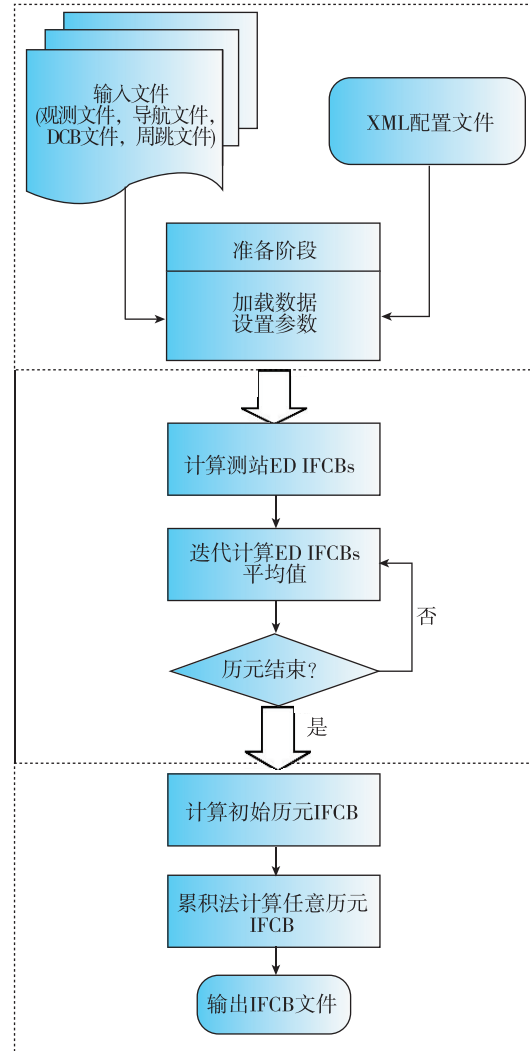


图 2 IFCB 产品估计流程图

Fig. 2 Flowchart of IFCB product estimation process

表 1 多模 GNSS 和三频信号频率

Tab. 1 Multi-GNSS and triple-frequency signal frequency

多模 GNSS	信号频率
BDS-2	B1I/B2I/B3I
BDS-3	B1I/B2a/B3I
	B1C/B2a/B3I
Galileo	E1/E5a/E5b
GPS	L1/L2/L5

含有关模糊度周跳的信息。

2) 评估阶段: ED IFCB 按照逐历元计算获得。首先, 计算每个 MGEX 测站的 GFIF 组合值。然后, 从 GFIF 组合数据和周跳数据中获得 18 个 MGEX 测站的 ED IFCB。最后, 根据式(8)逐历元计算 ED IFCB 平均值, 通过迭代算法删除大于标准偏差(standard deviation, STD) 3 倍的异常值以提高鲁棒性。如果异常值为 0 或者迭代次数大于

10 次,则停止估计 IFCB。

3)生产阶段:增加一个约束并计算任意历元的 IFCB。首先,根据式(10)增加一个零均值约束。然后,确定卫星在参考历元的 IFCB。最后,基于初始值和式(9),通过累积法获得任意历元的 IFCB。

2.1 多模 GNSS IFCB 产品的特点

图 3 和图 4 分别展示了基于 B1I/B2I/B3I 信号频率估计的 BDS-2 卫星的 PIFCB 时序图和 IFCBs 均方根(root mean square,RMS)统计图。分析图 3 和图 4 可知,BDS-2 地球静止轨道(geostationary

orbit,GEO),倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit,IGSO)和中圆地球轨道(middle Earth orbit,MEO)卫星估计的 PIFCB 最大振幅分别达到约 4.0 cm,5.0 cm 和 4.0 cm。PIFCBs RMS 最大分别达到约 1.9 cm,1.1 cm 和 0.8 cm。这表明,基于 BDS-2 MEO 卫星 B1I/B2I/B3I 信号频率估计的 IFCBs RMS 相比于 GEO 和 IGSO 卫星更小。MEO 卫星相对于 GEO 卫星和 IGSO 卫星的 IFCB 量级存在差异,可能与卫星-地球-太阳相对位置有关。

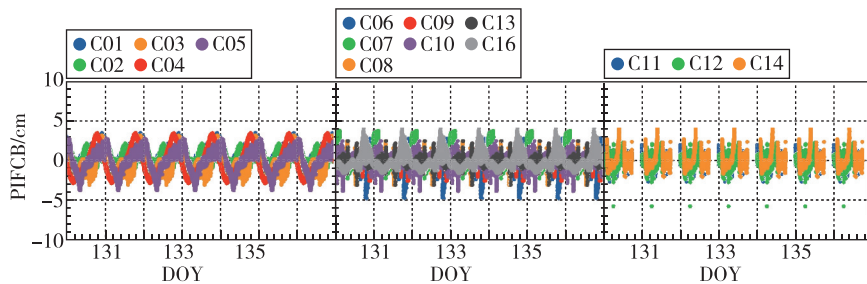


图 3 2023 年 DOY(130~136)BDS-2 卫星(B1I/B2I/B3I)PIFCB 时间序列

Fig. 3 BDS-2 satellites with B1I/B2I/B3I PIFCB time series from DOY 130 to 136 in 2023

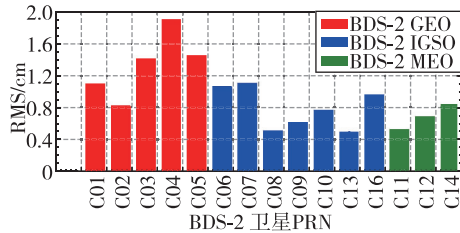


图 4 2023 年 DOY(130~136)BDS-2 卫星 (B1I/B2I/B3I)IFCBs RMS

Fig. 4 BDS-2 satellites with B1I/B2I/B3I IFCBs RMS from DOY 130 to 136 in 2023

图 5 和图 6 分别展示了基于 B1C/B2a/B3I 信号频率估计的 BDS-3 卫星的 PIFCB 时序图和 IFCBs

RMS 统计图。图 7 和图 8 分别展示了基于 B1I/B2a/B3I 信号频率估计的 BDS-3 卫星的 PIFCB 时序图和 IFCBs RMS 统计图。分析图 5 和图 6 可知,基于 B1C/B2a/B3I 信号频率估计的大多数 BDS-3 卫星的 PIFCB 振幅约为 3.0~5.0 cm,IFCBs RMS 约为 0.5~1.0 cm。然而,基于 B1C/B2a/B3I 信号频率估计的 BDS-3 伪随机噪声码(pseudo random noise code, PRN) C39 卫星和 PRN C46 卫星的 IFCBs RMS 相比其他 BDS-3 卫星较大,分别达到约 1.8 cm 和 1.5 cm。这可能与澳大利亚地区 18 个 MGEX 测站接收到 BDS-3 PRN C39 卫星和 PRN C46 卫星 B1C/B2a/B3I 信号频率较少有关。由

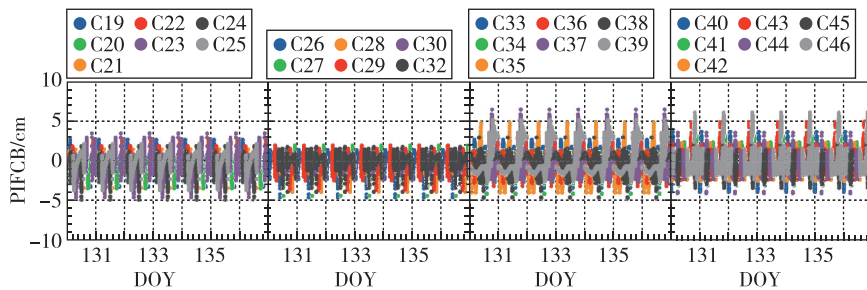


图 5 2023 年 DOY(130~136)BDS-3 卫星(B1C/B2a/B3I)PIFCB 时间序列

Fig. 5 BDS-3 satellites with B1C/B2a/B3I PIFCB time series from DOY 130 to 136 in 2023

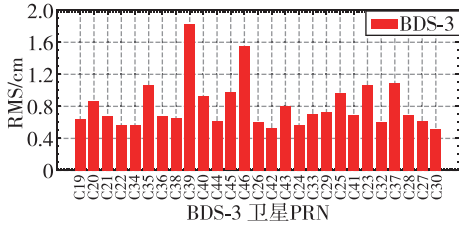


图 6 2023 年 DOY(130~136) BDS-3 卫星(B1C/B2a/B3I)IFCBs RMS

Fig. 6 BDS-3 satellites with B1C/B2a/B3I IFCBs RMS from DOY 130 to 136 in 2023

于 MGEX 测站接收到的 B1C/B2a/B3I 信号频率观测数据较少,导致 BDS-3 PRN C39 卫星和 PRN C46 卫星的 PIFCB 产生了较大的未建模残差。进一步分析图 7 和图 8 可知,分别基于 B1I/B2a/B3I 与 B1C/B2a/B3I 信号频率估计的 IFCB 产品结果基本一致。

图 9 和图 10 分别展示了基于 E1/E5a/E5b 信号频率估计的 Galileo 卫星的 PIFCB 时序图和 IFCBs RMS 统计图。图 11 和图 12 分别展示了基

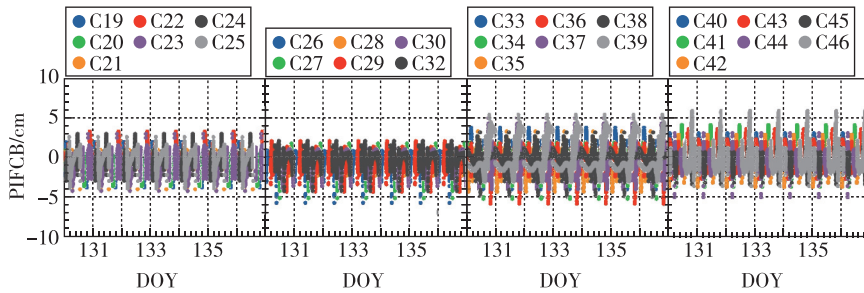


图 7 2023 年 DOY(130~136) BDS-3 卫星(B1I/B2a/B3I)PIFCB 时间序列

Fig. 7 BDS-3 satellites with B1I/B2a/B3I PIFCB time series from DOY 130 to 136 in 2023

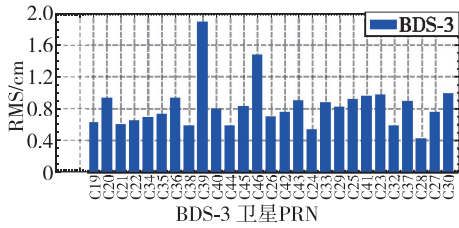


图 8 2023 年 DOY(130~136) BDS 卫星 (B1I/B2a/B3I)IFCBs RMS

Fig. 8 BDS-3 satellites with B1I/B2a/B3I IFCBs RMS from DOY 130 to 136 in 2023

于 L1/L2/L5 信号频率估计的 GPS 卫星的 PIFCB 时序图和 IFCBs RMS 统计图,GPS BLOCK IIF 卫星和 GPS BLOCK IIIA 卫星(PRN G04,PRN G11, PRN G14,PRN G18,PRN G28 和 PRN G23)分别用红色和蓝色标记。分析图 9 和图 10 可知,基于 E1/E5a/E5b 信号频率估计的大多数 Galileo 卫星的 PIFCB 振幅约为 2.0~3.0 cm,PIFCBs RMS 不超过 0.6 cm,最大达到约 0.9 cm。这表明,PIFCB 误差对 Galileo 卫星的 E1/E5a/E5b 信号频率影响很小。分析图 11 和图 12 可知,基于 L1/L2/L5 信号

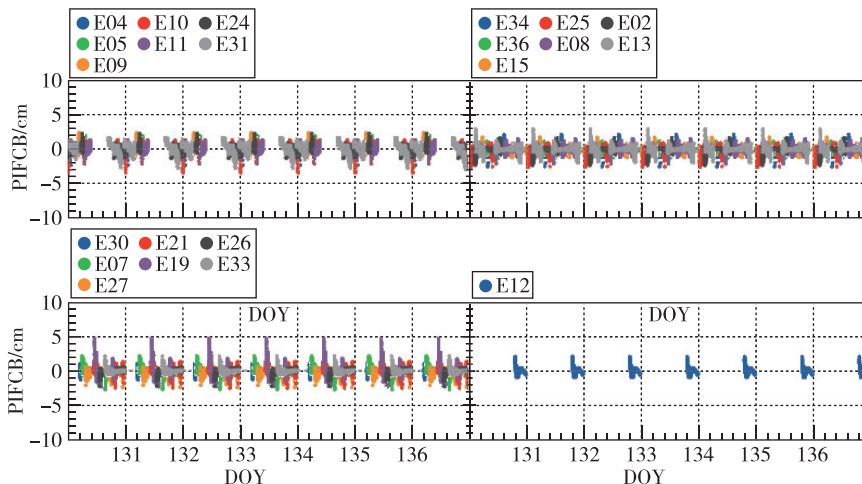


图 9 2023 年 DOY(130~136) Galileo 卫星(E1/E5a/E5b)PIFCB 时间序列

Fig. 9 Galileo satellites with E1/E5a/E5b PIFCB time series from DOY 130 to 136 in 2023

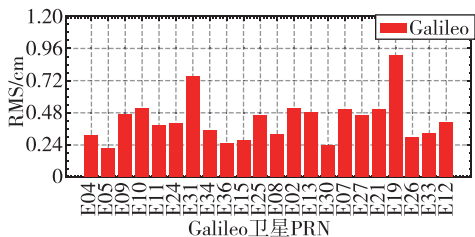


图 10 2023 年 DOY(130~136)Galileo 卫星(E1/E5a/E5b)IFCBs RMS
 Fig. 10 Galileo satellites with E1/E5a/E5b IFCBs RMS from DOY 130 to 136 in 2023

频率估计的 GPS BLOCK IIF 卫星的 PIFCB 最大振幅达到约 10.0 cm,IFCBs RMS 最大达到约 4.9 cm。GPS III 卫星的 PIFCB 最大振幅达到约 4.0 cm,IFCBs RMS 最大达到约 1.1 cm。这表明,PIFCB 误差对 GPS III 卫星的 L1/L2/L5 信号频率的影响较小。

综合对比分析 BDS-2, BDS-3, Galileo 和 GPS 卫星的 PIFCB 时序图和 IFCBs RMS 可知,PIFCB 误差对 Galileo 卫星的影响最小,对 GPS BLOCK IIF 卫星的影响最大;对 BDS-3 卫星的影响低于对

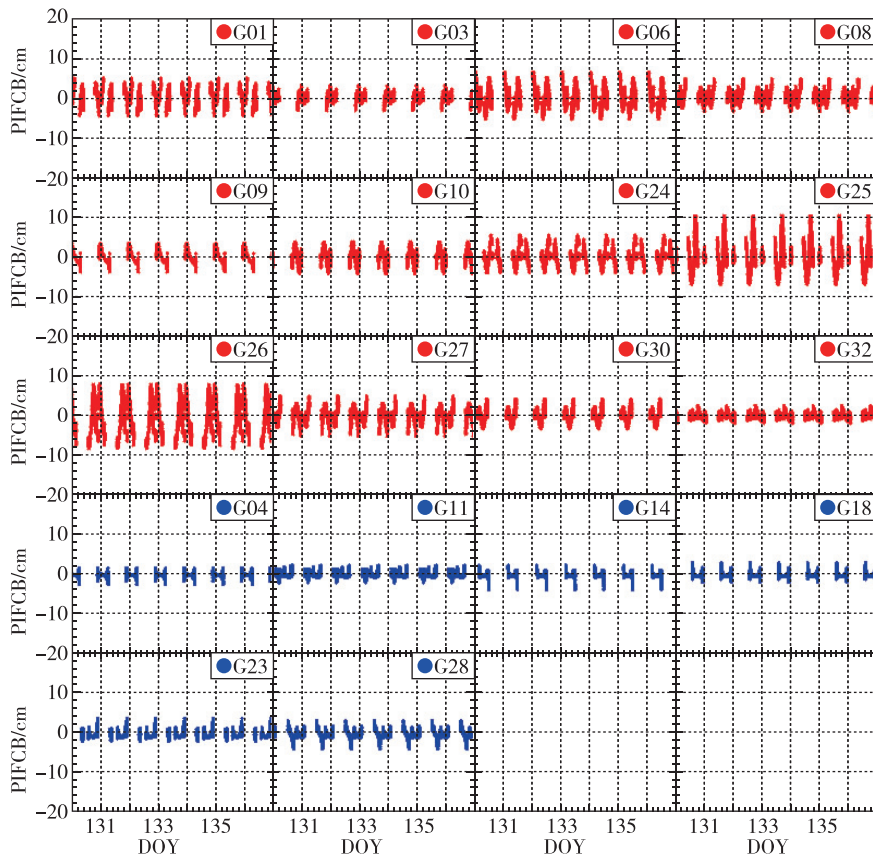


图 11 2023 年 DOY(130~136)GPS 卫星(L1/L2/L5)PIFCB 时间序列
 Fig. 11 GPS satellites with L1/L2/L5 PIFCB time series from DOY 130 to 136 in 2023

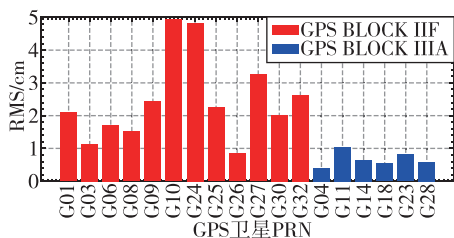


图 12 2023 年 DOY(130~136)GPS 卫星(L1/L2/L5)IFCBs RMS
 Fig. 12 GPS satellites with L1/L2/L5 IFCBs RMS from DOY 130 to 136 in 2023

BDS-2 卫星;MGEX 测站接收卫星的信号频率对 IFCB 产品的估计结果会产生一定的影响。

2.2 PIFCB 误差对 UC 三频 PPP 性能的影响

由 2.1 节可知,多模 GNSS IFCB 产品估计的结果表明,PIFCB 误差对 GPS BLOCK IIF 卫星影响最大。因此,为了更好地评估 PIFCB 误差对 UC 三频 PPP 性能的影响,下面的实验主要围绕 GPS BLOCK IIF 卫星展开研究。

图 13 展示了基于 L1/L2/L5 信号频率按照逐历元估计 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD 产品

的结果,实验选择 G01 卫星作为参考卫星。分析图 13 可知,不使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD 振幅约为 0.2~0.4 周,具有长期波动的特点。使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD 具有全天候保持稳定的特点。图 14 展示了基

于 L1/L2/L5 信号频率按照逐天统计 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD STD。分析图 14 可知,使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD STD 明显低于不使用 IFCB 产品校正,EWL UPD 的平均 STD 提高了 67.2%,具体表现为从 0.064 周减小到 0.021 周。

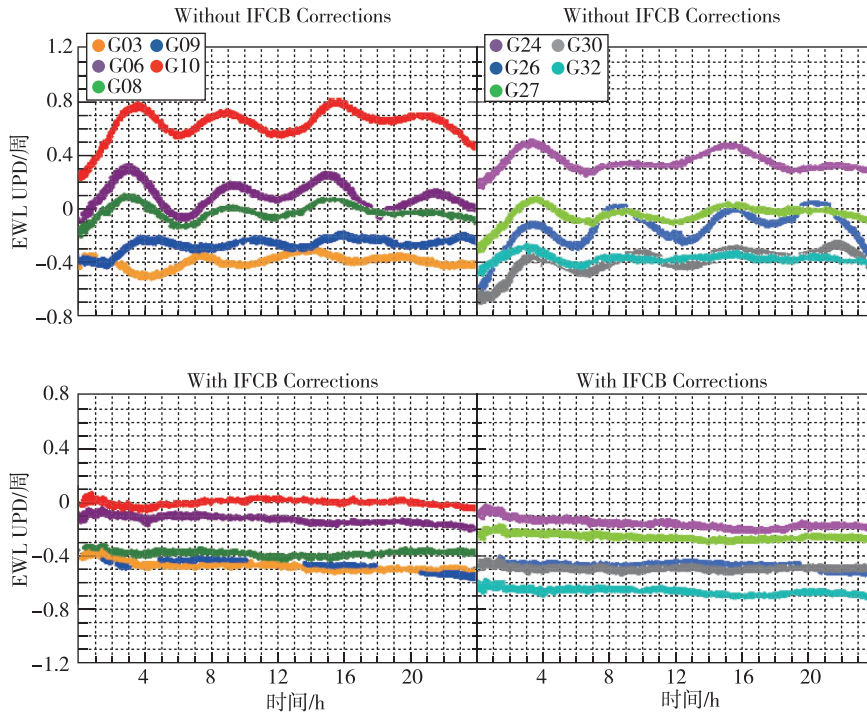


图 13 2023 年 DOY 130 EWL UPD

Fig. 13 EWL UPD on DOY 130 in 2023

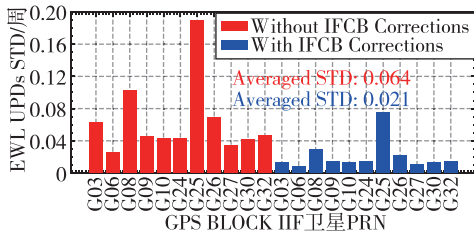


图 14 2023 年 DOY(130~136)GPS BLOCK IIF 卫星 (L1/L2/L5)EWL UPD STD

Fig. 14 GPS BLOCK IIF satellites with L1/L2/L5 EWL UPD STD from DOY 130 to 136 in 2023

为了进一步验证 PIFCB 误差对 GPS BLOCK IIF 卫星 UC L1/L2/L5 PPP 的定位精度和收敛时间的影响,UC PPP 基本处理策略如表 2 所示,收敛时间定义为连续 10 个历元达到小于 5 cm 的水平定位误差所需的时间。统计 2023 年 DOY(130~136)的 18 个 MGEX 测站的 N,E,U 三方向平均定位精

度和平均收敛时间分别如表 3 和图 15 所示。L1/L2_PPP, L1/L2/L5_Without_PPP 和 L1/L2/L5_With_PPP 分别表示仅使用 UC L1/L2 PPP 方案、

表 2 UC PPP 基本处理策略

Tab. 2 UC PPP basic processing strategy

项目	处理策略
信号频率	L1/L2/L5
采样间隔	30 s
卫星端/接收机端 PCO/PCV	igs20.atx
对流层模型	Saastamoninen 模型
对流层湿延迟	随机游走模型估计
电离层	UC 模型
接收机钟差	白噪声估计
相位模糊度	常数估计
截止高度角	7°
观测值权比	高度角加权
相位缠绕	经验模型改正

不使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 UC L1/L2/L5 PPP 方案和使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 UC L1/L2/L5 PPP 方案。

分析表 3 可知,使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 UC L1/L2/L5 PPP 的平均定位精度显著提高,具体表现为 E 方向从 4.63 cm 提高到 3.08 cm,提高了 31.5%;N 方向从 3.04 cm 提高到 2.00 cm,提高了 34.2%;U 方向从 8.76 cm 提高到 5.85 cm,提高了 33.2%。进一步分析图 15 可知,使用 IFCB

表 3 3 种 UC PPP 东(E)、北(N)和天顶(U) 三方向平均定位精度

Tab. 3 The average positioning accuracy in three directions of E,N, and U for three UC PPP solutions cm

位置	L1/L2_PPP	L1/L2/L5_Without_PPP	L1/L2/L5_With_PPP
E	3.25	4.63	3.08
N	2.08	3.04	2.00
U	5.98	8.76	5.85

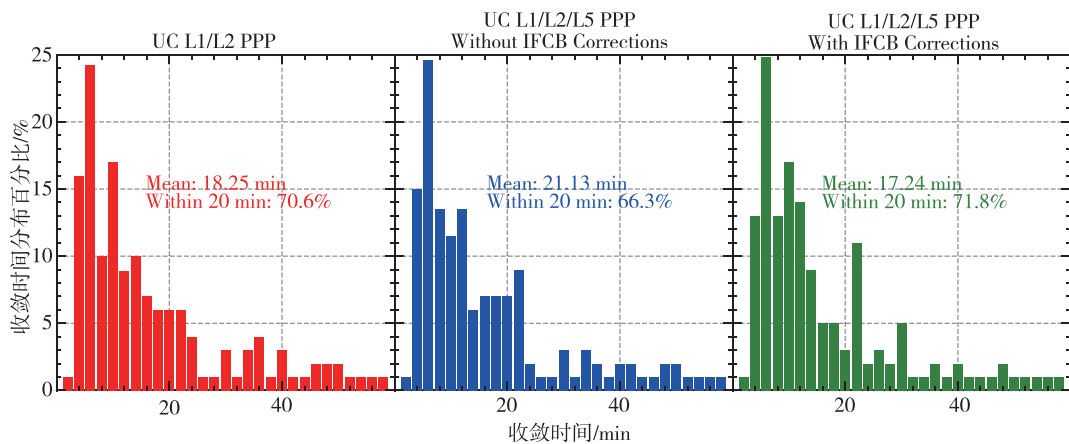


图 15 3 种 UC PPP 方案收敛时间分布

Fig. 15 Distribution of convergence time for three UC PPP solutions

产品校正 PIFCB 误差的 UC L1/L2/L5 PPP 的收敛时间小于 20 min 的比例从 66.3% 提高到 71.8%,提高了 5.5%。平均收敛时间从 21.13 min 缩短到 17.24 min,减少了 18.4%,略优于 UC L1/L2 PPP 的 18.25 min。

3 结论

基于 2023 年 DOY(130~136)澳大利亚地区 18 个 MGEX 测站的观测数据 GFIF 组合分别估计了 BDS,Galileo 和 GPS 卫星的 IFCB 产品。对比分析了 BDS,Galileo 和 GPS 卫星的 IFCB 的特点。评估了 PIFCB 误差对 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD 和 UC 三频 PPP 性能的影响,得出的主要结论如下:

1)BDS 卫星的 PIFCB 最大振幅达到约 5.0 cm, PIFCBs RMS 最大不超过 2.0 cm;Galileo 卫星的 PIFCB 最大振幅达到约 3.0 cm,PIFCBs RMS 最大不超过 1.0 cm;GPS BLOCK IIF 卫星的 PIFCB 最大振幅达到约 10.0 cm,GPS III 卫星的 PIFCB 最大振幅达到约 4.0 cm。

2)使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD STD 从 0.064 周减小到 0.021 周,提高了 67.2%。这表明,使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差可以显著提高 GPS BLOCK IIF 卫星的 EWL UPD 的精度。

3)使用 IFCB 产品校正 PIFCB 误差的 GPS BLCOK IIF 卫星的 UC L1/L2/L5 PPP 平均定位精度和平均收敛时间得到显著改善。具体表现为,E、N 和 U 三方向分别从 4.63 cm,3.04 cm 和 8.76 cm 减小到 3.08 cm,2.00 cm 和 5.85 cm,平均定位精度分别提高了 31.5%,34.2% 和 33.2%。收敛时间小于 20 min 的比例从 66.3% 提高到 71.8%,提高了 5.5%。平均收敛时间从 21.13 min 缩短到 17.24 min,减少了 18.4%。

参考文献

[1] GUO F, ZHANG X, WANG J. Timing group delay and differential code bias corrections for BeiDou positioning[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89: 427-445.
 [2] LI X, LI X, LIU G, et al. Triple-frequency PPP am-

- biguity resolution with multi-constellation GNSS; BDS and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 1105-1122.
- [3] LI X, LIU G, LI X, et al. Galileo PPP rapid ambiguity resolution with five-frequency observations[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24: 1-13.
- [4] LI X, HUANG J, LI X, et al. Multi-constellation GNSS PPP instantaneous ambiguity resolution with precise atmospheric corrections augmentation[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(3): 107.
- [5] LI P, ZHANG X, GE M, et al. Three-frequency BDS precise point positioning ambiguity resolution based on raw observables[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92: 1357-1369.
- [6] LIU G, ZHANG X, LI P. Improving the performance of Galileo uncombined precise point positioning ambiguity resolution using triple-frequency observations[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 341.
- [7] DEO M, EL-MOWAFY A. Triple-frequency GNSS models for PPP with float ambiguity estimation; performance comparison using GPS[J]. *Survey Review*, 2018, 50(360): 249-261.
- [8] GENG J, BOCK Y. Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87: 449-460.
- [9] GUO F, ZHANG X, WANG J, et al. Modeling and assessment of triple-frequency BDS precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90: 1223-1235.
- [10] MONTENBRUCK O, HUGENTOBLER U, DACH R, et al. Apparent clock variations of the Block IIF-1 (SVN62) GPS satellite[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16: 303-313.
- [11] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P, et al. Initial assessment of the COMPASS/BeiDou-2 regional navigation satellite system[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17: 211-222.
- [12] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning[J]. *GPS Solutions*, 2009, 13: 173-182.
- [13] BOCK H, DACH R, JÄGGI A, et al. High-rate GPS clock corrections from CODE; support of 1 Hz applications[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83: 1083-1094.
- [14] GE M, CHEN J, DOUŠA J, et al. A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16: 9-17.
- [15] LI H, ZHOU X, WU B, et al. Estimation of the inter-frequency clock bias for the satellites of PRN25 and PRN01[J]. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 2012, 55: 2186-2193.
- [16] GUO J, GENG J. GPS satellite clock determination in case of inter-frequency clock biases for triple-frequency precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(10): 1133-1142.
- [17] FAN L, SHI C, LI M, et al. GPS satellite inter-frequency clock bias estimation using triple-frequency raw observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 2465-2479.
- [18] PAN L, ZHANG X, GUO F, et al. GPS inter-frequency clock bias estimation for both uncombined and ionospheric-free combined triple-frequency precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93: 473-487.
- [19] LI H, ZHOU X, WU B. Fast estimation and analysis of the inter-frequency clock bias for Block IIF satellites[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17: 347-355.
- [20] 曹炳强, 成英燕, 许长辉, 等. 间距分区法在解算卫星连续运行站数据中的应用[J]. *测绘通报*, 2016(11): 15-17.
- CAO Bingqiang, CHENG Yingyan, XU Changhui, et al. Application of space partition method in the CORS data processing[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(11): 15-17(in Chinese).

(编辑:黄利华)