

顾及频间钟偏差改正的精密单点定位模糊度固定

张兵良^{1,2}, 方卓², 王立诗云³

(1. 南京农业大学公共管理学院, 江苏南京 210095; 2. 南京数维测绘有限公司, 江苏南京 211808;

3. 中铁四院集团南宁勘察设计院有限公司, 广西南宁 430007)

摘要: 针对频间钟偏差(IFCB)影响三频非差非组合精密单点定位模糊度固定(PPP-AR)性能的问题, 提出了一种历元差分(ED)的方法估计全球定位系统(GPS)、伽利略卫星导航系统(Galileo)和北斗卫星导航系统(BDS)的IFCB; 分析了GPS、Galileo和BDS卫星面向相位的(PIFCB)时变特性, 评估了IFCB改正对GPS Block IIF卫星超宽巷(EWL)未校准相位延迟(UPD)和GPS三频非差非组合PPP-AR性能的影响。结果表明:GPS、Galileo和BDS卫星的PIFCB时变序列峰值分别约为10 cm、3cm和5 cm。IFCB改正可以显著提高GPS Block IIF卫星超宽巷UPD的稳定性和三频非差非组合PPP-AR性能。

关键词: 频间钟偏差; 未校准相位延迟; 精密单点定位; 模糊度固定

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

Precise Point Positioning Ambiguity Resolution with Inter-Frequency Clock Bias Correction

ZHANG Bingliang^{1,2}, FANG Zhuo², WANG Lishi Yun³

(1. College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Shuwei Surveying and Mapping Co., Ltd., Nanjing 211808, China; 3. Nanning Survey and Design Institute Co., Ltd., of China Railway Siyuan Group, Nanning 430007, China)

Abstract: This paper addresses the issue that inter-frequency clock bias (IFCB) affects the performance of triple-frequency undifferenced and uncombined precise point positioning ambiguity resolution (PPP-AR). It proposes an epoch-differenced (ED) method to estimate IFCB for Global Positioning System (GPS), Galileo Navigation Satellite System (Galileo), and BeiDou Navigation Satellite System (BDS) satellites. It analyzes the time-varying characteristics of phase-specific IFCB (PIFCB) for these three satellite systems and

evaluated the impacts of IFCB correction on extra-wide lane (EWL) uncalibrated phase delay (UPD) estimation for GPS Block IIF satellites and the performance of triple-frequency undifferenced and uncombined PPP-AR. The results demonstrate that the peak values of time-varying PIFCB series for GPS, Galileo, and BDS satellites are approximately 10 cm, 3 cm, and 5 cm, respectively. IFCB correction significantly improves the stability of EWL UPD estimation for GPS Block IIF satellites and enhances the performance of triple-frequency undifferenced and uncombined PPP-AR.

Keywords: inter-frequency clock bias (IFCB); uncalibrated phase delay (UPD); precise point positioning; ambiguity resolution

随着多模多频全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)观测的迅速发展, 精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术在周跳检测、高阶电离层延迟校正、加速PPP收敛以及提高模糊度固定(ambiguity resolution, AR)效率和可靠性等方面具有显著的优势^[1-3]。然而, 国际GNSS服务(international GNSS service, IGS)分析中心通常使用2个特定频率形成的无电离层(ionosphere-free, IF)组合模型生成精密卫星钟差产品, 不再适用于多频PPP处理^[4]。这可归因于载波相位观测中的特定频率的时变偏差。Montenbruck等^[5]首次基于无几何和无电离层(geometry-free and ionospheric-free, GFIF)组合识别出GPS载波相位观测中的时变偏差, 这些偏差被定义为频间钟偏差(inter-frequency clock bias, IFCB)。因此, IFCB的准确建模和估计对于提高GNSS定位和导航的精度具有重要意义。Li等^[6]首先提出了全球定位系统(global positioning system,

收稿日期: 2023-08-23

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42271106)

第一作者: 张兵良, 高级工程师, 工学硕士, 主要研究方向为大地测量学。E-mail: zbl@njau.edu.cn

通信作者: 方卓, 助理研究员, 硕士生, 主要研究方向为卫星导航定位与技术。

E-mail: honeycuteboy@outlook.com



论文
拓展
介绍

GPS)伪随机噪声(pseudo random noise, PRN)PRN 25和PRN 01卫星IFCB的估计方法。随后, Li等^[7]针对GPS Block IIF卫星提出了快速估计和分析IFCB的方法。近年来,针对实时PPP中GPS卫星的IFCB问题,提出了多种建模和预测方法。例如, Pan等^[8]的研究改进了三频GPS卫星的IFCB估计方法,显著提高了定位精度。针对三频PPP中GPS卫星的IFCB问题,提出了新的解决思路,研究了GPS Block IIF卫星的IFCB特性及其对定位精度的影响,为误差来源的识别提供了依据^[9]。此外,利用三频原始观测数据估计GPS卫星的IFCB,为GNSS钟差模型的改进提供了实验基础^[10-12]。针对北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)地球静止轨道卫星的IFCB建模和评估以及BDS与GPS精密定位中的IFCB问题,相关研究丰富了IFCB领域的内容,并为BDS应用提供了技术支持。一些研究还提出了GPS Block IIF和BDS卫星IFCB的经验修正模型,并利用长期三频观测数据进行分析,为多模多频IFCB改正提供了重要参考^[13-16]。针对GPS三频非差非组合数据的应用策略、格洛纳斯卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)卫星的IFCB特征的系统性探究、多模多频IFCB与原始观测值信号偏差(observable-specific signal bias, OSB)的联合解算以及GLONASS L3信号相位中心偏移的差异性分析不仅为提升多模GNSS定位精度提供了理论支撑,同时亦拓展了GLONASS钟差研究体系的技术路径^[17-20]。此外,部分学者基于IGS钟差产品提出的卫星IFCB估计与补偿方法,通过引入BDS多频观测数据的验证,有效优化了GNSS钟差建模精度。研究进一步系统评估了IFCB随机建模策略对多频PPP的影响效应,为多频GNSS技术的应用推广奠定了方法论基础^[21-23]。

随着多模多频GNSS观测技术的快速发展,探讨多模多频IFCB估计方法显得愈发重要。基于此,本文提出了一种历元差分(epoch difference, ED)的方法估计GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB,使用了全球100个多模GNSS实验跟踪网(multi-GNSS experiment, MGEX)测站观测数据估计了GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB,分析了GPS、Galileo和BDS卫星面向相位的(phase IFCB, PIFCB)时变特性,评估了IFCB改正对GPS Block IIF卫星的超宽巷(extra-wide-lane, EWL)未校准相位延迟(uncalibrated phase delay, UPD)和非差非组合三频PPP-AR性能的影响。

1 数学模型

1.1 精密单点定位数学模型

原始伪距和载波相位PPP观测方程可以表示为

$$\begin{cases} P_{s,r} = \rho_{s,r} + c\Delta t_r - c\Delta t_s + \gamma_i I_{s,r} + T_{s,r} + \\ \quad d_{rc,i} + d_{rv,i} - (d_{sc,i} + d_{sv,i}) + \epsilon_{s,r} \\ L_{s,r} = \rho_{s,r} + c\Delta t_r - c\Delta t_s - \gamma_i I_{s,r} + T_{s,r} + \\ \quad N_{sr,i} + b_{rc,i} + b_{rv,i} - (b_{sc,i} + b_{sv,i}) + \xi_{s,r} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{s,r}$ 为伪距观测值; $\rho_{s,r}$ 为卫星 s 到接收机 r 之间的几何距离; c 为真空中的光速; Δt_r 和 Δt_s 分别为接收机和卫星钟差; $\gamma_i = f_i^2/f_1^2$, f_i 为信号频率, i 为第 i 信号频率; $I_{s,r}$ 为第 1 信号频率上的一阶倾斜电离层延迟; $T_{r,s}$ 为倾斜对流层延迟; $d_{rc,i}$ 和 $d_{rv,i}$ 分别为接收机端伪距硬件延迟的时不变部分和时变部分; $d_{sc,i}$ 和 $d_{sv,i}$ 分别为卫星端伪距硬件延迟的时不变部分和时变部分; $\epsilon_{s,r}$ 为伪距测量噪声; $L_{s,r}$ 为载波相位观测值; $N_{sr,i}$ 为第 i 信号频段整周模糊度; $b_{rc,i}$ 和 $b_{rv,i}$ 分别为接收机端相位硬件延迟的时不变部分和时变部分, 由于接收机端相位延迟时变部分影响很小, 通常被忽略^[11]; $b_{sc,i}$ 和 $b_{sv,i}$ 分别为卫星端相位硬件延迟的时不变部分和时变部分; $\xi_{s,r}$ 为载波相位测量噪声。

伪距和载波相位观测中的硬件延迟是不同的。通常假设在伪距和载波相位观测方程中使用相同的卫星钟差。精密钟差估计(precise clock estimation, PCE)过程中, 卫星端伪距和相位硬件延迟的时变部分将被卫星钟差参数吸收。因此, 基于第 1、2 频率和第 1、3 频率 IF 组合生成的精密卫星钟差可以表示为

$$\begin{cases} c\Delta t_{s,IF12} = c\Delta t_s - (\alpha_{IF12} d_{sv,1} + \beta_{IF12} d_{rv,2}) - \\ \quad (\alpha_{IF12} b_{sv,1} + \beta_{IF12} b_{sv,2}) \\ c\Delta t_{s,IF13} = c\Delta t_s - (\alpha_{IF13} d_{rv,1} + \beta_{IF13} d_{rv,3}) - \\ \quad (\alpha_{IF13} b_{sv,1} + \beta_{IF13} b_{sv,3}) \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha_{IF12} = f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \\ \beta_{IF12} = -f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \end{cases} \quad (3)$$

1.2 非组合三频IFCB估计

基于第 1、2 和第 1、3 频率 IF 组合生成的卫星钟差之间的差值可以表示为

$$\vartheta_{s,IF} = c\Delta t_{s,IF13} - c\Delta t_{s,IF12} = \eta_{s,IF} + \delta_{s,IF} \quad (4)$$

$$\eta_{s,IF} = (\alpha_{IF12} d_{rc,1} + \beta_{IF12} d_{rc,2}) - (\alpha_{IF13} d_{rc,1} + \beta_{IF13} d_{rc,3}) = -\beta_{IF12} (d_{rc,1} - d_{rc,2}) +$$

$$\beta_{IF13} (d_{rc,2} - d_{rc,3}) = -\beta_{IF12} \mu_{12} + \beta_{IF13} \mu_{13} \quad (5)$$

$$\delta_{s,IF} = (\alpha_{IF12} b_{sv,1} + \beta_{IF12} b_{sv,2}) - (\alpha_{IF13} b_{sv,1} + \beta_{IF13} b_{sv,3}) \quad (6)$$

式中: $\vartheta_{s,IF}$ 、 $\eta_{s,IF}$ 和 $\delta_{s,IF}$ 分别为总的IFCB、面向伪距的IFCB(code IFCB, CIFCB)和PIFCB; μ_{12} 和 μ_{13} 分别为第1、2和第1、3频率差分码偏差(differential code bias, DCB)。由式(6)可知, CIFCB可以直接通过DCB线性变换获得, PIFCB则需要进一步研究。

GFIF组合通常定义为2组不同频率IF组合载波相位观测之间的差值。GFIF组合可以表示为

$$\zeta_{sr,123} = L_{sr,IF12} - L_{sr,IF13} = N_{sr,GFIF} + b_{rc,GFIF} + b_{rv,GFIF} + b_{sc,GFIF} + b_{sv,GFIF} + \xi_{sr,GFIF} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} N_{sr,GFIF} = N_{sr,IF12} - N_{sr,IF13} \\ b_{rc,GFIF} = b_{rc,IF12} - b_{rc,IF13} \\ b_{rv,GFIF} = b_{rv,IF12} - b_{rv,IF13} \\ b_{sc,GFIF} = b_{sc,IF12} - b_{sc,IF13} \\ b_{sv,GFIF} = b_{sv,IF12} - b_{sv,IF13} \\ \xi_{sr,GFIF} = \xi_{sr,IF12} - \xi_{sr,IF13} \end{cases} \quad (8)$$

由式(7)–(9)可知, PIFCB可以重新表示为

$$\delta_{IF,13} = \zeta_{sr,123} - (N_{sr,GFIF} + b_{rc,GFIF} + b_{rv,GFIF} + b_{sc,GFIF}) \quad (9)$$

如果历元间不存在周跳, 由于接收机端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^[4,6]。ED PIFCB可以表示为

$$\Delta\delta_{IF,13}(t, t+1) = \delta_{IF,13}(t+1) - \delta_{IF,13}(t) \quad (10)$$

式中: $\Delta\delta_{IF,13}(t, t+1)$ 为历元 t 到历元 $t+1$ 时刻的ED PIFCB变化量。假设存在 n 个测站, 卫星 s 在历元 t 和 $t+1$ 时刻的ED PIFCB平均值可以表示为

$$\delta_{IF,13\text{mean}}(t, t+1) = \sum_{i=1}^n \Delta\delta_{IF,13}(t, t+1)/n \quad (11)$$

任意历元的ED PIFCB通过累积法可以表示为

$$\delta_{IF,13}(t) = \delta_{IF,13}(t_0) + \sum_{j=0}^{t-1} \Delta\delta_{IF,13}(j, j+1) \quad (12)$$

式中: $\delta_{IF,13}(t)$ 和 $\delta_{IF,13}(t_0)$ 分别为历元 t 和 t_0 的非差PIFCB; t_0 为参考历元, 通常设为某一天的初始历元。通过非零均值正态分布约束确定一天的 $\delta_{IF,13}(t_0)$ 。假设存在 k 个历元, $\delta_{IF,13}(t_0)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \sum_{j=0}^{k-1} \Delta\delta_{IF,13}(j) &= 0 \\ \delta_{IF,13}(t_0) &= \left[-\sum_{j=1}^{k-1} (k-j) \Delta\delta_{IF,13}(j-1, j) \right] / k \end{aligned} \quad (13)$$

2 数据处理

2.1 数据来源

选取2023年年积日(day of year, DOY)130–136连续7 d全球均匀分布的100个MGEX测站观测数据估计GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB; 进一步选取了全球均匀分布的14个MGEX测站观测数据进行GPS三频非差非组合PPP-AR性能评估, 测站分布如图1所示。

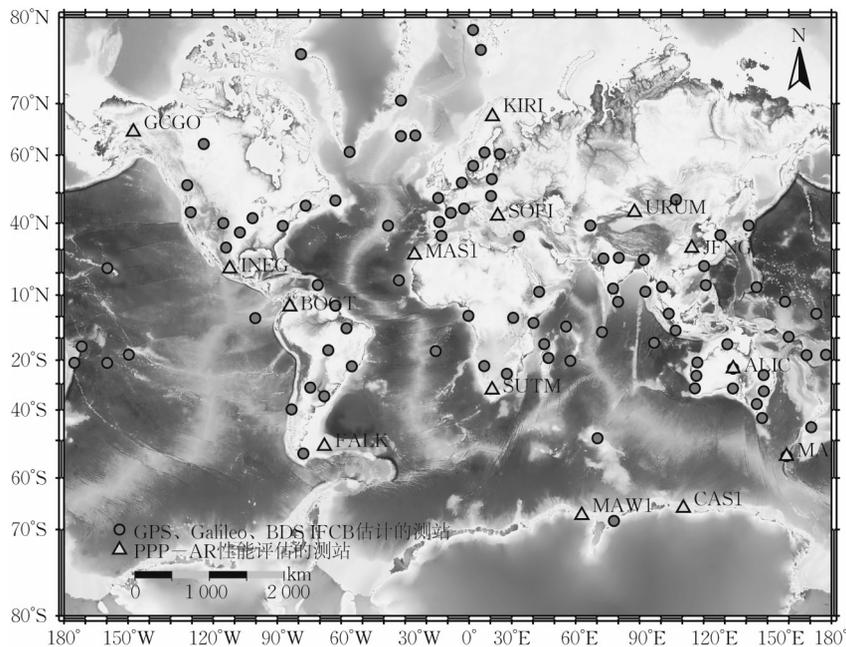


图1 MGEX测站分布

Fig. 1 Distribution of MGEX station

2.2 GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB估计

根据GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB估计原理,使用了大地测量和地球物理研究所(Institute of Geodesy And Geophysics, IGG)的DCB产品,GPS、Galileo和BDS信号频段如表1所示。图2显示了GPS Block IIF和Block III卫星(G04、G11、G14、G18、G23和G28)的PIFCB时变序列。分析图2可知,GPS Block IIF卫星的PIFCB时变序列峰值约为10 cm,GPS Block III卫星的PIFCB时变序列峰值小于4 cm,这表明PIFCB误差对GPS Block III卫星L5载波相位观测影响很小。图3显示了Galileo卫

星PIFCB时变序列,分析图3可知,Galileo卫星的PIFCB时变序列均呈现出小于3 cm的变化幅度。

表1 GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB估计使用的信号频段

Tab. 1 Singal frequency bands used for IFCB estimation of GPS, Galileo, and BDS Satellites

系统	信号频段
GPS	L1、L2、L5
Galileo	E1、E5a、E5b
BDS-2	B1I、B2I、B3I
BDS-3	B1C、B2a、B3I

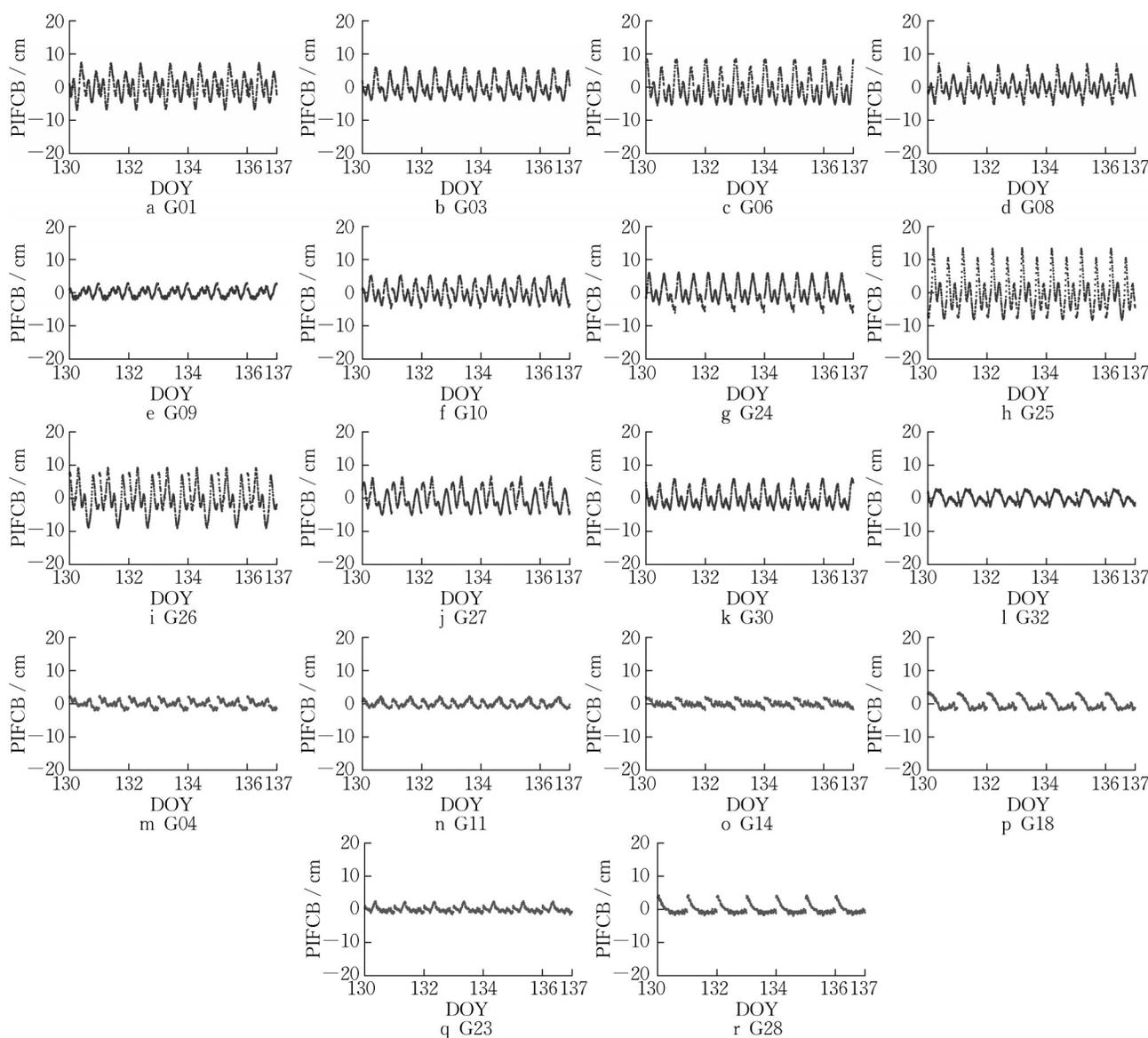


图2 GPS卫星的PIFCB时变序列

Fig. 2 PIFCB time-varying series for GPS Satellites

GPS和Galileo卫星的IFCB均方根(root mean square, RMS)值统计结果分别如图4和图5所示。

分析图4和图5可知,GPS Block III和Galileo卫星的频间钟偏差RMS值均小于1.5 cm,这表明PIFCB

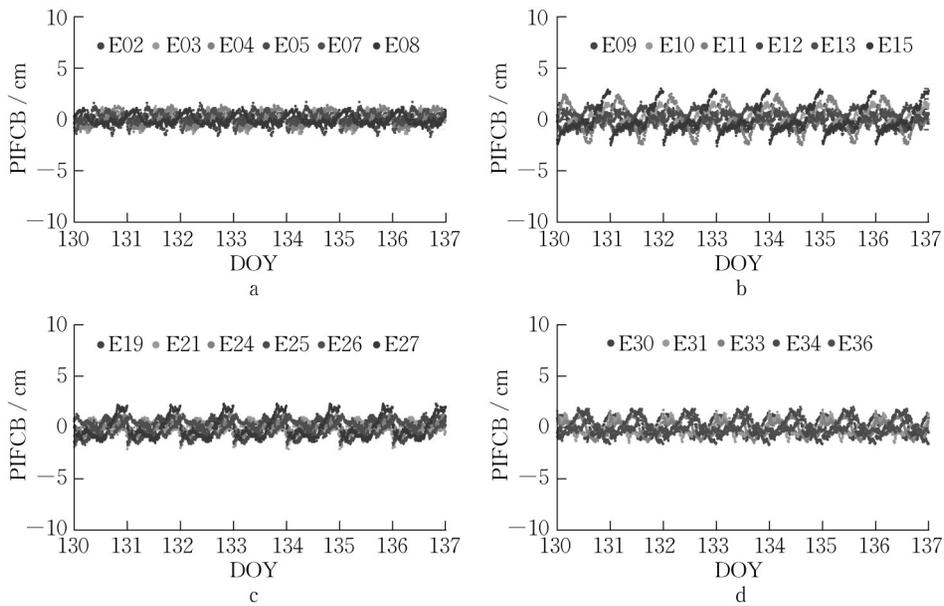


图3 Galileo 卫星的 PIFCB 时变序列

Fig. 3 PIFCB time-varying series for Galileo Satellites

误差对 GPS Block III 和 Galileo 卫星的影响均可以忽略不计。

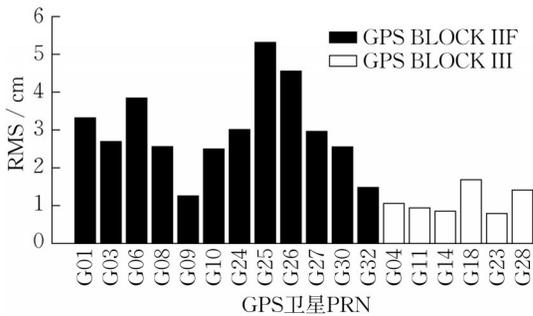


图4 GPS 卫星的频间钟偏差 RMS 统计结果

Fig. 4 IFCBs RMS statistics results for GPS Satellites

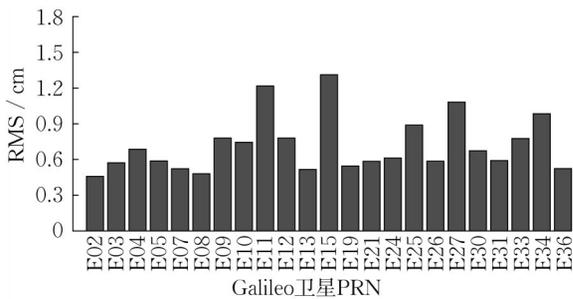


图5 Galileo 卫星的频间钟偏差 RMS 统计结果

Fig. 5 IFCBs RMS statistics results for Galileo Satellites

图 6 和图 7 分别显示了 2023 年 DOY 130—DOY 136 BDS-2 和 BDS-3 卫星的 PIFCB 时变序列，

图 8 和图 9 分别显示了 BDS-2 和 BDS-3 卫星的频间钟偏差 RMS 值统计结果。分析图 6—8 可知, BDS 卫星的 PIFCB 时变序列变化幅度约为 3 ~ 5 cm, 频间钟偏差 RMS 值不超过 3 cm。BDS-3 的 PRN C34 和 PRN C40 卫星相比其他 BDS 卫星的频间钟偏差 RMS 值较大, 这可归因于追踪 BDS-3 PRN C34 和 PRN C40 卫星的 MGEX 测站较少有关。由于观测数据较少, 估计的 PIFCB 产生较大的未建模残差噪声。随着新的 BDS-3 卫星观测数量的增加, PRN C34 和 PRN C40 卫星的 IFCB 估计结果将与其他 BDS-3 卫星相当。

为了进一步验证 IFCB 对三频 PPP-AR 数据处理的影响。鉴于 2.2 节的 GPS、Galileo 和 BDS 卫星的 PIFCB 时变特性验证了 IFCB 对 GPS Block III、Galileo 和 BDS 卫星的影响相对较小, 因此, 后续实验主要研究 IFCB 对 GPS Block IIF 卫星的超宽巷 UPD 估计结果和非差非组合三频 PPP-AR 性能的影响。

2.3 GPS Block IIF 卫星的超宽巷 UPD 估计结果

选择 G01 作为参考卫星, 图 10 显示了 2023 年 DOY 130—DOY 136 经 IFCB 改正前后按照逐历元估计 GPS Block IIF 卫星的超宽巷 UPD 估计结果。分析图 10 可知, 未经 IFCB 改正估计的超宽巷 UPD 时间序列的峰间振幅约为 0.2 ~ 0.4 周, 具有长期波动的特性。经 IFCB 改正后估计的超宽巷 UPD 时间序列具有全天保持稳定的特性。图 11 显示了经

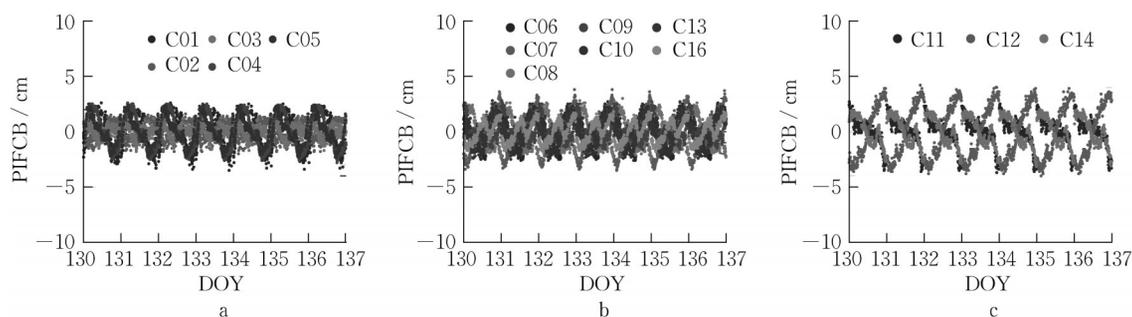


图6 BDS-2卫星的PIFCB时变序列

Fig. 6 IFCB estimation for BDS-2 Satellites

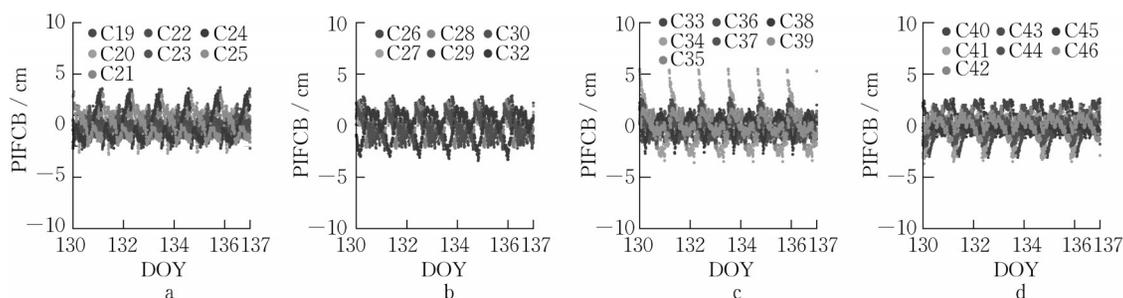


图7 BDS-3卫星的PIFCB时变序列

Fig. 7 IFCB estimation for BDS-3 Satellites

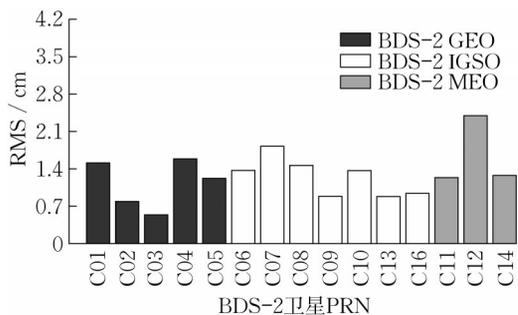


图8 BDS-2卫星的频间钟偏差RMS统计结果

Fig. 8 IFCBs RMS statistics results for BDS-2 Satellites

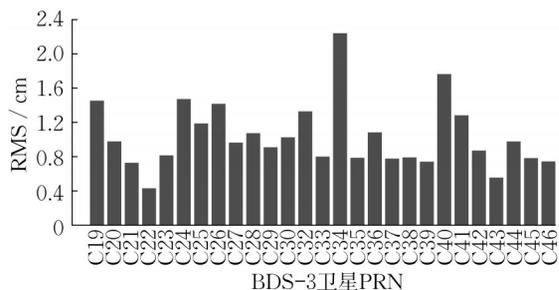


图9 BDS-3卫星的频间钟偏差RMS统计结果

Fig. 9 IFCBs RMS statistics results for BDS-3 Satellites

IFCB改正前后按照逐天估计超宽巷UPDs的标准差(standard deviation, STD)统计结果。经IFCB改正

正估计的超宽巷未校准相位延迟STD明显小于未经IFCB改正估计的超宽巷未校准相位延迟UPDs。平均超宽巷未校准相位延迟STD从0.06周提高到0.02周,提高了66.7%。这表明,IFCB改正可以显著提高GPS Block IIF卫星的超宽巷UPD稳定性。

2.4 GPS三频非差非组合PPP-AR性能评估

为了进一步验证IFCB对GPS三频非差非组合PPP-AR性能的影响。非差非组合PPP-AR处理策略具体如表2所示。使用扩展卡尔曼滤波对状态量进行估计,接收机坐标视作白噪声估计;相位缠绕使用经验模型改正;卫星端和接收机端的相位中心偏差(phase center offset, PCO)和相位中心变化(phase center variation, PCV)使用IGS提供的igs20.atx文件进行改正;部分模糊度固定使用数据驱动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卫星直至固定,Ratio检验和最小二乘模糊度降相关平差(least square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)成功率作为判断模糊度固定是否成功的标准。14个MGEX测站的平均收敛时间和定位误差RMS统计结果分别如表3和图12所示。收敛时间定义为连续10个历元均小于5cm的水平定位误差所需的时间。分析表2可知,经IFCB改正的

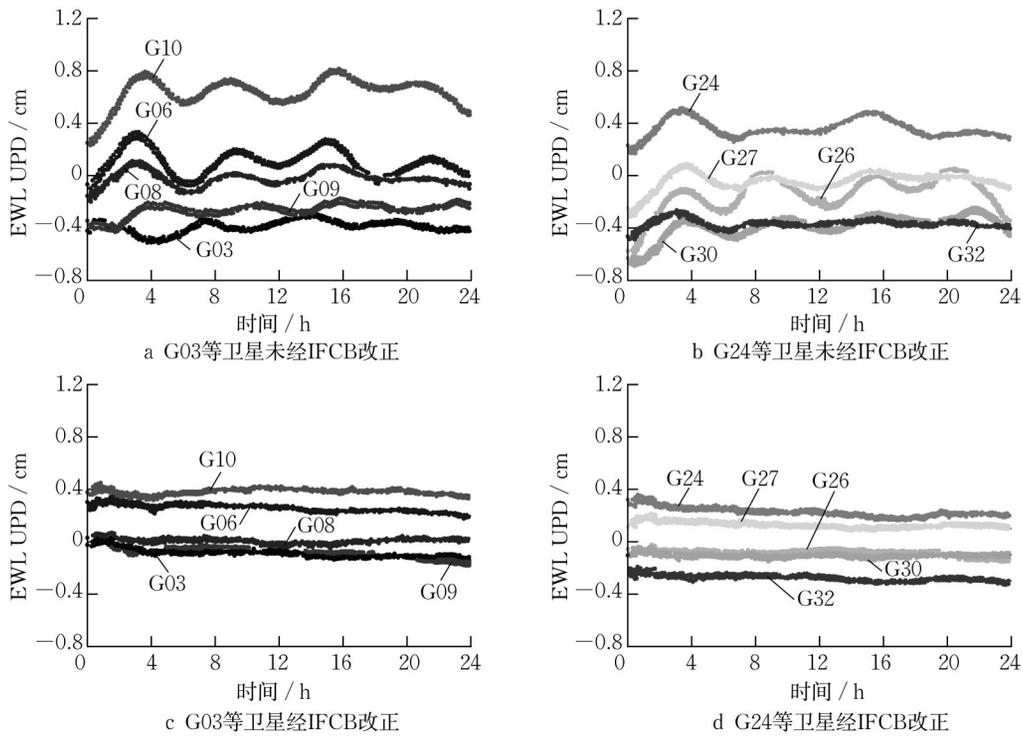


图10 GPS Block IIF 卫星经IFCB改正前后 EWL UPD 估计结果

Fig. 10 Estimation of EWL UPDs before and after IFCB correction for GPS Block IIF Satellites

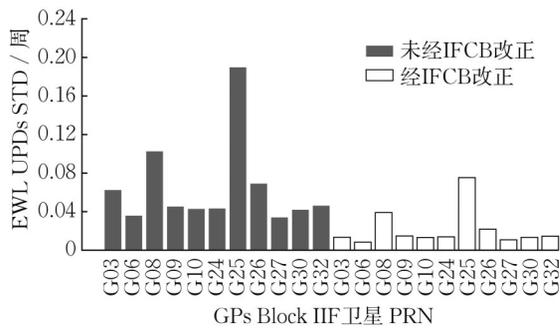


图11 GPS Block IIF 卫星经IFCB改正前后 EWL UPDs STD 统计结果

Fig. 11 EWL UPDs STD statistics for GPS Block Satellites before and after IFCB correction

三频非差非组合 PPP-AR 解方案相比未经 IFCB 改正东(east, E)、北(north, N)和天(up, U)三方向平均定位误差RMS分别从2.64 cm减少到1.82 cm, 平均定位精度提高了31.1%;从2.25 cm减少到1.51 cm, 平均定位精度提高了32.9%;从3.02 cm减少到2.06 cm, 平均定位精度提高了31.8%。收敛时间小于20min比例从68.6%提升到71.3%, 提高了2.7%。平均收敛时间从22.1 min减少到18.1 min, 减少了18.1%, 略优于非差非组合双频 PPP-AR 解方案(18.4min)。

表2 非差非组合 PPP-AR 处理策略

Tab. 2 Undifferenced and uncombined PPP-AR processing strategy

项目	策略
信号频段	L1、L2、L5
采样间隔	30 s
卫星端和接收机端 PCO 和 PCV	igs20.atx
电离层延迟	随机游走
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°
定权方式	高度角定权
相位缠绕	经验模型改正
模糊度固定算法	LAMBDA 算法
模糊度固定检核	LAMBDA 成功率超过95%, 比率检验值大于3.0

表3 GPS 双频 PPP-AR 和经 IFCB 改正前后 GPS 三频 PPP-AR 平均定位误差 RMS 值

Tab. 3 Average positioning error RMS of GPS UC dual-frequency PPP-AR and UC triple-frequency PPP-AR solutions before and after IFCB correction

位置	双频 PPP-AR	未经 IFCB 改正的 IF 三频 PPP-AR	经 IFCB 改正的 三频 PPP-AR
E	1.85	2.64	1.82
N	1.52	2.25	1.51
U	2.08	3.02	2.06

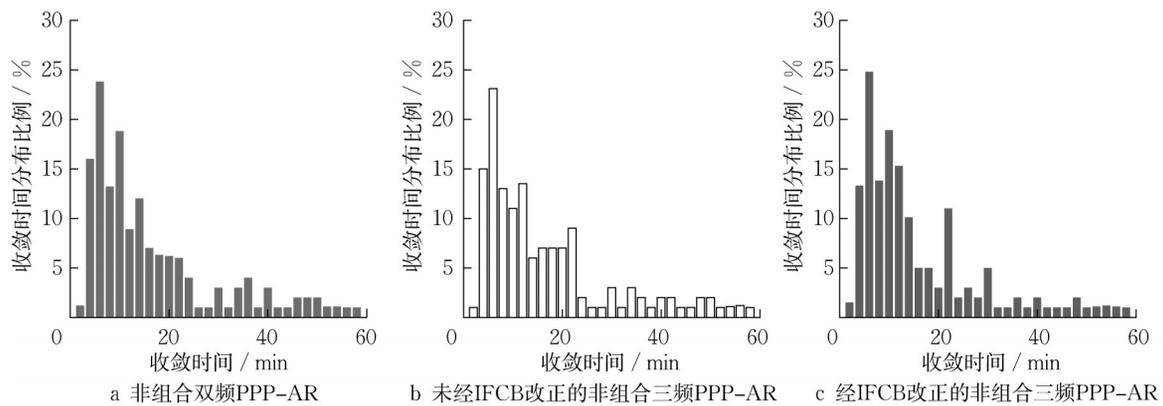


图12 GPS双频PPP-AR和经IFCB改正前后GPS三频PPP-AR收敛时间分布

Fig. 12 Distribution of convergence time of GPS UC dual-frequency PPP-AR and UC triple-frequency PPP-AR solutions before and after IFCB correction

3 结语

提出了一种ED的方法估计GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB,使用了2023年DOY 130—DOY 136全球均匀分布的100个MGEX测站观测数据估计了GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB,分析了GPS、Galileo和BDS卫星的PIFCB时变特性,评估了IFCB改正对GPS Block IIF卫星的超宽巷UPD和GPS三频非差非组合PPP-AR性能的影响。GPS、Galileo和BDS卫星的IFCB时变序列特性表明:基于GPS Block IIF卫星估计的PIFCB时变序列峰值约为10 cm;基于GPS Block III和Galileo卫星估计的PIFCB时变序列均呈现出小于4 cm峰间振幅变化。BDS卫星的PIFCB时变序列幅度约为3~5 cm,频间钟偏差RMS值不超过3 cm。GPS Block IIF卫星的超宽巷UPD和三频非差非组合PPP-AR性能评估结果表明:经IFCB改正的GPS Block IIF卫星的超宽巷未校准相位延迟UPDs从0.06周提高到0.04周,提高了66.7%,这表明,IFCB改正可以显著提高GPS Block IIF卫星的超宽巷UPD稳定性。经IFCB改正的三频非差非组合PPP-AR解方案相比未经IFCB改正PPP-AR解方案在E、N和U三方向平均定位精度分别提高了31.1%、32.9%、31.8%;收敛时间小于20min比例提高了2.7%;平均收敛时间减少了18.1%,略优于非差非组合双频PPP-AR解方案。GPS三频非差非组合PPP-AR的性能评估的实验验证了IFCB的改正效果,对卫星钟差估计与精密定位均具有一定的参考意义。

作者贡献声明:

张兵良:提出研究思路,指导研究方案,设计论文框架,

审阅论文并提出修改意见。

方卓:整理文献,参与研究工作,完成程序编写,撰写论文。

王立诗云:整理文献,参与研究工作。

参考文献:

- [1] ZHOU H, WANG L, FU W, *et al.* Real-time GNSS triple-frequency cycle slip detection using three optimal linear combinations[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 142.
- [2] 张兵良,方卓,王立诗云,等.高阶电离层延迟对PPP-AR对流层参数估计的影响[J].*测绘科学*,2024,49(4):57.
ZHANG Bingliang, FANG Zhuo, WANG Lishiyun, *et al.* The effects of higher-order ionospheric delay on precise point positioning ambiguity resolution tropospheric parameters estimation [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2024, 49(4):57.
- [3] YANG Y, ZHOU F, SONG S. Improving precise point positioning (PPP) performance with best integer equivariant (BIE) estimator[J]. *GPS Solutions*, 2024, 28(1): 50.
- [4] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P, *et al.* Three's the challenge: a close look at GPS SVN62 triple-frequency signal combinations finds carrier-phase variations on the new L5[J]. *GPS World*, 2010, 21(8): 8.
- [5] 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.
- [6] LI H J, ZHOU X H, 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.
- [7] 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.
- [8] PAN L, ZHANG X, LI X, *et al.* GPS inter-frequency clock

- bias modeling and prediction for real-time precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22: 1.
- [9] LI H, LI B, XIAO G, *et al.* Improved method for estimating the inter-frequency satellite clock bias of triple-frequency GPS [J]. *GPS Solutions*, 2016, 20: 751.
- [10] 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.
- [11] PAN L, ZHANG X, LI X, *et al.* Characteristics of inter-frequency clock bias for Block IIF satellites and its effect on triple-frequency GPS precise point positioning [J]. *GPS solutions*, 2017, 21: 811.
- [12] 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.
- [13] LI H, CHEN Y, WU B, *et al.* Modeling and initial assessment of the inter-frequency clock bias for COMPASS GEO satellites [J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(12): 2277.
- [14] PAN L, LI X, ZHANG X, *et al.* Considering inter-frequency clock bias for BDS triple-frequency precise point positioning[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 734.
- [15] GONG X, GU S, LOU Y, *et al.* Research on empirical correction models of GPS Block IIF and BDS satellite inter-frequency clock bias[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94: 1.
- [16] ZHANG F, CHAI H, LI L, *et al.* Estimation and analysis of GPS inter-frequency clock biases from long-term triple-frequency observations[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25: 1.
- [17] AI Q, LIUT, ZHANG B, *et al.* Simultaneous estimation of inter-frequency clock biases and clock offsets with triple-frequency GPS data: undifferenced and uncombined methodology and impact analysis[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 145.
- [18] ZHANG F, CHAI H, LI L, *et al.* Understanding the characteristic of GLONASS inter-frequency clock bias using both FDMA and CDMA signals[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(2): 63.
- [19] LI L, YANG Z, JIA Z, *et al.* Parallel computation of Multi-GNSS and multi-frequency inter-frequency clock biases and observable-specific biases[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7): 1953.
- [20] WU J, LI X, YUAN Y, *et al.* Estimation of GLONASS inter-frequency clock bias considering the phase center offset differences on the L3 signal [J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(3): 130.
- [21] ZHANG F, CHAI H, WANG M, *et al.* Considering inter-frequency clock bias for GLONASS FDMA+ CDMA precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(1): 10.
- [22] FAN L, WANG C, GUO S, *et al.* GNSS satellite inter-frequency clock bias estimation and correction based on IGS clock datum: A unified model and result validation using BDS-2 and BDS-3 multi-frequency data [J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95: 1.
- [23] LU Y, ZHU H, TANG L, *et al.* Influence of stochastic modeling for inter-frequency clock biases on multi-frequency precise point positioning[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(18): 4507.