引文格式:黄卫权,李梦浩,张健,等.卫星钟差批处理估计的基准优化方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):576-590.DOI:10.13203/j.whugis20240091

Citation:HUANG Weiquan,LI Menghao,ZHANG Jian,et al.Datum Optimization Method for Satellite Clock Batch Estimation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):576-590.DOI:10.13203/j.whugis20240091

卫星钟差批处理估计的基准优化方法

黄卫权[1] 李梦浩[1] 张 健[1] 王仁龙[1]

1 哈尔滨工程大学智能科学与工程学院,黑龙江 哈尔滨,150001

摘 要:超快速卫星钟差产品是实时高精度定位用户在网络受限条件下实现精密单点定位(precise point positioning,PPP)服务的基础,其稳定性直接影响PPP定位精度。传统超快速卫星钟差批处理估计通常以固定单接收机钟为基准,由钟差噪声引起的参考接收机钟不稳定将会导致卫星钟差的稳定性降低。为此,提出基于接收机钟拟稳约束的钟差基准优化方法,通过构建接收机钟差模型精度加权的钟差拟稳约束形成稳健的接收机钟群局部重心基准,以提升卫星钟差批处理估计的稳定性。利用全球网测站一个月数据进行全球定位系统卫星钟差批处理估计实验,相比于传统固定单接收机钟基准,钟差基准优化方法对于BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb和BLOCK III Rb不同卫星类型的卫星钟差模型拟合精度分别提升43.10%、1.73%、23.47%、16.34%和47.49%,卫星钟差千秒频率稳定度分别提升9.59%、0.04%、0.35%、0.33%和11.22%,卫星钟差万秒频率稳定度分别提升11.53%、0.60%、7.62%、4.83%和18.21%。所提方法在参考接收机钟不稳定的恶劣情况下仍能维持卫星钟差批处理估计的稳定性,提升了超快速卫星钟差产品的稳定性,进而提升了卫星钟差预测和PPP定位精度。

关键词:卫星钟差;批处理估计;钟差基准;稳定性

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-06-11

DOI:10.13203/j.whugis20240091 **文章编号**:1671-8860(2026)03-0576-15

Datum Optimization Method for Satellite Clock Batch Estimation

HUANG Weiquan[1] *LI Menghao*[1] *ZHANG Jian*[1] *WANG Renlong*[1]

1 College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract: **Objectives**: Ultra-rapid satellite clock products constitute the prerequisite for providing high-precision precise point positioning (PPP) services to users operating under limited or unstable network conditions. The stability of satellite clock estimates, which is strongly influenced by the choice of clock datum, plays a critical role in determining PPP positioning accuracy. In conventional ultra-rapid satellite clock batch estimation, a single fixed receiver clock is commonly adopted as the reference datum. However, receiver clock noise inevitably introduces instability into the reference clock, thereby degrading the stability and reliability of the estimated satellite clocks. **Methods**: To address this issue, an optimized clock datum method based on quasi-stable constraints of receiver clocks is proposed. The method constructs a robust local barycentric datum for a group of receiver clocks by introducing quasi-stable constraints weighted according to the accuracy of receiver clock models. By reducing the dependence on a single reference receiver and mitigating the impact of receiver clock noise, the proposed datum enhances the robustness and stability of satellite clock batch estimation. The method is integrated into the satellite clock batch processing framework to improve the overall quality of ultra-rapid satellite clock products. **Results**: One month global positioning system satellite clock batch estimation experiments were conducted using global tracking network observations. Comparative analyses between the traditional fixed single-receiver clock datum and the proposed optimized datum were performed for different satellite types, including BLOCK IIF Rb, BLOCK IIF Cs,

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3901300);国家自然科学基金(62373117)。

第一作者:黄卫权,博士,教授,研究方向为组合导航。huangweiquan@hrbeu.edu.cn

通信作者:李梦浩,博士。lmh950605@qq.com

BLOCK IIR Rb, BLOCK IIR-M Rb, and BLOCK III Rb. The results demonstrate that the satellite clock model fitting accuracy is improved by 43.10%, 1.73%, 23.47%, 16.34%, and 47.49%, respectively. In addition, the frequency stability at 1 000 s is enhanced by 9.59%, 0.04%, 0.35%, 0.33%, and 11.22%, while the frequency stability at 10 000 s is improved by 11.53%, 0.60%, 7.62%, 4.83%, and 18.21%, respectively. **Conclusions:** The proposed clock datum optimization method effectively suppresses the adverse influence of unstable reference receiver clocks on satellite clock batch estimation, particularly under unfavorable conditions where receiver clock stability cannot be guaranteed. As a result, the stability of ultra-rapid satellite clock products is significantly improved, which in turn enhances satellite clock prediction performance and PPP positioning accuracy. This method provides a robust and practical solution for high-precision PPP applications relying on ultra-rapid satellite clock products.

Key words: satellite clock; batch estimation; clock datum; stability

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术能为全球网单接收机用户提供动态分米级、静态厘米级精度的定位服务,其中基于全球网观测站生成的卫星钟差产品是实现高精度PPP定位的基础[1-4]。卫星钟差产品按实效性分类,主要包括实时、超快速、快速和最终卫星钟差产品[5]。相比于其他卫星钟差产品,超快速卫星钟差产品不受实时数据流的网络限制且具有低延迟和高稳定性的优势,可用于实时PPP以提供高精度定位服务[6]。因此,超快速卫星钟差产品的稳定性对于用户实现高精度定位至关重要。

超快速卫星钟差产品包含观测和预测两部分,其中观测部分的卫星钟差是利用星地测距信息通过批处理参数估计方法估计得到,预测部分是通过构建卫星钟差预测模型对批处理估计的卫星钟差进行拟合和外推得到[7]。批处理估计的卫星钟差是构建卫星钟差预测模型的基础,其稳定性决定卫星钟差的预测精度。相比于基于单测站网的卫星钟差估计,基于测站群的卫星钟差组合估计具备提升卫星钟差精度和稳定性的能力,在不降低更新延迟的前提下可用于超快速卫星钟差产品[8]。卫星钟差估计通常采用非差观测模型,其待估参数包含接收机钟差和卫星钟差。由于两者之间存在线性相关性,在构建误差方程时设计矩阵会出现秩亏的现象,进而导致法方程出现秩亏的现象。为避免法方程秩亏导致待估参数无法求解的问题,通常引入参考钟约束,估计与参考钟基准对齐的卫星钟差。参考钟不稳定会影响卫星钟差估计的稳定性,导致卫星钟差建模和预测精度降低,进而降低PPP定位精度。因此,有必要研究能为超快速卫星钟差估计提供稳定钟差基准的方法,以提升批处理估计卫星钟差稳定性,进而提升卫星钟差预测精度和PPP定位精度。

卫星钟差估计引入钟差基准的本质是增加关于钟差的零值约束伪观测方程,以消除卫星钟差的自由度。按照约束类型,钟差基准策略可分为卫星钟公共基准(common cocks satellite, CCS)和接收机钟公共基准(common clocks receiver, CCR)[9]。CCS基准包括单卫星钟基准和卫星钟重心基准,CCR基准包括单接收机钟基准和接收机钟重心基准,其中重心基准是构建所有卫星钟差或接收机钟差的零均值约束条件,但可视卫星或可观测接收机数量发生变化会导致钟差基准发生改变。单接收机钟基准一般选择配备氢原子钟的接收机钟为参考,以确保卫星钟差估计不受可视卫星数变化的影响。HUANG等[10]推导了单卫星钟、单接收机钟和卫星钟重心基准约束的解析转换关系,分析比较不同钟差基准的特点和适应场景。传统卫星钟差批处理估计的钟差基准分两步确定:(1)卫星钟差批处理估计选择接收机钟重心基准,以估计所有的卫星钟差和接收机钟差;(2)利用钟差基准转换模型,将以接收机重心为基准的卫星钟差转换到单接收机钟基准,其中参考接收机钟的优选准则为接收机钟差模型拟合残差最小[8]。因此,参考接收机钟的稳定性是影响批处理估计卫星钟差稳定性的重要因素。

传统超快速卫星钟差估计选择固定单接收机钟基准,以维持不同观测窗卫星钟差基准不发生改变。从钟差基准角度分析,影响卫星钟差稳定性的因素包括两个方面:一方面,接收机易受环境干扰、设备故障和网络中断等因素影响,导致参考接收机的观测弧段不连续。这种情况参考接收机不再参与卫星钟差批处理估计,钟差基准需切换到其他参考接收机钟,而钟差基准切换必然导致卫星钟差稳定性降低;另一方面,参考接收机钟的稳定性受观测噪声和钟差噪声的影

响,不同观测窗固定的参考接收机钟稳定性不同。当参考接收机钟稳定性较差时,将会导致卫星钟差的稳定性降低。本文重点关注由钟差噪声引起的参考接收机钟不稳定导致卫星钟差稳定性降低的问题,忽略由观测弧段不连续引起的钟差基准切换对不同观测窗卫星钟差稳定性的影响。

为提供稳定的超快速卫星钟差产品,卫星钟差批处理估计需维持钟差基准的稳定性。传统维持卫星钟差稳定性的方法分为钟差基准约束优化和桥接补偿方法。对于钟差基准约束优化方法,XIE等[11]提出采用卫星钟差短期预测和接收机钟漂建模的钟差基准补偿方法。CHENG等[12]提出以短期预测的卫星钟为约束维持卫星钟差估计的原钟差基准。ZHAO等[13]提出优化的钟差基准策略,利用观测质量优选的卫星钟群构建CCS基准。对于桥接补偿方法,ZHANG等[14]提出使用平均钟差变化率的方法来桥接补偿钟差基准跳变。上述方法从钟差模型精度和频率稳定度等方面验证维持钟差基准的有效性。然而基于钟差预测的钟差基准受限于钟差预测精度,基于观测质量优选的钟差基准随时间推移易发生变化,基于桥接补偿的钟差基准存在累积误差,均造成卫星钟差稳定性的提升能力有限。因此,有必要在卫星钟差批处理过程中提供稳定的钟差基准,使参考接收机钟在稳定性降低时仍能维持卫星钟差的稳定性。

本文旨在优化卫星钟差批处理估计的钟差基准策略,以提升超快速观测部分卫星钟差的稳定性,进而提升卫星钟差预测精度和PPP定位精度。传统超快速卫星钟差估计固定性能稳定的单参考接收机钟为钟差基准,钟差噪声等因素导致参考接收机钟差稳定性降低,进而降低卫星钟差的稳定性。通过构建接收机钟差模型精度加权的钟差拟稳约束,形成稳健的接收机钟群局部重心基准,降低传统方法固定参考接收机钟不稳定对卫星钟差稳定性的影响。

本文首先分析卫星钟差批处理估计传统的固定单接收机钟基准策略,引出传统钟差基准策略存在卫星钟差稳定性不高的问题。然后,通过建立接收机钟差模型精度加权的钟差拟稳约束,构建稳健的接收机钟群局部重心基准。最后,通过与传统钟差基准策略对比,从卫星钟差基准变化和卫星钟差稳定性水平的角度验证本文所提钟差基准优化方法的有效性,并分析批处理估计卫星钟差稳定性提升对卫星钟差预测精度和PPP定位精度的影响。

1 方法原理

为了提升卫星钟差批处理估计的稳定性,首先构建基于全球网测站群的卫星钟差批处理估计函数模型。然后介绍钟差基准转换方法,分析传统基于固定单接收机钟基准对卫星钟差稳定性的影响。最后建立接收机钟差模型精度加权的钟差拟稳约束,构建稳健的接收机钟群局部重心基准,分析本文所提钟差基准优化方法提升卫星钟差稳定性的优势。

1.1 函数模型

基于全球网测站群的卫星钟差批处理估计在观测窗内利用测站群内所有接收机的观测信息,固定测站坐标和卫星轨道,构建非差无电离层(ionosphere-free, IF)组合观测模型。模型待估参数包括卫星钟差、接收机钟差、天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay,ZTD)和模糊度参数,其他测距误差源被待估参数或观测残差吸收[15]。为了降低估计观测窗内所有待估参数的解算负担,将待估参数分为时变和时不变参数[16],采用参数预消除和回代的方法批处理估计待估参数。时变参数包括接收机钟差和卫星钟差,时不变参数包括天顶对流层延迟和模糊度。观测窗内各测站群的卫星钟差批处理估计误差方程可简化为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}^s_{P,\mathrm{IF},r,c} \\ \boldsymbol{v}^s_{L,\mathrm{IF},r,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_{r,c} & \boldsymbol{G}^s \\ \boldsymbol{G}_{r,c} & \boldsymbol{G}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \boldsymbol{t}_{r,c} \\ \delta \boldsymbol{t}^s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_{\mathrm{ZTD}} & 0 \\ \boldsymbol{G}_{\mathrm{ZTD}} & \boldsymbol{G}_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z}_{r,c} \\ \boldsymbol{N}^s_r \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{l}^s_{P,\mathrm{IF},r,c} \\ \boldsymbol{l}^s_{L,\mathrm{IF},r,c} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{G}$是设计矩阵;s是卫星,r是接收机;c是测站群;P是伪距观测量;L是相位观测量;$\boldsymbol{v}$是各观测量的后验观测残差矢量;$\delta \boldsymbol{t}_r$是各接收机的接收机钟差矢量;$\delta \boldsymbol{t}^s$是各卫星的卫星钟差矢量;$\boldsymbol{Z}_r$是各接收机ZTD矢量;$\boldsymbol{N}^s_r$是各接收机观测到各卫星的模糊度矢量;$\boldsymbol{l}$是各观测量的先验观测残差矢量。

由于测站网观测模型中的接收机钟差和卫星钟差在每个历元都线性相关,导致对应的设计矩阵秩亏,需逐历元选择钟差基准消除设计矩阵秩亏。选择钟差基准是在卫星钟差批处理估计观测模型的基础上增加伪观测量,使原法方程增加钟差基准约束方程。为分析增加约束方程对原法方程的变化,简化原法方程为[17]:

$$\boldsymbol{MX} = \boldsymbol{W} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{M}$是法方程设计矩阵;$\boldsymbol{X}$是待估参数向量;$\boldsymbol{W}$是包含观测量加权的先验残差向量。选择钟差基准消除设计矩阵秩亏,使$\boldsymbol{M}$矩阵满秩,进而使待估参数可估。

为能估计所有的卫星钟差和接收机钟差,本文选择接收机钟重心基准策略,即逐历元约束所有接收机钟差的和为零。根据平差模型,约束方程可表示为:

$$\begin{cases} \underset{[n(\delta \boldsymbol{t}^s)+n(\delta \boldsymbol{t}_r)+n(\boldsymbol{T}_r)+n(\boldsymbol{N}_r^s)]\times 1}{\boldsymbol{E}_{r,z}\ \boldsymbol{X}} = 0 \\ \boldsymbol{E}_{r,z} = \begin{bmatrix} \underset{1\times n(\delta t^s)}{0^s} & \underset{1\times n(\delta t_r)}{\boldsymbol{e}_{r,z}} & \underset{1\times n(T_r)}{0_T} & \underset{1\times n(N_r^s)}{0_N} \end{bmatrix} \\ \underset{1\times n(\delta t_r)}{\boldsymbol{e}_{r,z}} = [1 \quad 1 \quad \cdots \quad 1] \end{cases} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{E}_{r,z}$是维度为$1\times[n(\delta \boldsymbol{t}^s)+n(\delta \boldsymbol{t}_r)+n(\boldsymbol{T}_r)+n(\boldsymbol{N}_r^s)]$的接收机钟重心基准约束向量;$z$是零值约束;$n$是观测窗内参数个数;$\boldsymbol{T}$为ZTD。根据最小二乘平差原理,联合式(2)和式(3),接收机钟重心基准约束的法方程设计矩阵为:

$$\bar{\boldsymbol{M}}_{r,z} = \boldsymbol{M} + (\boldsymbol{E}_{r,z})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E}_{r,z} \tag{4}$$

式中,$\bar{\boldsymbol{M}}$是增加约束方程后的法方程设计矩阵。

通过增加关于CCR基准的约束方程,消除法方程$\boldsymbol{M}$矩阵的秩亏。联立卫星钟差批处理估计误差方程和钟差基准约束方程,利用参数预消除与回代的方法估计方程中的待估参数,此时估计的卫星钟差和接收机钟差是以测站群内所有接收机钟重心为基准的相对钟差。

接收机钟重心基准受卫星钟差批处理估计所用测站影响,不同测站群的接收机钟重心基准不同,不同观测窗所用测站也难以保证恒定不变。不同测站群的重心基准不一致和不同观测窗的重心基准变化导致钟差基准不一致,降低卫星钟差的稳定性。因此,为了维持批处理估计卫星钟差的稳定性,有必要通过钟差基准转换方法实现不同测站群接收机钟重心基准统一到同一钟差基准。

1.2　钟差基准转换方法

为了避免因接收机钟重心基准不一致导致卫星钟差的钟差基准发生改变,通常利用不同测站群批处理估计的接收机钟差和卫星钟差作为观测量估计组合钟差,将钟差基准从不同测站群的接收机钟重心基准转换到单接收机钟基准。卫星钟差组合估计的误差方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{v}_{\delta t_r,c} \\ \boldsymbol{v}_{\delta t^s,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{G}_r & 0_c & \boldsymbol{G}_{r,D} \\ 0_c & \boldsymbol{G}^s & \boldsymbol{G}^{s,D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \boldsymbol{t}_{r,\mathrm{comb}} \\ \delta \boldsymbol{t}^{s,\mathrm{comb}} \\ \delta \boldsymbol{D} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{l}_{\delta t_r,c} \\ \boldsymbol{l}_{\delta t^s,c} \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中,$\delta \boldsymbol{D}$是相对于参考时间所建立的时间基准偏差;$\delta \boldsymbol{t}_{r,\mathrm{comb}}$是组合估计后各接收机的接收机钟差矢量;$\delta \boldsymbol{t}^{s,\mathrm{comb}}$是组合估计后各卫星的卫星钟差矢量。

由式(5)可看出,卫星钟差组合估计误差方程的待估参数包括组合的接收机钟差、组合的卫星钟差和相对于参考钟差基准的时间基准偏差。由于不同测站群的可视卫星相同,卫星钟差待估参数对于不同测站群属于公共参数。因此,相比于单测站网估计卫星钟差,基于测站群的卫星钟差组合估计可提升卫星钟差精度。

将卫星钟差组合估计法方程简化为式(2)。为避免时间基准偏差的设计矩阵秩亏,传统方法在测站群内选择稳定性高的单参考接收机钟作为参考,例如选择配备氢原子钟的接收机钟,将参考接收机钟的时间基准偏差约束为零,其钟差基准约束方程可表示为:

$$\begin{cases} \underset{[n(\delta \boldsymbol{t}_r)+n(\delta \boldsymbol{t}^s)+n(\delta \boldsymbol{D})]\times 1}{\boldsymbol{E}_{r,v}\ \boldsymbol{X}} = 0 \\ \boldsymbol{E}_{r,v} = \begin{bmatrix} \underset{1\times n(\delta t_r)}{0_r} & \underset{1\times n(\delta t^s)}{0^s} & \underset{1\times n(\delta D)}{\boldsymbol{e}_{r,v}} \end{bmatrix} \\ \underset{1\times n(\delta D)}{\boldsymbol{e}_{r,v}} = [\underset{1\times[n(\delta D)-n(r)]}{0} \quad \underset{1\times n(r)}{1}] \end{cases} \tag{6}$$

式中,$\boldsymbol{E}_{r,v}$是维度为$1\times[n(\delta \boldsymbol{t}_r)+n(\delta \boldsymbol{t}^s)+n(\delta \boldsymbol{D})]$的单接收机钟基准的约束向量。根据最小二乘平差原理,联合式(2)和式(6),卫星钟差组合估计法方程矩阵可表示为:

$$\bar{\boldsymbol{M}}_{r,v} = \boldsymbol{M} + (\boldsymbol{E}_{r,v})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{E}_{r,v} \tag{7}$$

经钟差基准转换,组合估计的接收机钟差和卫星钟差是以所选参考接收机钟为钟差基准的相对钟差。将接收机钟重心基准转换到单接收机钟基准,一方面有助于统一不同观测窗卫星钟差批处理估计的钟差基准为相同的参考接收机钟,从而降低钟差基准不一致对卫星钟差稳定性的影响。另一方面,由于各测站观测质量存在差异,所有测站的接收机钟稳定性势必存在差异。相比于接收机钟重心基准,单接收机钟基准可降低钟差噪声对钟差基准稳定性的影响,这是因为接收机钟重心基准包含钟差基准稳定性较差的接收机钟。

由钟差噪声引起的参考接收机钟在观测窗内不稳定,导致相对于该参考接收机钟的卫星钟差稳定性降低。为确保当前观测窗卫星钟差的稳定性,需将参考接收机钟切换为性能稳定的接收机钟,但钟差基准切换会降低卫星钟差在观测窗边界处的连续性[18],进而降低卫星钟差的稳定

性。因此,有必要在钟差基准转换时选择稳定的钟差基准,使参考接收机钟在稳定性降低时仍能维持卫星钟差的稳定性。

1.3 钟差基准优化方法

为解决由钟差噪声引起的参考接收机钟不稳定降低卫星钟差稳定性的问题,本文提出基于接收机钟拟稳约束的钟差基准优化方法,该方法根据接收机钟差模型精度选择性能稳定的参考接收机钟群。钟差模型精度是指钟差模型的拟合精度,可用于反映钟差的稳定性[19]。由于参考接收机钟通常选择稳定性最好的氢原子钟,该接收机钟差在一天内线性趋势明显,故构建钟差线性模型统计接收机钟差模型精度[20],可表示为:

$$x(i)=a_0+a_1(t_i-t_0)+\varepsilon_x(i) \tag{8}$$

式中,x是钟差;i是历元;a_0是钟差的相位;a_1是钟差的频率;t_i是观测时间;t_0是参考时间;ε_x是钟差模型拟合残差。利用原始钟差与拟合钟差作差可得到接收机钟差模型拟合残差,表示每个历元钟差模型值与拟合值之间的差异。接收机钟差模型精度利用拟合残差的均方根(root mean square,RMS)值进行统计,RMS值越小,接收机钟差性能越稳定。根据参考接收机钟稳定性评估方法,本文选择配备氢原子钟的接收机钟组成参考接收机钟群,以维持钟差基准的稳定性。参考接收机钟群优选可表示为:

$$\delta \boldsymbol{t}_g=\left\{\delta \boldsymbol{t}_r,(R_{\varepsilon_r}\leqslant R_{\varepsilon_0},\forall r\in C(H))\right\} \tag{9}$$

式中,g是参考接收机钟群;R是均方根值;$C(H)$是观测窗内配备氢原子钟的接收机全集;ε_0是接收机钟差模型精度的经验阈值;ε_r为接收机钟差模型精度。

根据所选的参考接收机钟群,考虑不同接收机钟的稳定性差异,构建接收机钟差模型精度加权的接收机钟拟稳约束,可表示为:

$$\begin{cases} \underset{[n(\delta t_r)+n(\delta t^s)+n(\delta D)]\times 1}{\boldsymbol{E}_{r,g}\ \boldsymbol{X}}=0 \\ \boldsymbol{E}_{r,g}=\begin{bmatrix} \underset{1\times n(\delta t_r)}{0_r} & \underset{1\times n(\delta t^s)}{0^s} & \underset{1\times n(\delta D)}{\omega_{r,g}} \end{bmatrix} \\ \underset{1\times n(\delta D)}{\boldsymbol{e}_{r,g}}=\begin{bmatrix} \underset{1\times[n(\delta D)-n(g)]}{0} & \underset{1\times n(g)}{\dfrac{1}{\sum_{j=1}^{g}\omega_j}} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{10}$$

式中,ω是接收机钟差模型RMS值的倒数;$\boldsymbol{E}_{r,g}$是是维度为$1\times[n(\delta t_r)+n(\delta t^s)+n(\delta D)]$的接收机钟拟稳约束向量。根据最小二乘平差原理,联合式(2)和式(10),卫星钟差组合估计法方程矩阵可表示为:

$$\bar{\boldsymbol{M}}_{r,g}=\boldsymbol{M}+(\boldsymbol{E}_{r,g})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}_{r,g} \tag{11}$$

本文提出的钟差基准优化方法通过构建接收机钟差模型精度加权的拟稳约束,形成稳健的接收机钟群局部重心基准。经钟差基准转换,组合估计的接收机钟差和卫星钟差是以测站群内参考接收机钟群局部重心为基准的相对钟差。在不发生钟差基准切换的前提下,即使某个参考接收机钟出现由钟差噪声引起的接收机钟不稳定的情况,该局部重心基准会降低稳定性较差的接收机钟对钟差基准稳定性的影响。因此,相比于传统的固定单接收机钟基准,本文所提的基准优化方法能降低参考接收机钟不稳定对卫星钟差稳定性的影响,进而提升卫星钟差批处理估计的稳定性。

2 卫星钟差批处理估计

基于全球网测站群进行卫星钟差批处理估计实验,验证本文所提的钟差基准优化方法相比于传统钟差基准策略提升卫星钟差稳定性的优势。首先,评估基于全球网测站群的卫星钟差批处理估计精度,分析钟差组合估计对卫星钟差精度的影响。根据钟差基准变化的数学模型,分析利用不同钟差基准批处理估计卫星钟差的稳定性差异。然后,利用卫星钟差模型精度和频率稳定度指标,对比评估不同钟差基准策略批处理估计卫星钟差的稳定性。最后进行卫星钟差预测和PPP实验,分析批处理估计卫星钟差稳定性提升对卫星钟差预测精度和PPP定位精度的影响。

2.1 数据来源和处理策略

以全球定位系统(global positioning system,GPS)为例,利用国际全球导航卫星系统服务(international global navigation satellite system service,IGS)测站网的观测数据进行卫星钟差批处理估计实验,卫星钟差批处理估计策略如表1所示。其中,卫星轨道产品固定为最终卫星轨道产品,以排除卫星轨道误差对卫星钟差精度和稳定性评估的影响[10-11]。

卫星钟差批处理估计所用全球网每个测站群的测站数为40,满足每个测站群的卫星钟差估计精度饱和[21]。卫星钟差批处理估计所用全球网测站群分布如图1所示,其中不同颜色表示不同的测站群。测站选择满足每个测站群均属于全球网分布且不同测站群互不重叠的条件,以降低不同测站群卫星钟差估计的相关性。在满足全球网测站群互不重叠的前提下,本文测站优选准则为所选测站组成的测站网观测量数量最多[22]。

表 1　卫星钟差批处理估计策略

Table 1　Strategy for Satellite Clock Batch Estimation

参数	设置
时间	2023年年内日序001—031
观测量	非差伪距和相位观测量
组合模型	双频 IF 组合
观测信号	GPS 双频(L1/L2)
截止高度角/(°)	5
采样率/s	300
随机模型	伪距先验精度:单位权 0.1 m; 相位先验精度:单位权 0.001 m; 高度角加权随机模型
测站网	3个以 40 个全球网测站组成的测站群
测站坐标	固定为 IGS 周解
硬件延迟	卫星钟差吸收[1]
对流层延迟	干分量:Saastamoinen 模型校正; 湿分量:全球投影函数[11],每 2 h 估计
电离层延迟	低阶项:IF 组合消除; 高阶项:忽略
接收机钟差	单点定位先验值,逐历元估计
卫星钟差	逐历元估计
卫星轨道	固定为德国地学研究中心提供的最终卫星轨道产品
模糊度	浮点解,连续观测弧段常数估计
参数估计方法	批处理最小二乘

钟差组合估计所需的卫星钟差和接收机钟差来自不同测站群的批处理估计结果,其钟差基准分别为不同测站群的接收机钟重心基准。在钟差组合估计时,传统单接收机钟基准和本文所提接收机钟群局部重心基准需分别选择单个和多个参考接收机钟,参考接收机优选准则依赖接收机钟的稳定性。根据式(8)所示的接收机钟差模型精度统计方法,利用钟差组合估计前不同测站群批处理估计的接收机钟差,计算所有测站的接收机钟差模型精度。本文所用测站的接收机钟差模型精度统计结果见图 2,其中两个子图为卫星钟差批处理估计实验所用的所有测站。

由图 2 可看出,不同测站的接收机钟差模型精度差异较大,这是因为稳定性差的接收机钟不符合钟差线性模型。配备氢原子钟的接收机钟稳定性较好,其钟差模型 RMS 也相对较高,如 IENG 和 ONSA 测站,一个月的接收机钟差模型 RMS 均值分别为 0.25 ns 和 0.28 ns。配备氢原子钟的接收机钟在不同天的钟差模型精度也存在显著差异,这主要是由于钟差噪声引起的,如 GODS 测站,一个月的接收机钟差模型 RMS 最大值为 0.87 ns,平均值为 0.34 ns。

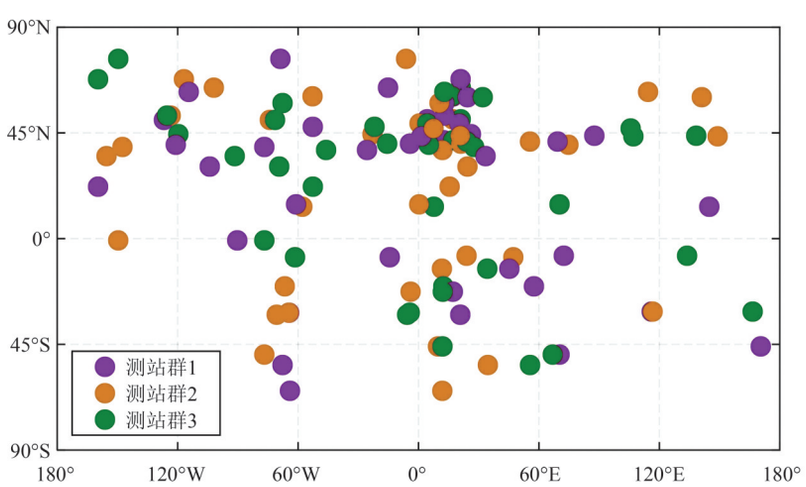


图 1　卫星钟差批处理估计所用全球网测站群分布

Fig. 1　Global Network Station Distribution for Satellite Clock Batch Estimation

本文在钟差组合估计过程设计 3 个接收机钟基准策略,用于对比分析钟差基准转换选择不同钟差基准策略批处理估计卫星钟差的稳定性差异。其中,传统固定单接收机钟基准选择钟差稳定性较差的 GODS 测站为参考接收机钟,以满足由钟差噪声引起的参考接收机钟不稳定的实验条件。本文所提接收机钟群局部重心基准的参考接收机钟差模型精度阈值设置为 0.30 ns,并包含稳定性较差的 GODS 测站组成参考接收机钟群,以验证本文所提方法相比于传统方法提升卫星钟差稳定性的优势。通过与接收机钟差模型精度优选的单接收机钟基准进行对比,验证所提方法在观测窗边界处提升卫星钟差稳定性的优势。因此,本文的 3 个钟差基准分别为固定 GODS 测站的单接收机钟基准($S1$)、根据模型精度优选的单接收机钟基准($S2$)和包含 GODS 测站的接收机钟群局部重心基准($S3$)。

考虑到卫星钟差稳定性受不同类型卫星原

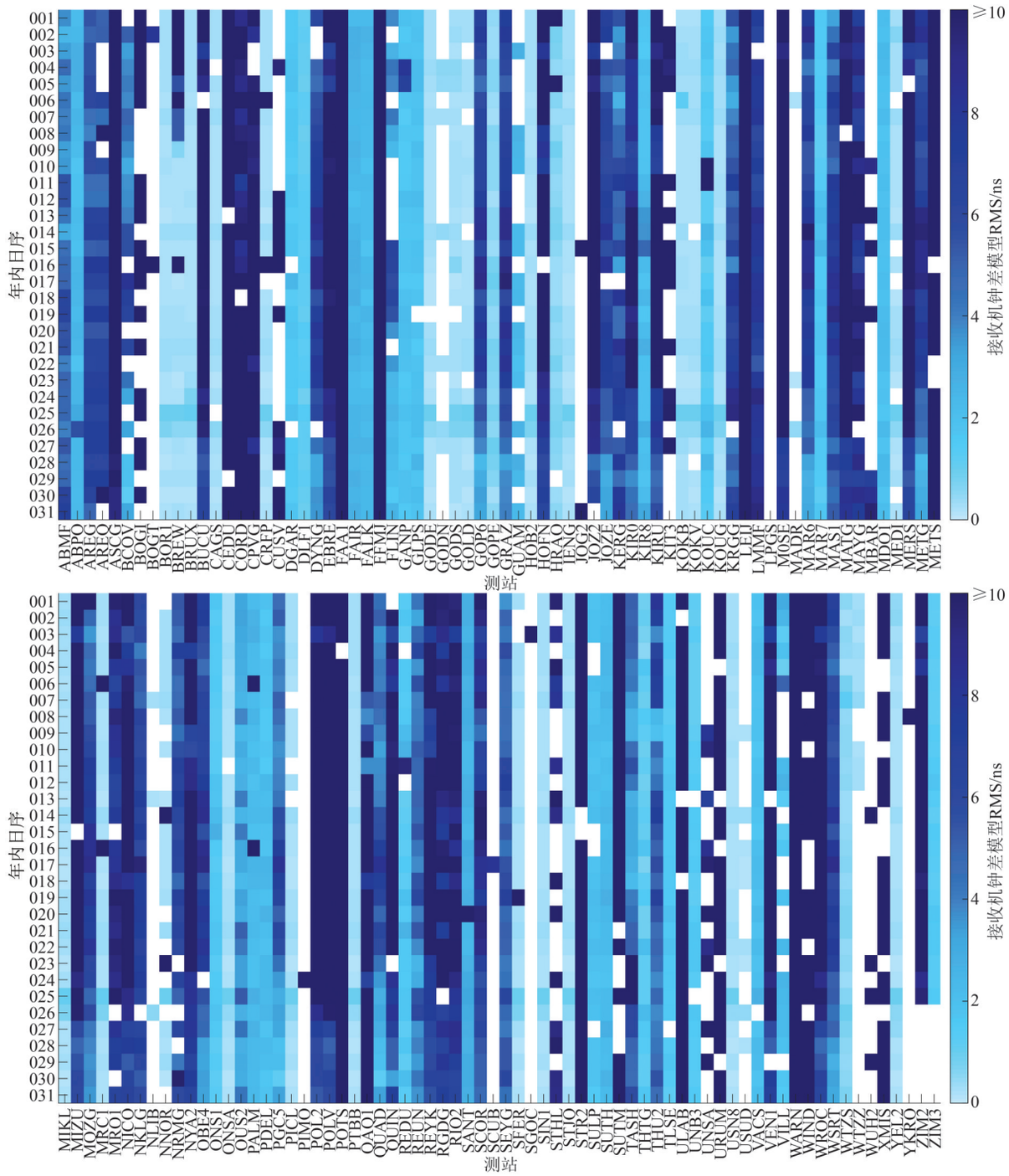


图2 全球网所有测站的接收机钟差模型精度

Fig. 2 Receiver Clock Model Accuracy of All Stations in the Global Network

子钟的影响,本文按照卫星类型及原子钟进行分类,对不同类型的卫星钟差进行精度和稳定性评估。本文在轨卫星的卫星类型及原子钟类型分类如表2所示。其中,Rb为铷原子钟,Cs为铯原子钟。

2.2 钟差精度评估

为了分析钟差组合估计对卫星钟差精度的影响,评估钟差基准转换前后的卫星钟差精度。卫星钟差精度评估通常使用双差策略提取卫星钟差误差,其中参考星选择策略包括单卫星钟差和所有卫星钟差的均值。为了保留所有卫星的卫星钟差误差序列,本文选取所有卫星钟差的均值作为参考卫星,可表示为:

$$\nabla\Delta\delta \boldsymbol{t}^{s}_{\mathrm{est,ref}}(i)=\left[\delta \boldsymbol{t}^{s}(i)-\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\delta \boldsymbol{t}^{m}(i)\right]-\left[\delta \boldsymbol{t}^{s}_{\mathrm{ref}}(i)-\frac{1}{M}\sum_{m=1}^{M}\delta \boldsymbol{t}^{m}_{\mathrm{ref}}(i)\right] \tag{12}$$

式中,$\nabla\Delta$是双差算子;est是估计的卫星钟差;ref

表 2　在轨卫星的卫星类型及原子钟

Table 2　Satellite Types and Onboard Atomic Clocks

卫星类型	原子钟类型	测站编号
BLOCK IIF	Rb	G01、G03、G06、G09、G24、G25、G26、G27、G30、G32
BLOCK IIF	Cs	G08、G10
BLOCK IIR	Rb	G02、G13、G16、G19、G20、G21、G22
BLOCK IIR-M	Rb	G05、G07、G12、G15、G17、G29、G31
BLOCK III	Rb	G04、G14、G18、G23

是参考的卫星钟差;M是卫星总数。本文实验选择IGS分析中心提供的最终卫星钟差产品为参考[23],提取卫星钟差误差后,利用RMS和标准差(standard deviation,STD)指标反映卫星钟差误差的偏差和离散程度。

由于钟差基准策略引起的时间基准偏差差异属于与卫星无关的系统性偏差,该偏差在双差处理过程中被消除,因而忽略钟差估计选择不同钟差基准策略对卫星钟差精度的影响[23]。本文以$S1$作为钟差组合估计的卫星钟差基准,不同测站群卫星钟差批处理估计的钟差基准为接收机钟重心基准。钟差组合估计前后的卫星钟差精度如图3所示,不同卫星类型的卫星钟差精度统计结果如表3所示。其中,测站群1、测站群2和测站群3分别表示钟差组合估计前以各测站群接收机钟重心为钟差基准批处理估计的卫星钟差。G11和G28没有统计结果,是因为这两颗卫星的广播星历不健康而未参与卫星钟差批处理估计。

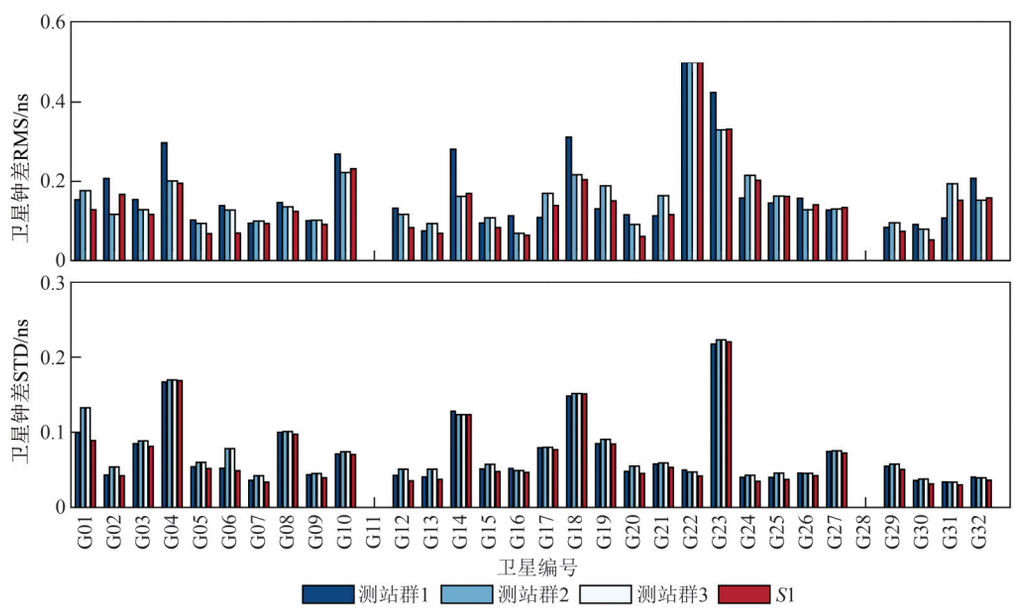


图3　钟差组合估计前后的卫星钟差批处理估计精度

Fig. 3　Satellite Clock Batch Estimation Accuracy Before and After Clock Combination

表 3　不同卫星类型的卫星钟差批处理估计精度/ns

Table 3　Satellite Clock Batch Estimation Accuracy for Different Satellite Types/ns

卫星类型	原子钟类型	卫星钟差RMS				卫星钟差STD			
		测站群1	测站群2	测站群3	$S1$	测站群1	测站群2	测站群3	$S1$
BLOCK IIF	Rb	0.14	0.14	0.14	0.12	0.06	0.06	0.06	0.05
BLOCK IIF	Cs	0.21	0.18	0.18	0.17	0.09	0.09	0.09	0.08
BLOCK IIR	Rb	0.35	0.33	0.33	0.32	0.05	0.06	0.06	0.05
BLOCK IIR-M	Rb	0.10	0.13	0.13	0.09	0.05	0.05	0.05	0.04
BLOCK III	Rb	0.33	0.23	0.23	0.22	0.17	0.17	0.17	0.17

由图3和表3可看出,钟差组合估计前后BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb和BLOCK III Rb的卫星钟差RMS分别提升11.12%、5.62%、4.43%、16.10%和13.76%,STD分别提升15.37%、3.39%、11.39%、12.29%和0.28%。通过组合不同测站群批处理估计的卫星钟差,利用钟差基准转换方法统一钟差基准,能有效提升所有卫星类

型的卫星钟差精度。这是因为卫星钟差组合估计可有效降低卫星钟差的初始钟差偏差和相对钟差偏差,进而提升卫星钟差精度。

2.3 钟差基准变化分析

为了分析钟差组合估计选择不同钟差基准策略的卫星钟差稳定性差异,根据钟差基准变化数学模型提取由钟差基准策略引起的卫星钟差偏差变化。考虑卫星钟差估计的解析表达式由初始钟差偏差、相对钟差偏差和时间基准偏差组成[23],卫星钟差的钟差基准变化通常通过与参考卫星钟差产品作差的单差序列反映[13],可表示为:

$$\Delta\delta \boldsymbol{t}^{s}_{\mathrm{est,ref}}(i)=\Delta\delta \boldsymbol{t}^{s}_{\mathrm{est,ref}}(i_0)+\sum_{i=i_0}^{i}\Delta\delta \boldsymbol{t}^{s}_{\mathrm{est,ref}}(i)-\sum_{i=i_0}^{i}\boldsymbol{D}_{\mathrm{est,ref}}(i) \tag{13}$$

式中,Δ是差分算子;i_0是初始历元。等号右边第一项是初始钟差偏差,该偏差是与卫星相关的常值,不影响卫星钟差稳定性;第二项是相对钟差偏差,其精度优于0.1 ns,远高于纳秒级的钟差基准变化范围;第三项是相对钟差基准偏差,该偏差是与卫星无关的系统性偏差。选择IGS分析中心提供的最终卫星钟差产品为参考,该综合产品消除了不同分析中心的钟差基准差异而具有最高的稳定性。因此,通过与参考卫星钟差产品作单差处理,卫星钟差单差序列可反映由钟差基准策略引起的卫星钟差稳定性变化。

根据钟差基准变化数学模型,钟差组合估计选择不同钟差基准策略的卫星钟差单差序列见图4。其中,*S*1、*S*2和*S*3分别表示以*S*1、*S*2和*S*3为钟差基准组合估计的卫星钟差,不同颜色表示不同的卫星,不再单独设置图例,仅用于结果对比展示。

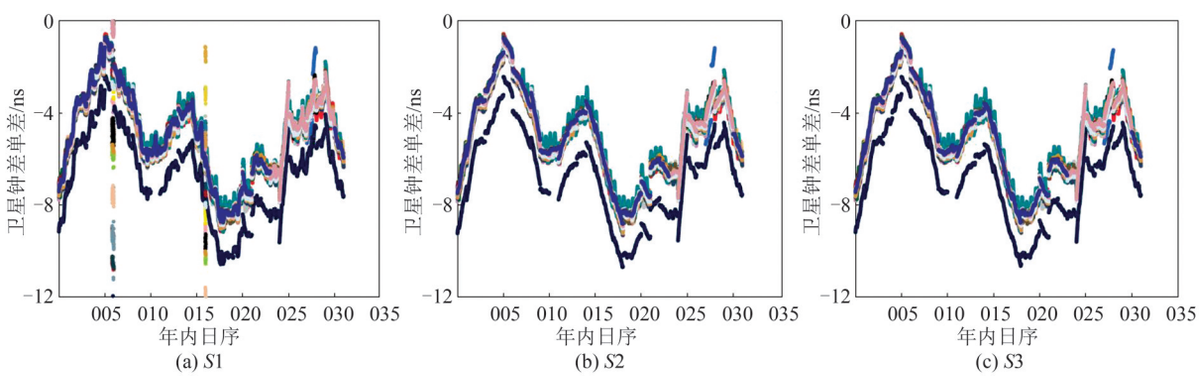


图4 不同钟差基准策略的卫星钟差单差序列

Fig. 4 Single-Differenced Satellite Clock Sequences Under Different Clock Datum Strategies

由图4可看出,不同钟差基准策略的卫星钟差单差序列在日边界处均存在显著的阶跃跳变现象,这是因为卫星钟差批处理估计的观测窗长度是一天,不同天批处理估计的卫星钟差存在由批单元解算引起的钟差基准跳变。此外,*S*1在年内日序006和016存在钟差基准跳变现象,*S*2和*S*3在对应时间没有基准跳变现象。这是因为GODS测站观测弧段不连续引起的参考接收机钟差跳变,导致以该参考钟为钟差基准的卫星钟差发生钟差基准跳变,降低卫星钟差的稳定性。相比于*S*1,*S*2和*S*3未选择GODS接收机钟为钟差基准,这说明钟差基准切换能避免观测窗内卫星钟差稳定性降低的问题,本文忽略钟差基准切换对观测窗边界卫星钟差稳定性的影响。

对比图4中未发生参考接收机钟跳的卫星钟差单差序列可看出,*S*1比*S*2的卫星钟差稳定性差,*S*2和*S*3的卫星钟差变化趋势一致。这是因为由钟差噪声引起的GODS接收机钟稳定性随时间发生显著变化,*S*2的卫星钟差稳定性最好,*S*3能降低钟差噪声对卫星钟差稳定性的影响。因此,相比于传统单接收机钟基准,本文所提接收机钟群局部重心基准能提升卫星钟差的稳定性,与选择优选单接收机钟基准的卫星钟差稳定性相当。

2.4 钟差稳定性评估

为了定量分析钟差组合估计选择不同钟差基准策略对卫星钟差稳定性变化的影响,本文利用卫星钟差模型精度和频率稳定度指标评估批处理估计卫星钟差的稳定性。本文重点分析观测窗内不同钟差基准对卫星钟差稳定性的影响,忽略观测窗边界处的钟差基准跳变。由于GPS卫星钟差在一天内线性趋势明显,故构建钟差线性模型统计卫星钟差模型精度。根据式(8)钟差模型精度统计方法,钟差组合估计选择不同钟差基准策略的卫星钟差模型精度见图5,不同卫星类型的卫星钟差模型精度统计结果见表4。

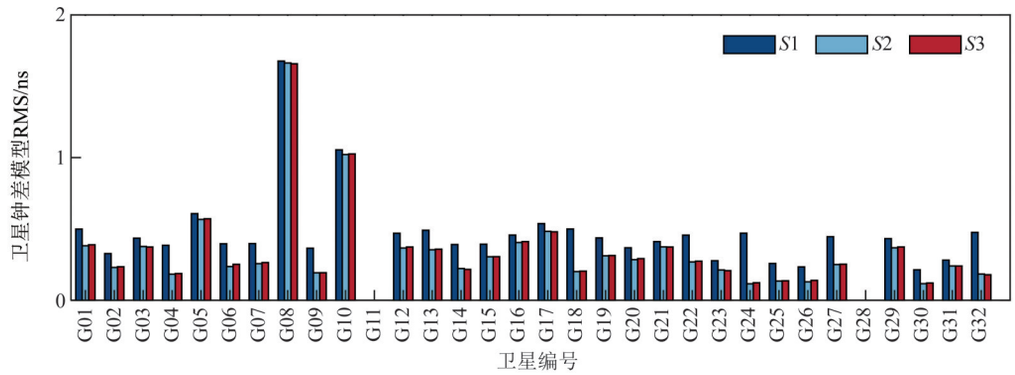


图 5　不同钟差基准策略的钟差模型精度

Fig. 5　Satellite Clock Model Accuracy Under Different Clock Datum Strategies

表 4　不同卫星类型的卫星钟差模型 RMS/ns

Table 4　Satellite Clock Model RMS for Different Satellite Types/ns

卫星类型	原子钟类型	*S*1	*S*2	*S*3
BLOCK IIF	Rb	0.38	0.21	0.21
BLOCK IIF	Cs	1.37	1.34	1.34
BLOCK IIR	Rb	0.42	0.32	0.32
BLOCK IIR-M	Rb	0.45	0.37	0.37
BLOCK III	Rb	0.39	0.20	0.20

由图 5 和表 4 可看出,G08 和 G10 的卫星钟差模型精度大于 1 ns,比其他卫星的卫星钟差模型精度差,而这两颗卫星的钟差 STD 优于 0.10 ns,这主要是因为这两颗卫星搭载 Cs 原子钟,其钟差噪声较大,导致其钟差线性模型拟合精度较差。相比于 *S*1,*S*3 BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb 和 BLOCK III Rb 的卫星钟差模型精度分别提升 43.10%、1.73%、23.47%、16.34% 和 47.49%,S2 和 S3 的卫星钟差模型精度相当。这说明本文所提接收机钟群局部重心基准比传统固定单接收机钟基准的卫星钟差稳定性水平更高,与单接收机钟优选基准的卫星钟差稳定性水平相当。

为了进一步验证本文所提方法提升卫星钟差稳定性水平的优势,利用频率稳定度指标评估批处理估计卫星钟差的稳定性水平[24]。频率稳定度是描述原子钟输出频率受噪声影响的波动情况,本文利用重叠哈达玛方差评估卫星钟差的稳定性水平[25],该方法可表示为:

$$H\sigma^2(\tau)=\frac{1}{6\tau^2(N-3m)}\times\sum_{i=1}^{N-3m}(\delta\boldsymbol{t}^s_{i+3m}-3\delta\boldsymbol{t}^s_{i+2m}+3\delta\boldsymbol{t}^s_{i+m}-3\delta\boldsymbol{t}^s_i)^2 \tag{14}$$

式中,$H\sigma(\tau)$是频率稳定度;N是卫星钟差历元总数;m是平滑因子;τ是平滑时间。通常选用百秒稳、千秒稳和万秒稳描述钟差稳定性水平,表示在平滑时间范围分别在 100 s、1 000 s 和 10 000 s 内钟差的稳定性水平。由于卫星钟差批处理估计实验的采样率为 300 s,本文分别评估千秒稳和万秒稳的卫星钟差频率稳定度。

根据卫星钟差频率稳定度的统计方法,钟差组合估计选择不同钟差基准策略的卫星钟差千秒和万秒频率稳定度见图 6,不同卫星类型的卫星钟差千秒和万秒频率稳定度统计结果见表 5。

由图 6 可看出,卫星钟差的千秒和万秒频率稳定度分别在 10^{-13} 和 10^{-14} 量级,其中不同钟差基准策略的千秒频率稳定度差异不大,*S*2 和 *S*3 比 *S*1 的万秒频率稳定度小。这是因为相比于 1 000 s 平滑时间范围,10 000 s 平滑时间范围的卫星钟差时间基准偏差逐渐累积,卫星钟差时间基准偏差对卫星钟差万秒频率稳定度的影响更大。

由表 5 可看出,相比于 *S*1,*S*3 BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb 和 BLOCK III Rb 的卫星钟差千秒频率稳定度分别提升 9.59%、0.04%、0.35%、0.33% 和 11.22%,万秒频率稳定度分别提升 11.53%、0.60%、7.62%、4.83% 和 18.21%。这说明相比于固定单接收机钟基准,本文所提的接收机钟群局部重心基准能提升卫星钟差批处理估计的稳定性水平。相比于星载 Cs 钟,星载 Rb 钟的卫星钟差万秒频率稳定度高近一个数量级,且基于 *S*3 的卫星钟差稳定性提升更大。这是因为星载 Rb 钟比星载 Cs 钟的卫星钟差稳定性好,使 *S*3 在星载 Rb 钟的稳定性水平提升更明显。相比于 *S*2,*S*3 不同卫星类型的卫星钟差千秒频率稳定度分别提升 1.16%、提升 0.04%、降低 0.01%、相当和提升 1.63%,万秒频率稳定度分别降低 0.78%、0.01%、0.96%、0.06% 和 0.25%。卫星钟差千秒和万秒频率稳定度略微降低是因为 *S*3 包含比 *S*2 钟差稳定性略差的接收机钟。但相比于 *S*2,*S*3 的

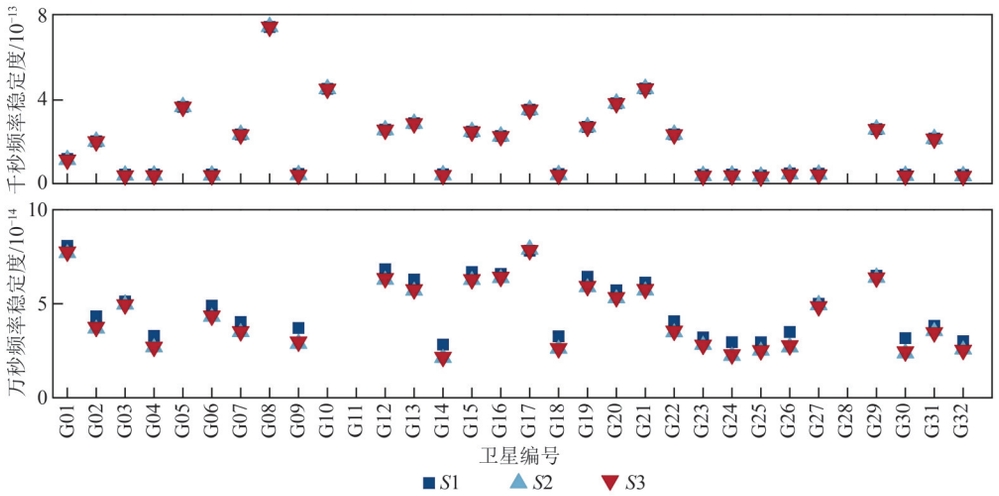


图6 不同钟差基准策略的千秒和万秒频率稳定度

Fig. 6 Frequency Stability at 1 000 s and 10 000 s Under Different Clock Datum Strategies

表5 不同卫星类型的千秒和万秒频率稳定度

Table 5 Frequency Stability at 1 000 s and 10 000 s for Different Satellite Types

卫星类型	原子钟类型	千秒频率稳定度/10^{-13}			万秒频率稳定度/10^{-14}		
		*S*1	*S*2	*S*3	*S*1	*S*2	*S*3
BLOCK IIF	Rb	0.513 4	0.469 7	0.464 2	4.240	3.722	3.751
BLOCK IIF	Cs	6.017 2	6.017 2	6.015 0	18.720	18.607	18.608
BLOCK IIR	Rb	2.951 4	2.940 8	2.941 0	5.651	5.171	5.221
BLOCK IIR-M	Rb	2.771 1	2.761 9	2.761 9	6.723	6.394	6.398
BLOCK III	Rb	0.440 4	0.397 4	0.390 9	3.150	2.570	2.577

优势体现在能避免由钟差基准切换引起的卫星钟差连续性降低,进而提升观测窗边界处的卫星钟差稳定性。为评估观测窗边界处卫星钟差的稳定性,本文采用历元间差分法提取卫星钟差边界不连续偏差(boundary discontinuity bias, BDB)[26],该方法可表示为:

$$\begin{cases}\delta\hat{\boldsymbol{t}}^{s,\mathrm{ses}_1,\mathrm{ses}_2}(i_e,i_f)=\dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{K_1}\displaystyle\sum_{i=1}^{K_1}\delta\boldsymbol{t}^{s,\mathrm{ses}_1}(i,i+1)+\dfrac{1}{K_2}\sum_{i=1}^{K_2}\delta\boldsymbol{t}^{s,\mathrm{ses}_2}(i,i+1)\right)\\ B^{s,\mathrm{ses}_1,\mathrm{ses}_2}=\delta\boldsymbol{t}^{s,\mathrm{ses}_1,\mathrm{ses}_2}(i_e,i_f)-\delta\hat{\boldsymbol{t}}^{s,\mathrm{ses}_1,\mathrm{ses}_2}(i_e,i_f)\end{cases}\tag{15}$$

式中,B是卫星钟差BDB;ses_1是前面的观测窗;ses_2是后面的观测窗;K_1是前面观测窗的历元总数;K_2是后面观测窗的历元总数;$(i,i+1)$是历元间差分;$\delta\boldsymbol{t}^{s,\mathrm{ses}_1,\mathrm{ses}_2}(i_e,i_f)$是观测窗边界处的卫星钟差历元间差分;$\delta\hat{\boldsymbol{t}}^{s,\mathrm{ses}_1,\mathrm{ses}_2}(i_e,i_f)$是观测窗边界前后的卫星钟差历元间差分平均值。

根据卫星钟差的BDB统计方法,钟差组合估计选择不同钟差基准策略的卫星钟差BDB如图7所示,不同卫星类型的卫星钟差BDB统计结果如表6所示。其中,*S*3′表示不包含GODS测站的接收机钟局部重心基准,以避免稳定性差的接收机钟对卫星钟差BDB的影响。

由图7可看出,不同钟差基准策略均存在BDB,这是因为卫星钟差的边界不连续除了受钟差基准切换影响,还与卫星钟差的批单元解算有关。本文忽略由批单元解算引起的卫星钟差边界不连续,重点关注钟差基准切换对卫星钟差稳定性的影响。由表6可看出,相比于*S*2,*S*3′ BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb和BLOCK III Rb卫星类型的卫星钟差BDB分别降低5.17%、4.05%、5.27%、4.79%和4.96%,这说明本文方法能提升观测窗边界处的卫星钟差连续性,进而提升观测窗边界处的卫星钟差稳定性水平。

2.5 钟差预测和PPP精度评估

为了验证本文方法对提升卫星钟差预测精度的优势,采用一小时滑动策略并利用不同钟差基准批处理估计卫星钟差,基于钟差线性模型对批处理估计的卫星钟差进行钟差预测实验。依据式(12)对卫星钟差预测精度进行评估,相关结果如图8和表7所示。*S*1-P、*S*2-P和*S*3-P分别表示基于*S*1、*S*2和*S*3钟差基准策略的卫星钟差预

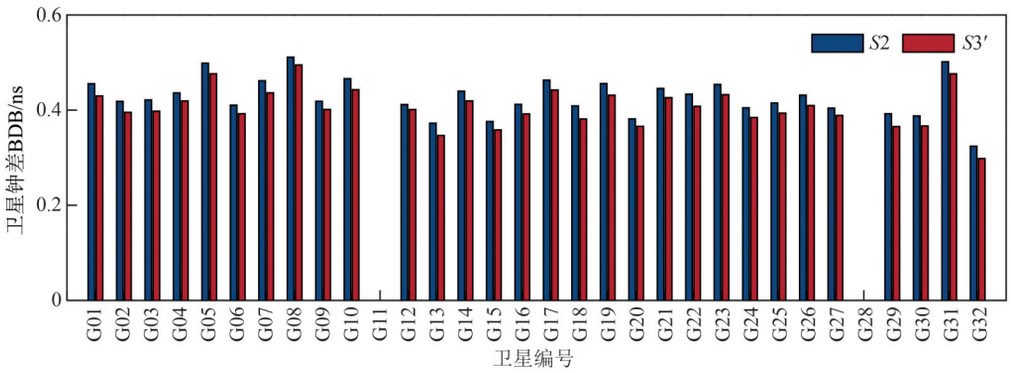


图 7　不同钟差基准策略的卫星钟差 BDB

Fig. 7 Satellite Clock BDB Under Different Clock Datum Strategies

表 6　不同卫星类型的卫星钟差 BDB/ns

Table 6　Satellite Clock BDB for Different Satellite Types/ns

卫星类型	原子钟类型	*S2*	*S3′*
BLOCK IIF	Rb	0.41	0.39
BLOCK IIF	Cs	0.49	0.47
BLOCK IIR	Rb	0.42	0.40
BLOCK IIR-M	Rb	0.44	0.42
BLOCK III	Rb	0.43	0.41

测(prediction,P)。由图 8 和表 7 可知,G08 和 G10 卫星的钟差预测 STD 均大于 1.5 ns,主要由于其星载铯钟噪声水平较高,导致钟差模型拟合及预测精度较低。与 *S*1-P 相比,*S*3-P 在不同卫星类型上的钟差 RMS 分别提高 23.77%、0.27%、5.16%、5.95% 和 47.73%,STD 分别提高 38.89%、0.34%、12.31%、7.19% 和 57.30%。与 *S*2-P 相比,*S*3-P 的 RMS 提高 3.01%、下降 0.68%、提高 5.27%、13.45% 和 26.17%,STD 提高 12.59%、0.01%、8.57%、13.63% 和 27.14%。结果表明,本文在改善观测窗边界处卫星钟差稳定性的同时,进一步提升了卫星钟差预测精度。

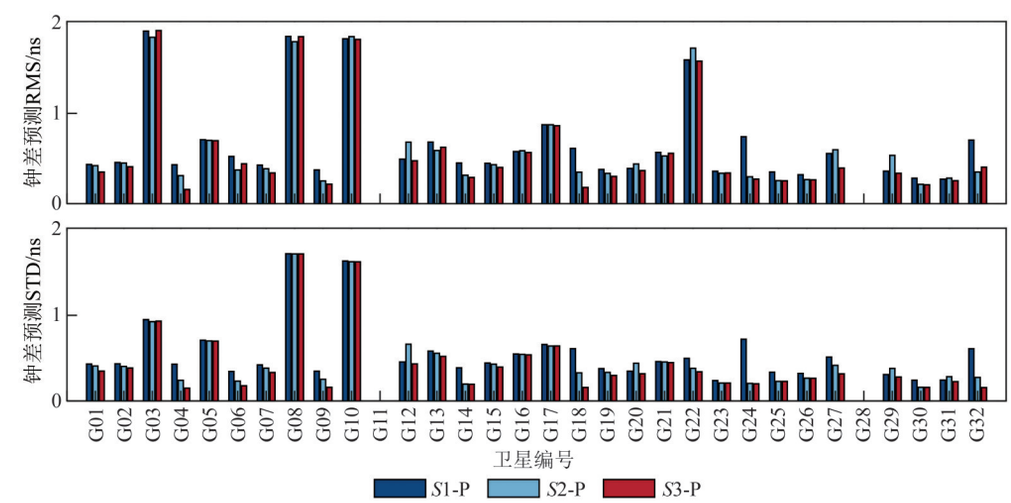


图 8　不同钟差基准策略的卫星钟差预测精度

Fig. 8　Satellite Clock Prediction Accuracy Under Different Clock Datum Strategies

表 7　不同卫星类型的卫星钟差预测精度/ns

Table 7　Satellite Clock Prediction Accuracy for Different Satellite Types/ns

卫星类型	原子钟类型	RMS			STD		
		*S*1-P	*S*2-P	*S*3-P	*S*1-P	*S*2-P	*S*3-P
BLOCK IIF	Rb	0.62	0.49	0.47	0.48	0.34	0.29
BLOCK IIF	Cs	1.84	1.82	1.83	1.68	1.67	1.67
BLOCK IIR	Rb	0.66	0.66	0.63	0.46	0.44	0.41
BLOCK IIR-M	Rb	0.51	0.56	0.48	0.46	0.50	0.43
BLOCK III	Rb	0.46	0.33	0.24	0.42	0.24	0.18

为验证本文方法在提升PPP定位精度方面的有效性,采用预测卫星钟差开展仿动态PPP实验,并以IGS分析中心提供的最终卫星钟差产品进行钟差预测作为对比,与*S*1-P、*S*2-P和*S*3-P结果进行比较。PPP实验选取10个未参与卫星钟差批处理估计且可视卫星差异明显的测站,固定采用德国地学研究分析中心提供的最终卫星轨道产品,模糊度解算方式为浮点解,截止高度角设为5°。测站位置参考值采用IGS周解,选取收敛后定位误差的三维(threee dimension,3D)RMS作为PPP定位精度评价指标。为保证解算收敛并避免卫星轨道外推误差影响,剔除前1 h及最后15 min的PPP定位结果[1]。不同卫星钟差预测产品的PPP定位精度结果见图9,其统计结果见表8。其中,IGS-P表示基于IGS最终卫星钟差产品进行预测并用于PPP解算的定位结果。

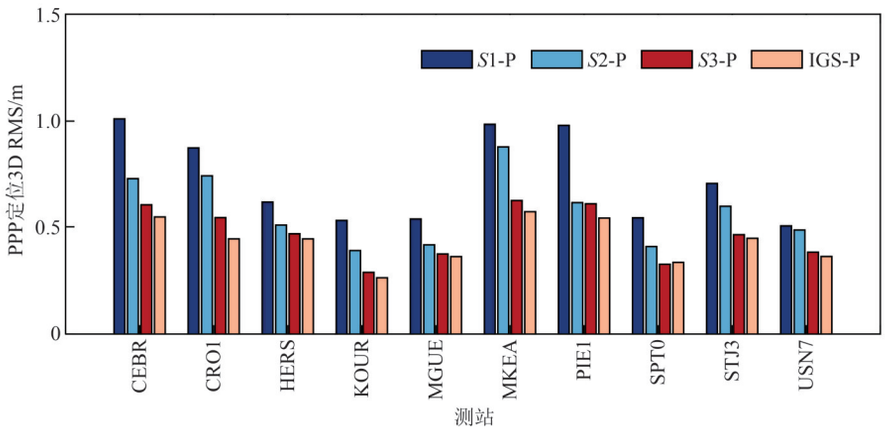


图9 不同预测卫星钟差产品的PPP定位精度

Fig. 9 PPP Positioning Accuracy for Different Predicted Satellite Clock Products

表8 不同预测卫星钟差产品的PPP定位3D RMS统计结果/m

Table 8 Statistical Results of PPP Positioning 3D RMS for Different Predicted Satellite Clock Products/m

测站	*S*1-P	*S*2-P	*S*3-P	IGS-P
CEBR	1.00	0.72	0.60	0.55
CRO1	0.87	0.73	0.54	0.44
HERS	0.62	0.51	0.47	0.44
KOUR	0.53	0.39	0.29	0.26
MGUE	0.54	0.42	0.37	0.36
MKEA	0.98	0.87	0.62	0.57
PIE1	0.97	0.61	0.61	0.54
SPT0	0.54	0.41	0.32	0.33
STJ3	0.70	0.60	0.46	0.44
USN7	0.50	0.48	0.38	0.36
平均值	0.73	0.57	0.46	0.43

由图9和表8可以看出,*S*1-P、*S*2-P和*S*3-P的PPP定位精度均在分米级,这主要是因为当前卫星钟差预测精度较低,星载Rb钟和星载Cs钟的钟差预测精度STD分别在0.2~0.5 ns和1.6~1.7 ns的范围。参考*S*1-P、*S*2-P、*S*3-P和IGS-P的分米级PPP定位精度属于正常范围之内,相比于*S*1-P和*S*2-P,*S*3-P的PPP定位精度分别提升35.55%和18.70%。这说明本文所提方法在提升卫星钟差稳定性水平的基础上,能提升基于预测卫星钟差的PPP定位精度。

3 结 语

为了提升超快速卫星钟差的稳定性,本文提出了基于接收机钟拟稳约束的钟差基准优化方法,该方法通过构建接收机钟差模型精度加权的钟差拟稳约束形成稳健的接收机钟群局部重心基准。钟差基准优化方法能降低传统方法固定参考接收机钟不稳定对卫星钟差稳定性的影响,提升批处理估计卫星钟差的稳定性,进而提升卫星钟差预测精度和PPP定位精度。当参考接收机在观测窗内观测弧段不连续时,传统方法和本文方法均需更换参考接收机钟或钟群,导致不同观测窗的钟差基准发生改变,进而降低卫星钟差的稳定性。单接收机钟优选基准能提升卫星钟差的稳定性,但该方法会频繁切换参考接收机钟,导致卫星钟差在观测窗边界处的稳定性降低。本文重点关注由钟差噪声引起的参考接收机钟不稳定导致卫星钟差稳定性降低的问题,忽略由观测弧段不连续引起的钟差基准切换对卫星钟差稳定性的影响。

本文利用全球网一个月数据进行GPS卫星钟差批处理估计实验,卫星钟差稳定性分析结果表明,本文所提基准优化方法能提升卫星钟差的稳定性。卫星钟差稳定性评估结果表明,相比于

传统固定单接收机钟基准,本文所提钟差基准优化方法对于BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb和BLOCK III Rb的卫星钟差模型拟合精度分别提升43.10%、1.73%、23.47%、16.34%和47.49%,卫星钟差千秒频率稳定度分别提升9.59%、0.04%、0.35%、0.33%和11.22%,卫星钟差万秒频率稳定度分别提升11.53%、0.60%、7.62%、4.83%和18.21%。本文采用1 h滑动策略并利用不同钟差基准批处理估计的卫星钟差进行钟差预测和PPP实验。钟差预测精度和PPP定位精度评估结果表明,相比于传统固定单接收机钟基准,本文所提钟差基准优化方法对于BLOCK IIF Rb、BLOCK IIF Cs、BLOCK IIR Rb、BLOCK IIR-M Rb和BLOCK III Rb的卫星钟差预测STD精度分别提升38.89%、0.34%、12.31%、7.19%和57.30%。

参 考 文 献

[1] YE S R, ZHAO L W, SONG J, et al. Analysis of Estimated Satellite Clock Biases and Their Effects on Precise Point Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 16.

[2] 张洁, 赵琳, 杨福鑫, 等. 面向大众导航应用的精密单点定位完好性监测方法[J]. 航空学报, 2023, 44(13): 327904.
ZHANG Jie, ZHAO Lin, YANG Fuxin, et al. PPP Integrity Monitoring Algorithm for General-Purpose Navigation Applications[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(13): 327904.

[3] 赵齐乐, 陶钧, 郭靖, 等. 广域瞬时厘米级精密单点定位和服务系统[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1058-1069.
ZHAO Qile, TAO Jun, GUO Jing, et al. Wide-Area Instantaneous cm-Level Precise Point Positioning: Method and Service System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1058-1069.

[4] 李博峰, 苗维凯, 陈广鄂. 多频多模GNSS高精度定位关键技术与挑战[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(11): 1769-1783.
LI Bofeng, MIAO Weikai, CHEN Guang'e. Key Technologies and Challenges of Multi-Frequency and Multi-GNSS High-Precision Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1769-1783.

[5] 耿江辉, 闫哲, 温强. 多系统GNSS卫星钟差和偏差产品综合: IGS第3次重处理[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1070-1081.
GENG Jianghui, YAN Zhe, WEN Qiang. Multi-GNSS Satellite Clock and Bias Product Combination: The Third IGS Reprocessing Campaign[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1070-1081.

[6] CHEN Q M, SONG S L, ZHOU W L, et al. Accuracy Analysis of GNSS Hourly Ultra-Rapid Orbit and Clock Products from SHAO AC of iGMAS[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(5): 1022.

[7] JIAO G Q, SONG S L, JIAO G Q, et al. High-Rate One-Hourly Updated Ultra-Rapid Multi-GNSS Satellite Clock Offsets Estimation and Its Application in Real-Time Precise Point Positioning[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(5): 1257.

[8] HENKEL P, PSYCHAS D, GÜNTHER C, et al. Estimation of Satellite Position, Clock and Phase Bias Corrections[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(10): 1199-1217.

[9] ODIJK D, ZHANG B C, KHODABANDEH A, et al. On the Estimability of Parameters in Undifferenced, Uncombined GNSS Network and PPP-RTK User Models by Means of S-System Theory[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(1): 15-44.

[10] HUANG G W, XIE W, FU W J, et al. BDS Real-Time Satellite Clock Offsets Estimation with Three Different Datum Constraints[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2021, 17(1): 34.

[11] XIE W, HUANG G W, FU W J, et al. An Efficient Clock Offset Datum Switching Compensation Method for BDS Real-Time Satellite Clock Offset Estimation[J]. *Advances in Space Research*, 2021, 68(4): 1802-1813.

[12] CHENG J H, LIU X, LI H, et al. A Real-Time Clock Offset Datum Maintenance Method Based on Short-Term Clock Offset Prediction[C]//The 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023), Denver, USA, 2023.

[13] ZHAO L W, DOUSA J, YE S R, et al. A Flexible Strategy for Handling the Datum and Initial Bias in Real-Time GNSS Satellite Clock Estimation[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 94(1): 3.

[14] ZHANG L, YANG H Z, YAO Y B, et al. A New Datum Jump Detection and Mitigation Method of Real-Time Service (RTS) Clock Products[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 67.

[15] 黄观文, 王浩浩, 谢威, 等. GNSS实时卫星钟差估计技术进展[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(5): 1-9.
HUANG Guanwen, WANG Haohao, XIE Wei, et

al. Technical Progress of GNSS Real-Time Satellite Clock Offset Estimation[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(5): 1-9.

[16] FU W J, YANG Y X, ZHANG Q, et al. Real-Time Estimation of BDS/GPS High-Rate Satellite Clock Offsets Using Sequential Least Squares[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 62(2): 477-487.

[17] FU W J, HUANG G W, ZHANG Q, et al. Multi-GNSS Real-Time Clock Estimation Using Sequential Least Square Adjustment with Online Quality Control[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 963-976.

[18] SONG W W, YI W T, LOU Y D, et al. Impact of GLONASS Pseudorange Inter-Channel Biases on Satellite Clock Corrections[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 323-333.

[19] 赵丹宁, 雷雨. GLONASS星载原子钟的长期特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(6): 895-904.
ZHAO Danning, LEI Yu. Long-Term Characteristics Analysis of GLONASS In-Flight Clocks[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(6): 895-904.

[20] 袁俊军, 孟瑞祖. GPS导航卫星精密钟差的插值和预报方法研究[J]. 测绘地理信息, 2018, 43(5): 64-67.
YUAN Junjun, MENG Ruizu. Research on Interpolation and Forecasting Method of GPS Precise Clock Bias[J]. *Journal of Geomatics*, 2018, 43(5): 64-67.

[21] LI M H, HUANG W Q, LI H, et al. Satellite Clock Batch Estimation Accuracy Analysis and Its Impacts on PPP[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3932.

[22] YANG X, WANG Q X, XUE S Q. Random Optimization Algorithm on GNSS Monitoring Stations Selection for Ultra-Rapid Orbit Determination and Real-Time Satellite Clock Offset Estimation[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, 2019(1): 7579185.

[23] YAO Y B, HE Y D, YI W T, et al. Method for Evaluating Real-Time GNSS Satellite Clock Offset Products[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1417-1425.

[24] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3卫星钟差特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(1): 53-61.
MAO Ya, WANG Qianxin, HU Chao, et al. Analysis of the Characterization for BDS-3 Satellite Clock Error[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(1): 53-61.

[25] 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.

[26] HUANG W Q, LI M H, LI H, et al. A Compensation Method of Satellite Clock Day-Boundary Jumps Based on Epoch-Differenced[C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021), Singapore, 2021.