

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.06.018

不同基准钟对 BDS 实时钟差估计的影响分析

李平力¹, 熊 帅¹, 邵 搏¹, 谢 威²

(1. 中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068;
2. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710061)

摘要: BDS 原始观测量是站星之间的相对时间延迟, 在实时卫星钟差估计过程中需要引入一个基准钟, 求解该基准约束下的钟差产品。基于两种不同的基准约束条件实时估计 BDS 卫星钟差, 并从实时钟差的估计精度、钟差频率特性(频率漂移率、频率准确度、频率稳定度)及钟差预报精度等方面分析其对 BDS 实时钟差估计的影响。算例结果表明, 在两种不同的基准模式下, 估计得到的 BDS 实时卫星钟差性能基本一致, 在实际使用中可根据情况采用不同的基准钟进行钟差估计, 为 BDS 实时卫星钟差估计时基准钟的选择提供了参考。

关键词: BDS; 基准钟; 卫星钟差; 实时估计; 影响分析

中图分类号: TN961 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)06-0150-06

Analysis of Influence of Different Reference Clocks on BDS Real-Time Clock Offset Estimation

LI Ping-li¹, XIONG Shuai¹, SHAO Bo¹, XIE Wei²

(1. The 20th Research Institute of CETC, Xi'an 710068, China;
2. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: The BDS raw observation is the relative time delay between stations and satellites. One clock offset datum should be applied when estimating real-time clock offset, and then the clock offset products can be estimated under the constraint of this datum. In this study, the BDS satellite clock offset is estimated based on two different datums constraint. The impact of two datums on clock offset estimation is analyzed in terms of clock offset accuracy, clock frequency characteristics (frequency drift, frequency accuracy and frequency stability), clock offset prediction. The experimental results show that the BDS satellite clock offset performance is almost the same based on two different clock offset datums. In practice, different clock offset datum can be selected to estimate clock offset under different circumstances. This study can provide a reference for datum selection when estimating real-time satellite clock offset.

Key words: BDS; Reference clock; Satellite clock offset; Real-time estimation; Influence analysis

0 引言

2020年7月31日,北斗三号全球卫星导航系统宣

布正式开通,为全球用户提供高质量的定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)服务^[1]。

对于北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite

收稿日期: 2022-03-19; 修订日期: 2022-06-09

基金项目: 陕西省重点研发计划(2021ZDLGY08-01, 2021LLRH-06); 陕西省创新人才推进计划(2021TD-03)

作者简介: 李平力(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事北斗卫星导航方面的研究。

System, BDS)而言,只有提供高质量的 PNT 服务才能在全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)竞争中占据优势,而高精度和高稳定度的实时钟差产品是支撑北斗 PNT 服务的核心基础产品^[2-3]。BDS 实时卫星钟差必须利用地面跟踪网实时观测数据进行高采样实时估计得到^[4-5]。因为 BDS 原始观测是站星之间的相对时间延迟,在实时卫星钟差估计过程中需要引入一个参考钟,通常选择接收机钟或卫星钟,求解该基准约束下的钟差产品^[6]。已有众多学者对实时卫星钟差估计进行研究,但都只是直接采用接收机钟或卫星钟作基准进行数据解算,并没有论文详细分析利用两种基准解算得到的钟差是否存在差异^[7-9]。

为了更全面地评估基准对实时卫星钟差估计的影响,本文基于两种不同的基准约束条件,利用非差消电离层组合模型求解 BDS 实时卫星钟差,并从实时钟差的估计精度、频率特性(频率准确度、频率漂移率、频率稳定度)和预报精度等方面进行分析,对两种基准约束条件下估计的 BDS 实时卫星钟差性能进行综合评估与对比,为 BDS 实时卫星钟差估计过程中时钟基准的选择提供参考。

1 实时卫星钟差估计模型

本文采用非差无电离层组合模型实时估计精密卫星钟差^[10-11]。构建误差方程如下

$$v_{k,P}^j(i) = c(dt_k(i) - dT^j(i)) + \delta d_{k, \text{tro}}^j(i) + \rho_k^j(i) - P_k^j(i) + \epsilon_{k,P}^j(i) \quad (1)$$

$$v_{k,L}^j(i) = c(dt_k(i) - dT^j(i)) + \delta d_{k, \text{tro}}^j(i) + \rho_k^j(i) + \lambda \cdot N_k^j(i) - \lambda \cdot L_k^j(i) + \epsilon_{k,L}^j(i) \quad (2)$$

式(1)、式(2)中, c 为光速; i 为历元号; k 为测站号; j 为卫星号; $N_k^j(i)$ 为模糊度参数; $\delta d_{k, \text{tro}}^j(i)$ 为对流层延迟影响; λ 为组合观测值波长; $dt_k(i)$ 、 $dT^j(i)$ 分别为接收机钟差和卫星钟差; $\epsilon_{k,P}^j(i)$ 、 $\epsilon_{k,L}^j(i)$ 为噪声的影响; $P_k^j(i)$ 、 $L_k^j(i)$ 分别为伪距和相位的组合观测值; $\rho_k^j(i)$ 为卫星与测站间的几何距离; $v_{k,P}^j(i)$ 、 $v_{k,L}^j(i)$ 分别为伪距和相位的观测值残差。

利用式(1)、式(2)建立的误差方程,未知参数包括接收机钟差、卫星钟差、对流层延迟和模糊度,参数求解方法可采用均方根信息滤波。针对模糊度参数和对流层湿延迟参数,在分段时间内对流层湿延迟参数是不变的,在没有发生周跳时卫星模糊度参数也是不变的,因此可将其作为分段非时变参

数。同时还需要利用误差改正模型对观测数据进行固体潮、海潮、极潮、卫星相位中心偏差与变化、卫星相位缠绕、相对论效应以及地球自转等改正^[12]。

在对式(1)、式(2)建立的误差方程进行求解时,需要先确定一个基准钟,然后求解相对于该基准钟的相对卫星钟差。在选择基准钟时,已有学者证明选择的基准钟精度达到 10^{-6} s 以上时不会影响卫星钟差的估计精度^[13]。因此,在保证接收机钟和卫星钟精度的情况下,两者作为基准钟对 BDS 实时卫星钟差的估计应该是等价的。

2 实时钟差处理流程及策略

2.1 数据处理流程

本文非差消电离层组合模型实时钟差估计数据处理流程如图 1 所示。

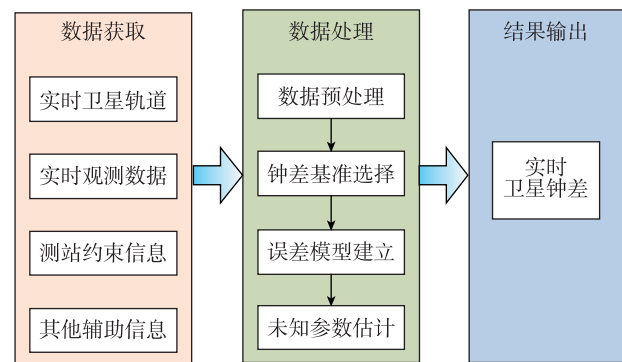


图 1 BDS 实时卫星钟差估计数据处理流程

Fig. 1 Data processing flow of BDS real-time satellite clock offset estimation

图 1 中,首先实时获取卫星轨道参数、测站观测数据、测站约束信息以及其他辅助信息等;然后,对接收到的数据进行实时预处理,并进行参考基准的选择;接着,利用已知模型对观测数据进行相关误差修正,建立误差观测方程,对实时卫星钟差进行估计;最后生成实时卫星钟差产品。

2.2 实验分析策略

为了分析基于不同基准钟估计的 BDS 实时卫星钟差性能,本文采用长安大学北斗分析中心提供的实时轨道产品,其中,地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)卫星轨道精度优于 1m,倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)/中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星轨道精度

优于 10cm,以全球范围内 90 个左右国际 GNSS 服务(International GNSS Service,IGS)监测站作为实验站点进行实验,监测站分布如图 2 所示。本文随机选取了 C03 卫星钟和 TID1 测站接收机钟作为基准钟进行实时钟差解算(只是选取的基准钟不同,其他处理保持一致),对比分析了估计的 BDS 实时卫星钟差性能。

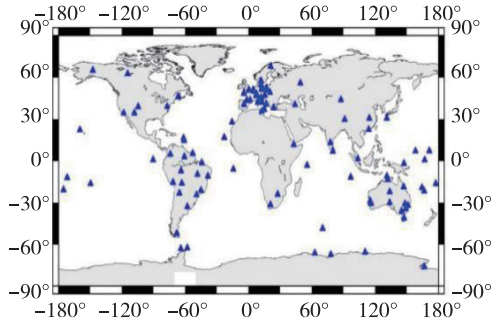


图 2 用于 BDS 实时卫星钟差估计的测站分布图
Fig. 2 Station distribution map for BDS real-time satellite clock offset estimation

3 实时钟差估计精度分析

选取 2020 年年积日 070~072 连续 3 天的观测数据,以 C03 卫星钟和 TID1 测站接收机钟作为基准钟分别实时估计 BDS 卫星钟差,采样历元为 30s,将估计的钟差结果与 GBM 最终精密钟差(30s)进行二次差比较,统计其标准差(Standard Deviation, STD)值,结果如图 3(每颗星 3 天平均)和表 1 所示。

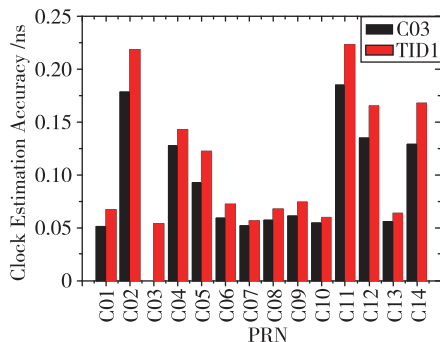


图 3 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差精度对比

Fig. 3 Comparison of accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

由图 3 和表 1 可知,C03 卫星钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差精度平均为 0.095 ns; TID1

表 1 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差精度对比

Tab. 1 Comparison of accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

参考基准	钟差精度/ns				
	070	071	072	平均值	
C03 卫星钟	最优	0.041	0.051	0.046	
	平均	0.092	0.096	0.097	0.095
	最差	0.210	0.167	0.181	
TID1 测站接收机钟	最优	0.041	0.059	0.060	
	平均	0.102	0.113	0.118	0.111
	最差	0.237	0.219	0.247	

接收机钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差精度平均为 0.111ns。C03 卫星钟当基准钟估计的 BDS 钟差精度略优于 TID1 接收机钟,这种略微的差异是由于卫星钟相比接收机钟性能更优,但这种精度差异较小,在用户端使用上没有差别。

4 实时钟差频率特性分析

为了进一步对比不同基准估计的 BDS 实时卫星钟差性能,分别对 C03 卫星钟和 TID1 测站接收机钟作为基准钟估计得到的钟差频率特性进行分析,包括频率准确度、频率漂移率和频率稳定度^[14]。

4.1 频率准确度对比分析

频率准确度是指实际输出频率与标称频率的一致程度。对两种不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差进行频率漂移率对比分析,结果如图 4(每颗星 3 天平均)和表 2 所示。

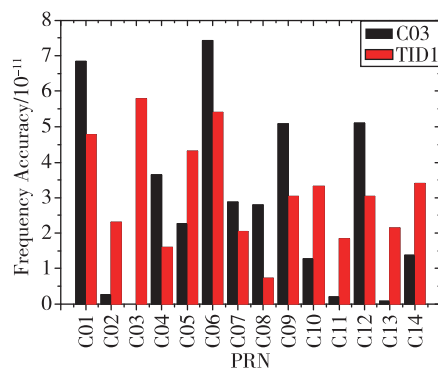


图 4 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差频率准确度对比

Fig. 4 Comparison of frequency accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

表 2 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差频率准确度对比

Tab. 2 Comparison of frequency accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

参考基准		频率准确度/ 10^{-11}			
		070	071	072	平均值
C03 卫星钟	最优	0.07	0.08	0.09	
	平均	3.01	3.02	3.01	3.02
	最差	7.42	7.43	7.44	
TID1 接收机钟	最优	0.74	0.74	0.73	
	平均	3.12	3.13	3.13	3.13
	最差	5.76	5.77	5.78	

由图 4 和表 2 可知,C03 卫星钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差频率准确度平均为 3.02×10^{-11} ;TID1 接收机钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差频率准确度平均为 3.13×10^{-11} 。从结果分析可知,两种不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差在频率准确度特性上基本一致。

4.2 频率漂移率对比分析

频率漂移率是指卫星钟的输出频率随时间的变化而变化。对不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差进行频率漂移率对比分析,结果如图 5(每颗星 3 天平均)和表 3 所示。

由图 5 和表 3 可知,C03 卫星钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差频率漂移率平均为 1.65×10^{-18} ;TID1 接收机钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差频率漂移率平均为 1.77×10^{-18} 。从结果分析可知,两种不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差在频率漂移率特性上基本一致。

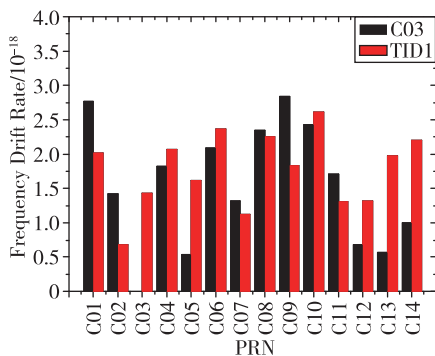


图 5 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差频率漂移率对比

Fig. 5 Comparison of frequency drift rates for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

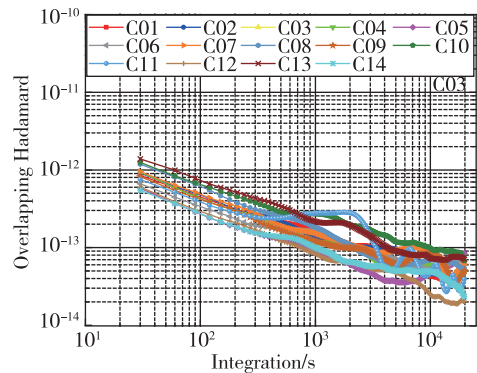
表 3 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差频率漂移率对比

Tab. 3 Comparison of frequency drift rates for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

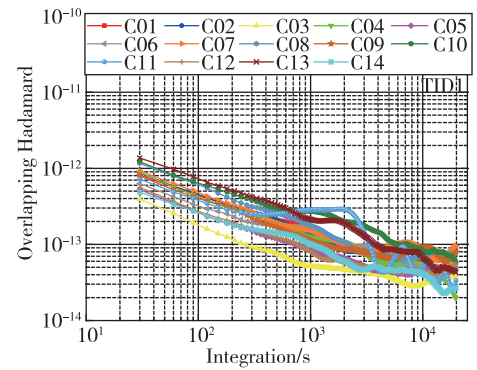
参考基准		频率漂移率/ 10^{-18}			
		070	071	072	平均值
C03 卫星钟	最优	0.31	0.26	0.51	
	平均	1.51	1.59	1.86	1.65
	最差	3.25	2.91	3.59	
TID1 接收机钟	最优	0.17	0.56	0.62	
	平均	1.59	1.66	2.07	1.77
	最差	3.59	2.88	4.48	

4.3 频率稳定度对比分析

频率稳定度是衡量卫星钟的输出频率随机起伏变化状况的一个指标。本文采用哈达玛总方差分析频率稳定度。对不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差进行频率稳定度对比分析,结果如图 6(以 070 天为例)和表 4、表 5 所示。



(a)



(b)

图 6 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差频率稳定度对比

Fig. 6 Comparison of frequency stability for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

表 4 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差千秒稳对比

Tab. 4 Comparison of 1000-second stability for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clock

参考基准		千秒稳/ 10^{-13}			
		070	071	072	平均值
C03 卫星钟	最优	0.79	0.82	0.81	
	平均	1.67	1.51	1.54	1.57
	最差	2.83	2.68	2.54	
TID1 接收机钟	最优	0.83	0.92	0.82	
	平均	1.69	1.58	1.60	1.62
	最差	2.78	2.77	2.55	

表 5 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差万秒稳对比

Tab. 5 Comparison of 10000-second stability for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clock

参考基准		万秒稳/ 10^{-14}			
		070	071	072	平均值
C03 卫星钟	最优	2.46	2.98	5.52	
	平均	5.96	5.64	7.55	6.39
	最差	8.40	8.27	9.67	
TID1 接收机钟	最优	4.07	3.97	4.02	
	平均	6.28	6.15	7.99	6.81
	最差	9.12	9.67	10.8	

由图 6 和表 4、表 5 可知,C03 卫星钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差千秒稳平均为 1.57×10^{-13} ,万秒稳平均为 6.39×10^{-14} ;TID1 接收机钟当基准钟时,连续 3 天估计的 BDS 钟差千秒稳平均为 1.62×10^{-13} ,万秒稳平均为 6.81×10^{-14} 。从结果分析可知,两种不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差在频率稳定度特性上基本一致。

5 实时钟差预报精度分析

采用两种不同基准钟实时估计的 BDS 卫星钟差,利用二次多项式加周期项的方法^[15],分别进行卫星钟差 1h 预报和 6h 预报,将预报的钟差结果与 GBM 最终精密钟差(30s)进行二次差比较,统计其平均 STD 值,结果如图 7(每颗星 3 天平均)和表 6、表 7 所示。

由图 7 和表 6、表 7 可知,C03 卫星钟当基准钟时,估计的实时 BDS 卫星钟差 1h 预报精度平均为 0.128ns,6h 平均为 0.697ns;TID1 接收机钟当基准

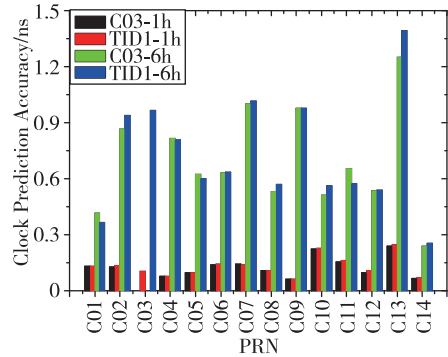


图 7 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差预报精度对比

Fig. 7 Comparison of prediction accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

表 6 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差 1h 预报精度对比

Tab. 6 Comparison of 1h prediction accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

参考基准		1h 预报精度/ns			
		070	071	072	平均值
C03 卫星钟	最优	0.061	0.048	0.047	
	平均	0.115	0.145	0.126	0.128
	最差	0.23	0.326	0.299	
TID1 接收机钟	最优	0.068	0.045	0.051	
	平均	0.116	0.145	0.128	0.130
	最差	0.237	0.332	0.301	

表 7 C03 和 TID1 为参考钟估计的实时 BDS 钟差 6h 预报精度对比

Tab. 7 Comparison of 6h prediction accuracy for real-time BDS clock offset estimated by C03 and TID1 as reference clocks

参考基准		6h 预报精度/ns			
		070	071	072	平均值
C03 卫星钟	最优	0.182	0.237	0.139	
	平均	0.701	0.796	0.593	0.697
	最差	1.078	2.234	1.205	
TID1 接收机钟	最优	0.185	0.313	0.141	
	平均	0.723	0.834	0.628	0.729
	最差	1.007	2.485	1.327	

钟时,估计的实时 BDS 卫星钟差 1h 预报精度平均为 0.130ns,6h 平均为 0.729ns。从结果分析可知,两种不同基准钟估计的 BDS 卫星钟差在预报精度上基本一致。

6 结论

为了分析利用不同基准解算得到的钟差是否存在差异,更好地评估基准对实时卫星钟差估计的影响,本文基于两种不同的基准(接收机钟和卫星钟)约束条件,利用非差消电离层组合模型求解BDS实时卫星钟差,从不同方面评估BDS实时卫星钟差的性能。分析结果表明,在两种不同的基准模式下,估计得到的BDS实时卫星钟差的估计精度、频率特性(频率准确度、频率漂移率、频率稳定度)和预报精度性能基本一致,说明两种基准在BDS实时卫星钟差解算上并没有明显的差别。本文利用实测数据验证了卫星钟和接收机钟作基准钟对BDS实时卫星钟差估计的等价性,在实际使用中可根据情况采用不同的基准钟进行钟差解算,为BDS实时卫星钟差估计时基准钟的选择提供了参考。

参考文献

- [1] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821.
Guo Shuren, Cai Hongliang, Meng Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7):810-821(in Chinese).
- [2] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1997, 102(B3):5005-5017.
- [3] Zhang R, Zhang Q, Huang G, et al. Impact of tracking station distribution structure on BeiDou satellite orbit determination[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(10):2177-2187.
- [4] 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(1):9-17.
- [5] Zhang X, Li X X, Guo F. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications[J]. GPS Solutions, 2011, 15(4):315-324.
- [6] Huang G, Xie W, Fu W, et al. BDS real-time satellite clock offsets estimation with three different datum constraints[J]. Journal of Global Positioning Systems, 2021, 17(1):34-47.
- [7] Fu W, Huang G, 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.
- [8] Jiang M, Gu Y, Li Z, et al. A decentralized processing schema for efficient and robust real-time multi-GNSS satellite clock estimation[J]. Remote Sensing, 2019, 11(21):2595.
- [9] Zhao L, Dousa J, Ye S, 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.
- [10] Tu R, Ge M, Zhang H, et al. The realization and convergence analysis of combined PPP based on raw observation[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(1):211-221.
- [11] Tu R, Zhang H, Ge M, et al. A real-time ionospheric model based on GNSS precise point positioning[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(6):1125-1134.
- [12] 李平力,黄观文,崔博斌,等.基于非差模型的GPS卫星实时钟差估计精度分析[J].导航定位与授时,2018,5(1):68-73.
Li Pingli, Huang Guanwen, Cui Bobin, et al. Accuracy analysis of real-time GPS satellite clock estimation based on undifferenced model[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(1):68-73(in Chinese).
- [13] 叶世榕. GPS非差相位精密单点定位理论与实现[D].武汉:武汉大学,2002.
Ye Shirong. Theory and realization of GPS precise point positioning using un-differenced phase observation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002(in Chinese).
- [14] Huang G, Cui B, Xu Y, et al. Characteristics and performance evaluation of Galileo on-orbit satellites atomic clocks during 2014—2017 [J]. Advances in Space Research, 2018, 63(9):2899-2911.
- [15] Huang G, Cui B, Zhang Q, et al. An improved predicted model for BDS ultra-rapid satellite clock offsets [J]. Remote Sensing, 2018, 10(2):60.

(编辑:孟彬)