

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.03.012

GNSS 卫星钟差估计与结果分析

叶 珍, 李浩军

(同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要:探讨了 GNSS 卫星钟差估计的基本原理、处理方法及数据处理中的一些关键技术,利用全球 56 个 IGS 跟踪站的观测数据进行钟差估计,比较分析了钟差产品的精度与定位性能。以 GPS 系统解算结果为例,其钟差产品与 IGS 最终精密卫星钟差符合较好,精度优于 0.04ns(约 0.012m),多系统钟差解算结果互差优于亚纳秒级。基于钟差产品进行精密单点定位解算试验,试验结果表明,在定位收敛之后,静态 PPP 在东、北、天 3 个方向上精度为 0.0582m、0.0466m、0.1188m;动态 PPP 在东、北、天 3 个方向上精度为 0.0671m、0.0640m、0.3200m。定位结果与 IGS 最终精密钟差解算结果符合较好,表明两者之间差异较小,进一步验证了解算得到的卫星钟差产品的定位性能。

关键词:卫星钟差估计;精密单点定位;精度分析;定位性能

中图分类号:P228.4

文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:2095-8110(2019)03-0088-07



Estimation and Result Analysis of GNSS Satellite Clock Error

YE Zhen, LI Hao-jun

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The basic principle, processing method and some key techniques in GNSS satellite clock error estimation were discussed. The observation data of 56 IGS tracking stations around the world were used to estimate the satellite clock error, the accuracy and positioning performance of the clock products were compared and analyzed. Taking the GPS system solution as an example, the clock product was in good agreement with the final precision satellite clock of IGS, and the accuracy was better than 0.04ns (about 0.012m), mutual differences of multi-system clock error results were better than sub-ns. Based on the satellite clock product, the precise point positioning solution test was carried out. The test results showed that after the positioning convergence, the accuracies of static PPP in the three directions of E, N and U were: 0.0582m, 0.0466m, and 0.1188m; the accuracies of kinematic PPP in the three directions of E, N and U were: 0.0671m, 0.0640m, and 0.3200m. The positioning results were in good agreement with the final precision clock error calculation results of IGS, indicating that the difference between them was small, which further verified the positioning performance of the calculated satellite clock products.

Key words: Satellite clock error estimation; Precise point positioning; Precision analysis; Positioning performance

收稿日期:2019-03-04;修订日期:2019-03-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41674029)

作者简介:叶珍(1995-),女,硕士,主要从事卫星钟差估计方面的研究。E-mail: isyezhen@163.com

通信作者:李浩军(1981-),男,副教授,主要从事精密单点定位、GNSS 卫星钟差、GNSS 系统偏差方面的研究。

E-mail: yanlhjch@126.com

0 引言

精密单点定位^[1-4] (Precise Point Positioning, PPP) 技术具有定位精度高, 数据采集方便, 数据处理简单, 不受观测时间、观测距离限制等优点, 成为近年来精密定位服务的重要手段。其中, 卫星钟差对定位精度的影响尤为重要, 其精度及稳定性直接影响到 PPP 解算的最终结果。目前, 国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)及其分析中心可提供 30s、5min、15min 采样间隔的钟差产品, 其精度已优于 0.1ns^[5], 可以满足高精度用户的事后定位需求。国内外学者对卫星钟差估计^[6-7]进行了大量的研究, 并且提出了具有较高精度的钟差估计方法, 主要包括非差模式^[8-10]和历元间差分模式^[11]。历元间差分模式可消除模糊度参数, 减少待估参数个数, 提高数据处理速度, 但初始时刻卫星钟差会引入与卫星相关的偏差。文献[12]提出了利用历元间差分相位观测值和非差伪距观测值并行计算的方法, 旨在消除该项偏差的影响。非差模式卫星钟差估计方法待估参数过多, 计算速度较慢, 但非差模式顾及各项误差改正, 可以得到较高的精度。文献[13]利用非差载波相位观测值进行事后精密卫星钟差解算, 与 IGS 最终精密钟差产品符合较好, 互差优于亚纳秒级。

全球导航卫星系统^[14-15] (Global Navigation Satellite System, GNSS) 发展迅速, 除了美国的全球定位系统(Global Positioning System, GPS), 还包括俄罗斯的全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)、欧洲的 Galileo, 以及中国的北斗卫星导航系统^[16-17] (BeiDou Navigation Satellite System, BDS)。随着全球一体化的进展, 以及各导航系统的逐步应用实施, 未来是一个全球卫星导航系统的多系统融合时代, 多系统组合定位能够增加可观测卫星数、优化卫星的集合图形结构以及提高多系统组合定位精度与可靠性^[18-19]。本文介绍了基于非差观测量的 GNSS 卫星钟差估计算法和数据处理过程, 分别解算得到 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 多系统卫星钟差产品, 并分析了该产品的精度与定位性能。

1 GNSS 卫星钟差估计

在卫星钟差估计中, 一般采用无电离层影响的非差相位和伪距观测值^[20], 其中, GPS 与 BDS 的观测值方程为:

$$L^{G,j} = \rho^{G,j} + c\delta^G + c\delta^{G,j} + \lambda^G \cdot N^G + T^G + \epsilon^G(\Phi_{IF}^j) \quad (1)$$

$$P^{G,j} = \rho^{G,j} + c\delta^G + c\delta^{G,j} + T^G + \omega^G(P_{IF}^j) \quad (2)$$

$$L^{C,j} = \rho^{C,j} + c\delta^C + c\delta^{C,j} + \lambda^C \cdot N^C + T^C + ISB + \epsilon^C(\Phi_{IF}^j) \quad (3)$$

$$P^{C,j} = \rho^{C,j} + c\delta^C + c\delta^{C,j} + T^C + ISB + \omega^C(P_{IF}^j) \quad (4)$$

式中, 上标 G、C 分别代表 GPS 与 BDS; L^j 、 P^j 为卫星 j 对应的无电离层影响的相位与伪距观测值; ρ^j 为卫星与接收机之间的几何距离; c 为光速; δ 为接收机钟差, δ^j 为卫星钟差; λ 为波长; N 为整周模糊度参数; T 为对流层延迟; $\epsilon(\Phi_{IF}^j)$ 、 $\omega(P_{IF}^j)$ 分别为相位、伪距观测值的其他误差项。

其中 ISB 为系统间偏差^[21-22], 由不同基准产生, 表达式如下

$$ISB = (ref^C - ref^G) + (b^C - b^G) \quad (5)$$

式中, ref^C 、 b^C 为 BDS 下无电离层组合的载波相位硬件延迟与码硬件延迟; ref^G 、 b^G 为 GPS 下无电离层组合的载波相位硬件延迟与码硬件延迟。

利用由上述公式建立的观测方程, 采用最小二乘方法来解算事后卫星钟差、接收机钟差及载波相位模糊度等参数。在未发生周跳或周跳已经修复的情况下, 整周末知数当作常数处理, 在发生周跳的情况下, 整周末知数当作一个新的参数进行估计; 观测数据时间间隔为 30s, 设置卫星截止高度角为 7°; 天线相位中心变化采用绝对天线相位中心(IGS08)模型; 对潮汐影响、相对论效应、地球自转等采用模型改正; 接收机钟差参数、卫星钟差参数以及系统间偏差 ISB 均当作白噪声处理; 对流层影响采用 Saastamoinen 模型加以改正。卫星钟差估计数据处理的具体策略如表 1 所示。

表 1 GNSS 卫星钟差估计策略

Tab. 1 Strategy of the GNSS satellite clock error estimation

参数	处理策略
观测值	LC+PC
先验约束	P_1 5.0m, L_1 0.03m
观测值	截止高度角 7°
观测值加权	$p = 1/\sigma^2, \theta_i \geq 30^\circ,$ $p = 2\sin\theta_i/\sigma^2, \theta_i < 30^\circ$
相位缠绕	模型改正
相位中心变化	IGS08 模型
误差改正	潮汐改正 固体潮、极移潮、海洋潮
相对论效应、地球自转	模型改正

续表

参数	处理策略
测站坐标	固定
卫星轨道	固定
对流层	Saastamoinen 模型
参数估计	
卫星钟差	估计+白噪声
接收机钟差	估计+白噪声
相位模糊度	估计
系统间偏差 ISB	白噪声

2 钟差分析与定位验证

2.1 卫星钟差精度分析

本文选用 2017 年第 300d 全球分布的 56 个 IGS 跟踪站数据对 GNSS 事后卫星钟差进行估计与分析,卫星钟差计算时采用 30s 的时间间隔,测站分布如图 1 所示。GNSS 卫星钟差估计中,观测量是卫星与测站之间的相对时间延迟,解算得到的卫星绝对钟差与基准钟绝对钟差之间的差值为相对钟差。在保证基准钟的钟差精度优于 10^{-6} s 的情况下,相对钟差和绝对钟差对定位影响是等价的,本文所讨论的 GNSS 卫星钟差均指相对钟差^[23]。由于所选卫星钟差基准不同,故需先消除基准钟差偏差才能真实反映卫星钟差精度。对卫星钟差估计结果的精度评价采用与 IGS 最终精密钟差作二次差^[23]比较的方法,即先将本文解算得到的卫星钟差结果与 IGS 的 30s 最终精密钟差产品作一次差,再通过选择一参考卫星(本文选择 1 号卫星,观测时段内 4 号和 31 号卫星不可见),将作一次差之后的参考卫星钟差差值与其他卫星差值作二次差,消除由于基准钟选择不同而对钟差解算产生的影响。二次差后的统计结果可以有效地反映出计算结果与 IGS 最终精密钟差之间的符合程度。将计算结果与 IGS 最终精密钟差进行比较,统计二次差时间序列的标准偏差(Standard Deviation, STD)值

$$\text{STD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}{N - 1}} \quad (6)$$

式中, X_i 为第 i 个历元 2 套卫星钟差之差; \bar{X} 为其平均值; N 为历元数。

限于篇幅,根据本文介绍的 GNSS 卫星钟差估计基本原理与数据处理策略,文中给出 GPS 下的卫星钟差解算结果,其他系统的解算结果基本一致。解算得到 2017 年第 300d 的卫星钟差,并将其与 IGS 最终精密卫星钟差进行比较。如图 2 所示,统



图 1 用于 GNSS 卫星钟差估计的 56 个测站分布图

Fig. 1 Distribution of the 56 stations used in GNSS satellite clock error estimation

计结果表明,本文解算得到的卫星钟差与 IGS 最终精密卫星钟差二次差的标准偏差均优于 0.012m,所有卫星标准偏差的平均值为 0.007m。各卫星钟差计算结果的偏差均值如图 3 所示,均优于 0.25m。表 2 给出了多系统卫星钟差偏差的统计结果,比较分析得到利用多系统进行卫星钟差估计,各解算结果的平均标准偏差互差优于 2mm;平均偏差互差优于 3mm。可见,利用本文算法解算得到的卫星钟差与 IGS 最终精密钟差产品的精度相当,两者相差较小。分析其偏差产生的原因在于,目前本文卫星钟差估计时初值的选取以及随机模型与 IGS 存在差别,导致解算结果与 IGS 钟差产品之间存在与卫星相关的系统性偏差。

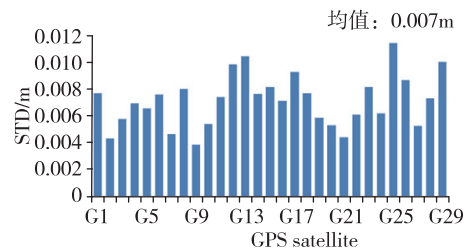


图 2 GPS 卫星钟差与 IGS 最终精密钟差的标准偏差
Fig. 2 STD of GPS satellite clock and IGS final precise clock

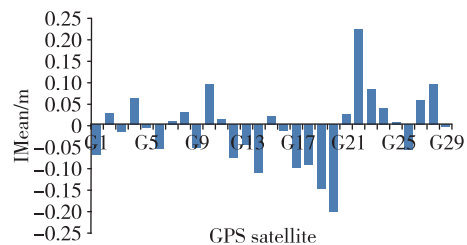


图 3 GPS 卫星钟差与 IGS 最终精密钟差的偏差均值
Fig. 3 Deviation mean of GPS satellite clock and IGS final precise clock

表 2 多系统卫星钟差偏差比较

Tab. 2 Comparison of deviation for multi-system satellite clock (M-STD is Mean STD, M-D is Mean Deviation)

	GPS	GLONASS	Galileo	BDS
M-STD/m	0.0072	0.0083	0.0066	0.0069
M-D /m	-0.0097	-0.0114	-0.0091	-0.0093

2.2 定位结果验证

为了分析和验证本文卫星钟差解算结果的精度及其定位性能,将估计的卫星钟差用于定位试验,分别进行静态与动态 PPP 解算,并将定位结果与 IGS 最终精密卫星钟差的定位结果进行比较分析,进一步验证本文解算得到的卫星钟差的定位性能。这里给出 GPS 定位结果的验证分析,其他系统基本一致。

表 3 分别以 GPS 静态及动态 PPP 比较分析了本文解算得到的卫星钟差与 IGS 精密钟差的定位收敛时间^[24]。从比较结果中可以看到, GPS PPP 的收敛时间较短,静态平均收敛时间约为 22min,动态平均收敛时间约为 36min,并且本文估计钟差与 IGS 精密钟差定位收敛时间除 WILL 站静态收敛时间相差 14min,其余测站 PPP 收敛时间相差较小,均小于 10min,稳定性较高。可见,本文解算得到的卫星钟差与 IGS 最终精密钟差用于 PPP 解算时的收敛时间相当,分析其原因在于二次差后剩下的常数项偏差被模糊度吸收,不对结果造成影响,故两者区别不大。

表 3 GPS 卫星钟差定位收敛时间比较

Tab. 3 Comparison of convergence time for GPS satellite clock positioning

测站	IGS 精密钟差/min		本文估计钟差/min	
	静态 PPP	动态 PPP	静态 PPP	动态 PPP
BJFS	32	31	36	39
BOGT	11	31	15	31
LHAZ	26	48	30	55
MASI	16	10	18	14
MDO1	20	27	20	34
NVSK	11	31	13	32
POL2	20	44	25	46
SHAO	36	32	41	31
WILL	24	41	10	43
ZAMB	14	29	16	34
Mean	22	36	22	36

图 4、图 5 所示分别为利用本文估计卫星钟差以及 IGS 最终精密钟差对 BJFS 站(39. 61N, 115. 89E)进行静态、动态精密单点定位试验。由结果可以得到,在定位收敛之后,本文解算得到的钟差产品与 IGS 精密钟差静态 PPP 定位精度在 E、N、U 这 3 个方向上分别为,本文解算:0. 0582m、0. 0466m、0. 1188m; IGS:0. 0385m、0. 0259m、0. 0736m; 动态 PPP 定位精度在 E、N、U 这 3 个方向上分别为,本文解算: 0. 0671m、0. 0640m、0. 3200m; IGS: 0. 0481m、0. 0435m、0. 2260m。从图中可以看出,本文解算得到的 GPS 卫星钟差与 IGS 最终精密钟差的定位结果在定位收敛后符合较好,说明两者差异较小,精度符合较高,也验证了本文解算得到的钟差产品的定位性能。

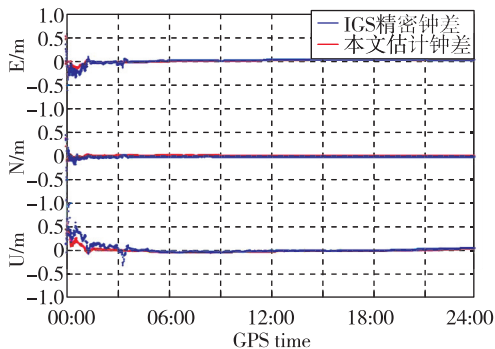


图 4 BJFS 站 GPS 静态精密单点定位结果比较
Fig. 4 Comparison of GPS static PPP results for BJFS station

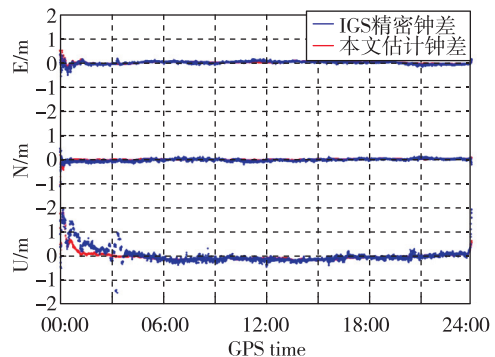


图 5 BJFS 站 GPS 动态精密单点定位结果比较
Fig. 5 Comparison of GPS kinematic PPP results for BJFS station

图 6 是利用本文解算得到的卫星钟差与 IGS 最终精密钟差进行伪距定位的结果,从图 6 中可以看出,利用 2 套钟差产品在伪距单点定位中精度较

为符合。表4给出了2套卫星钟差在伪距单点定位中的RMS值,其互差在E、N、U这3个方向优于0.06m,相较于PPP定位结果互差较大。分析其原因因为二次差之后剩下的常数项偏差影响了SPP的定位精度,可能由伪距观测值中的卫星钟差系统性偏差引起,仍需进一步研究。

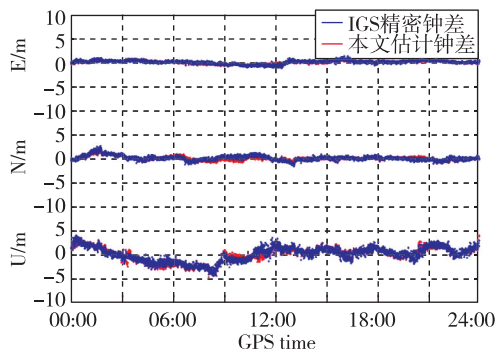


图6 BJFS站GPS伪距定位结果比较

Fig. 6 Comparison of GPS SPP results for BJFS station

表4 GPS卫星钟差单点定位RMS值比较

Tab. 4 Comparison of SPP RMS for GPS satellite clock

RMS/m	IGS精密钟差	本文估计钟差
E	0.3516	0.3808
N	0.4466	0.5037
U	1.4750	1.4979

GLONASS、Galileo以及BDS的定位验证结果与GPS基本一致。基于同济大学导航定位软件,解算不同系统的定位结果。表5给出了4个系统5d的收敛时间差比较,表明本文解算得到的卫星钟差产品与IGS最终精密钟差在不同系统下的定位收敛时间差相差不大;表6给出了卫星钟差用于伪距单点定位时不同系统、3个方向上的RMS差值统计结果,表明2套卫星钟差产品用于SPP验证时不同系统下的RMS差值相差较小。由以上结果可以分析得到,2套钟差产品在不同系统下的定位结果基本一致,进一步表明了本文解算得到的多系统卫星钟差产品的定位性能。

表5 GNSS卫星钟差定位收敛时间差比较

Tab. 5 Comparison of convergence time difference for GNSS satellite clock position (G-GPS, R-GLONASS, E-Galileo, C-BDS)

时间/min	静态PPP				动态PPP			
	G	R	E	C	G	R	E	C
2017/10/25	3	4	3	5	2	2	3	3
2017/10/26	5	3	4	3	4	4	5	5
2017/10/27	4	6	5	5	4	3	4	7
2017/10/28	2	4	6	6	6	3	3	2
2017/10/29	3	2	3	3	3	4	2	3
Mean	3.4	3.8	4.2	4.4	4.8	3.2	3.4	4.0

表6 GNSS卫星钟差单点定位RMS差值比较

Tab. 6 Comparison of SPP RMS difference for GNSS satellite clock

RMS/m	GPS	GLONASS	Galileo	BDS
E	0.0292	0.0951	0.0542	0.0358
N	0.0571	0.0344	0.0266	0.0673
U	0.0229	0.0316	0.0382	0.0425

3 结论

本文介绍了GNSS卫星钟差估计的基本原理及算法,包括观测方程、处理策略等,并选取了56个全球分布的IGS跟踪站进行卫星钟差估计,根据卫星钟差估计结果与IGS最终精密卫星钟差进行对比,分析了解算得到的卫星钟差的处理精度与钟差产品的定位性能。以GPS解算结果为例,统计结果表明,本文解算得到的卫星钟差与IGS最终精密钟差符合较好,二次差精度优于0.04ns(约为0.012m),平均精度为0.02ns(约为0.007m),各卫星钟差偏差均值优于0.25m,多系统卫星钟差解算结果互差优于亚纳秒级。将解算得到的钟差产品应用于定位解算,通过比较分析得出,GPS静态PPP在经过约22min后定位趋于收敛,E、N、U这3个方向精度优于0.0025m、0.0302m、0.0267m;GPS动态PPP在经过约36min后定位趋于收敛,E、N、U这3个方向精度优于0.0106m、0.0220m、0.0415m。与IGS最终精密钟差的定位结果相差较小,说明两者精度符合较好,也验证了本文解算得

到的卫星钟差的定位性能。SPP 的 2 套钟差产品定位结果的 RMS 值互差在 E、N、U 这 3 个方向优于 0.06m, 相较于 PPP 定位结果互差较大, 分析其原因因为二次差之后剩下的常数项偏差影响了 SPP 的定位精度, 可能由伪距观测值中的卫星钟差系统性偏差引起, 仍需进一步研究。

由于目前所考虑的误差模型不够精确, 可能会对定位结果带来系统性偏差。在今后的工作中还必须对各类误差模型进一步精化, 消除其影响。另外, 相对于事后卫星钟差估计, 实时卫星钟差估计的数据处理及随机模型更为复杂, 也更具有应用价值。因此, 实时卫星钟差估计将是未来研究的一个重要方向。

参考文献

- [1] 刘经南, 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(3): 234-240.
Liu Jingnan, Ye Shirong. GPS precise point positioning using undifferenced phase observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2002, 27(3): 234-240(in Chinese).
- [2] Li H, Chen J, Wang J, et al. Network based real-time precise point positioning[J]. Advances in Space Research, 2010, 46(9): 1218-1224.
- [3] 李浩军, 王解先, 陈俊平, 等. 基于 GNSS 网络的实时精密单点定位及精度分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(6): 1302-1307.
Li Haojun, Wang Jiexian, Chen Junping, et al. The realization and analysis of GNSS network based real-time precise point positioning[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(6): 1302-1307(in Chinese).
- [4] 夏凤雨, 叶世榕, 赵乐文, 等. 基于 SSR 改正的实时精密单点定位精度分析[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(3): 52-57.
Xia Fengyu, Ye Shirong, Zhao Lewen, et al. Analysis of real-time precision point positioning based on SSR corrections[J]. Navigation Positioning and Timing, 2017, 4(3): 52-57(in Chinese).
- [5] IGS Product Availability[EB/OL]. <http://www.igs.org/products>. 2018.
- [6] 屈利忠, 杜明义, 王坚, 等. 多模 GNSS 精密卫星钟差估计与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(1): 107-111.
Qu Lizhong, Du Mingyi, Wang Jian, et al. Multi-GNSS satellites clock estimation and analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(1): 107-111(in Chinese).
- [7] Ye S, Zhao L, Jia S, et al. Analysis of estimated satellite clock biases and their effects on precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 16.
- [8] 赵齐乐, 戴志强, 王广兴, 等. 利用非差观测量估计北斗卫星实时精密钟差[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(5): 686-691.
Zhao Qile, Dai Zhiqiang, Wang Guangxing, et al. Real-time precise BDS clock estimation with the undifferenced observation[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(5): 686-691(in Chinese).
- [9] 蔡华, 赵齐乐, 楼益栋. 精密卫星钟差确定系统的实现与精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11): 1293-1296.
Cai Hua, Zhao Qile, Lou Yidong. Implementation and precision analysis of GPS precise clock estimation system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1293-1296(in Chinese).
- [10] 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 un-differenced model[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(1): 68-73(in Chinese).
- [11] 何明宪, 李星星, 李盼, 等. 基于非差与历元差分两种观测模型估计精密卫星钟差的方法比较[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 95-99.
He Mingxian, Li Xingxing, Li Pan, et al. Comparison and analysis of estimations of precise satellite clock error based on non-difference model and epoch differential model[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(1): 95-99(in Chinese).
- [12] 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.
- [13] 李星星, 徐运, 王磊. 非差导航卫星实时/事后精密钟差估计[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(6): 661-664.
Li Xingxing, Xu Yun, Wang Lei. Undifferenced precise satellite clock error estimation and precision analysis[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(6): 661-664(in Chinese).
- [14] Hauschild A, Montenbruck O, Steigenberger P.

- Short-term analysis of GNSS clocks[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(3): 295-307.
- [15] 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(2): 811-822.
- [16] Zhao Q, Wang C, Guo J, et al. Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 4.
- [17] Wang B, Lou Y, Liu J, et al. Analysis of BDS satellite clocks in orbit[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 783-794.
- [18] 陈良, 耿长江, 周泉. 北斗/GPS实时精密卫星钟差融合解算模型及精度分析[J]. *测绘学报*, 2016, 45(9): 1028-1034.
- Chen Liang, Geng Changjiang, Zhou Quan. Estimation model and accuracy of BeiDou/GPS real-time precise satellite clock error integrated solving[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica*, 2016, 45(9): 1028-1034(in Chinese).
- [19] 万军, 党亚民, 成英燕, 等. 多系统卫星钟差估算与分析[C]// *卫星导航定位与北斗系统应用*, 2015.
- Wan Jun, Dang Yamin, Cheng Yingyan, et al. Multi-system satellite clock error estimation and analysis[C]// *Satellite Navigation and Beidou System Application*, 2015(in Chinese).
- [20] 李浩军, 王解先, 王虎, 等. 基于GNSS网络的卫星精密钟差估计及结果分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(8): 1001-1003.
- Li Haojun, Wang Jiexian, Wang Hu, et al. Precise clock error estimation of GPS satellite and analysis based on GNSS network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(8): 1001-1003(in Chinese).
- [21] Li H, Li B, Lou L, et al. Impact of GPS differential code bias in dual-and triple-frequency positioning and satellite clock estimation[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 897-903.
- [22] 于合理, 郝金明, 田英国, 等. GNSS单站授时系统性偏差分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2017, 37(1): 30-34.
- Yu Heli, Hao Jinming, Tian Yingguo, et al. Analysis of systematic bias of single station time service[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2017, 37(1): 30-34(in Chinese).
- [23] 楼益栋. GPS精密卫星钟差估计与分析[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2009, 34(1): 88-91.
- Lou Yidong. Realization and analysis of GPS precise satellite clock products [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(1): 88-91(in Chinese).
- [24] 张小红. BDS/GPS精密单点定位收敛时间与定位精度的比较[J]. *测绘学报*, 2015, 44(3): 250-256.
- Zhang Xiaohong. Convergence time and positioning accuracy comparison between BDS and GPS precise point positioning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica*, 2015, 44(3): 250-256(in Chinese).