

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.03.019

GNSS 接收机时间管理模型的设计与实现

曹士龙^{1,2,3}, 刘根友¹, 尹翔飞^{1,2}, 王生亮^{1,2}, 高 铭^{1,2}

- (1. 中国科学院测量与地球物理研究所大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077;
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 3. 北京和协航电信息科技有限公司, 北京 100093)

摘要: 为了满足卫星接收机对多个时间系统统一管理的需求, 设计了一种适用于多系统 GNSS 接收机的时间管理模型, 用于维持和处理接收机内部时间。详述了接收机时间初始化、维持、钟差估计的方法与修正策略。基于 DSP6671 平台对模型进行了实验验证, 并分析了不同定位模式下的钟差变化特性, 以及两种钟差调整策略对伪距、载波相位的非差和双差的影响。实验结果表明: 该模型可通过两种方式修正接收机钟差, 且对双差载波相位观测值不产生影响; 能有效估计出顾及接收机端硬件时延的钟差。实验中, GPS、GLONASS 和 BDS 三种模式下的钟差均值分别为 -30.7ns 、 -72.6ns 和 -109.1ns 。

关键词: GNSS; 时间模型; 钟差; 毫秒钟跳

中图分类号: TN965.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)03-0146-07

Design and Realization of Time Management Model in GNSS Receiver

CAO Shi-long^{1,2,3}, LIU Gen-you¹, YIN Xiang-fei^{1,2}, WANG Sheng-liang^{1,2}, GAO Ming^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China; 2. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Beijing UniAvionics Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100093, China)

Abstract: In order to meet the requirements of unified management of multiple time systems, a time management model suitable for multi-system GNSS receiver is designed in this paper to maintain and process the internal time of the receiver. The methods of receiver time initialization, maintenance, clock offset estimation and correction strategy are described in detail. Based on DSP6671 platform, the model is verified by experiment, and the variation characteristics of clock offset under different positioning modes are analyzed, as well as the effects of two clock offset adjustment strategies on pseudorange, zero-difference and double-difference of carrier phase. The experimental results show that the model can modify the receiver clock offset in two ways, and it has no effect on the observed double-difference carrier phase. It can effectively estimate the clock bias taking into account the hardware delay of the receiver. In the experiment, the average clock offsets of GPS, GLONASS and BDS are -30.7ns , -72.6ns and -109.1ns , respectively.

Key words: GNSS; Time model; Clock offset; Millisecond clock jump

收稿日期: 2019-11-05; 修订日期: 2020-01-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0501900); 国家自然科学基金(41774017, 41621091)

作者简介: 曹士龙(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事 GNSS 定位算法及软件设计研究。

通信作者: 刘根友(1967-), 男, 研究员, 主要从事大地测量与地球重力学应用基础研究。

0 引言

随着我国北斗三号全球卫星导航系统的组网建设以及全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 和 GLONASS 的现代化发展,极大增强了导航定位用户的可见卫星数,使卫星的空间几何构型更加稳定,多系统 GNSS 并存与发展的局面已经形成。多系统融合是全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 发展的必然趋势。目前正在建设的多模 GNSS 实验 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) 跟踪站和国际 GNSS 监测评估系统 (International GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS) 跟踪站使用的接收机大多数都同时支持 GPS、GLONASS、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 和 Galileo 四个系统。传统支持单个导航系统的接收机已经不能满足高精度、高可靠性、多样化服务的需求。未来的全球卫星导航系统一定是多系统 GNSS 组合定位^[1]。

目前,针对多系统 GNSS 的组合定位算法在数学模型建立、误差模型改正、数据预处理和参数估计等方面的研究已经比较成熟,国内外相关学者取得了丰富的研究成果。例如:蔡昌盛等研究了 GPS/GLONASS 组合精密单点定位 (Precise Point Positioning, PPP),显著改善了 PPP 收敛速度^[2];李星星和楼益栋等对 GPS、GLONASS、BDS 和 Galileo 四系统组合 PPP 模型进行了研究,分析了四系统组合 PPP 的性能^[3-4];A. Khodabandeh 等深入研究了多系统 PPP-RTK 的数学模型^[5]。

但多系统 GNSS 组合定位不是简单地增加观测卫星数,还需要考虑不同系统间星座构成、时间及坐标系统、信号类型之间的差异,这也给 GNSS 接收机软件设计带来了更多的挑战。

近年来,国内学者也在多系统 GNSS 接收机钟跳和差分码偏差 (Differential Code Bias, DCB) 等方面进行了大量研究,例如:郑凯等分析了各类钟跳与时标、载波相位观测值之间的关系,并给出了顾及各类钟跳的导出多普勒值构造方法^[6];O. Montenbruck 等分析了 DCB 产生的原因,利用多系统 GNSS 观测值和全球电离层格网估计 GPS、Galileo 和 BDS 三系统卫星端和接收机端的 DCB^[7];袁运斌等提出了基于零基线精密估计站间单差接收机 DCB 的方法,并对站间单差接收机 DCB 的日加权平均值进行了分析^[8]。但是关于多系

统 GNSS 接收机软件中时间管理模型的研究及参考文献有限,还有待进一步研究和完善。

在多系统 GNSS 接收机工作过程中,统一的时间基准是保证正常定位解算的基础。然而由于不同卫星导航系统所采用的时间基准各不相同,多系统 GNSS 接收机需要兼容各个卫星系统时间^[9-10],为各类用户提供基于不同时间基准的信息。因此,研究高效、优化的多系统 GNSS 接收机时间管理模型就显得尤为重要。

1 导航卫星系统的时间基准

导航卫星系统的时间基准源于各自维持的系统时。在多系统 GNSS 接收机内部需要处理多个时间基准下的卫星信号和数据。由于各个时间系统是独立的,它们之间会存在系统间偏差^[11]。而这些系统偏差要么从卫星上通过导航电文播发给用户,要么在接收机参数估计时附加一个未知参数进行估计^[12]。多系统 GNSS 接收机既要维持各个卫星系统时间的独立性,又要协调处理好相互之间的转换关系,因此接收机软件中需要建立一个高效可靠的时间管理模型来实现二者的平衡。

2 多系统 GNSS 接收机时间的管理模型设计

GNSS 接收机的时间由三部分构成:参考时刻、开机时长和接收机钟差。

参考时刻定义为接收机开机的起始时刻所对应的绝对卫星系统时间,也即接收机中时间间隔计数器 (Time Interval Counter, TIC) 等于 0 时的卫星系统时间。

开机时长定义为从开机上电开始的 TIC 计数值 N_{tic} 。

参考时刻加上开机时长的总和减去标准系统时间后的偏差值作为接收机的钟差值。

对于多系统 GNSS 接收机的参考时刻来说,每一种卫星时间系统下都对应一个参考时刻,由于各个卫星系统之间的时间差值通常小于 $2\mu s$,因此在多系统 GNSS 接收机时间模型中,取系统时间的整毫秒以上的部分作为参考时刻,毫秒以下的部分归入接收机钟差。多系统 GNSS 接收机的钟差个数就等于卫星系统的数目,如图 1 所示。

2.1 接收机时间的初始化流程设计

接收机时间的初始化过程就是确定参考时刻的过程。GNSS 接收机时间初始化设计流程如图 2 所示。



图 1 GNSS 接收机时间模型示意图
Fig. 1 GNSS receiver time model diagram

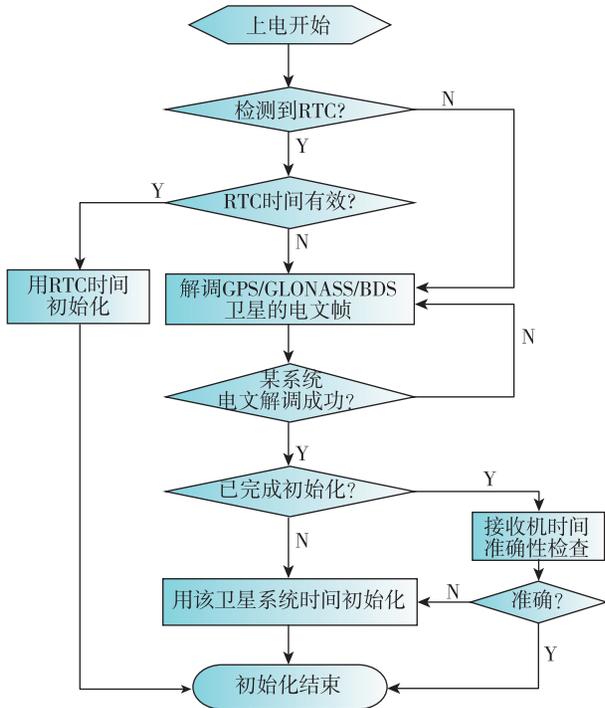


图 2 接收机时间初始化流程
Fig. 2 GNSS receiver time initialization flow chart

接收机的时间初始化分两种情况：

1)使用 RTC 初始化

接收机上电后,从实时时钟(Real-Time Clock, RTC)芯片中读取 RTC 时间 T_{cur} ,并采用式(1)计算参考时刻 T_{ref}

$$T_{ref} = T_{cur} - \frac{N_{TIC}}{f_{TIC}} \quad (1)$$

其中, f_{TIC} 代表接收机软件中产生 TIC 的频率。从 RTC 中还可以读取最后一次断电前的时刻 T_{FE} ,RTC 时间的精确度 σ_{RTC} 可通过式(2)估计

$$\sigma_{RTC} = (T_{RTC} - T_{FE})\delta_{RTC} \quad (2)$$

式中, δ_{RTC} 代表 RTC 的钟漂值,可从芯片手册或制造商处获得。

2)使用卫星导航电文初始化

如果接收机上没有安装 RTC,接收机在完成帧同步后,从导航电文中提取出交接字 T_{HOW} 和周计

数 WN (需要考虑周计数翻转的情况)。按照式(3)计算

$$T_{cur} = WN * 604800 + T_{HOW} + \delta t_{emi} + \delta t_{pro} \quad (3)$$

其中, δt_{emi} 表示信号从卫星传播至接收机所产生的时延(一般取信号传播时延的平均值,如 GPS 信号为 65ms); δt_{pro} 表示接收机内部的处理时延。经过卫星电文初始化后,本地接收机时间的偏差可控制在 50ms 以内。然后采用式(1)初始化接收机的参考时刻。

2.2 接收机时间的维持

接收机时间的维持需要三个参数:参考时刻、开机时长和接收机钟差。

接收机一旦完成时间初始化,参考时刻就确定下来。

开机时长的维持依赖于接收机中驱动 TIC 的晶振。晶振的稳定度越高,开机时长的精度越高。一般接收机的温补晶振的频率准确度可达 2.0×10^{-8} [13]。由于晶振的不稳定性及测量误差的存在,接收机软件一方面不断地估计出尽可能精确的钟差值,另一方面将 TIC 信号周期尽可能调整到等间距,从而维持一个高精度的接收机时钟。前者通过接收机的定位解算来实现,后者通过调整数控振荡器(Numerically Controlled Oscillator, NCO)或者晶振驯服技术[14]来实现。

2.3 接收机钟差的估计模型

通常将接收机端的硬件时延和接收机钟差混合在一起进行估计,对于单系统单频接收机来说,这不会影响到定位和授时的精度。然而对于多系统多频接收机来说,硬件时延的影响不可忽略[15]。在多系统接收机中,每一种定位模式(或每一个频点信号)均能估计出一个接收机钟差值,而由于系统间偏差、观测误差及接收机硬件时延的影响,导致不同定位模式(或不同频点信号)估计的接收机钟差也不相同。

本节讨论了顾及接收机端硬件时延的 GNSS 接收机钟差估计模型[7]。以 GPS(C/A) + GLONASS(L1) + BDS(B1)接收机为例,三种定位模式分别为 GPS、GLONASS 和 BDS。三种卫星系统的观测方程分别为

$$P_G = \rho_G + c(dT + b_G^r - \bar{d}t_{brd_G}^s) + d_{trop_G} +$$

$$d_{ion_G} + cT_{gd_G}$$

$$P_{N_k} = \rho_{N_k} + c(dT + b_{N_k}^r - \bar{d}t_{brd_N}^s) + d_{trop_N_k} +$$

$$d_{\text{ion}_{N_k}} + cT_{\text{gd}_{N_k}}$$

$$P_{B_1} = \rho_{B_1} + c(dT + b_{B_1}^r - \bar{d}t_{\text{brd}_{B_1}}^s) + d_{\text{trop}_{B_1}} + d_{\text{ion}_{B_1}} + cT_{\text{gd}_{B_1}} \quad (4)$$

式中,下标 G 、 N_k 、 B_1 分别代表三种卫星系统, k 代表 GLONASS 不同卫星频点偏移号; P 代表伪距观测值; ρ 代表星站距; c 代表真空中的光速; dT 代表接收机的钟差; b^r 代表接收机端的硬件时延; $\bar{d}t_{\text{brd}}^s$ 代表广播星历的卫星钟差; d_{trop} 和 d_{ion} 分别代表对流层和电离层延迟; T_{gd} 代表卫星端的群延时。

在实时单点定位解算中,由于无法区分接收机的钟差和硬件时延值,三种定位模式估计出的接收机钟差均不相等。

2.4 接收机钟差的修正

由于观测误差和时间量化误差的存在,接收机总是有修不尽的钟差。接收机钟差修正的目的是使接收机维持的本地时间与所选的系统时间尽可能保持一致。接收机根据用户配置的参考时间来选择相应的钟差修正本地时间。例如:用户要求输出北斗时,接收机软件中就使用北斗时间系统对应的钟差来修正当前接收机的时间 T_{cur} 。同时对输出的伪距 P_{cur} 、载波相位 ϕ_{cur} 按照式(5)进行修正

$$T'_{\text{cur}} = T_{\text{cur}} - (dT + b_{B_1}^r)$$

$$P'_{\text{cur}} = P_{\text{cur}} - (dT + b_{B_1}^r) \cdot c$$

$$\phi'_{\text{cur}} = \phi_{\text{cur}} - (dT + b_{B_1}^r) \cdot f_{B_1} \quad (5)$$

式中, T'_{cur} 、 P'_{cur} 和 ϕ'_{cur} 分别为钟差修正后的接收机时间、伪距值和载波相位值; f_{B_1} 为北斗 B1 频点的标称频率值。

接收机钟差的修正方式通常有两种:

1) 实时修正。接收机每完成一次定位解算,都要对接收机输出的时间、伪距和载波相位观测值进行修正,修正量为当前估计的钟差值。这样做是为了保证任意时刻的接收机时间和原始伪距观测值接近于真实值,保持连续变化。

2) 毫秒级修正。当接收机钟差累积到一定门限(如 1ms)后才对接收机时间、伪距和载波相位观测值做一次修正^[16-18]。这样做是为了使一段时间内的伪距和载波相位的数值变化只受多普勒和接收机钟漂的影响。此过程中伪距和载波相位观测值中所包含的接收机钟差越来越大,当接收机钟差累积到一定门限(如 1ms)时才对接收机时间、伪距和载波相位值进行调整。经过上述调整后,接收机时间、伪距和载波相位原始观测值都会出现与 1ms

对应的钟跳。这种变化会破坏原始载波相位观测值的连续性,在周跳探测时应注意钟跳的影响。载波相位观测值中的周跳与钟跳现象相似,但二者产生的机理不同,不应将钟跳当作周跳进行修复。钟跳在星间单差或双差处理时可以被消除,因此可以采用星间单差或双差诊断周跳,从而避免对定位结果产生影响^[19-20]。

3 实现与验证

笔者基于 DSP6671 平台对 GNSS 接收机时间管理模型进行了软件实现和实验验证。在接收机软件中同时维持了 GPS、GLONASS 和 BDS(B1) 三种定位模式,并对三个接收机钟差进行估计。分别采用两种钟差调整方式,按照 10Hz 频度输出 GPS、GLONASS 和 BDS 的原始伪距和载波相位观测值,分析和验证模型的正确性。

3.1 接收机钟差估计

GPS、GLONASS 和 BDS 三种定位模式下分别估计的接收机钟差结果如表 1 和图 3 所示。

表 1 不同定位模式下的接收机钟差

Tab. 1 Clock offsets of receiver in different positioning modes

定位模式	样本数	平均值/ns	均方根/ns
GPS	7569	-30.70	0.49
GLONASS	7569	-72.59	1.20
BDS	7569	-109.09	1.49

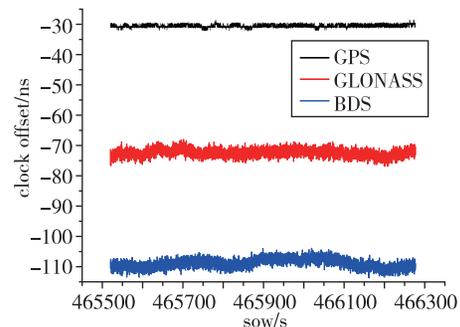


图 3 不同定位模式下接收机钟差

Fig. 3 Clock offsets of receiver in different positioning modes

从实验数据可以看出, GPS、GLONASS、BDS 三种模式解算的接收机钟差均值分别为 -30.70ns、-72.59ns 和 -109.09ns。由于三个频率的卫星信号受到的硬件时延不同,导致三个接收机钟差相互

之间存在系统偏差, GPS 与 GLONASS 钟差的偏差值为 41.9ns, GPS 与 BDS 钟差的偏差值为 78.3ns。钟差偏差值的变化在短时间内比较稳定, 说明接收机端的硬件时延在短时间内是稳定的。实验数据中, GLONASS 和 BDS 解算的钟差均方根大于 GPS 模式的钟差均方根, 其原因与 GLONASS 和 BDS 定位精度有关; 由于 GLONASS 和 BDS 收星状况不如 GPS 好, 导致 GLONASS 和 BDS 模式解算的接收机钟差精度略差。

3.2 接收机钟差的修正

采用实时钟差修正时, 伪距和载波相位观测值是连续变化的, 如图 4 所示。

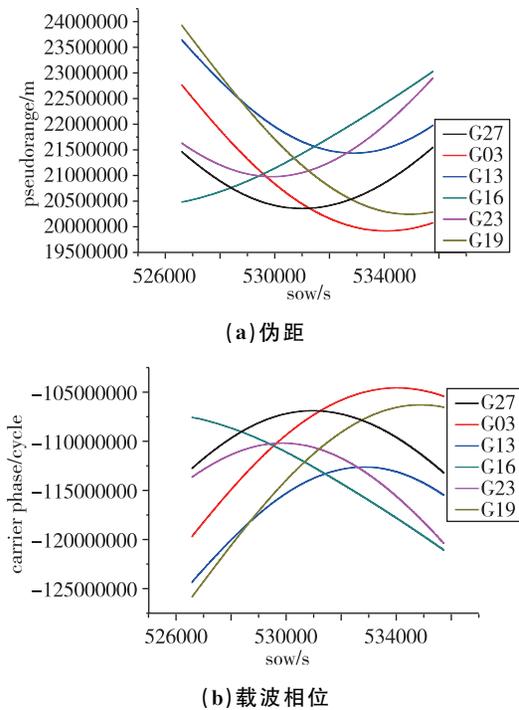


图 4 GPS 伪距和载波相位

Fig. 4 GPS pseudorange and carrier phase

采用毫秒修正方式时, 所有卫星的伪距和载波相位在同一时刻发生跳跃, 如图 5 所示。

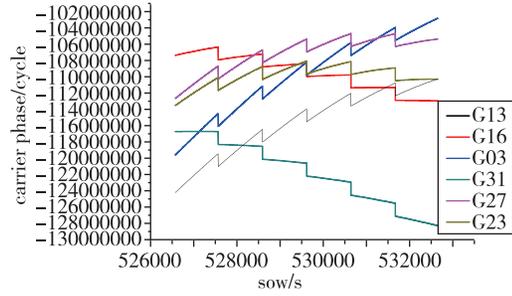
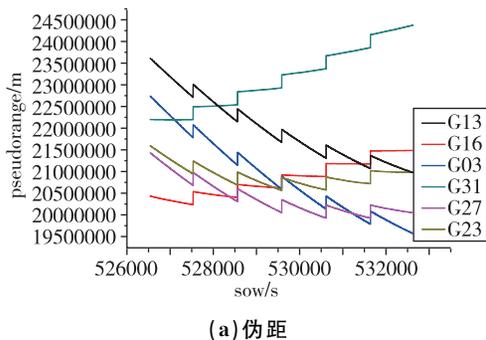


图 5 GPS 伪距和载波相位

Fig. 5 GPS pseudorange and carrier phase

毫秒跳变对于双差观测值没有影响, 载波相位双差值的统计如图 6 所示。

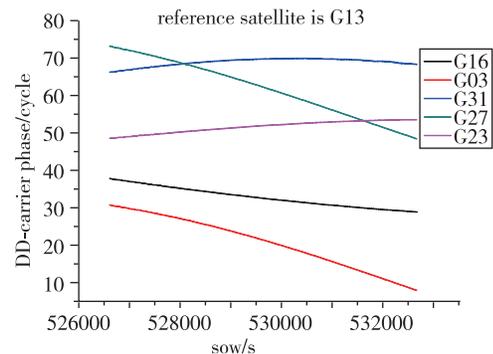


图 6 GPS 载波相位双差值

Fig. 6 Double difference of GPS carrier phase

载波相位双差值前后历元作差的残差值统计如图 7 所示。

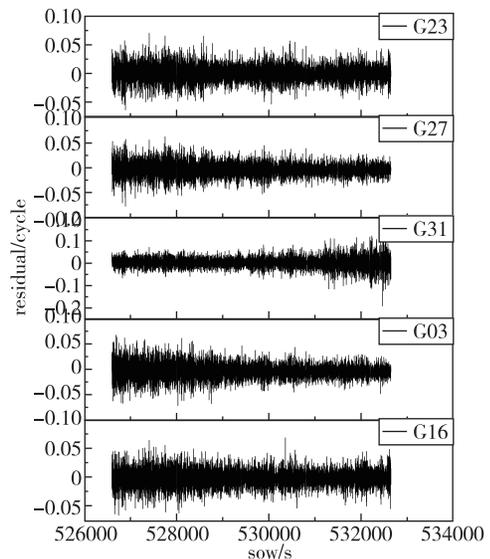


图 7 GPS 载波相位双差残差值

Fig. 7 Double difference residual of GPS carrier phase

通过分析前后历元间的载波相位双差残差值的变化量可以看出,尽管毫秒级钟差跳变使得原始伪距和载波相位观测量产生了跳变,但对双差载波相位观测量没有影响。

4 结论

本文针对多系统 GNSS 接收机设计了一种时间管理模型,实验结果表明:

1)该模型实现了 GNSS 接收机内部对多个系统时的统一管理。

2)模型顾及了接收机端的硬件时延,可以同时估计 GPS、GLONASS 和 BDS 对应的接收机钟差。由于同一系统中不同频点(如 B1、B2 和 B3)的硬件时延也可能不相同,不同频点解算出的接收机钟差之间也会存在系统偏差(部分接收机厂商会在出厂前做偏差校正),因此该模型也适用于同一系统中的不同频点信号联合解算时的情况。

3)提供了两种不同的接收机钟差调整方式,以实现对不同钟差调整方式的控制,使得接收机输出的时间和原始观测量满足不同场景的应用需求。

4)两种钟差调整方式对载波相位双差值无影响。

参考文献

- [1] Ren X, Zhang K, Li X, et al. Precise point positioning with multi-constellation satellite systems: BeiDou, Galileo, GLONASS, GPS[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(12): 1307-1313.
- [2] Cai C, Gao Y. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 223-236.
- [3] Li X, Ge M, Dai X, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [4] Lou Y, Zheng F, Gu S, et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(4): 849-862.
- [5] Khodabandeh A, Teunissen P J G. PPP-RTK and inter-system biases: the ISB look-up table as a means to support multi-system PPP-RTK[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(9): 837-851.
- [6] 郑凯, 郭博峰, 张小红. 接收机钟跳对单站 GPS 测速的影响及改正方法[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(3): 304-308.
- Zheng Kai, Guo Bofeng, Zhang Xiaohong. Research of clock jump effect on velocity estimation with a single GPS receiver[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(3): 304-308 (in Chinese).
- [7] Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential code bias estimation using multi-GNSS observations and global ionosphere maps[J]. *Navigation*, 2014, 61(3): 191-201.
- [8] 袁运斌, 张宝成, 李敏. 多频多模接收机差分码偏差的精密估计与特性分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 2106-2111.
- Yuan Yunbin, Zhang Baocheng, Li Min. Precise estimation and characteristic analysis of multi-GNSS receiver differential code biases[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2106-2111(in Chinese).
- [9] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. BD 与 GPS、GLONASS 多模融合导航定位时空统一[J]. *大地测量与地球动力学*, 2013, 33(4): 73-78.
- Li Hefeng, Dang Yamin, Bei Jinzhong, et al. Research on spatio-temporal unification of BDS/GPS/GLONASS multi-mode fusion navigation and positioning[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013, 33(4): 73-78(in Chinese).
- [10] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. BD/GPS/GLONASS 融合定位模型及性能分析[J]. *测绘通报*, 2014(9): 1-5.
- Li Hefeng, Dang Yamin, Bei Jinzhong, et al. Research on model and performance of BDS/GPS/GLONASS multi-mode fusion positioning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(9): 1-5(in Chinese).
- [11] 袁兵, 叶世榕, 鲍立桂. 基于融合处理多系统接收机钟差的伪距单点定位算法研究[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(4): 48-52.
- Yuan Bing, Ye Shirong, Bao Ligui. Multi-mode single point positioning based on processing of integration multi-system clock offset[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2015, 2(4): 48-52(in Chinese).
- [12] Wu M, Liu W, Wang W, et al. Differential inter-system biases estimation and initial assessment of instantaneous tightly combined RTK with BDS-3, GPS, and Galileo[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(12): 1430.
- [13] 韩舒文, 原海军, 左启耀, 等. 晶振误差特性及其对弹载卫星导航接收机的影响分析[J]. *导航定位与授时*, 2017, 4(3): 66-71.

- Han Shuwen, Yuan Haijun, Zuo Qiyao, et al. Analysis on crystal oscillator error characteristics and its effect on missile borne satellite receiver[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(3): 66-71(in Chinese).
- [14] 马煦, 孔维, 孙海燕. 基于 GPS 驯服时钟的频率校准系统的设计[J]. *电讯技术*, 2011, 51(10): 109-112.
- Ma Xu, Kong Wei, Sun Haiyan. Design of frequency calibration system based on GPS taming cuckoo clock [J]. *Telecommunication Engineering*, 2011, 51(10): 109-112(in Chinese).
- [15] Guo F, Zhang X, Wang J. Timing group delay and differential code bias corrections for BeiDou positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(5): 427-445.
- [16] Petovello M. Clock offsets in GNSS receivers[J]. *GNSS Solutions*, 2011, 3(4): 23-25.
- [17] Guo F, Zhang X. Real-time clock jump compensation for precise point positioning [J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 41-50.
- [18] Kim H S, Lee H K. Elimination of clock jump effects in low-quality differential GPS measurements [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2012, 7(4): 626-635.
- [19] Kim D, Langley R B. Instantaneous real-time cycle-slip correction for quality control of GPS carrier-phase measurements[J]. *Navigation*, 2002, 49(4): 205-222.
- [20] Zhang X, Guo B, Guo F, et al. Influence of clock jump on the velocity and acceleration estimation with a single GPS receiver based on carrier-phase-derived Doppler[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 549-559.

(编辑:李瑾)