

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.05.001

# GNSS 实时卫星钟差估计技术进展

黄观文, 王浩浩, 谢威, 曹钰

(长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054)

**摘要:**不依赖实体基准站增强信息的 GNSS 实时精密单点定位服务将逐渐成为主流定位模式。实时卫星钟差产品作为实时精密单点定位的关键先决条件之一,其精度直接决定实时精密定位服务的性能。计算实时卫星钟差的 GNSS 实时卫星钟差估计技术成为实时精密定位的核心技术之一,其主要包括两种解算模式:非差解算模式和差分解算模式。由于对卫星模糊度等未知参数处理策略的不同,卫星钟差估计技术又可细分为非差、历元差分、星间差分、混合差分等策略类型。针对不同实时卫星钟差估计技术的原理方法、算法效率、适用性等问题,综合目前已有相关研究成果的基础上,对 GNSS 实时卫星钟差估计的研究现状、关键技术和面临的挑战进行了较为系统的总结综述,并对未来卫星钟差预报产品和实时估计产品的关系进行了展望。

**关键词:**GNSS;实时钟差;钟差估计;非差;差分

中图分类号:P228;V324.2+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(2020)05-0001-09



## Technical Progress of GNSS Real-time Satellite Clock Offset Estimation

HUANG Guan-wen, WANG Hao-hao, XIE Wei, CAO Yu

(College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** GNSS real-time precise point positioning services that aren't dependent on enhanced information from reference station will gradually become the mainstream positioning mode. As one of the key prerequisites for real-time precise point positioning, real-time satellite clock offset products' accuracy directly determines the performance of real-time precise positioning services. GNSS real-time satellite clock offset estimation technology, which calculates real-time satellite clock offset, has become one of the core technologies for real-time precision positioning. There are mainly two solution modes: un-differenced mode and differential mode. Due to the different processing strategies for unknown parameters such as satellite ambiguity, the satellite clock offset estimation technology can be subdivided into un-differenced, epoch-differenced, inter-satellite differenced, mixed-differenced and other strategy types. Aiming at the principle methods, algorithm efficiency, applicability and other issues of different real-time satellite clock estimation technologies, this paper systematically summarizes the current research status, key technologies and challenges of GNSS real-time satellite clock estimation based on existing related research results and gives the outlook of the relationship between forecasted satellite clock offset products and real-time estimated products.

收稿日期:2020-08-17;修订日期:2020-08-23

基金项目:国家自然科学基金(41774025);陕西省杰出青年基金(2019JC-20);

中国第二代卫星导航系统重大专项(GFZX0301040308)

作者简介:黄观文(1983-),男,教授,博导,主要研究方向为 GNSS 精密定位和精密钟差。E-mail:huang830928@chd.edu.cn

**Key words:** GNSS; Real-time satellite clock offset; Clock offset estimation; Un-differenced; Differential

## 0 引言

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是能在地球表面或近地空间的任何地点为用户提供全天候的三维坐标和速度以及时间信息的空基无线电导航定位系统<sup>[1-2]</sup>。中国自主建设、独立运行的北斗三号全球卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)已于2020年7月31日正式开通,标志着我国成为世界上第3个独立拥有全球卫星导航定位系统的国家。目前,天空中已有超过100颗GNSS工作卫星,迈入到一个多星座多频率数据融合的新时代。

GNSS测量的基本原理是利用伪随机噪声码进行时间比对,得到测距信号的时间延迟<sup>[3]</sup>。因此,精确的位置测量实际上就是精确的时间测量。星载原子钟作为导航卫星的时间基准,也是卫星导航系统有效载荷的核心,其性能直接决定着定位、导航与授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)的服务质量<sup>[4]</sup>。星载原子钟利用原子能级跃迁的频率来精确计量时间时造成卫星钟的钟面时与标准时间的差异,即卫星钟差。精密卫星钟差的获取对GNSS实现高精度服务性能具有重要的实践价值。

本文首先简单介绍了卫星钟差产品的类型和特点,然后系统概述了实时卫星钟差估计技术的进展、关键方法以及与实时钟差预报技术的关系,最后讨论并展望了目前所面临的技术挑战。

## 1 GNSS实时钟差技术发展

精密卫星轨道和钟差产品是实现GNSS高精度PNT服务的先决条件,其精度决定了GNSS的服务性能<sup>[5]</sup>,目前国际GNSS服务组织(International GNSS Services, IGS)提供的最终卫星钟差产品精度为75ps,能够很好地满足用户事后高精度定位的需求(<http://www.igs.org/products>),但需要延迟12~18天才能获取;即使是精度略差的快速钟差产品也存在17~41h左右的时延,已无法满足用户对于时效性的要求。因此,用户一般采用广播星历来满足实时性的需求,但目前广播星历的卫星钟差精度较低,大约在5ns左右。为此,IGS还提供了可用于实时定位的超快速钟差产品,该产品时间弧段为48h,前24h弧段

的实测钟差精度优于0.15ns,但仍存在3~9h的时间延迟;后24h弧段预报部分可以满足实时应用的需求,但由于在轨星载原子钟极易受外界环境及自身因素的影响,变化极为快速复杂,难以用数学模型进行准确预报<sup>[3]</sup>,其只能达到略优于广播星历的钟差精度3ns左右,远远低于IGS建议的实时卫星钟差精度0.3ns,仍不能满足实时高精度定位的要求。因此,高精度的实时卫星钟差必须利用地面跟踪站网的实时观测数据进行GNSS实时卫星钟差估计<sup>[6]</sup>。

鉴于广播星历和超快速产品的钟差精度均难以满足用户实时高精度导航定位的需求,IGS实时工作组从2007年开始启动实时实验项目(IGS Real-Time Pilot Project, IGS-RTPP),并在2013年实现了一套完整的实时产品服务(Real-Time Service, RTS)系统,将实时卫星钟差改正数采用状态空间表达(State Space Representation, SSR)信息格式,基于互联网进行RTCM网络传输的协议(Network Transport of RTCM over the Internet Protocol, NTRIP),通过互联网的方式向全球用户播发<sup>[7-8]</sup>。多家GNSS分析中心与组织也开始致力于实时精密卫星钟差估计的算法研究与产品生成,如德国联邦制图与大地测量局(Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, BKG)、法国空间研究中心(Centre National d'Etudes Spatiales, CNES)、德国波茨坦地学研究中心(Deutsche GeoForschungsZentrum, GFZ)和中国武汉大学(Wuhan University, WHU)等。目前,绝大多数IGS分析中心提供的实时钟差产品都是5s更新且精度大致相当,在0.2ns左右<sup>[9]</sup>。

在卫星钟差估计方面,主要分为早期的GPS实时卫星钟差估计和后续的GNSS实时卫星钟差估计。在GPS实时卫星钟差估计方面,Zhang等使用Auto-BAHN软件,采用扩展Kalman滤波(Extended Kalman Filter, EKF)的估计方法,实现了近实时GPS轨道和钟差的确定<sup>[10]</sup>;Mevart等仅利用历元间差分载波相位观测值,实现了GPS实时卫星钟差估计<sup>[11]</sup>;楼益栋首先分析了伪距和相位观测值对钟差估计的影响,然后在实时估计过程中通过参数引入与消除的方法减少待估参数的个数,加快数据处理速度<sup>[12-13]</sup>;Hauschild和Montenbruck基于非差观测量,采用Kalman滤波实现了近实时GPS卫

星钟差估计,并将其应用于低轨卫星定轨<sup>[14]</sup>;Bock 等利用历元间差分模型对非差估计 5min 间隔的卫星钟差进行加密,然后通过线性内插得到了 1Hz 高频卫星钟差<sup>[15]</sup>;李星星等实现了基于非差载波相位观测值的实时 GPS 精密卫星钟差估计算法<sup>[16]</sup>;李浩军等采用历元间、星间差分技术消除了模糊度和接收机钟差参数,进而快速求解出相邻历元间相对钟差的差值<sup>[17-18]</sup>;Zhang 等采用非差伪距和载波相位观测值、历元间差分伪距和载波相位观测值并行计算的方法,实现了 GPS 实时精密卫星钟差估计算法<sup>[19]</sup>;基于对流层延迟短时间内几乎不变的特性,宋伟伟提出了在实时卫星钟差估计中采用对流层双线程处理策略来提高解算效率<sup>[6]</sup>;Ge 等于 2012 年提出了一种基于非差伪距观测量和历元间差分载波相位观测值的混合差分模型,该模型消除了模糊度参数,大幅度提高了解算效率,估计得到的卫星钟差精度与非差模型的结果精度相当<sup>[20]</sup>。

除了上述针对 GPS 实时钟差的研究外,目前也有大量学者对 GNSS 实时钟差估计算法进行了探索。Fu 等推导了轨道误差对实时钟差估计的影响模型,分析了不同轨道精度下 BDS 实时卫星钟差的估计精度<sup>[21]</sup>;赵齐乐等实现了基于非差观测量 GPS/BDS 组合实时钟差估计算法,估计得到的 BDS 实时钟差精度优于 0.15ns<sup>[22]</sup>;基于 Ge 等提出的混合差分模型,GPS/BDS 实时卫星钟差联合估计算法得以实现<sup>[23-24]</sup>。随着 GNSS 卫星和地面跟踪站数目的不断增加,解算效率和实时性是目前实现多模 GNSS 实时高频卫星钟差估计所要面临的重要问题。Chen 等在混合差分模型的基础上,通过伪距观测值星间差分进一步消除了接收机钟差参数,在保证卫星钟差精度的基础上,进一步提高了 GNSS 实时钟差估计的解算效率<sup>[25-26]</sup>;考虑到对流层变化十分缓慢、模糊度参数收敛后趋于常数等特点,戴志强提出了在非差方法的基础上,利用快、慢更新线程并行的 GNSS 实时钟差估计方法,研究表明该方法在效率和精度上都优于历元间差分方法<sup>[3,27]</sup>;Ye 等推导证明了实时卫星钟差估计中非差模型与混合差分模型的等价性<sup>[28]</sup>;面对多模 GNSS 单个历元计算负荷大的问题,Gong 等基于分块矩阵 QR 分解法,采用均方根信息滤波参数估计方法进行 GNSS 实时卫星钟差估计,兼顾了解算效率和精度要求<sup>[29]</sup>;针对区域 GNSS 实时钟差估计时观测数据的不连续导致钟跳的问题,Shi 等根据 GNSS 不同类型星载原子钟

的物理特性提出了一种原子钟噪声模型,相对传统的白噪声估计,利用该模型估计的卫星钟差平均标准偏差(Standard Deviation, STD)和均方根(Root Mean Square, RMS)分别提升了 44.4%和 12.1%<sup>[30]</sup>;Fu 等设计了高阶方程的快速解算算法,实现了基于序贯最小二乘的实时卫星钟差快速估计<sup>[31]</sup>;随后,又针对 GNSS 组合实时卫星钟差估计中在线质量控制难、计算效率低的问题,提出了一种适合高维最小二乘下实时钟差质量控制方法<sup>[32]</sup>;Liu 等基于非差观测量实现了一种高效的 GNSS 联合实时高频(1Hz)精密卫星钟差估计方法<sup>[33]</sup>;Dai 等和 Yang 等基于非差模型提出的非差模糊度固定策略,能够提升实时钟差估计的收敛时间和卫星钟差精度,同时基于实时钟差产品进行的实时动态精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)的收敛时间和定位精度也得到了提升<sup>[34-35]</sup>;Li 等提出了 GNSS 整数恢复钟模型,恢复了模糊度参数的整周特性,研究表明该模型能够提升 GNSS 实时估计的卫星钟差精度和解算效率,同时也促进了 GNSS 实时 PPP 模糊度固定的应用<sup>[36]</sup>;Zhao 等基于混合差分模型提出了一种适用于全球/区域 GNSS 实时卫星钟差估计中钟差基准选择和初始卫星钟差偏差预报的策略,以避免实时钟差产品的不一致性<sup>[37]</sup>。

综上所述,随着 GNSS 的发展日益趋向现代化以及全球能够提供多 GNSS 实时数据流的地面监测站数目的不断增多,GNSS 的实时高精度服务性能将受到越来越多的关注。因此,GNSS 实时精密卫星钟差估计将是实时精密数据处理的研究重点,也是实现高精度实时定位的关键技术。

## 2 GNSS 实时钟差估计技术

### 2.1 GNSS 无电离层组合观测方程

GNSS 实时精密卫星钟差估计一般是基于地面跟踪站网的双频(或多频)伪距和载波相位观测量,根据电离层延迟与信号频率的平方成反比这一特性,对不同频率的相位和伪距观测值进行线性组合以消除电离层一阶项,剩余的高阶项影响很小,一般不予考虑<sup>[38]</sup>,形成的双频观测量无电离层组合观测方程如下

$$\begin{aligned} P_{r,IF}^{s,g} &= \rho_r^{s,g} + \delta t_r^g - \delta t^{s,g} + d_{r,IF}^g - d_{IF}^{s,g} + \\ & m_r^{s,g} T_r^s + \epsilon_{r,IF}^{s,g} \\ L_{r,IF}^{s,g} &= \rho_r^{s,g} + \delta t_r^g - \delta t^{s,g} + m_r^{s,g} T_r^s + \\ & \lambda_{IF}^{s,g} (N_{r,IF}^{s,g} + b_{r,IF}^g - b_{IF}^{s,g}) + \xi_{r,IF}^{s,g} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $P$ 、 $L$  分别为以 m 为单位的伪距和载波相位观测量;  $r$ 、 $s$  分别为接收机和卫星;  $\rho_r^{s,g}$  为接收机  $r$  至系统卫星  $s$  的几何距离;  $c$  为光在真空中的传播速度;  $g$ 、 $j$  分别为全球卫星导航系统类型 (GPS、GLO-NASS、BDS 和 Galileo 等) 和对应系统导航信号的频率号;  $\delta t_r^g$ 、 $\delta t^{s,g}$  分别为接收机和卫星的真实钟差;  $m_r^{s,g}$  为对流层天顶延迟相应的投影函数;  $T_r^s$  为信号传播路径上对流层天顶延迟误差, 一般认为与频率无关;  $d_{r,j}^g$ 、 $d_j^{s,g}$  分别为接收机和卫星对应频率  $j$  的伪距码偏差;  $b_{r,j}^g$ 、 $b_j^{s,g}$  分别为接收机和卫星对应频率  $j$  的相位延迟偏差;  $N_{r,j}^{s,g}$  为载波相位观测量的整周模糊度;  $\lambda_{IF}^{s,g}$  为无电离层组合的波长; 伪距观测量的无电离层组合为  $P_{r,IF}^{s,g} = (f_1^2 P_{r,1}^{s,g} - f_2^2 P_{r,2}^{s,g}) / (f_1^2 - f_2^2)$ ; 载波相位观测量的无电离层组合为  $L_{r,IF}^{s,g} = (f_1^2 L_{r,1}^{s,g} - f_2^2 L_{r,2}^{s,g}) / (f_1^2 - f_2^2)$ ; 接收机伪距码偏差的无电离层组合为  $d_{r,IF}^g = (f_1^2 d_{r,1}^g - f_2^2 d_{r,2}^g) / (f_1^2 - f_2^2)$ ; 卫星伪距码偏差的无电离层组

合为  $d_{IF}^{s,g} = (f_1^2 d_1^{s,g} - f_2^2 d_2^{s,g}) / (f_1^2 - f_2^2)$ ; 接收机相位延迟的无电离层组合为  $b_{r,IF}^g = c(f_1 b_{r,1}^g - f_2 b_{r,2}^g) / (f_1^2 - f_2^2) / \lambda_{IF}^{s,g}$ ; 卫星相位延迟的无电离层组合为  $b_{IF}^{s,g} = c(f_1 b_1^{s,g} - f_2 b_2^{s,g}) / (f_1^2 - f_2^2) / \lambda_{IF}^{s,g}$ ; 无电离层组合模糊度为  $N_{r,IF}^{s,g} = c(f_1 N_{r,1}^{s,g} - f_2 N_{r,2}^{s,g}) / (f_1^2 - f_2^2) / \lambda_{IF}^{s,g}$ ;  $\epsilon_{r,IF}^{s,g}$ 、 $\epsilon_{IF}^{s,g}$  分别为伪距和载波相位无电离层组合观测量的观测噪声。

上述无电离层组合观测方程是基于  $f_1$  和  $f_2$  信号的观测量形成的, 对于三频或多频 (如 GPS L1/L2/L5, BDS B1I/B3I/B1C/B2a 等) 信号, 任意 2 个频率之间的无电离层组合与上述类似。

## 2.2 GNSS 实时钟差估计技术

GNSS 实时卫星钟差估计根据其采用的观测量模型的不同, 可分为非差估计法、历元间差分估计法以及混合差分估计法等<sup>[8]</sup>。表 1 从不同实时卫星钟差估计技术的原理方法、待估参数、算法效率和优缺点及适用性等方面进行了总结。

表 1 GNSS 实时卫星钟差估计技术总结

Tab. 1 Summary of GNSS real-time satellite clock offset estimation technology

估计技术	方法原理	待估参数	优缺点及适用性
非差估计法	采用原始伪距和载波相位观测量进行无电离层组合, 在观测方程中固定卫星轨道和测站坐标, 模型改正天线相位中心偏差和变化、相位缠绕、地球自转效应等误差 <sup>[6,39]</sup>	接收机钟差、卫星钟差、天顶对流层延迟参数和模糊度参数	该方法历元间观测量不存在相关性, 理论模型较为严密, 同时保留了模糊度参数, 有利于后续非差模糊度固定以及相位硬件延迟特性研究等 <sup>[22,40]</sup> ; 但也存在模糊度等待估参数众多, 解算效率难以保证实时性的缺点, 因此在估计实时卫星钟差时不适合太多测站参与解算
历元间差分估计法	认为相邻历元的天顶对流层延迟相同, 对相邻历元的相位和伪距观测量历元间作差, 精确计算出历元间的相对卫星钟差, 同时通过引入一个初始时刻的实时卫星钟差值, 以恢复各个历元的卫星钟差	接收机钟差、卫星钟差和天顶对流层延迟参数	该方法在消除模糊度参数、提高数据处理效率的同时, 也存在如下不足: 1) 历元间观测量具有强相关性, 可能会导致未知参数估计值不稳定; 2) 若相位观测量发生周跳或者卫星失锁的情况, 该卫星的实时钟差估计将会中断, 降低观测数据利用率的同时还必须重新引入新的初始卫星钟差值 <sup>[20]</sup> ; 3) 引入的初始时刻卫星钟差值一般不易精确获取 <sup>[6]</sup> 。因此, 该方法精度和可靠性一般低于非差估计法
混合差分估计法	采用历元间差分的载波相位观测量求解历元间卫星钟差变化值和非差伪距观测量估计卫星钟差初始值, 然后根据历元间卫星钟差变化累积值和卫星钟差初始值恢复各历元的精密卫星钟差	接收机钟差、卫星钟差和天顶对流层延迟参数	该方法相当于非差模型和历元间差分模型相结合的方式, 在效率上优于非差模型, 在精度上优于历元间差分模型 <sup>[20]</sup>
星间单差估计法	对同一历元单个测站的非差组合观测量进行星间差分, 解算待求卫星相对于参考卫星的星间相对钟差, 并归算到参考卫星钟上	卫星钟差、天顶对流层延迟参数和模糊度参数	该方法消除了接收机钟差参数, 避免了同时求解接收机钟差和卫星钟差时产生秩亏的问题 <sup>[41]</sup> , 简化了钟差估计模型, 但待估参数中仍存在数目众多的模糊度参数
星间历元间差分估计法	同时对载波相位和伪距观测量进行星间差分 and 历元间差分, 观测方程变成仅含有卫星钟差参数和对流层参数的线性方程	卫星钟差和天顶对流层延迟参数	消除了模糊度参数和接收机钟差参数, 极大地简化了实时卫星钟差估计的过程, 提高了实时卫星钟差估计的效率 <sup>[42]</sup>

### 2.3 实时钟差解算的参数估计方法

实时钟差解算的参数估计方法通常有序贯最小二乘(Sequential Least Square, SLS)估计、Kalman 滤波(Kalman-filter, KF)估计以及均方根信息滤波(Square Root Information Filter, SRIF)估计等。

#### 1) Kalman 滤波

Kalman 滤波是基于观测序列以及动力学模型信息求解状态向量的最优估值<sup>[14,43]</sup>。其观测方程和状态方程如下

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{W}_k \quad (2)$$

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \boldsymbol{\Omega}_{k-1} \quad (3)$$

式中,  $k$  为历元观测序列;  $\mathbf{L}_k$  为历元  $k$  的观测值向量;  $\mathbf{X}_k$  为历元  $k$  的状态向量;  $\mathbf{A}_k$  为观测方程的系数阵;  $\mathbf{W}_k$  为观测噪声向量;  $\Phi_{k,k-1}$  为状态转移矩阵;  $\boldsymbol{\Omega}_{k-1}$  为动态噪声向量;  $\Gamma_{k-1}$  为动态噪声矩阵。

对观测方程和状态方程进行线性化后, 每个历元通过不断预测—修正—预测的过程估计得到新的滤波估值, 且不需要存储之前历元的大量观测数据<sup>[6]</sup>。上述 Kalman 滤波与最小二乘估计是等价的, 并可由最小二乘推导得出。

#### 2) 均方根信息滤波

SRIF 作为 Kalman 滤波的一个演化版本, 采用平方根矩阵, 能够确保协方差矩阵的对称性和正定性<sup>[12]</sup>。利用 Household 变换避免了法方程的求逆, 能够有效地克服滤波器的发散, 比 Kalman 滤波具有更高的数值稳定性和计算高效性<sup>[44-45]</sup>, 但同时也增加了参数估计的复杂性。

#### 3) 序贯最小二乘估计

序贯最小二乘估计也是一种经常用于动态定位的经典方法, 可避免不精确状态模型信息的影响<sup>[46]</sup>。已有研究证明, 在实时卫星钟差的估计过程中, 模糊度和系统间偏差等参数作为常数估计而钟差参数被模型化为白噪声。序贯最小二乘估计方法和滤波解是等效的<sup>[14,47]</sup>, 在 GNSS 实时钟差估计工作中, 三种参数估计方法理论等价, 可任选其一。

### 2.4 实时钟差预报和实时钟差估计的关系

除了实时卫星钟差估计, 卫星钟差预报也是一种获取实时卫星钟差的方式。钟差预报是指利用一段已知的钟差数据进行建模, 预报未来一段时间的卫星钟差。当前, 常用的模型主要有: 一次多项式模型、二次多项式模型、灰色模型、差分整合移动平均自回归模型和谱分析模型<sup>[48-49]</sup>。目前, 已有多家分析中心提供超快速卫星钟差预报产品。表 2 给

出了 2019 年 8 月 22 日—2019 年 8 月 28 日共 7 天 GFZ 的 GNSS 超快速预报钟差产品精度统计指标。可以看出, 目前 Galileo、GPS、GLONASS 和 BDS-2 的 24h 超快速预报钟差精度分别为 0.54ns、2.13ns、2.75ns 和 4.24ns。BDS-2 超快速预报钟差精度较差, 主要是由于 BDS 异构星座中的地球静止轨道(Geostationary Earth Orbits, GEO)卫星钟差精度较低导致。Galileo 产品精度最优, 基本可以满足分米级导航定位服务要求。本文简要总结了实时钟差估计和钟差预报的优点与不足, 如表 3 所示。相比于实时钟差预报, 实时钟差估计能够提供较高精度的卫星钟差, 以及更高精度的 PNT 服务。然而, 钟差估计需要较多的地面观测站提供实时观测数据。由于接收机性能、网络时延和通信设备等多种因素的影响, 实时观测数据流的数量难以保证, 甚至会出现所有测站的观测数据中断, 此时钟差无法估计。为了维持实时卫星钟差数据, 需要采用实时卫星钟差预报, 钟差预报可以提供连续的钟差值。但是, 原子钟的变化极为复杂, 难以采用精确的数学模型进行建模, 导致预报的钟差精度较低。

表 2 GFZ 超快速钟差预报精度

Tab. 2 Accuracy of GFZ ultra-rapid clock offset

系统类型	prediction products			ns
	Galileo	GPS	GLONASS	BDS-2
精度	0.54	2.13	2.75	4.24

表 3 钟差估计与钟差预报的优缺点比较

Tab. 3 Comparison of advantages and disadvantages between clock offset estimation and clock offset prediction

项目	优点	不足
钟差估计	精度高	需要大量地面观测站、实时数据流难以保证, 导致钟差数据中断
钟差预报	连续性好	原子钟变化极为复杂, 难以精确建模, 预报钟差精度较低

随着原子钟稳定性的提升和物理模型的精化, 笔者认为中短期(24h 内)实时钟差预报精度有望稳定提升至 0.5ns 内, 未来可为用户提供分米级至厘米级的实时精密定位服务, 但厘米级至毫米级的高精度实时定位仍需要实时卫星钟差估计技术的支持。

### 3 结论与展望

鉴于 GNSS 实时卫星钟差估计技术的重要性,

本文首先综合现有的文献资料,对目前实时卫星钟差估计技术的研究进展和关键方法分析等方面进行了较为系统的论述。本节结合目前研究成果,对未来卫星钟差估计技术面临的挑战进行了初步展望,希望能为该方向学者下一步的研究工作提供一点参考。

1) BDS 实时钟差产品的精度和可靠性是保障实时 PNT 服务的关键,然而目前对 BDS 实时钟差估计的探索和研究还主要是借鉴 GPS 实时钟差的处理方法。针对我国 BDS 空间段采用三种轨道卫星组成混合星座的特点,提出了分类控制不同星座卫星钟差的解算策略,精化了卫星钟差求解的函数模型及随机模型,但是实现厘米级高采样率可靠性的 BDS 实时钟差产品,还需进行更为深入的研究。

2) 在 GNSS 卫星钟差估计中,钟差参数通常被简单模型化为白噪声进行估计,这种简化的假设并不能严格反映钟差的物理模型。尽管实时处理卫星钟差模型噪声会增加计算负担,但是更为稳定可靠的卫星钟差产品对于 GNSS 的授时与时间同步尤为重要。因此,考虑不同类型的 GNSS 星载原子钟,建立能够正确反映卫星钟差物理特性的噪声模型,将是一项重要的精细化研究工作。

3) 实时数据流的解析和处理是 GNSS 实时卫星钟差估计的基础工作,直接决定解算卫星钟差的精度和可靠性。受地面监测站布设位置、环境、通信设备和接收机性能等因素的影响,目前 GNSS 全球连续跟踪站实时数据流仍存在时延、丢包和数据中断的现象,导致观测数据质量包含较多的粗差和钟跳等异常。因此,要实现高效率高质量的 GNSS 实时流数据预处理与质量控制工作还面临很大的挑战。

4) 数目众多的模糊度参数和不合理的对流层约束是影响 GNSS 实时卫星钟差解算效率和精度的重要因素。在多系统组合 GNSS 实时卫星钟差估计过程中,高频数据的观测值数目以及需要解算的高阶法方程维数导致计算量十分庞大。因此,如何充分利用现代高性能计算机处理器的计算能力,优化高维法方程解算算法,从而实现 GNSS 实时钟差的快速估计以及多系统 GNSS 实时钟差的融合处理还需要进一步研究。

5) 目前实时钟差产品分为预报和估计两种,综合技术优缺点和目前精度指标,笔者初步建议预报

钟差精度(6h)优于 0.2ns 时,实时产品以预报产品为主、实时估计为辅(主要提升可靠性);预报产品精度(6h)差于 0.2ns 时,实时产品以估计产品为主、实时预报为辅(主要提升连续性)。

## 参考文献

- [1] 宁津生,姚宜斌,张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.  
Ning Jinsheng, Yao Yibin, Zhang Xiaohong. Review of the development of global satellite navigation system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013, 1(1): 3-8(in Chinese).
- [2] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more[M]. Berlin: Springer, 2008: 397-415.
- [3] 戴志强. GNSS 实时精密定位服务系统若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.  
Dai Zhiqiang. GNSS real-time precise positioning service system: theory, algorithm and implementation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016(in Chinese).
- [4] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.  
Huang Guanwen. Research on algorithms of precise clock offset and quality evaluation of GNSS satellite clock[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese).
- [5] 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, 1997, 102(3): 5005-5017.
- [6] 宋伟伟. 导航卫星实时精密钟差确定及实时精密单点定位理论方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.  
Song Weiwei. Research on real-time clock offset determination and real-time precise point positioning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2011(in Chinese).
- [7] Tomasz H, Jaroslaw B. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time [J]. GPS Solutions, 2014, 19(1): 1-13.
- [8] 余忠伦,高雅萍,杨立财. SSR 改正数更新频率及中断时间间隔对实时 PPP 的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(11): 1153-1158.  
She Zhonglun, Gao Yaping, Yang Licai. Analysis of the impact of SSR corrections update frequency and interrupt time interval in real-time PPP[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(11): 1153-

- 1158(in Chinese).
- [9] 尹倩倩, 楼益栋, 易文婷. IGS 实时产品比较与分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(6): 123-128.  
Yin Qianqian, Lou Yidong, Yi Wenting. Comparison and analysis of IGS real-time products[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(6): 123-128(in Chinese).
- [10] Zhang Q, Moore P, Hanley J, et al. Auto-BAHN: software for near real-time GPS orbit and clock computations[J]. Advances in Space Research, 2007, 39(10): 1531-1538.
- [11] Mervart L, Lukes Z, Rocken C, et al. Precise point positioning with ambiguity resolution in real-time [C]// Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2008. Savannah, GA, 2008: 397-405.
- [12] 楼益栋. 导航卫星实时精密轨道与钟差确定[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.  
Lou Yidong. Research on real-time precise GPS orbit and clock offset determination[D]. Wuhan: Wuhan University, 2008(in Chinese).
- [13] 楼益栋, 施闯, 周小青, 等. 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, Shi Chuang, Zhou Xiaoqing, et al. Realization and analysis of GPS precise clock products [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(1): 88-91(in Chinese).
- [14] Hauschild A, Montenbruck O. Kalman-filter-based GPS clock estimation for near real-time positioning [J]. GPS Solutions, 2009, 13(3): 173-182.
- [15] Bock H, Dach R, Jaeggi A, et al. High-rate GPS clock corrections from CODE: support of 1 Hz applications[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(11): 1083-1094.
- [16] 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).
- [17] 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, 1007.  
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, 1007(in Chinese).
- [18] 李浩军, 王解先, 刘三枝. 基于局域参考站网络伪距观测的钟差估计及应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(9): 1355-1358.  
Li Haojun, Wang Jiexian, Liu Sanzhi. Estimation and application of clock error based on pseudorange observation of regional reference network[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(9): 1355-1358(in Chinese).
- [19] Zhang X H, Li X X, Guo F. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications[J]. GPS Solutions, 2011, 15(4): 315-324.
- [20] Ge M R, Chen J P, 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.
- [21] Fu W J, Zhang Q, Huang G W, et al. Performance analysis of real-time BDS clock estimation with different orbit accuracy[C]// Proceedings of 2016 China Satellite Navigation Conference (CSNC), Volume I. Springer Singapore, 2016.
- [22] 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).
- [23] Zhang W X, Lou Y D, Gu S F, et al. Joint estimation of GPS/BDS real-time clocks and initial results[J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 665-676.
- [24] 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 analysis of Beidou/GPS real-time precise satellite clock error integrated resolving [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1028-1034(in Chinese).
- [25] Chen Y C, Yuan Y B, Zhang B C, et al. A modified mix-differenced approach for estimating multi-GNSS real-time satellite clock offsets[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 72.
- [26] 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).
- [27] Dai Z Q, Dai X L, Zhao Q L, et al. Multi-GNSS real-time clock estimation using the dual-thread parallel method[J]. Advances in Space Research, 2018, 62(9): 2518-2528.
- [28] 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, 2018, 22(1): 16.
- [29] Gong X P, Gu S F, Lou Y D, et al. An efficient solution of real-time data processing for multi-GNSS network[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(7): 797-809.
- [30] Shi C, Guo S W, Gu S F, et al. Multi-GNSS satellite clock estimation constrained with oscillator noise model in the existence of data discontinuity [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(4): 515-528.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Liu T, Zhang B C, Yuan Y B, et al. An efficient undifferenced method for estimating multi-GNSS high-rate clock corrections with data streams in real time [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1435-1456.
- [34] Dai Z Q, Dai X L, Zhao Q L, et al. Improving real-time clock estimation with undifferenced ambiguity fixing[J]. GPS Solutions, 2019, 23(2): 1-12.
- [35] Yang X H, Gu S F, Gong X P, et al. Regional BDS satellite clock estimation with triple-frequency ambiguity resolution based on undifferenced observation [J]. GPS Solutions, 2019, 23(2): 1-12.
- [36] Li X X, Xiong Y, Yuan Y B, et al. Real-time estimation of multi-GNSS integer recovery clock with undifferenced ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(12): 2515-2528.
- [37] Zhao L W, Douša 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): 1-11.
- [38] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京: 测绘出版社, 1998.
- Wei Ziqing, Ge Maorong. Mathematical model of GPS relative positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Publishing House, 1998(in Chinese).
- [39] Tu R, Zhang H P, Ge M R, et al. A real-time ionospheric model based on GNSS Precise Point Positioning[J]. Advances in Space Research, 2013, 52(6): 1125-1134.
- [40] 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).
- [41] 牟春霖. 基于星间单差的 GNSS 实时精密卫星钟差估计[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
- Mu Chunlin. GNSS real time precise satellite clock error estimation based on single difference between satellites[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016(in Chinese).
- [42] 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).
- [43] 李星星. GNSS 精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- Li Xingxing. Rapid ambiguity resolution in GNSS precise point positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013(in Chinese).
- [44] 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).
- [45] 赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣, 等. 均方根信息滤波和平滑及其在低轨卫星星载 GPS 精密定轨中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2006, 31(1): 12-15.
- Zhao Qile, Liu Jingnan, Ge Maorong, et al. Applica-



- tions of square root information filtering and smoothing on orbit determination of LEO satellites with on board GPS data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(1): 12-15(in Chinese).
- [46] Yang Y X, He H B, Xu G H. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(2-3): 109-116.
- [47] Hutsell S T. Relating the Hadamard variance to MCS Kalman filter clock estimation[C]// *Proceedings of the 27<sup>th</sup> Annual Precise Time and Time Interval (PT-TI) Meeting*, 1996: 291-302.
- [48] 黄观文, 杨元喜, 张勤. 开窗分类因子抗差自适应序贯平差用于卫星钟差参数估计与预报[J]. *测绘学报*, 2011, 40(1): 15-21.  
Huang Guanwen, Yang Yuanxi, Zhang Qin. Estimate and predict satellite clock error using adaptively robust sequential adjustment with classified adaptive factors based on opening windows[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2011, 40(1): 15-21(in Chinese).
- [49] Huang G W, Zhang Q, Xu G C. Real-time clock offset prediction with an improved model[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(1): 95-104.