

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.013

一种顾及轨道误差的实时 GPS 钟差估计方法

谭 粤¹, 黄观文¹, 付文举², 王 乐¹, 谢 威¹, 曹 钰¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;
2. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 为了提高实时卫星钟差估计的精度和稳定性, 提出了一种顾及轨道误差的实时 GPS 钟差估计方法。基于超快速轨道产品, 分析了轨道标准差与绝对轨道误差的相关性。通过线性插值获得实时轨道误差信息, 以优化先验残差的随机模型。基于先验轨道标准差阈值, 采用分段方式剔除实时轨道异常卫星对应的观测值。实验结果表明: 轨道标准差和轨道误差的相关性高达 0.82。与常用的高度角相关的随机模型相比, GPS 卫星钟差估计精度最大提高了 15.2%, 平均提高了 8.1%, 钟差误差的时间序列更加平稳, 所有 GPS 卫星的平均钟差 STD 均在 0.15ns 以内。因此, 超快速轨道产品中提供的轨道标准差与绝对轨道误差表现出较强相关。采用顾及轨道误差的实时钟差估计方法可提高 GPS 卫星钟差估计精度, 准确识别并剔除 GPS 实时轨道异常的卫星, 从而提高 GPS 实时钟差估计的稳定性。

关键词: 随机模型; 轨道误差; 实时卫星钟差估计; GPS

中图分类号: P228; V324.2+4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2023)01-0125-08

A Real-Time GPS Clock Estimation Method Considering Orbital Error

TAN Yue¹, HUANG Guanwen¹, FU Wenju², WANG Le¹, XIE Wei¹, CAO Yu¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;
2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and stability of real-time clock offset estimation, a real-time GPS clock estimation method considering the orbital error is proposed. Based on the ultra-rapid orbit products, the correlation between the orbital standard deviation and the absolute orbital error is analyzed. The orbital error information is obtained by linear interpolation to optimize the stochastic model of prior residuals. Based on the prior orbital standard deviation threshold, the observation values corresponding to satellites with anomaly real-time orbit are eliminated by piecewise method. The experimental results show that the correlation between the orbit standard deviation and the orbit error is up to 0.82. Compared with the commonly used elevation dependent stochastic model, the maximum accuracy of GPS satellites clock offset estimation is increased by 15.2%, and the average accuracy is increased by 8.1%. The time series of clock offset error are stabler, and the average clock offset STD of all GPS satellites is within 0.15ns. Therefore, the orbital standard deviation provided in the ultra-rapid orbit products is strongly correlated

收稿日期: 2022-08-24; 修订日期: 2022-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (41731066); 国家重点研发计划 (2018YFC1505105)

作者简介: 谭粤 (1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事 GNSS 实时卫星钟差估计方面的研究。

通信作者: 付文举 (1987-), 男, 博士后, 主要从事 GNSS 精密钟差与精密定位方面的研究。

with the absolute orbital error. GPS satellites clock offset estimation can be improved with the clock estimation method considering the orbital error. The anomaly GPS real-time orbit satellites can be identified and eliminated accurately to improve the stability of GPS real-time clock offset estimation.

Key words: Stochastic model; Orbital error; Real-time satellite clock offset estimation; GPS

0 引言

实时精密单点定位 (Real-Time Precise Point Positioning, RT-PPP) 技术因其独特的优势,如可以单站作业、实时性强、模型简单、定位精度高、不受距离的限制等,目前广泛应用于低轨卫星精密定轨^[1]、地震监测^[2]和实时大气探测^[3]等领域。精密的实时卫星钟差产品是支持全球 RT-PPP 技术的先决条件之一,其精度和稳定性决定了定位服务性能。因此,获得实时、精密和稳定的卫星钟差产品一直是该领域的研究热点^[4-6]。国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 实时工作组于 2013 年 4 月正式通过实时数据流提供全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 轨道和钟差改正数。卫星原子钟受限于自身物理特性及太空环境因素,难以用数学模型对钟差进行准确建模预报^[7],实测钟差产品的 24h 预报精度约为 3ns^[8],远低于 IGS 建议的 0.3ns 钟差精度。因此,利用地面监测站网的实时观测数据估计卫星钟差是获得实时精密钟差的有效方法。

随机模型作为实时卫星钟差估计数学模型的重要组成部分,其准确性决定了实时钟差估计的精度和稳定性。王浩浩等采用高度角定权模型进行了 BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差估计^[9]。赵齐乐等基于高度角定权模型,估计了 BDS-2 和 GPS 的实时卫星钟差^[10]。Liu T. 等把伪距和载波分别为 0.3m 和 0.003m 的先验观测值精度加入高度角相关的定权模型中,通过实时数据流解算获得了四系统的实时钟差^[4]。谷守周等在进行 BDS/GPS 实时钟差融合估计时,将定轨时的卫星轨道精度信息加入定权模型中,一定程度上完善了定权模型^[11]。刘站科等利用定轨时的卫星轨道精度信息进行了多模 GNSS 实时钟差融合估计,进一步推广了此定权模型^[12]。在实时卫星钟差估计时,大多数钟差估计软件都是直接固定存在误差的预报卫星轨道,采用简单的与高度角相关的定权模型。然而,固定轨道后的残差模型不仅包含了观测误差,还存在轨道误差。不同卫星轨道的精度不同,且随着预报时长的增

加而降低。综上所述,只考虑观测值误差和卫星经验定轨误差的定权模型是不完善的,随着钟差估计时间的增加,会对实时钟差估计精度和稳定性造成不利影响。因此,本文基于 IGS 超快速 (IGS Ultra-rapid, IGU) 实时轨道文件提供的轨道标准差信息,提出了一种顾及轨道误差的实时 GPS 钟差估计方法,并设计了两个实验方案验证其有效性。本文首先介绍了实时卫星钟差估计函数模型,详细推导了顾及轨道误差的定权模型。然后,介绍了实验数据、处理策略和数据处理流程,并对实验结果进行了详细分析。最后,给出了本文的结论。

1 实时卫星钟差估计函数模型

本文采用非差无电离层 (Ionosphere-Free, IF) 组合模型实时估计卫星钟差, GPS 单系统实时钟差估计的函数模型如下

$$P_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + c(d_{r,IF} - d_{IF}^s) + m_r^s Z_r + e_{r,IF}^s \quad (1)$$

$$L_{r,IF}^s = \rho_r^s + c(t_r - t^s) + \lambda_{IF}(B_{r,IF} - B_{IF}^s) + \lambda_{IF} N_{r,IF}^s + m_r^s Z_r + \epsilon_{r,IF}^s \quad (2)$$

式中, $P_{r,IF}^s$ 和 $L_{r,IF}^s$ 分别为 IF 组合伪距和载波相位的观测值, s 代表卫星号, r 代表接收机编号; t_r 为接收机钟差, t^s 为卫星钟差; ρ_r^s 为从卫星到接收机的几何距离; c 为在真空中的光速; $d_{r,IF}$ 为接收机 IF 组合码硬件延迟, d_{IF}^s 为卫星 IF 组合码硬件延迟; $B_{r,IF}$ 为接收机 IF 未校正的相位延迟 (Uncalibrated Phase Delays, UPD), B_{IF}^s 为卫星 IF UPD; $N_{r,IF}^s$ 为 IF 载波相位模糊度; Z_r 为天顶对流层延迟; m_r^s 为对流层延迟投影函数; $e_{r,IF}^s$ 和 $\epsilon_{r,IF}^s$ 分别为伪距和载波相位 IF 组合的观测噪声。

在实时钟差估计时,常固定地面测站坐标和卫星轨道并计算其几何距离,然后从观测方程中移除。传播路径的对流层延迟误差采用经验模型对其干分量进行改正,残差部分首先计算映射函数,然后估计天顶对流层湿延迟。卫星和接收机码偏差通常和相应的钟差参数融合。UPD 被相位模糊度吸收。其他误差,如地球固体潮、海洋潮汐和极移潮改正,相对论延迟,相位缠绕,卫星和接收机相

位中心偏差和变化等,通过经验模型改正。简化后的函数模型如下

$$v_{r,IF}^s = c(\bar{t}_r - \bar{t}^s) + m_r^s Z_r + p_{r,IF}^s \quad (3)$$

$$v_{r,IF}^s = c(\bar{t}_r - \bar{t}^s) + \lambda_{IF} \bar{N}_{r,IF}^s + m_r^s Z_r + l_{r,IF}^s \quad (4)$$

式中, $\bar{t}_r = t_r + d_{r,IF}$ 表示融合后的接收机钟差; $\bar{t}^s = t^s + d_{IF}^s$ 表示融合后的卫星钟差; $\bar{N}_{r,IF}^s = N_{r,IF}^s + B_{r,IF} - B_{IF}^s + (d_{IF}^s - d_{r,IF})c/\lambda_{IF}$ 为浮点模糊度; $p_{r,IF}^s = P_{r,IF}^s - \rho_r^s$ 和 $l_{r,IF}^s = L_{r,IF}^s - \rho_r^s$ 分别为伪距观测和载波相位观测值的验前残差(Observed Minus Computed, OMC); $v_{r,IF}^s$ 和 $v_{r,IF}^s$ 为相应的验后残差。

本文采用序贯最小二乘平差方法进行实时卫星钟差估计,随着每个历元的测量更新和状态更新,估计的钟差将会逐渐收敛^[14]。当先验信息严密可靠时,实时序贯最小二乘估计具有无偏最优性^[15]。由于接收机钟差和卫星钟差线性相关,会导致法方程秩亏,因此选择一个参考钟来消除秩亏,计算的钟差都是相对于参考钟的相对钟差^[1]。当参考钟的精度优于 10^{-6} s 时,并不会影响用户的定位精度^[16]。

2 随机模型

2.1 基于高度角的随机模型

实时钟差估计随机模型常用高度角相关的定权模型^[10,14,17],具体公式如下

$$P = \begin{cases} \begin{cases} lc : \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{lc}^2} \\ pc : \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{pc}^2} \end{cases}, E > 30^\circ \\ \begin{cases} lc : \frac{\sigma_0^2}{\frac{\sigma_{lc}^2}{(2\sin E)^2}} \\ pc : \frac{\sigma_0^2}{\frac{\sigma_{pc}^2}{(2\sin E)^2}} \end{cases}, E \leq 30^\circ \end{cases} \quad (5)$$

式中, P 表示权值; lc 和 pc 分别表示载波相位观测值和伪距观测值的权; E 表示卫星高度角; σ_0 表示单位权中误差; σ_{lc} 和 σ_{pc} 分别表示载波相位和伪距观测值的精度。

2.2 顾及轨道误差的随机模型

设卫星位置为 (x_s, y_s, z_s) , 各分量不相关, 其坐标对应的精度为 $(\sigma_{x_s}, \sigma_{y_s}, \sigma_{z_s})$; 设测站坐标为 (x_r, y_r, z_r) , 其位置精确已知。则卫星到接收机的几何距离 ρ_{dis} 计算如下

$$\rho_{dis} = \sqrt{(x_s - x_r)^2 + (y_s - y_r)^2 + (z_s - z_r)^2} \quad (6)$$

由于 GPS 卫星到接收机的距离在 20000km 左右, 在线性化时可忽略高阶项的影响^[18], 只考虑一阶项的误差。把几何距离 ρ_{dis} 在卫星位置初值 (x_{s0}, y_{s0}, z_{s0}) 进行泰勒一阶展开可得

$$\rho_{dis} = \rho_0 + d\rho_{sp3} = \rho_0 + \frac{x_{s0} - x_r}{\rho_0} dx_s + \frac{y_{s0} - y_r}{\rho_0} dy_s + \frac{z_{s0} - z_r}{\rho_0} dz_s \quad (7)$$

式中

$$\rho_0 = \sqrt{(x_{s0} - x_r)^2 + (y_{s0} - y_r)^2 + (z_{s0} - z_r)^2}$$

$$dx_s = x_s - x_{s0}, dy_s = y_s - y_{s0}, dz_s = z_s - z_{s0}$$

$$\text{令 } \alpha = \frac{x_{s0} - x_r}{\rho_0}, \beta = \frac{y_{s0} - y_r}{\rho_0}, \gamma = \frac{z_{s0} - z_r}{\rho_0} \text{ 得}$$

$$d\rho_{sp3} = \alpha dx_s + \beta dy_s + \gamma dz_s \quad (8)$$

由协方差传播律可得几何距离 ρ_{dis} 的精度为

$$\sigma_{sp3} = \sqrt{\alpha^2 \sigma_{x_s}^2 + \beta^2 \sigma_{y_s}^2 + \gamma^2 \sigma_{z_s}^2} \quad (9)$$

综上所述, 结合 2.1 节, 顾及轨道误差的定权模型如下

$$P = \begin{cases} \begin{cases} lc : 0 \\ pc : 0 \end{cases}, \sigma_{sp3} > n\bar{\sigma} \\ \begin{cases} lc : \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{lc}^2 + \sigma_{sp3}^2} \\ pc : \frac{\sigma_0^2}{\sigma_{pc}^2 + \sigma_{sp3}^2} \end{cases}, E > 30^\circ, \sigma_{sp3} \leq n\bar{\sigma} \\ \begin{cases} lc : \frac{\sigma_0^2}{\frac{\sigma_{lc}^2}{(2\sin E)^2} + \sigma_{sp3}^2} \\ pc : \frac{\sigma_0^2}{\frac{\sigma_{pc}^2}{(2\sin E)^2} + \sigma_{sp3}^2} \end{cases}, E \leq 30^\circ, \sigma_{sp3} \leq n\bar{\sigma} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\bar{\sigma}$ 表示轨道内符合精度阈值的平均值; n 一般设置为 3.0~4.0。

当轨道内符合精度大于 $n\bar{\sigma}$, 则认为轨道的预报误差很大, 将会造成实时钟差估计精度低和不稳定。因此, 为了消除不利影响, 将观测权值设为 0, 即剔除该颗卫星对应的所有观测值, 最终得到的卫星钟差则不包含此颗卫星。在实时钟差估计时, 误差阈值可根据不同卫星系统的轨道预报精度进行确定。通过大量实验发现, IGU 轨道文件中 GPS 轨道内符合精度的平均值约为 0.015m, 本文 n 值取为 4.0, 因此当轨道内符合精度大于 0.06m 时, 则剔除该颗卫星。

3 实验分析

3.1 实验数据与处理策略

3.1.1 实验数据及轨道精度分析

本实验采用 IGS 发布的 6h 更新的超快速产品 IGU 轨道综合产品。IGU 轨道产品由不同 IGS 分析中心的超快速轨道综合而来,其中包含了 48h 的数据,前 24h 是实测产品,精度较高;后 24h 是预报产品,其精度随着预报时长增加而逐步降低,尤其是钟差产品^[19]。IGU 部分产品说明如表 1 所示^[20]。如图 1 所示,IGU 轨道文件中,第 1~5 列分别是卫星号, X、Y、Z 坐标和钟差信息;第 6~8 列分别是轨道 X、Y、Z 坐标的标准差,即为内符合精度。假设 x 为轨道坐标内符合精度表示的数值,那么相应的轨道坐标精度为 1.25^x , 单位 mm(<https://igs.org/formats-and-standards/>)。由于 IGU 实时轨道的采样间隔为 15min,且轨道内符合精度变化缓慢,因此本文通过线性插值得到实时轨道内符合精度信息。

表 1 IGS 发布的产品信息

Tab. 1 Products information published by IGS

产品类型	时间 延迟/h	轨道 精度/cm	钟差 精度/ns	采样 间隔/min
超快速实测	3~9	3	0.05	15
超快速预报	实时	5	1.5	15

```

* 2020 09 13 00 0.00000000
PG01 -17894.720129 -7790.735939 17930.262134 36.067121 6 8 6 185 P P
PG02 14322.744478 22384.546217 290.863655 -515.621615 8 3 8 228 P P
PG03 -17908.330941 4291.973101 19023.327787 -297.414827 8 6 6 218 P P
PG04 -26547.030634 -461.148952 -1245.810057 999999.999999 16 7 11 P P
PG05 7473.290932 15842.063452 -20064.104863 -20.966372 5 4 5 215 P P
PG06 3724.793432 23370.659085 12069.661787 -325.108392 8 7 8 221 P P
PG07 -11649.081900 10187.682402 -21216.023021 -371.216582 5 7 7 206 P P
PG08 -24113.434775 -6495.018499 -9411.871562 -47.753234 14 13 13 244 P P
PG09 -21035.378799 8598.408733 -12152.625184 -285.129766 12 8 9 208 P P
PG10 10932.258048 -23729.260935 4045.781992 -453.063514 8 3 6 236 P P
PG11 -23391.455969 -10685.429173 5384.506268 -165.994597 5 10 10 222 P P
PG12 17450.495585 -1739.337308 19666.847019 68.005367 10 11 7 202 P P
PG13 17496.591560 13163.920852 -15236.172268 44.724518 10 5 9 190 P P
PG15 24946.603844 4421.654524 -8918.137398 -204.082439 10 9 10 217 P P
PG16 -7412.683969 -14225.668071 -21298.815747 -208.322653 4 10 10 215 P P
PG17 -6266.663094 14188.434291 21983.866317 325.053405 6 5 5 225 P P
PG18 10811.474776 -11371.707969 -21437.346241 289.064675 8 9 9 225 P P
PG19 1845.616627 14808.945137 21685.246292 -105.680535 9 5 4 199 P P
PG20 15322.340921 -19820.052976 -8521.811454 526.756668 7 5 6 166 P P

```

图 1 IGU 轨道文件中的轨道内符合精度信息(部分)

Fig. 1 Orbit precision of inner coincidence in orbit file(Partial)

图 2 给出了 IGU 中的部分 GPS 卫星的轨道外符合精度和内符合精度时间序列,图中外符合精度表示以 IGS 事后精密轨道为参考得到的 IGU 轨道误差,内符合精度表示 IGU 轨道文件中给出的轨道标准差信息,两者都换算成距离表示。从图 2 可以看出,外符合精度和内符合精度的变化趋势相同。通过相关性分析,G15 的相关性高达 0.82,G24 为 0.50,都表现出较强相关。内符合精度信息可以在

一定程度上反映出外符合精度,因此采用 IGU 轨道文件中的内符合精度定权具有一定的合理性。

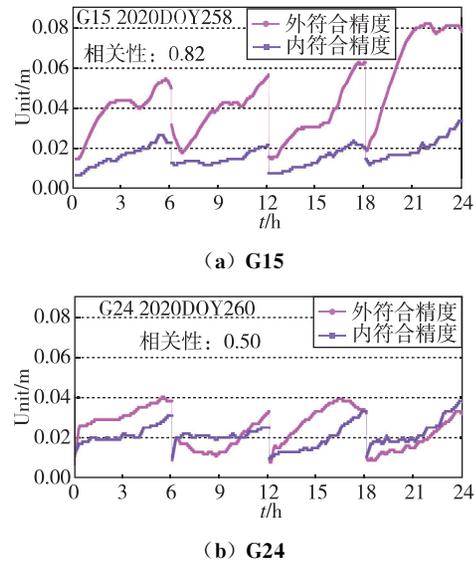


图 2 GPS 轨道外符合精度和内符合精度统计(部分)
Fig. 2 GPS orbit precision of external and inner coincidence (Partial)

图 3 给出了 G32 卫星在 2020 年积日(DOY) 261 的轨道外符合精度和内符合精度,可以看出,G32 卫星的轨道外符合精度很差,从相应的内符合精度信息可以反映出来。由上一节提及的轨道内符合精度阈值可知,G32 在 DOY261 天因为内符合精度大于 0.06m 被剔除。

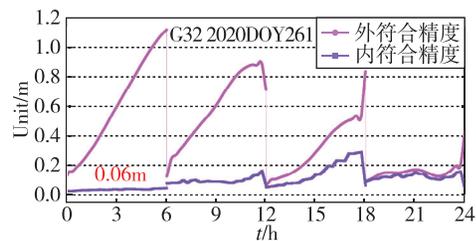


图 3 轨道精度阈值

Fig. 3 Orbital precision threshold

3.1.2 钟差估计策略及精度评定方法

本实验选用全球均匀分布的 68 个 MGEX(Multi-GNSS Experiment)测站。GPS 卫星可以被所有的测站实时跟踪。实验采集了 2020 年 9 月 13~17 日,年积日 257-261(DOY,Day of Year)的 30s 采样间隔的实时观测数据,利用事后仿实时估计 GPS 卫星钟差,其中 DOY 257 存在钟差收敛过程,故不统计 DOY 257 的钟差估计结果^[14]。

本实验设计了两个方案以验证本文提出的新的钟差估计策略的有效性,方案 1:采用常规的高度角相关的随机模型;方案 2:采用顾及轨道误差的随机模型。

本文采用团队自研事后仿实时钟差估计软件^[14,21],具体的实时钟差估计策略如表 2 所示,其中卫星钟差和接收机钟差作为白噪声进行估计,每个测站的天顶对流层延迟采用每小时分段常数估计,模糊度在一个连续的观测弧段内作为常数估计。

实验数据处理流程如图 4 所示。首先,对实时观测数据和轨道数据进行数据预处理,得到干净、不含粗差的数据。然后,用线性插值计算卫星的内符合精度,并判断该颗卫星的内符合精度是否满足阈值,如果不满足,则剔除该颗卫星;如果满足,则采用顾及轨道精度定权计算该颗卫星观测值的权值。最后进行实时钟差估计。

表 2 实时钟差估计策略

Tab. 2 Real-time clock estimation strategy

项目	参数	处理策略
观测量	载波和伪距	非差无电离层载波相位和伪距观测值
	观测精度	伪距 0.6m,载波 0.01 周 ^[12]
	定权方法	方案 1、方案 2
	截至高度角	7°
误差改正	卫星天线相位中心和变化	igs14_2118.atx ^[22]
	接收机天线相位中心和变化	igs14_2118.atx ^[22]
	潮汐改正	固体潮、海洋潮汐、极移潮,模型改正:IERS 2010 ^[23]
	相位缠绕	模型改正 ^[24]
	相对论效应	模型改正 ^[23] ;IERS 2010
电离层延迟	双频无电离层组合改正	
参数估计	参考钟	固定一个接收机钟(MGUE)
	卫星轨道	固定,IGU 6h 更新的超快速轨道
	测站坐标	固定,IGS 周解
	接收机钟差	估计,白噪声
	卫星钟差	估计,白噪声
	对流层延迟	Saastamoinen 模型加 GMF 映射函数改正,分段常数估计(2h)
	相位模糊度	浮点解,每个连续弧段为 1 个常数
	估计方法	序贯最小二乘估计

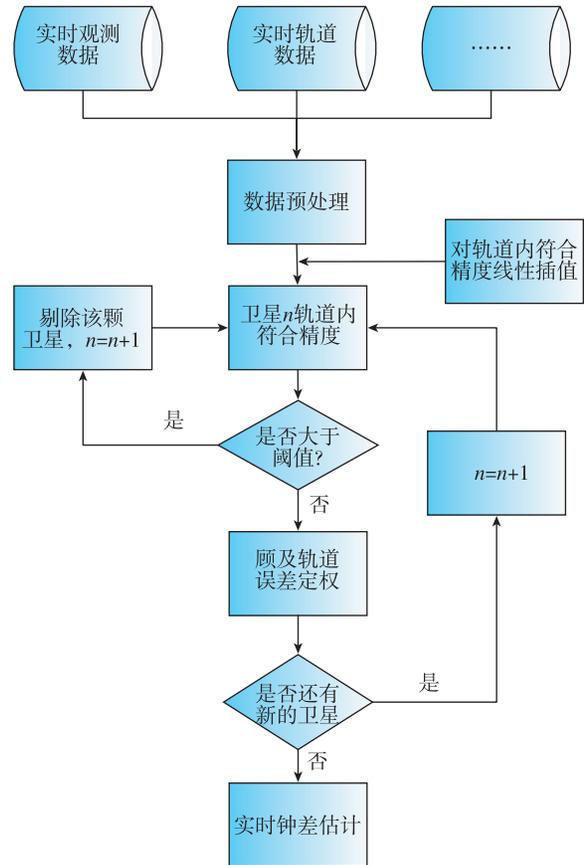


图 4 数据处理流程图

Fig. 4 Data processing flow chart

为了验证本文提出方案的可行性,本文选用 IGS 事后精密钟差产品评估两种方案的钟差估计精度。IGS 事后精密钟差产品由多家 IGS 分析中心的事后精密产品综合得到,其产品稳定且精度高,精度优于 0.02ns,因此可以客观地评估两种方案估计的钟差精度^[20]。钟差的标准差(Standard Deviation, STD)可以反映实时估计的钟差精度,这将会直接影响 RT-PPP 的定位精度^[25]。与选取特定卫星钟作为参考钟不同,本文选用虚拟钟(即所有卫星重心基准)作为参考钟,消除不同钟差产品的系统偏差,可以有效避免因为选取了较大误差的特定参考钟计算得到有偏差的 STD 值^[16,26]。

3.2 实验结果分析

假设单位权中误差为伪距观测值精度,即 $\sigma_0 = 0.6m$,则当高度角大于 30°时,方案 1 的伪距观测值权值为 1.0,载波相位观测值权值为 90000.0,且一直保持不变。在采用方案 2 的定权方式后,ABMF 测站可观测的部分卫星轨道误差和载波相位观测值的权值如图 5 所示。从图 5(a)可以看出,

G32 的轨道误差最大;对应图 5(b)G32 的载波相位观测值权值最小。因此,采用方案 2 后,当时轨道误差增大时,对应的观测值权值将会降低,一定程度上纠正了轨道误差大造成的随机模型偏差。

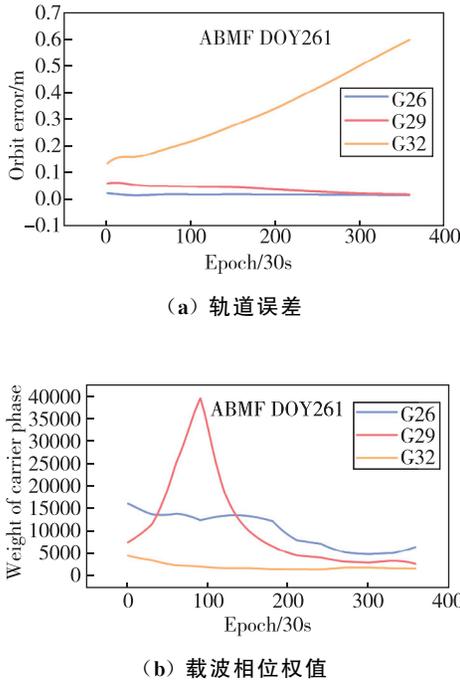


图 5 ABMF 测站可观测的部分卫星

Fig. 5 The part of satellites that can be observed by the ABMF station

GPS 实时卫星钟差在 2020 DOY258-261 的平均钟差 STD 统计如表 3 所示。从表 3 可以得出,方案 1 的所有卫星平均钟差 STD 为 0.086ns,方案 2 为 0.079ns,方案 2 比方案 1 整体精度提升了 8.1%。在 DOY261 卫星平均钟差 STD 提升最大,提升了 15.2%。

表 3 每天钟差平均 STD

Tab. 3 Average daily clock STD ns

DOY	258	259	260	261	平均
方案 1	0.079	0.073	0.079	0.112	0.086
方案 2	0.076	0.071	0.075	0.095	0.079
提升	3.8%	2.7%	5.1%	15.2%	8.1%

图 6 统计了每天所有卫星的钟差 STD 平均值,可以看出,在前 3 天(DOY258-260)方案 2 因为采用了顾及轨道误差的定权模型,改进了目前常用的高度角定权模型,钟差估计精度比方案 1 都有所提高,平均提高了 3.9%;其中 DOY260 提升较明显,提升了 5.1%。图 7 所示为 G19 卫星在 DOY260 的钟

差估计误差时间序列,可以看出,方案 1 的钟差误差波动较大,而方案 2 在采用新的定权模型后,钟差误差表现平稳,特别是在 12 点之后;前者的钟差 STD 为 0.075ns,后者为 0.036ns,精度提升了 52.0%。在 DOY261 因为剔除了 G32 一部分轨道预报误差较大的弧段,因此整体的钟差估计精度提升最大,提升了 15.2%。

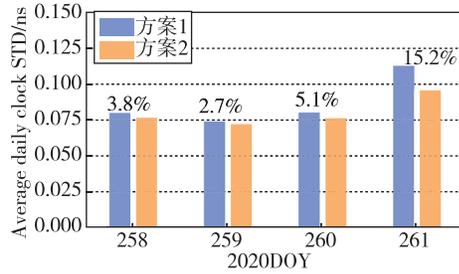


图 6 每天的平均钟差 STD 精度

Fig. 6 Average daily clock STD

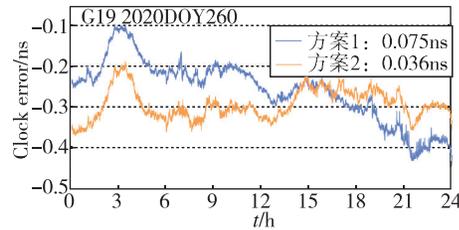


图 7 G19 卫星在 DOY260 的钟差误差时间序列

Fig. 7 Clock error time series of G19 on DOY260

GPS 每颗卫星在 2020 DOY258-261 的平均钟差 STD 统计如图 8 所示。其中,由于 G32 卫星在 DOY261 的轨道误差很大,采用方案 1 的钟差估计策略时,G32 的平均钟差精度超过了 0.25ns,误差较大。在采用方案 2 后,成功剔除了一部分轨道较差的弧段,使得 G32 卫星的钟差估计精度维持在正常水平,钟差估计精度提升了 48.2%,所有卫星的钟差估计精度都在 0.15ns 以内。除 G32 卫星外,其他卫星钟差估计得益于采用了顾及轨道误差的随机模型,钟差估计精度有不同程度的提升,其中 G16 卫星提升幅度最大,提升了 25.7%。由于轨道文件中的轨道精度信息变化相对缓慢,且存在少数卫星的轨道误差增大但是内符合精度变小的情况,如 G09 和 G12 等,造成定权模型存在一定偏差,因此有的卫星钟差估计精度有一定降低^[27]。特别对于轨道预报精度已经较高的卫星,如 G11 和 G13 等,由于实验采用的是模糊度浮点解,钟差估计模型本身存在一定偏差,因此两种方案的钟差精度差

异在合理范围之内。但总的来说,钟差估计精度是有一定提高的。

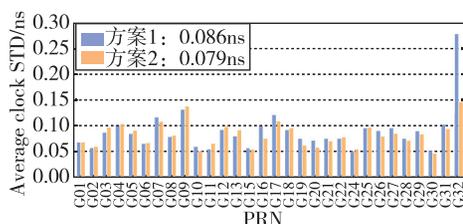


图 8 每颗卫星的平均钟差 STD

Fig. 8 Average clock STD of every satellite

4 结论

本文提出了顾及轨道误差的实时钟差估计策略。首先利用 IGU 综合轨道的内符合精度信息,通过线性插值得到每颗卫星的实时轨道内符合精度,然后按照一定数学模型将其融入到常用的高度角定权模型中,并根据内符合精度阈值,剔除了轨道内符合精度超限的卫星。研究结果表明:

1)超快速轨道产品中提供的轨道标准差与绝对轨道误差表现出较强相关,把轨道标准差视为轨道误差融入定权模型具有一定合理性;

2)顾及轨道误差的定权模型可以完善常用的高度角定权模型,整体提高了实时钟差估计精度,当卫星轨道预报异常时能有效识别并剔除;

3)与常用的高度角定权模型相比,采用顾及轨道误差建模的钟差估计方法,在 2020 DOY258-261,GPS 卫星钟差估计精度最大提升 15.2%,平均提升 8.1%;

4)通过轨道内符合精度阈值成功剔除了一部分轨道较差的弧段,使得 G32 卫星的钟差估计精度保持在一个正常水平。

参考文献

- [1] Yang Z, Liu H, Qian C, et al. Real-time estimation of low earth orbit (LEO) satellite clock based on ground tracking stations[J]. Remote Sensing, 2020, 12(12): 2050.
- [2] Zhang X, Li X, Guo F. Satellite clock estimation at 1Hz for realtime kinematic PPP applications[J]. GPS Solutions, 2010, 15(4): 315-324.
- [3] Li X, Dick G, Ge M, et al. Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 41(10): 3615-3621.
- [4] Liu T, Zhang B, Yuan Y, 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.
- [5] Li X, Xiong Y, Yuan Y, et al. Real-time estimation of multi-GNSS integer recovery clock with undifferenced ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(12): 2515-2528.
- [6] Xie W, Huang G, Fu W, 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.
- [7] 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).
- [8] 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.
Hang 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(in Chinese).
- [9] 王浩浩, 黄观文, 付文举, 等. BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差的性能分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 61-67.
Wang Haohao, Huang Guanwen, Fu Wenju, et al. Performance analysis of BDS-2/BDS-3 real-time satellite clock offset joint estimation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 61-67(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] 谷守周, 施闯, 党亚民, 等. 顾及轨道误差 BDS/GPS 实时钟差融合估计的观测权函数设计[J]. 测绘学报, 2016, 45(S2): 39-45.
Gu Shouzhou, Shi Chuang, Dang Yamin, et al. Observation weight function design for fusing BDS/GPS data to estimate the real-time clock with regard to the orbit errors[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(S2): 39-45(in Chinese).
- [12] 刘站科, 李国鹏, 张涛, 等. 顾及轨道误差的 GNSS 卫星钟差实时估计策略优化[J]. 导航定位与授时,

- 2020, 7(5): 21-27.
- Liu Zhanke, Li Guopeng, Zhang Tao, et al. Strategy optimization of GNSS satellite clock offset real-time estimation considering the orbit error[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(5): 21-27(in Chinese).
- [13] 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: Survey and Mapping Publishing House, 1998(in Chinese).
- [14] 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*, 2018, 93(7): 963-976.
- [15] 杨元喜, 何海波. GPS 动态测量中模糊度实数解的序贯最小二乘估计[J]. *测绘科学与工程*, 2005, 25(1): 1-4.
- Yang Yuanxi, He Haibo. Sequential least squares estimator for solving ambiguity of kinematic GPS phase measurement[J]. *Geomatic Science and Engineering*, 2005, 25(1): 1-4(in Chinese).
- [16] Yao Y, He Y, Yi W, et al. Method for evaluating real-time GNSS satellite clock offset products[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1417-1425.
- [17] Zuo X, Jiang X, Li P, et al. A square root information filter for multi-GNSS real-time precise clock estimation[J]. *Satellite Navigation*, 2021, 2(1): 1-14.
- [18] 薛树强, 杨元喜, 党亚民. 测距定位方程非线性平差的封闭牛顿迭代公式[J]. *测绘学报*, 2014, 43(8): 771-777.
- Xue Shuqiang, Yang Yuanxi, Dang Yamin. A closed-form of Newton iterative formula for nonlinear adjustment of distance equations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(8): 771-777(in Chinese).
- [19] El-Mowafy A, Deo M, Kubo N. Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections[J]. *GPS Solutions*, 2016, 21(3): 937-947.
- [20] 王浩浩. 北斗/GNSS 实时卫星钟差估计方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- Wang Haohao. Research on BeiDou/GNSS real-time satellite clock offset estimation[D]. Xi'an: Chang'an University, 2021(in Chinese).
- [21] Fu W, Yang Y, 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.
- [22] Rothacher M, Schmid R. 2010 ANTEX: the antenna exchange format, Version 1.4[DB/OL]. [2010-09-15]. [2015-03-01]. <ftp://igs.ign.fr/pub/igs/igs/scb/station/general/antex14.txt>.
- [23] Petit G, Luzum B. The IERS Conventions (2010) [C]// Proceedings of EGU General Assembly, 2011.
- [24] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. *Manuscr Geod*, 1993, 18(2): 91-98.
- [25] Zhang W, Lou Y, Gu S, et al. Joint estimation of GPS/BDS real-time clocks and initial results[J]. *GPS Solutions*, 2015, 20(4): 665-676.
- [26] 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.
- [27] 段兵兵, 兰孝奇. IGS 精密卫星轨道精度分析[J]. *工程勘察*, 2012, 40(2): 63-65+80.
- Duan Bingbing, Lan Xiaoqi. Precision analysis of IGS satellite orbit[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2012, 40(2): 63-65+80(in Chinese).

(编辑:黄利华)