

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.03.012

# 面向导航增强的低轨卫星钟差确定及预报方法研究

王锦乾<sup>1,2,3</sup>, 武美芳<sup>1,2,3</sup>, 王侃<sup>1,2,3</sup>, 刘嘉伟<sup>1,3</sup>, 杨旭海<sup>1,2,3</sup>, 邹敏<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 时间基准及应用重点实验室(中国科学院), 西安 710600)

**摘要:** 低轨导航增强是未来导航发展的重要趋势, 而高精度低轨卫星钟差是实现低轨导航增强的必要条件。基于 Sentinel-6A 卫星, 对低轨卫星钟差特性进行了分析, 给出了钟差确定方法及影响因素, 介绍了顾及钟差特性的低轨卫星钟差预报方法。实验表明, 低轨卫星钟差含有多个周期项, 给低轨卫星建模和预报带来了困难。与使用运动学定轨模型相比, 基于简化动力学的定轨模型可显著提升低轨卫星钟差精度; 当基于运动学模型确定低轨卫星钟差时, 相较于使用 GPS 单系统数据, 多 GNSS 观测数据可提升低轨卫星钟差精度。研究表明, 基于 GPS 和 Galileo 观测的 Sentinel-6A 卫星钟差精度相较于 GPS 单系统钟差精度改善了 36%, 同时, 所使用的 GNSS 产品精度与低轨卫星钟差精度密切相关。利用顾及卫星钟差特性的低轨卫星钟差预报方法, 当预报时长小于 1 min, 低轨卫星钟差预报精度(预报与解算值之差的 RMSE)在 0.1 ns 之内, 当预报时长小于 5 min, 预报精度在 0.3 ns 之内, 随着预报时长的增长, 预报精度显著下降。

**关键词:** 低轨卫星; 钟差确定; 钟差预报; GNSS; Sentinel-6A

中图分类号: V11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)03-0119-09

## A study of LEO satellite clock determination and prediction for navigation augmentation

WANG Jinqian<sup>1,2,3</sup>, WU Meifang<sup>1,2,3</sup>, WANG Kan<sup>1,2,3</sup>, LIU Jiawei<sup>1,3</sup>, YANG Xuhai<sup>1,2,3</sup>, ZOU Min<sup>1,2,3</sup>

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Time Reference and Applications, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** Augmentation with low Earth orbit (LEO) satellites has become a hot topic in future positioning, navigation and timing services, and high-precision LEO satellite clock product is an essential condition for the realization the LEO-augmentation. Using the data from the Sentinel-6A satellite, this paper analyzed its clock characteristics, explained the clock determination method and influencing factors, and introduced an LEO satellite clock prediction method that considers the clock characteristics. Experiments show that the LEO satellite clocks contain multiple periodic terms, which brings difficulties to clock modeling and prediction. Compared with the case using the kinematic precise orbit determination (POD) model, the reduced-dynamic POD model can significantly improve the LEO satellite clock precision. In the case of using the kinematic POD mod-

收稿日期: 2023-11-23; 修订日期: 2024-02-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(1200304124); 陕西省重点研发计划(2022GY-099)

作者简介: 王锦乾(2000—), 男, 硕士, 主要从事 LEO/GNSS 精密数据处理等方面的研究。

通信作者: 武美芳(1985—), 女, 高级工程师, 主要从事 LEO/GNSS 精密数据处理, 高精度授时等方面的研究。

el, the multi-GNSS scenario delivers better LEO satellite clock precision than the GPS-only scenario. The research result shows that Sentinel-6A satellite clock accuracy based on GPS and Galileo observation is improved by 36% compared with GPS single system clock error accuracy. The precision of the LEO satellite clocks is also found to be closely related to that of the GNSS products used. Using the LEO satellite clock prediction method that considers the satellite clock characteristics, the RMSE of the predicted and estimated clocks is within 0.1 ns and 0.3 ns, respectively, for a prediction time shorter than 1 min and 5 min. The prediction precision degrades significantly with the increasing prediction time.

**Key words:** Low Earth orbit (LEO) satellite; Clock determination; Clock prediction; Global navigation satellite system (GNSS); Sentinel-6A

## 0 引言

在我国,北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)于2020年完成建设,标志着我国卫星导航系统应用进入新的篇章。但是随着BDS的广泛应用,以其为代表的全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的不足也逐渐凸显:当前GNSS处于难以使用某一种特定的导航技术解决全部服务需求的困境<sup>[1]</sup>。首先,在高精度定位定时方面,依托中高轨导航卫星的精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术收敛时间较长,无法满足某些高实时性高精度应用场景,例如智能驾驶等;其次,中高轨卫星导航信号落地功率低,容易受到干扰<sup>[2]</sup>。因此,低轨卫星导航增强受到了世界卫星导航领域的关注和青睐,有望成为新一代卫星导航系统发展的新增量。我国积极布局低轨星座建设,相继部署了“鸿雁”、“虹云”等低轨导航增强星座,以增强BDS的定位、导航和授时(positioning, navigation and timing, PNT)服务性能<sup>[3]</sup>。在低轨导航增强系统中,无论是地面用户利用低轨信号进行定位授时,或是低轨星座本身需要建立和维持时间基准,都离不开低轨卫星精密钟差产品。因此,低轨卫星精密钟差产品是低轨导航增强系统融合GNSS提供高性能PNT服务的前提。

与中高轨卫星相比,低轨卫星钟差确定及预报研究面临更大的挑战。首先,低轨卫星常搭载高精度晶振,其性能与GNSS星载钟相比,相差1~2个量级<sup>[4]</sup>;其次,低轨卫星所受到的温度、相对论效应等外界影响明显复杂于中高轨卫星,且不同轨道高度的低轨卫星钟差呈现截然不同的周期性现象。因此,低轨卫星钟差必须近实时确定,且充分考虑钟差特性、温度及相对论效应等各种因素进行高精

度预报。

近年来,随着越来越多的低轨星座建成,国内外学者和各大机构纷纷针对导航增强的需求,对低轨卫星钟差展开研究。对于低轨卫星钟差参数的确定,通常利用GNSS观测数据,依托简化动力学或运动学定轨模型将卫星轨道与钟差一并解算<sup>[5]</sup>。通常利用简化动力学模型可以将精密定轨过程中的动力学参数与钟差参数作为最小二乘法平差的结果一同求解<sup>[6]</sup>。周星宇等<sup>[7]</sup>提出解算钟差时,在相邻历元间增加随机游走约束,改善钟差确定的精度。王侃等<sup>[8]</sup>在运动学模型下进行低轨卫星钟差建模,并且利用卡尔曼滤波的方法解算卫星轨道和钟差参数。此外,使用不同GNSS钟差产品也会对低轨卫星钟差和轨道结果带来影响<sup>[9]</sup>,考虑到低轨卫星钟差确定利用的GNSS观测数据计算中包含GNSS接收机和天线的硬件偏差,钟差确定结果还需要进一步校准<sup>[10]</sup>。

随着实时应用需求的不断增长,只有高精度的低轨卫星事后钟差产品是不够的,因此能够获得实时低轨卫星钟差产品的钟差预报方法同样值得研究。围绕低轨卫星钟差预报,葛海波等<sup>[11]</sup>利用最小二乘谐波估计建立了低轨卫星钟差多项式周期项模型,王侃等<sup>[12]</sup>分析了低轨卫星钟差预报的影响因素,武美芳等<sup>[13]</sup>分析了相对论效应对低轨卫星钟差预报的影响。

综上所述,针对低轨卫星钟差的研究应基于低轨卫星钟差的特性,在分析低轨卫星钟差特性的基础上,基于低轨卫星的近实时钟差确定结果,进一步研究低轨卫星钟差预报。但是,目前关于近实时低轨卫星钟差确定及预报,尤其是基于多系统GNSS数据进行的低轨卫星钟差确定及预报的研究甚少,并没有将上述3个因素有效结合起来。因此,

本文将围绕低轨卫星钟差特性、近实时低轨卫星钟差确定以及钟差预报 3 个方面,对低轨卫星钟差展开较为全面的研究和分析。

## 1 低轨卫星钟差特性分析

相较于中高轨卫星,低轨卫星定轨面临更为复杂的大气阻力效应和地球非球形引力场影响;同时,由于距离地球更近,低轨卫星中的相对论效应更加复杂,星钟参数中所含的硬件延迟受温度影响较大,因此求解得到的低轨卫星钟差稳定度以及钟差预报精度也将受到影响。低轨卫星常搭载晶振用于授时,例如,Sentinel 系列卫星搭载的超稳晶振(ultra-stable oscillator, USO)具有良好的短期稳定性,短期稳定度可达  $10^{-13}$  量级<sup>[14]</sup>。但是,由于求解的低轨卫星钟差受到相对论效应、温度等各类因素影响,其稳定性受到了强烈干扰,淹没了 USO 本身短期稳定性的优势。

Sentinel-6A 卫星是美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和欧洲航天局(European Space Agency, ESA)合作研发的一个监测卫星,其星载 GNSS 接收机可接收 GPS 及欧洲伽利略卫星导航系统(Galileo satellite navigation system, Galileo)双系统载波相位及伪距观测,用于提供全球海平面连续性观测服务<sup>[15]</sup>。Sentinel-6A 于 2020 年 11 月 21 日发射,轨道高度约 1 336 km,倾角约  $66^\circ$ ,2022 年 2 月轨道周期约 1.9 h<sup>[16]</sup>。本章以低轨卫星 Sentinel-6A 在 2022 年 2 月 7 日的卫星钟差为例,对低轨卫星钟差特性进行分析。

图 1 展示了 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月 7 日的钟差时间序列,该钟差序列基于星载 GPS 观测数

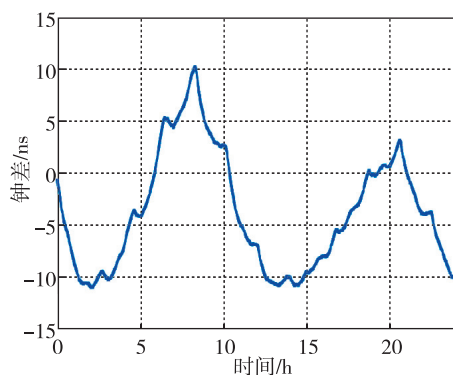


图 1 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月 7 日的钟差时间序列  
Fig. 1 Sentinel-6A satellite clock errors time sequence on February 7, 2022

据和欧洲定轨中心(Center for Orbit Determination in Europe, CODE)提供的 GNSS 精密轨道与钟差产品<sup>[17]</sup>,利用简化动力学定轨模式,通过批量最小二乘法生成。由图 1 可知,Sentinel-6A 的卫星钟差有较明显的周期项。通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT),如图 2 所示,Sentinel-6A 的卫星钟差包含多个周期项,包括最显著的 12 h 长周期项,6 h 和 8 h 的中长周期项以及约 1.9 h 的短周期项。

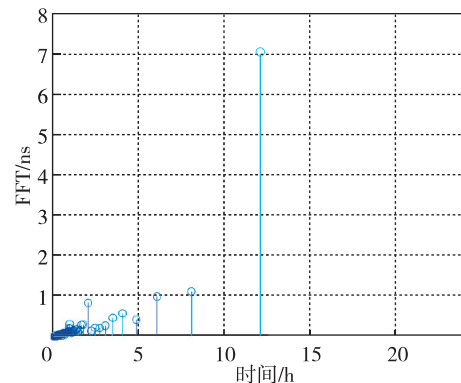


图 2 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月 7 日钟差序列 FFT 结果  
Fig. 2 FFT results of the Sentinel-6A satellite clock errors on February 7, 2022

在所有的周期项中,与低轨卫星轨道周期有关的周期项有一周一次(1/rev)和一周两次(2/rev),其幅度约为 0.75 ns 和 0.25 ns。12 h,8 h,6 h 周期项的幅度分别可达 7.2 ns,1.1 ns,0.96 ns。低轨卫星钟差的中长期周期项,可能与温度、海洋潮汐的影响有关,目前成因尚无确切结论<sup>[12]</sup>。然而,低轨卫星钟差所包含的周期项为卫星钟差的确定和预报带来了一定难度,需要在低轨卫星钟差预报的研究中,将该特性一并考虑。

## 2 低轨卫星钟差确定

低轨卫星钟差确定通常依托简化动力学或运动学定轨模式。简化动力学模式若与批量最小二乘法相结合,可获得更高精度的低轨卫星钟差和轨道。运动学模型结合卡尔曼滤波可以获得更高的运算效率,以提供时效性更强的低轨卫星钟差与轨道产品。两种模式的基础均为 GNSS 原始观测方程,因此,本文将从 GNSS 观测方程入手,给出两种模式下的低轨卫星钟差确定算法。

低轨卫星所接收到的星载 GNSS 原始伪距及载波相位方程可表示为

$$P_i^s = \rho_i^s + c(dt_r - dt_s) + I_i^s + d_i^s - d_{r,i} + \epsilon_{i,p} \quad (1)$$

$$L_i^s = \rho_i^s + c(dt_r - dt_s) + \lambda_i^s(N_i^s + b_{r,i} - b_i^s) - I_i^s + \epsilon_{i,L} \quad (2)$$

其中,  $P_i^s$  与  $L_i^s$  代表原始伪距和载波相位的观测值; 下角标  $i$  表示频率;  $c$  表示真空中的光速;  $dt_r$  与  $dt_s$  分别表示低轨卫星接收机和 GNSS 卫星钟差;  $I_i^s$  为电离层延迟;  $d_i^s$  与  $d_{r,i}$  分别是 GNSS 卫星和低轨接收机的伪距硬件延迟;  $\lambda_i^s$  是载波相位的波长;  $N_i^s$  是载波相位模糊度;  $b_{r,i}$  与  $b_i^s$  分别是低轨接收机和 GNSS 卫星的载波相位硬件延迟;  $\epsilon_{i,p}$  与  $\epsilon_{i,L}$  分别是伪距和载波相位观测值的测量噪声和多路径效应等。其他可被建模改正的误差项, 如相位缠绕、潮汐影响、相位中心偏差及变化等不再在等式(1)和(2)中具体描述。

## 2.1 低轨卫星钟差确定方法

### 2.1.1 基于运动学定轨模式的低轨卫星钟差确定

基于运动学定轨模式的低轨卫星钟差确定, 原理类似于 PPP, 采用无电离层组合 (ionosphere-free, IF) 的伪距和载波相位观测值进行低轨卫星钟差确定。与地面用户所进行的 PPP 不同的是, 低轨卫星所接收到的星载 GNSS 信号不经过对流层, 因此不需要考虑对流层延迟的影响。无电离层组合后的伪距和载波相位观测值与模型值之差 (observed minus computed term, O-C 项) 可以表示为

$$P_{IF} = A_x \Delta \mathbf{r}_K + c \bar{d}_r + \epsilon_{P_{IF}} \quad (3)$$

$$L_{IF} = A_x \Delta \mathbf{r}_K + c \bar{d}_r + \lambda \bar{N}_{IF} + \epsilon_{L_{IF}} \quad (4)$$

其中

$$\Delta \mathbf{r}_K = [\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z] \quad (5)$$

$$\lambda_{IF} = \frac{c}{f_1 + f_2} \quad (6)$$

$$\bar{N}_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 N_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 N_2 + \frac{-d_{r,IF} + b_{r,IF} - b_{IF}^s}{\lambda_{IF}} \quad (7)$$

其中,  $P_{IF}$  和  $L_{IF}$  分别为 IF 组合的伪距和相位观测值 O-C 项;  $f_1$  和  $f_2$  分别表示频率 1 和频率 2 的频率值;  $A_x$  为观测值对于轨道坐标的偏导;  $\Delta \mathbf{r}_K$  为基于初始轨道的改正向量;  $\Delta r_x, \Delta r_y, \Delta r_z$  分别表示低轨卫星位置在  $x, y, z$  方向上的增量;  $\bar{d}_r$  表示含接收机 IF 伪距硬件延迟 ( $d_{r,IF}$ ) 的接收机钟差。此处认为 GNSS 卫星的 IF 伪距硬件延迟已包含在 GNSS 卫星钟差产品中, 可根据具体使用的伪距双频观测值类型, 选择性地对差分码偏差改正。

### 2.1.2 基于简化动力学定轨模式的低轨卫星钟差确定算法

低轨卫星的精密轨道计算通常使用简化动力学模型, 通过星载 GNSS 观测, 求解改善一系列动力学参数, 并通过随机加速度或随机速度脉冲弥补动力学模型的不足, 实现高精度定轨, 钟差参数则与轨道参数一同求解。简化动力学定轨模式中, 基于初始轨道的改正数与运动学定轨模式不同, 可以表示为

$$\Delta \mathbf{r}_{RD} = [\Delta K_0, \Delta P_D, P_S]^T \quad (8)$$

其中,  $\Delta K_0$  表示初始状态下的开普勒六根数;  $\Delta P_D$  表示额外的动力学参数 (如太阳辐射压参数);  $P_S$  为随机加速度。

## 2.2 低轨卫星钟差确定影响因素分析

### 2.2.1 基于多系统 GNSS 的低轨卫星钟差确定

GNSS 观测量作为低轨卫星钟差确定的必要条件之一, 其特性、质量与低轨卫星钟差解算结果强相关。对于运动学定轨模式来说, 使用多系统 GNSS 数据可以通过更多的观测量增强观测模型强度, 从而提高低轨卫星钟差的精度<sup>[18]</sup>, 在卡尔曼滤波解算方法下也可提升钟差解算的收敛速度。另一方面, 由于观测模型的增强, 多系统 GNSS 有利于降低求解参数对于粗差或数据缺失的敏感度。但是, 利用多系统 GNSS 观测数据求解时, 实时 GNSS 星钟产品对不同系统往往提供不同的时间基准, 需要针对不同系统估计低轨卫星接收机钟差。例如, 利用 GPS 和 Galileo 多系统观测数据确定低轨卫星钟差时, Galileo 观测方程为

$$P_{IF}^E = A_x^E \Delta \mathbf{r}_K + c \bar{d}_r^E + \epsilon_{P_{IF}}^E \quad (9)$$

$$L_{IF}^E = A_x^E \Delta \mathbf{r}_K + c \bar{d}_r^E + \lambda \bar{N}_{IF}^E + \epsilon_{L_{IF}}^E \quad (10)$$

其中,  $P_{IF}^E$  和  $L_{IF}^E$  分别为 Galileo 系统的 IF 组合的伪距和载波相位观测值 O-C 项;  $A_x^E$  是 Galileo 的观测值对于轨道坐标的偏导;  $\bar{d}_r^E$  表示含接收机对应 Galileo 信号的 IF 伪距硬件延迟的接收机钟差;  $\bar{N}_{IF}^E$  表示 Galileo 观测的 IF 组合整周模糊度;  $\epsilon_{P_{IF}}^E$  与  $\epsilon_{L_{IF}}^E$  分别是 Galileo 的伪距和载波相位观测值的测量噪声和多路径效应等。

### 2.2.2 基于不同 GNSS 产品的低轨卫星钟差确定

GNSS 卫星轨道与钟差产品是低轨卫星钟差确定的一个必要条件。国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 等机构提供的轨道及钟差产品可分为最终产品、快速产品、超快速产品及实时产品<sup>[19]</sup>, 各类产品精度和滞后时间均不同。

根据不同的应用场景,低轨卫星钟差确定时可选择不同的 GNSS 卫星产品。因此,需要考虑不同 GNSS 卫星产品对低轨卫星钟差确定精度的影响。

本文利用 CODE 提供的最终精密钟差产品和法国国家空间研究中心(National Centre for Space Studies, CNES)<sup>[20]</sup>实时产品进行低轨卫星钟差确定并比较分析。低轨卫星钟差比较时,采用二次差方法,以去除不同钟差基准的影响<sup>[21]</sup>。公式表示如式(11)

$$\Delta t_i^{\text{ref}} = \sum_{s=1}^{m_i} \frac{(t_i^{s1} - t_i^{s2})}{m_i}$$

$$\Delta \nabla t_i^{s, \text{leo}} = t_i^{s, \text{leo}} - t_{0i}^{s, \text{leo}} - t_i^{\text{ref}} \quad (11)$$

其中,  $\Delta t_i^{\text{ref}}$  表示第  $i$  个历元一次差的均值,该值将作为二次差计算的参考时钟;  $m_i$  是该历元 GNSS 卫星个数;  $t_i^{s1}$  与  $t_i^{s2}$  分别表示 GNSS 不同产品在该历元的钟差;  $t_i^{s, \text{leo}}$  与  $t_{0i}^{s, \text{leo}}$  表示该历元估计的低轨卫星钟差和参考低轨卫星钟差;  $\Delta \nabla t_i^s$  表示第  $i$  个历元的二次差结果。

### 3 低轨卫星钟差预报

无论采用哪种方法确定低轨卫星钟差,钟差产品都存在一定的滞后性。因此,为获得实时低轨卫星钟差产品需要对低轨卫星钟差进行短期预报。

基于低轨卫星钟差特性分析,使用多项式加周期项模型拟合,将低轨卫星钟差描述为多项式与相应的周期项之和<sup>[12]</sup>,如式(12)所示

$$\hat{C}lk(t_1 - t_0) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1(t_1 - t_0) + \dots + \hat{a}_m(t_1 - t_0)^m + \sum_{j=1}^k \hat{A}_j \sin\left(\frac{2\pi}{T_j}(t_1 - t_0) + \hat{\varphi}_j\right) \quad (12)$$

其中,  $\hat{C}lk$  表示预报钟差;  $\hat{a}_i (i=1, \dots, m)$  表示多项式拟合系数;  $T_j$  为周期项的周期;  $\hat{A}_j$  与  $\hat{\varphi}_j$  分别是周期项的幅度与相位;  $k$  代表周期项的个数,可使用 FFT 以及最小二乘法确定周期项的频率和相位。

### 4 实验与分析

本章利用 Sentinel-6A 数据,从定轨模式、使用的 GNSS 以及不同的 GNSS 产品对低轨卫星的钟差确定进行了分析比较,所研究的对象主要为使用不同模式及产品时造成的钟差精度区别,而非绝对钟差精度本身。

本章实验基于来自 ESA 的 Sentinel-6A 数据开展,其数据采样间隔为 1 s,但是 Sentinel-6A 的

GPS 具有特殊性, L1 及 L2 频段于不同通道间频繁变换。在进行运动学定轨模式下的钟差解算时,本研究仅使用了 L1 及 L2 下的固定通道,因此观测数量有限,也影响了本章中所展示的基于 GPS 的低轨卫星钟差解算精度。与之对比,当利用 Sentinel-3B 卫星 2018 年 8 月 17 日~8 月 19 日的 GPS 观测数据和 CODE 提供的最终精密 GPS 轨道与钟差产品,分别基于批量最小二乘法简化动力学和卡尔曼滤波运动学定轨模式,确定低轨卫星钟差,其差值的标准差为 0.31 ns,如图 3 和图 4 所示。

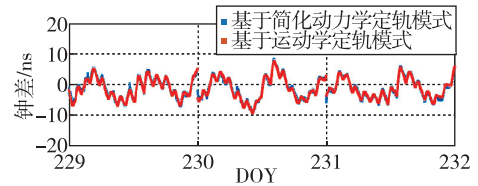


图 3 基于不同定轨模式的 Sentinel-3B 钟差在 2018 年 DOY 229~231 的时间序列

Fig. 3 Sentinel-3B clock errors based on different POD modes on DOY 229~231, 2018

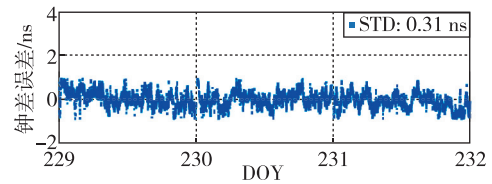


图 4 基于运动学与简化动力学定轨模式的 Sentinel-3B 低轨卫星钟差在 2018 年 DOY 229~231 的时间序列比较结果

Fig. 4 Differences of Sentinel-3B LEO satellite clock errors based on the kinematic and reduced-dynamic POD on DOY 229~231, 2018

#### 4.1 基于简化动力学/运动学定轨模式的低轨卫星钟差确定比较与分析

本节将利用 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月 3 日~2 月 7 日的 GPS 观测数据和 CODE 提供的最终精密 GPS 轨道与钟差产品,分别基于简化动力学和运动学定轨模式,确定低轨卫星钟差,钟差确定采样间隔设置为 30 s。如图 5 所示,利用卡尔曼滤波运动学定轨模式确定的低轨卫星钟差,相较于基于批量最小二乘法简化动力学定轨模式,其稳定性相对较差。这是因为动力学模型作为附加信息的加入增强模型强度,同时批量最小二乘法相较于卡尔曼滤波提供了更稳定的数据预处理效果。比较图 5 中的两类结果,如图 6 所示,其差值的标准差为 0.63 ns。

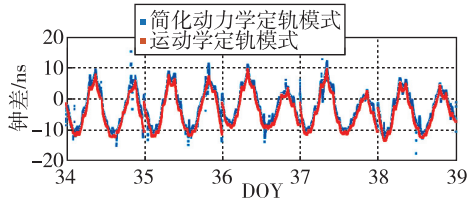


图5 基于不同定轨模式的 Sentinel-6A 钟差在 2022 年 DOY 34~38 的时间序列

Fig. 5 Sentinel-6A clock errors based on different POD modes on DOY 34~38, 2022

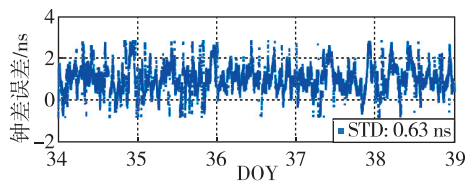


图6 基于运动学与简化动力学定轨模式的 Sentinel-6A 低轨卫星钟差在 2022 年 DOY 34~38 的时间序列比较结果

Fig. 6 Differences of Sentinel-6A LEO satellite clock errors based on the kinematic and reduced-dynamic POD on DOY 34~38, 2022

#### 4.2 基于单系统/双系统 GNSS 观测数据的低轨卫星钟差确定比较与分析

本节将利用 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月 3 日~2 月 7 日的星载 GNSS 观测数据和 CODE 提供的最终精密 GNSS 轨道与钟差产品,基于运动学定轨模式及卡尔曼滤波算法,使用 GPS 单系统(L1/L2)和 GPS(L1/L2)/Galileo(E1/E5a)双系统数据,分别确定低轨卫星钟差。本节实验中确定的低轨卫星钟差均为 GPS 对应的星载接收机钟差。

基于运动学定轨模式和 GPS 单系统观测数据的低轨卫星钟差时间序列如图 7 红线所示,基于 GPS/Galileo 双系统观测数据的低轨卫星钟差序列如图 7 蓝线所示。从图 7 可知,与基于双系统的低轨卫星钟差相比,基于 GPS 单系统确定的低轨卫星钟差稳定性较差,出现了更多离群值及重收敛现象。

采用以 GPS 观测数据, CODE 最终精密 GNSS 产品并通过批量最小二乘法简化动力学定轨模式解算的低轨卫星钟差作为基准,将图 7 中的两种结果与基准进行比较,结果如图 8 所示。从图 8 可知,使用双系统观测数据对于钟差确定的稳定度有明显的提升, GPS 单系统钟差确定误差序列的标准差为 0.63 ns, GPS 与 Galileo 双系统的钟差误差的标准差为 0.40 ns, 双系统钟差精度相较于 GPS 单系统改善了 36%。因此可以得出结论,基于运动学模型确定

低轨卫星钟差时,多系统星载 GNSS 观测数据可以有效地提升低轨卫星钟差解算的精度和稳定度。

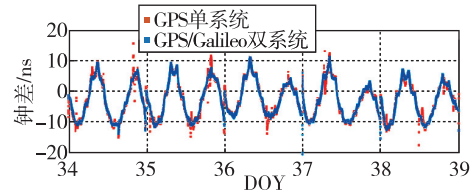


图7 基于单系统及双系统观测数据的 Sentinel-6A 钟差在 2022 年 DOY 34~38 的时间序列

Fig. 7 Sentinel-6A clock errors based on single- and dual-constellation observation data on DOY 34~38, 2022

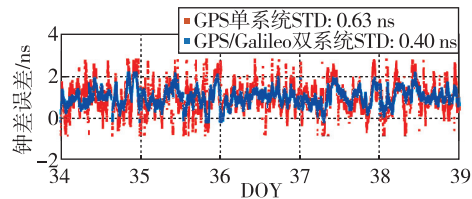


图8 基于单系统及双系统观测数据的 Sentinel-6A 在 2022 年 DOY 34~38 的钟差误差序列

Fig. 8 Differences of Sentinel-6A clock errors (with respect to the reference clocks) based on single- and dual-constellation observation data on DOY 34~38, 2022

#### 4.3 基于不同 GNSS 卫星产品的低轨卫星钟差确定比较与分析

本节将利用 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月 3 日~2 月 7 日的 GPS 与 Galileo 双系统观测数据,基于运动学定轨模式与卡尔曼滤波算法,分析比较基于 CODE 最终产品和 CNES 实时产品确定的低轨卫星钟差。

基于运动学定轨模式,使用 CNES 实时 GNSS 产品确定的低轨卫星钟差时间序列如图 9 红线所示,使用 CODE 最终产品确定的低轨卫星钟差时间序列如图 9 蓝线所示。由于 CNES 实时产品 GPS 与 Galileo 钟差拥有不同时间基准,此处比较的是含接收机 GPS IF 伪距硬件延迟的接收机钟差(见 2.1.1 与 2.2.1 节),并以天为单位进行了 CNES 与 CODE 产品间的钟差基准归算。从图 9 可知,在钟差确定过程中,相较于使用 CODE 最终产品,使用 CNES 实时产品解算的低轨卫星钟差稳定性较差,在个别历元出现重收敛的现象。

采用以 GPS 观测数据, CODE 最终产品并通过批量最小二乘法简化动力学定轨模式确定的低轨卫星钟差作为基准,将图 9 中的两种结果与基准钟

差进行比较,结果如图 10 所示。从图 10 可知,利用 CODE 最终产品确定的低轨卫星钟差相较于利用 CNES 实时产品有明显提升。使用 CNES 实时产品计算低轨卫星钟差误差序列的标准差为 0.46 ns,使用 CODE 最终产品的钟差误差序列的标准差为 0.40 ns,使用 CODE 最终产品确定低轨卫星钟差相较于使用 CNES 实时 GNSS 产品精度改善了 10%。因此可以得出结论,GNSS 产品精度对于低轨卫星钟差的精度有直接影响。

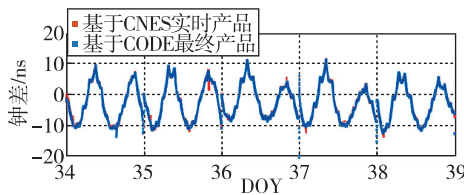


图 9 基于不同 GNSS 卫星产品的运动学定轨模式下 Sentinel-6A 钟差在 2022 年 DOY 34~38 的时间序列

Fig. 9 Sentinel-6A clock errors in kinematic POD based on different GNSS products on DOY 34~38, 2022

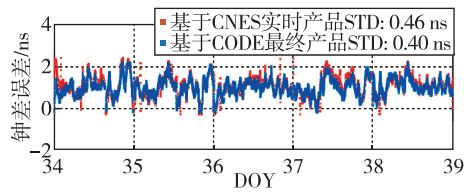


图 10 基于不同 GNSS 卫星产品的运动学定轨模式下 Sentinel-6A 在 2022 年 DOY 34~38 的钟差误差序列

Fig. 10 Differences of the Sentinel-6A clock errors (with respect to the reference clocks) in kinematic POD base on different GNSS products on DOY 34~38, 2022

#### 4.4 低轨卫星钟差预报分析

在第 3 章中介绍了低轨卫星钟差预报模型,本节利用该预报模型对低轨卫星钟差预报结果进行分析。模型确定方法为:首先利用 24 h 钟差数据,通过 FFT 确定中长期周期项,周期分别为 12 h, 8 h 以及 6 h,同时确定中长期周期项的振幅,分别为 1.1 ns, 0.98 ns 及 0.67 ns;其次,去除中长期周期项后,利用 4 h 钟差数据,确定短期周期项,周期分别为 1.9 h 及 0.95 h(与轨道周期 1/rev 和 2/rev 相关),并利用最小二乘确定短期周期项的振幅为 0.63 ns 与 0.26 ns;最后,确定多项式模型系数,根据去除周期项后的钟差序列特性,采用一阶多项式进行拟合。

本节实验数据为 Sentinel-6A 卫星 2022 年 2 月

7 日的卫星钟差,该卫星钟差利用 GPS 星载观测数据,基于简化动力学定轨模式确定。具体实验方法为:如图 11 所示,确定低轨卫星中的周期项,对于去除周期项以后的序列使用一阶多项式进行拟合,通过滑动窗口的方式确定最佳拟合时长,并对低轨卫星钟差进行预报,将预报结果与求解结果进行比对分析。图 12 给出了不同预报时间下的预报误差序列,可知随着预报时间增加,预报精度明显下降。

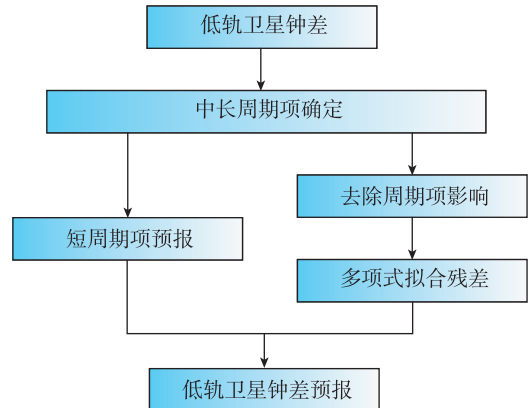
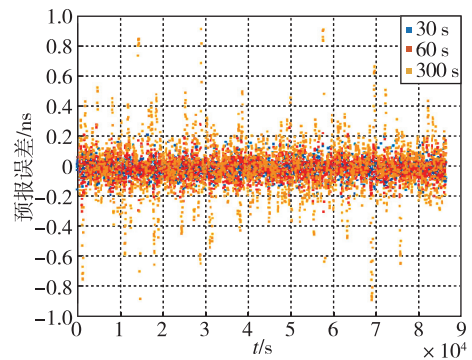
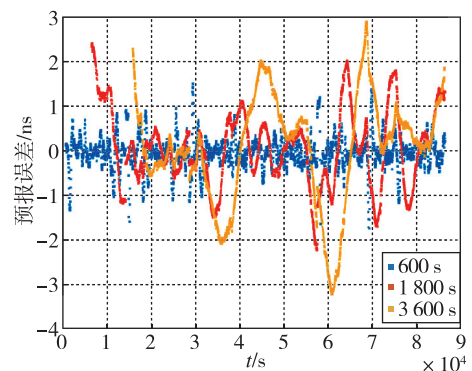


图 11 低轨卫星钟差预报算法流程图

Fig. 11 The flowchart of the LEO satellite clock prediction algorithm



(a)



(b)

图 12 低轨卫星钟差预报误差序列

Fig. 12 LEO satellite clock prediction errors

基于多项式模型的低轨卫星钟差预报结果如表1所示。从表1可知,预报1 min以内,预报精度(预报值与解算值之差的RMSE)在0.1 ns之内;预报5 min以内,预报精度在0.3 ns之内。预报1 h数据,预报精度明显下降,达到1.5 ns以上,可见中长期预报结果无法满足高精度PNT应用。

表1 低轨卫星 Sentinel-6A 的钟差预报结果

Tab.1 Precision of the LEO satellite Sentinel-6A clock prediction results

拟合时长/s	预报时间/s	RMSE/ns
120	30	0.048
280	60	0.068
330	300	0.192
420	600	0.356
4 980	1 800	0.856
12 500	3 600	1.189

## 5 结论

随着卫星导航应用需求的不断增长,低轨卫星增强逐渐成为新的研究热点,低轨卫星钟差是其中一个重要的研究方向。本文对低轨卫星钟差的研究包括低轨卫星钟差特性、低轨卫星钟差确定及低轨卫星钟差预报等方面的内容,实验结果表明:

1)低轨卫星受各系统性效应的影响,呈现明显的周期性现象。周期项的加入,为低轨卫星钟差确定和预报带来了挑战。钟差解算时,与基于卡尔曼滤波的运动学定轨模式相比,基于批量最小二乘法的简化动力学定轨模式更适合提供高精度的后处理低轨卫星钟差;而基于运动学定轨模式确定低轨卫星钟差时,GNSS多系统观测数据的引入,以及GNSS精密产品的引入,相较于GPS单系统和GNSS实时产品,能够明显地改善低轨卫星钟差的精度,以 Sentinel-6A 卫星为例,其改善幅度分别为36%和10%。

2)考虑到低轨卫星所呈现的周期性现象,低轨卫星预报时,需要顾及各类周期项。因此在低轨卫星钟差预报时,采用多项式模型结合周期项的方法进行钟差预报。以 Sentinel-6A 卫星为例,当预报时长在30~3 600 s之间时,低轨卫星钟差预报与解算值之差RMSE在0.05~1.5 ns之间。

3)随着对低轨卫星钟差研究的不断深入,需要在深入了解低轨卫星特性的基础上,进一步探究同时兼顾运算效率和低轨卫星钟差精度的确定方法,

以面对更加复杂的应用环境。对于钟差预报而言,仍然需要研究更高精度的短期预报方法以满足未来的使用需求。

## 参考文献

- [1] 王磊,李德仁,陈锐志,等. 低轨卫星导航增强技术——机遇与挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144-152.  
WANG Lei, LI Deren, CHEN Ruizhi, et al. Low earth orbit (LEO) satellite navigation augmentation technology: opportunities and challenges[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 144-152(in Chinese).
- [2] 张小红,马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.  
ZHANG Xiaohong, MA Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmentation GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087(in Chinese).
- [3] WANG L, LI D, CHEN R, et al. Low earth orbiter (LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2020, 22(2): 144-152.
- [4] GRIGGS E, KURSINSKI E R, AKOS D. Short-term GNSS satellite clock stability [J]. Radio Science, 2015, 50(8): 813-826.
- [5] LI K, ZHOU X, GUO N, et al. Comparison of precise orbit determination methods of zero-difference kinematic, dynamic and reduced-dynamic of GRACE-A satellite using SHORDE software[J]. Journal of Applied Geodesy, 2017, 11(3): 157-165.
- [6] YANG Z, LIU H, WANG P, et al. Integrated kinematic precise orbit determination and clock estimation for low Earth orbit satellites with onboard and regional ground observations[J]. Measurement Science and Technology, 2022, 33(12): 125002.
- [7] ZHOU X, JIANG W, CHEN H, et al. Improving the GRACE kinematic precise orbit determination through modified clock estimating[J]. Sensors, 2019, 19(19): 4347.
- [8] WANG K, EL-MOWAFY A, YANG X. LEO satellite clock modeling and its benefits for LEO kinematic POD [J]. Remote Sensing, 2023, 15(12): 3149.
- [9] XIAO G, LIU G, OU J, et al. Real-time carrier observation quality control algorithm for precision orbit determination of LEO satellites[J]. GPS Solutions, 2022, 26(4): 102.
- [10] YANG Z, LIU H, QIAN C, et al. Real-time estima-



- tion of low Earth orbit (LEO) satellite clock based on ground tracking stations[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 2050.
- [11] GE H, WU T, LI B. Characteristics analysis and prediction of low Earth orbit (LEO) satellite clock corrections by using least-squares harmonic estimation[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(1): 38.
- [12] WANG K, EL-MOWAFY A. LEO satellite clock analysis and prediction for positioning applications[J]. *Geo-Spatial Information Science*, 2022, 25(1): 14-33.
- [13] WU M, WANG K, LIU J, et al. Relativistic effects of LEO satellite and its impact on clock prediction[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(9): 095005.
- [14] WEINBACH U, SCHÖN S. Improved GPS receiver clock modeling for kinematic orbit determination of the GRACE satellites[C]// *Proceedings of 2012 European Frequency and Time Forum*. IEEE, 2012: 157-160.
- [15] DONLON C J, CULLEN R, GIULICCHI L, et al. The Copernicus Sentinel-6 mission: enhanced continuity of satellite sea level measurements from space[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112395.
- [16] MONTENBRUCK O, HACKEL S, WERMUTH M, et al. Sentinel-6A precise orbit determination using a combined GPS/Galileo receiver[J]. *Journal of Geodesy*, 2021, 95(9): 109.
- [17] DACH R, BROCKMANN E, SCHAER S, et al. GNSS processing at CODE: status report[J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83: 353-365.
- [18] 张怀, 聂兆生, 刘刚, 等. 高频 BDS/GPS 融合 PPP 确定 2021 年玛多 MW7.4 地震三要素[J]. *地震研究*, 2023, 46(2): 216-225.
- ZHANG Huai, NIE Zhaosheng, LIU Gang, et al. Determination of three parameters of the 2021 Maduo MW7.4 earthquake using high-rate BDS/GPS[J]. *Journal of Seismological Research*, 2023, 46(2): 216-225(in Chinese).
- [19] HADAS T, BOSY J. IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19: 93-105.
- [20] LAURICHESSE D, PRIVAT A. An open-source PPP client implementation for the CNES PPP-WIZARD demonstrator[C]// *Proceedings of 28<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015)*. Florida, 2015: 2780-2789.
- [21] YAO Y, HE Y, YI W, et al. Method for evaluating real-time GNSS satellite clock offset products[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21: 1417-1425.

(编辑:孟彬)