



基于PPP的低轨卫星星间时间同步

胡泽成, 钟世明, 张杰, 郭钊, 周冲冲

引用本文:

胡泽成, 钟世明, 张杰, 等. 基于PPP的低轨卫星星间时间同步[J]. 大地测量与地球动力学, 2026, 46(6): 695–701.

Hu Zecheng, Zhong Shiming, Zhang Jie, et al. Inter-Satellite Time Synchronization for Low Earth Orbit Satellites Based on Precise Point Positioning[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(6): 695–701.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.10.335>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

GRACE-FO卫星非差运动学精密定轨及精度分析

Zero-Difference Kinematic Precise Orbit Determination and Accuracy Analysis of GRACE-FO Satellite

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1178–1182 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.014>

基于地基GNSS观测数据的贵州高原地区水汽层析精度分析

Accuracy Analysis of Water Vapor Tomography Based on Ground-Based GNSS Observation Data in Guizhou Plateau

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1162–1166 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.011>

基于几何分析法的低轨星座设计

LEO Constellation Design Based on Geometric Analysis Method

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1003–1007 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.003>

基于非监督分类和图优化的GNSS多路径误差削弱方法

GNSS Multipath Errors Mitigation Method Based on Unsupervised Classification and Graph Optimization

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1015–1019,1031 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.005>

基于北斗三号PPP服务的快速静态和低动态定位性能分析

Assessment of Fast Static and Low-Speed Kinematic Positioning Based on BDS-3 PPP Service

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 997–1002 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.002>

基于 PPP 的低轨卫星星间时间同步

胡泽成^{1,2} 钟世明¹ 张 杰¹ 郭 钊^{1,2} 周冲冲^{1,3}

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院精密大地测量与定位全国重点实验室, 武汉, 430077

2 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京, 100049

3 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院武汉大地测量国家野外科学观测研究站, 武汉, 430077

摘 要: 伪距单点定位方法的同步精度低, 无法满足低轨卫星高精度的时间同步需求, 而星间链路时间同步方法因载荷复杂、设备成本高及易受空间环境干扰等因素, 难以应用于大规模低轨星座。本文提出一种基于精密单点定位 (PPP) 的低轨卫星星间时间同步方法, 具有成本低、易实现、无需依赖外部时间参考等优势, 可实现低轨卫星之间的高精度自主时间同步。研究利用 GRACE-FO 卫星星载 GPS 观测数据, 设计开展基于 PPP 的低轨卫星星间时间同步方法验证。实验结果表明, GRACE-FO 卫星轨道各方向定轨精度 RMS 约 7 cm, 2 颗卫星 GNSS 授时精度 STD 分别为 0.78 ns 和 0.77 ns, 短期稳定度 (1 280 s) 达到 2.22×10^{-13} 和 2.13×10^{-13} , 长期稳定度 (10 240 s) 达到 2.69×10^{-14} 和 3.21×10^{-14} 。同时, 星间时间同步精度 STD 为 0.46 ns, 短期稳定度 (1 280 s) 达到 2.24×10^{-13} , 长期稳定度 (10 240 s) 达到 3.47×10^{-14} 。上述结果验证了星载 GNSS PPP 星间时间同步方法的可行性, 可为低轨卫星星间高精度时间同步提供一种有效手段。

关键词: 低轨卫星; 精密单点定位; 精密定轨; 星间时间同步

中图分类号: P228

文献标识码: A

近年来, 低轨道 (low Earth orbit, LEO) 卫星凭借自身独特优势, 已成为航天应用领域的研究热点, 在定位、导航、授时、遥感以及通信等多个领域得到广泛应用^[1]。

在重力场反演任务中, 以 GRACE/GRACE-FO^[2] 卫星为代表的编队卫星, 对双星间的时间同步有着极高要求, 需达到亚纳秒级, 以此保障观测的精度与可靠性。在巨型星座运行方面, 随着 Starlink、OneWeb 等大规模商业通信星座的密集部署^[3], 数量众多的 LEO 卫星需在统一的时间框架内协同作业。对于基于 LEO 卫星的 GNSS 增强系统, 其低轨空间段由数十至数百颗搭载导航增强有效载荷的 LEO 卫星组成。这些卫星既能播发增强信息, 助力 GNSS 系统性能提升^[4], 也可作为独立的导航星座, 提供 PNT (positioning navigation timing) 服务^[5]。建立并维持低轨导航增强星座的时间基准, 是该增强系统地面段的一项关键任务, 可确保 GNSS 与低轨增强数据在高精度、统一的时空框架下完成融合处理^[6]。在 6G 空天地一体化网络架构^[7] 中, LEO 卫星互联网作

为重要组成部分, 为 6G 网络实现泛在、高速、低时延等特性提供了关键支撑^[8]。上述应用, 均迫切需要实现低成本、高精度的星间时间同步方法, 以满足 LEO 卫星星座组网、高速通讯等实际需求。

目前, 星间时间同步方法主要涵盖星间链路、GNSS 系统等^[9], 已有不少学者开展了相关研究。Nie 等^[10] 借助 GRACE 的星载 GPS 数据, 运用简化动力学法, 实现了 2~3 ns 的相对钟差精度; Pan 等^[11] 提出一种基于星间链路的伪距历元归算方法, 对北斗三号试验星的星间时间同步精度展开分析, 其时间同步精度优于 0.3 ns; 温旭峰等^[12] 采用星地星间联合钟差观测的方法, 验证了星间链路体制下时间同步的可行性, 结果显示, 星间链路观测具有较高可靠性, 星间钟差联合解算残差为 0.52 ns。王伟等^[13] 运用 SSR 改正信息的实时 PPP 方法, 对 COSMIC 卫星星载 GPS 观测数据进行解算, 结果表明, 轨道精度达到分米级, 钟差误差标准差达到纳秒级; Kunzi 等^[14] 基于多星座 GNSS 观测数据, 采用扩展卡尔曼滤波

收稿日期: 2025-10-11

项目来源: 国家自然科学基金 (42174222); 武汉市知识创新专项 (2023010201010082)。

第一作者简介: 胡泽成, 硕士生, 主要研究方向为低轨卫星时间同步, E-mail: huzecheng@apm.ac.cn。

通讯作者简介: 张杰, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为 GNSS 时频传递及卫星激光测距, E-mail: zhangjie@apm.ac.cn。

对 Sentinel-6A 卫星进行实时定轨和时间同步,实现了亚纳秒级的时间同步精度;Yao 等^[15]采用动力学定轨和整周模糊度固定技术,通过仿真 6 颗 LEO 卫星的多 GNSS 数据,实现了厘米级定轨和亚纳米级时间同步;闫冰等^[16]提出一种基于最大似然估计的低轨星座分布式时间同步方法,仿真结果表明,该方法可有效抑制随机通信时延的影响,实现优于 5 ns 的时间同步精度;Ge 等^[17]提出一种低轨卫星时钟模型,结果显示,LEO 时钟模型显著减少了时钟噪声,时间同步短期稳定度最高提升约 48%,长期稳定度最高提升约 27%。

对于 LEO 卫星星间时间同步而言,星地链路方式受地面站资源和链路条件的限制,难以满足多星大规模的时间同步需求;星间链路方法虽能实现 LEO 卫星的高精度时间同步,但受载荷复杂度、设备成本以及空间环境干扰等因素制约,在大规模 LEO 星座中难以满足高精度、高可靠的同步需求;此外,高性能原子钟虽能显著提升 LEO 卫星的时间基准性能,但受功耗、尺寸、重量和成本等因素^[18]影响,并不适用于 LEO 卫星对低成本的需求。GNSS 精密单点定位技术 (PPP) 凭借其厘米级定位精度、纳米级授时能力以及低成本、方法易实现等优势,为解决低轨星间时间同步难题提供了新途径。因此,本文采用 PPP 技术,利用 GRACE-FO 卫星的 GNSS 观测数据,对 LEO 卫星星间时间同步展开研究,分析可视卫星数、TDOP 等因素对时间同步精度的影响,成功实现了基于 PPP 的 GRACE-FO 卫星之间的高精度时间同步。

1 低轨卫星 PPP 时间同步方法

1.1 LEO 卫星星间时间同步原理

LEO 卫星接收机的时钟偏差可通过 LEO 卫星本地时间和全球导航卫星系统时间 (global navigation satellite system time, GNSST) 来获得,其表示 LEO 卫星本地时间与 GNSS 导航系统时间之间的差异^[19]。具体的时钟偏差计算公式如下:

$$D_L = T_L - \text{GNSST} \quad (1)$$

式中, T_L 为 LEO 卫星本地时间;GNSST 为全球导航卫星系统时间; D_L 为接收机的时钟偏差。采用 PPP 方式解算时, D_L 通过卡尔曼滤波参数估计得到。

根据式(1)得到 2 颗 LEO 卫星的时钟偏差

之后,二者作差可得到 LEO 卫星星间时间同步误差:

$$\begin{aligned} \Delta T &= D_{L_1} - D_{L_2} = T_{L_1} - \text{GNSST} - \\ &\quad (T_{L_2} - \text{GNSST}) = T_{L_1} - T_{L_2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ΔT 为星间时间同步误差; D_{L_1} 、 D_{L_2} 分别为 2 颗 LEO 卫星接收机的时钟偏差。从式(2)可以看出,LEO 卫星星间时间同步误差是 2 颗 LEO 卫星的本地时间之差。图 1 是基于 PPP 的 LEO 星间时间同步原理。首先星载 GNSS 接收机获得有效观测数据;然后利用精密产品进行 LEO 卫星观测数据的 PPP 处理,计算 LEO 卫星的时钟偏差;最后将 2 颗 LEO 卫星的时钟偏差作差得到时间同步误差。

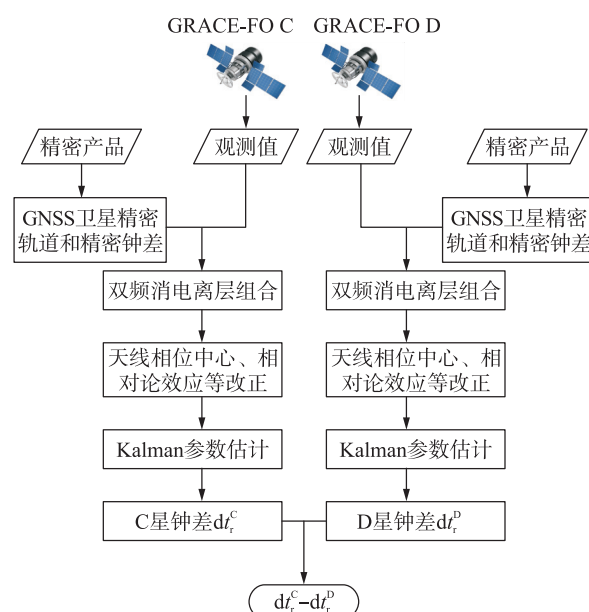


图 1 基于 PPP 的低轨卫星星间时间同步原理

Fig.1 Principle of inter-satellite time synchronization for LEO satellites based on PPP

1.2 LEO 卫星时钟偏差估计模型

LEO 卫星的轨道高度一般在 200~2 000 km,电离层集中在 60~2 000 km 的大气层区域,因此 LEO 卫星会受轨道高度以上的电离层延迟影响。考虑到 LEO 卫星的轨道高度高于对流层高度,对流层引入的误差基本可以忽略。此外,固体潮、海潮对 LEO 卫星的影响可以忽略不计。因此,本文采用双频消电离层组合对 LEO 卫星的时钟偏差进行解算时,其伪距和载波相位的双频消电离层组合模型^[20]为:

$$P_{\text{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + M_P + \epsilon_{\text{IF},P}^s \quad (3)$$

$$L_{\text{IF}}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + M_L + \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}}^s + \epsilon_{\text{IF},L}^s \quad (4)$$

式中, P_{IF}^s 为伪距组合观测值; L_{IF}^s 为载波相位组合

观测值; ρ_r^s 为站星间几何距离; c 为真空中光速; dt_r 为接收机时钟偏差; dt^s 为GNSS卫星时钟偏差; M_P 、 M_L 为PPP过程中其他误差改正项,包括相对论效应、相位缠绕、地球自转等; λ_{IF} 为载波相位的波长; N_{IF}^s 为电离层组合模糊度; $\epsilon_{IF,P}^s$ 、 $\epsilon_{IF,L}^s$ 分别为伪距和载波相位的观测噪声。

由于星载GNSS观测量反映的是导航卫星GNSS天线到LEO卫星接收机天线之间的距离,而GNSS卫星精密星历和LEO卫星精密轨道给出的是卫星质心的坐标,因此,在PPP解算LEO卫星观测数据时,需要对GNSS卫星和LEO卫

星的天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)进行改正。

LEO卫星的PCO改正不同于地面接收机,其PCO在星固坐标系下给出,而PPP解算得到的LEO卫星位置位于地固坐标系中,因此需要将二者统一到同一参考系下。具体而言,考虑到地球自转的影响,利用姿态四元数将PCO由星固坐标系转换至惯性坐标系,同时将PPP解算得到LEO卫星位置由地固坐标系转换至惯性坐标系,二者相加得到改正后的LEO卫星位置。姿态四元数坐标转换公式如下^[21]:

$$\mathbf{X}_{\text{ECI}} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{X}_{\text{SBF}} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{SBF}} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{R}$ 为转换矩阵; q_0 、 q_1 、 q_2 、 q_3 为姿态四元数; $\mathbf{X}_{\text{ECI}}$ 和 $\mathbf{X}_{\text{SBF}}$ 分别表示惯性坐标系下的坐标与星固坐标系下的坐标。

1.3 LEO卫星时间同步稳定性评估

修正Allan方差(modified Allan deviation, MDEV)是目前使用最多的时域频率稳定度评估方法,本文选择修正Allan方差作为评价LEO卫星时钟偏差频率稳定度的方法。计算公式^[22]为:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2\tau^2(N-3m+1)} \cdot \sum_{j=1}^{N-3m+1} \left(\sum_{i=j}^{j+m-1} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i) \right)^2 \quad (6)$$

式中, $\tau = m\tau_0$ 为取样时间; m 为平滑因子; N 为时间偏差数据的个数; x_i 为第*i*个平滑间隔的时间偏差数据。

2 实验数据与处理策略

实验采用德国地学中心(GFZ)提供的GRACE-FO C星与D星2023-04-30—05-06(DOY120—126)共7 d、采样间隔为10 s的LEVEL 1B的GPS观测数据,其经过时标钟差改正处理,因此本实验解算的时钟偏差相当于GRACE-FO C星和D星的时钟偏差与参考值的残余误差,其均值和标准差(STD)可作为评估单向授时、星间时间同步精度的指标。数据解算采用的精密产品、地球自转参数、LEO卫星姿态数据和事后科学轨道的详细信息如表1所示,表2给出了星间时间同步实验的具体处理策略。

表1 数据来源详细信息

Tab.1 Details of the data sources		
数据类型	来源	描述
GPS卫星精密轨道和钟差	CODE	5 min 采样间隔的精密轨道和5 s 采样间隔的精密钟差
地球自转参数	CODE	单天
GRACE-FO星载GPS观测数据	GFZ	采样间隔 10 s
GRACE-FO姿态数据	GFZ	采样间隔 1 s
GRACE-FO事后精密轨道	GFZ	采样间隔 1 s

表2 GRACE-FO卫星星间时间同步实验处理策略

Tab.2 Processing strategies for inter-satellite time synchronization experiments of the GRACE-FO satellites	
类别	描述
观测模型	双频电离层组合
截止高度角	3°
相对论效应	模型改正
天线相位中心改正	igs20.atx
相位缠绕	模型改正
地球自转改正	模型改正
模糊度参数	浮点解
接收机时钟偏差	白噪声估计
接收机位置	白噪声估计
参数估计方法	双向滤波

3 实验结果与分析

3.1 GRACE-FO轨道与单星GNSS授时精度评定

本文对LEO卫星轨道精度评估采用外符合精度评定方法,以GFZ提供的GRACE-FO在地固系下的精密轨道为参考,将PPP解算得到

的 LEO 卫星轨道与 GFZ 发布的轨道结果进行对比,并以轨道残差的 RMS 值作为精度评定指标。

图 2 给出 LEO 卫星 PPP 解算轨道与参考轨道的残差序列。可以看出,2 颗卫星的轨道残差均无明显的系统性偏差,其中 X 方向和 Y 方向存在周期性变化,这主要与卫星的轨道周期相关。表 3 统计了 2 颗卫星 7 d 的轨道残差 RMS 值,结果显示,X、Y、Z 三个方向的 RMS 值均约为 7 cm,定轨精度达到厘米级。

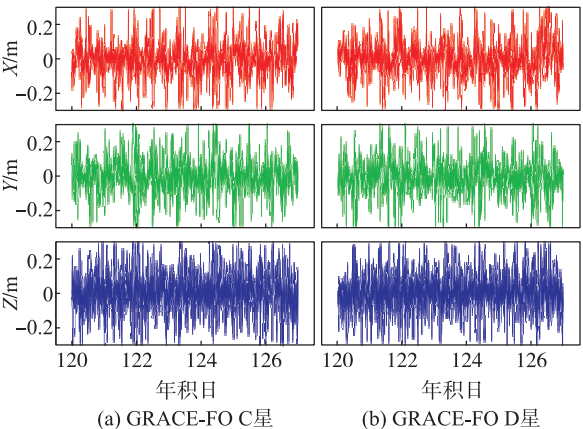


图 2 GRACE-FO 卫星解算轨道与参考轨道残差序列
Fig.2 Residual series between the estimated and reference orbits of GRACE-FO satellites

表 3 GRACE-FO 卫星解算轨道与参考轨道残差 RMS
Tab.3 RMS of residuals between the estimated and reference orbits for GRACE-FO satellites

卫星	X/cm	Y/cm	Z/cm
GRACE-FO C 星	6.5	6.6	7.0
GRACE-FO D 星	7.0	6.4	6.6

图 3 给出 GRACE-FO C 星 TDOP、可视卫星数和时钟偏差序列。可以看出,解算的 C 星时钟偏差序列大部分时段在 ± 2 ns 以内,其均值和 STD 分别为 0.37 ns 和 0.78 ns,无明显系统性偏差,时钟偏差序列相对稳定。除去滤波收敛的阶段,部分历元出现“突刺”,将时钟偏差分别与 TDOP 和可视卫星数进行比较分析。图中红色框线标示了受可视卫星数影响的“突刺”历元,可以看出,发生“突刺”的历元其可视卫星数大部分低于 6 颗,当 LEO 卫星的可视卫星数不足时,部分 GNSS 卫星观测数据由于数据质量问题在滤波迭代过程中被剔除,使得该历元实际参与解算的卫星数仅为 4 颗,方程对未知参数的约束变差,导致解算结果变差。同时,时钟偏差的解算精度不仅受可视卫星数的限制,还受到导航星座

空间几何构型^[23]的影响,根据 TDOP 的定义可知,TDOP 值越大,表明导航星座空间几何分布对时钟偏差解算精度的影响越大。由图 3 可见,GRACE-FO C 星的 TDOP 值在 1.0~3.0 范围内波动,但存在许多异常的变化值,且变化存在明显的跳跃。图中蓝色框线标示了受 TDOP 影响的“突刺”历元,可以看出,TDOP 值的异常点与时钟偏差解算结果中的“突刺”点具有较高的一致性,当 TDOP 值过大,时钟偏差的解算结果会出现“突刺”,表明 TDOP 值的变化会直接影响时钟偏差的解算精度。图中 TDOP 值为 0 的历元表示当前历元观测数据发生缺失,此时会导致 PPP 重收敛,时钟偏差同样会出现“突刺”。另一方面,在 LEO 卫星 PPP 时间同步过程中,轨道参数与时钟偏差参数存在显著的相关性,当 LEO 卫星部分历元因观测数据质量和较大的 TDOP 值导致解算轨道较差时,其时钟偏差也会相应地变差。因此这种“突刺”并不是受单一因素影响,而是受制于观测数据质量、卫星数、TDOP 等多方面因素。

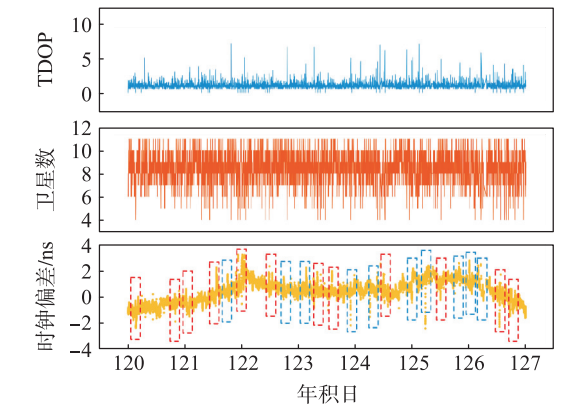


图 3 GRACE-FO C 星 TDOP、可视卫星数和时钟偏差序列
Fig.3 Time series of TDOP, visible satellite number, and clock offset for GRACE-FO satellite C

图 4 展示了 GRACE-FO D 星的 TDOP、可视卫星数和时钟偏差序列。结果表明,D 星 7 d 的时钟偏差解算结果大多在 ± 2 ns 范围内波动,其均值和 STD 分别为 0.37 ns 和 0.77 ns。表 4 给出 GRACE-FO 卫星解算的时钟偏差的统计结果。与 C 星类似,D 星部分历元同样出现了“突刺”现象。图中红色框线标示了受可视卫星数影响的“突刺”历元,蓝色框线标示了受 TDOP 影响的“突刺”历元,二者与时钟偏差序列中的“突刺”点具有较高的一致性。

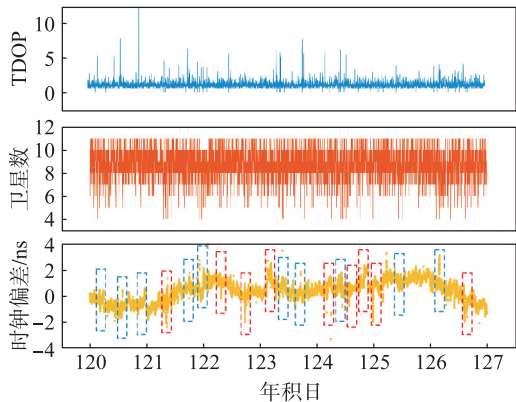


图 4 GRACE-FO D 星 TDOP、可视卫星数和时钟偏差序列

Fig.4 Time series of TDOP, visible satellite number, and clock offset for GRACE-FO satellite D

表 4 GRACE-FO 卫星时钟偏差统计结果
Tab.4 Statistical results of GRACE-FO satellite clock offsets

卫星	均值/ns	标准差/ns
GRACE-FO C 星	0.37	0.78
GRACE-FO D 星	0.37	0.77

为进一步评估 LEO 时钟偏差序列的稳定性,本文采用修正 Allan 方差对解算结果进行分析。需要说明的是,不同类型原子钟的短期、长期稳定度定义存在差异^[24]。为便于后续频率稳定度的对比分析,本文统一将平均时间位于 1 280 s 的频率稳定度作为短期稳定度的评定指标,平均时间位于 10 240 s 的频率稳定度作为长期稳定度的评定指标。GRACE-FO 卫星搭载的超稳晶体振荡器^[25] (ultra-stable oscillators, USO)具有较高的频率稳定度。如图 5 所示,GRACE-FO C 星时钟偏差序列的短期稳定度(1 280 s)达到 2.22×10^{-13} ,长期稳定度(10 240 s)达到 2.69×10^{-14} ,频率稳定度较好。GRACE-FO D 星时钟偏差序列的短期稳定度(1 280 s)达到 2.13×10^{-13} ,长期稳定度(10 240 s)达到 3.21×10^{-14} ,与 C 星的频率稳定度相当。

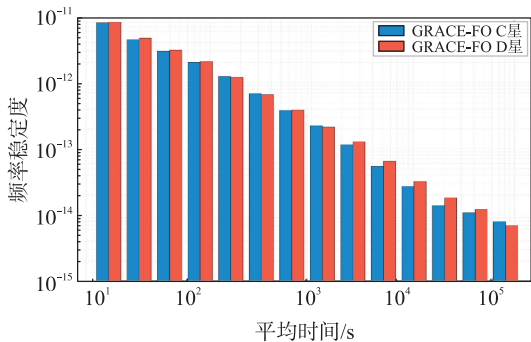


图 5 GRACE-FO 卫星时钟偏差序列频率稳定度
Fig.5 Frequency stability of clock offset time series for GRACE-FO satellites

3.2 星间时间同步

采用 PPP 技术可实现 GRACE-FO 双星的星间时间同步,图 6 展示了星间时间同步误差序列,观测弧段为 7 d。可以看出,星间时间同步误差基本在 ± 1 ns 范围内波动,STD 为 0.46 ns。与单星时钟偏差解算结果类似,部分历元出现明显的“突刺”现象。对比 2 颗卫星的时钟偏差结果可以发现,在星间时间同步误差发生“突刺”的历元中,通常伴随 1 颗卫星的时钟偏差发生较大的跳变,或 2 颗卫星的跳变幅值不同,从而导致星间时间同步误差增大。因此,与单颗卫星的时钟偏差序列相比,星间时间同步通过抵消 2 颗卫星间的对称误差,有效减小其同步误差的波动,提高稳定性。

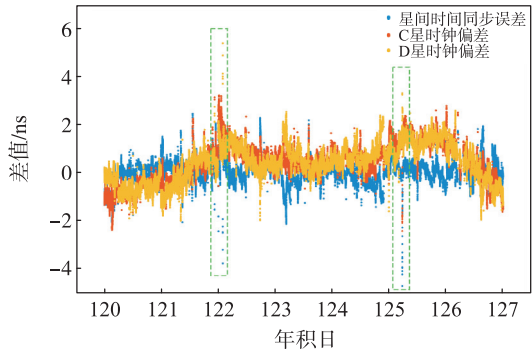


图 6 GRACE-FO C 星、D 星时钟偏差和星间时间同步误差序列

Fig.6 Time series of clock offset for GRACE-FO satellites C and D, and their inter-satellite time synchronization error

为了评估星间时间同步的频率稳定度,本文计算了星间时间同步误差的修正 Allan 方差。星间时间同步频率稳定度结果如图 7 所示。可以看出其短期稳定度(1 280 s)达到 2.24×10^{-13} ,长期稳定度(10 240 s)达到 3.47×10^{-14} ,频率稳定度较好。

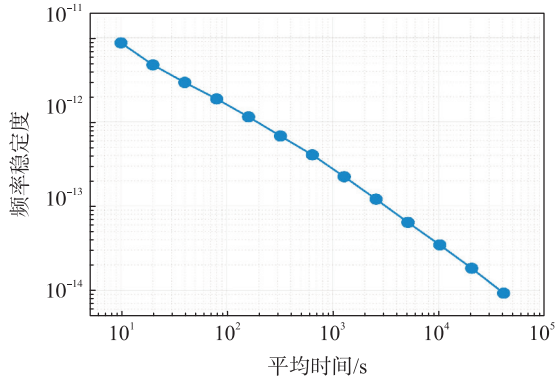


图 7 GRACE-FO 星间时间同步误差序列频率稳定度
Fig.7 Frequency stability of the inter-satellite time synchronization error series for GRACE-FO

4 结 语

本文介绍基于 PPP 的 LEO 卫星星间时间同步原理,设计并开展了 LEO 卫星 PPP 时间同步实验。通过解算 LEO 卫星的 GPS 双频观测数据得到 GRACE 卫星相对于参考值的时钟偏差,实现了 LEO 卫星间的高精度时间同步,该方法可应用于编队卫星的星间时间同步。实验结果表明:

1)采用 PPP 技术确定 GRACE-FO 卫星轨道,2 颗 GRACE-FO 卫星定轨精度约 7 cm,单颗卫星解算的时钟偏差均值均为 0.37 ns,STD 分别为 0.78 ns 和 0.77 ns,单星 GNSS 授时精度达到亚纳米量级,由于卫星数据质量和导航星座空间几何构型的原因出现少数“突刺”,长期稳定度约 $10^{-13} \sim 10^{-14}$ 。

2)GRACE-FO 卫星星间时间同步精度为 0.46 ns,长期稳定度达到 3.47×10^{-14} ,验证了 PPP 方法可实现亚纳米级 LEO 卫星星间时间同步。

本文采用的 PPP 算法相较于传统 LEO 卫星时间同步方法精度高,方法简单易于实现,但仍有部分问题未解决,如时间同步过程中并未考虑动力学因素,历元“突刺”的问题影响定轨精度和星间时间同步精度。随着 GNSS 系统的发展,多系统观测数据的融合和附加动力学约束的 PPP 方法有望解决 LEO 卫星星间时间同步的历元“突刺”问题,提高定轨精度和时间同步精度,为未来 LEO 卫星间的精确协同工作和 GNSS 增强系统提供一种关键的技术支撑。

参考文献

- [1] 方芳,吴明阁.全球低轨卫星星座发展研究[J].飞航导弹,2020(5):88-92 (Fang Fang, Wu Mingge. Research on the Development of Global LEO Satellite Constellation [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5): 88-92)
- [2] Chen J L, Cazenave A, Dahle C, et al. Applications and Challenges of GRACE and GRACE Follow-On Satellite Gravimetry [J]. Surveys in Geophysics, 2022, 43(1): 305-345
- [3] 袁洪,陈潇,罗瑞丹,等.对低轨导航系统发展趋势的思考[J].导航定位与授时,2022,9(1):1-11 (Yuan Hong, Chen Xiao, Luo Ruidan, et al. Review of the Development Trend of LEO-Based Navigation System [J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(1): 1-11)
- [4] 李敏,黄腾达,李文文,等.低轨导航增强技术发展综述[J].测绘地理信息,2024,49(1):10-19 (Li Min, Huang Tengda, Li Wenwen, et al. Overview of Low Earth Orbit (LEO) Navigation Augmentation Technology [J]. Journal of Geomatics, 2024, 49(1): 10-19)
- [5] 杨元喜,王建荣,孙中苗,等.低轨小卫星组网的测绘潜能及其关键技术[J].航天技术与工程学报,2024,1(1):1-7 (Yang Yuanxi, Wang Jianrong, Sun Zhongmiao, et al. The Surveying and Mapping Potential of LEO Small Satellite Constellations and Related Key Technologies [J]. Journal of Space Technology and Engineering, 2024, 1(1): 1-7)
- [6] 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-Augmented GNSS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087)
- [7] 沈学民,承楠,周海波,等.空天地一体化网络技术:探索与展望[J].物联网学报,2020,4(3):3-19 (Shen Xuemin, Cheng Nan, Zhou Haibo, et al. Space-Air-Ground Integrated Networks: Review and Prospect [J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 3-19)
- [8] 禹华钢,方子希.低轨卫星互联网:发展、应用及新技术展望[J].无线电工程,2023,53(11):2699-2707 (Yu Huangang, Fang Zixi. LEO Satellite Internet: Development, Application and New Technology Prospects [J]. Radio Engineering, 2023, 53(11): 2699-2707)
- [9] 王伟.基于 GNSS 和星间链路的低轨卫星系统时间同步技术研究[D].长沙:国防科技大学,2021 (Wang Wei. Research on Time Synchronization Technology of Low Orbit Satellite System Based on GNSS and Inter-Satellite Link [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021)
- [10] Nie G G, Wu F L, Zhang K F, et al. Research on LEO Satellites Time Synchronization with GPS Receivers Onboard [C]. 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, 2007
- [11] Pan J Y, Hu X G, Zhou S S, et al. Time Synchronization of New-Generation BDS Satellites Using Inter-Satellite Link Measurements [J]. Advances in Space Research, 2018, 61(1): 145-153
- [12] 温旭峰,郝金明,胡小工,等.基于星间链路体制的北斗卫星时间同步可行性分析[J].大地测量与地球动力学,2018,38(12):1274-1279 (Wen Xufeng, Hao Jinming, Hu Xiaogong, et al. Feasibility Analysis of Time Synchronization of Beidou Satellite Using Inter-Satellite Observation Data [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(12): 1274-1279)
- [13] 王伟,臧文驰,彭竞,等.基于 RT-PPP 的低轨卫星实时高精度时间同步方法[J].全球定位系统,2021,46(5):26-32 (Wang Wei, Zang Wenchi, Peng Jing, et al. Real Time and High Precision Time Synchronization Method of LEO Satellite Based on RT-PPP [J]. GNSS World of China, 2021, 46(5): 26-32)
- [14] Kunzi F, Montenbruck O. Precise Onboard Time Synchronization for LEO Satellites [J]. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 2022, 69(3)
- [15] Yao F, Guo J, Yang C. Research on Precise Orbit Determination Time Synchronization and Extended Application of LEO Constellation Based on GNSS [C]. China Satellite Navigation Conference (CSNC 2022), Singapore, 2022
- [16] 闫冰,赵亚飞,方一鸣,等.基于最大似然估计的低轨通信星座分布式时间同步方法研究[J].电信科学,2024,40

- (6): 60-68 (Yan Bing, Zhao Yafei, Fang Yiming, et al. Research on Distributed Time Synchronization Methods for LEO Communication Constellations Based on Maximum Likelihood Estimation[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 60-68)
- [17] Ge Y L, Liu Y L, Lyu D Q, et al. LEO Satellite Clock Modeling and Its Benefits for Real-Time LEO PPP Timing [J]. Measurement, 2025, 242
- [18] 刘湘楠, 李桢, 施闯. 卫星时频系统发展综述[J]. 时间频率学报, 2025, 48(1): 8-22 (Liu Xiangnan, Li Zhen, Shi Chuang. A Review of Satellite Time-Frequency System[J]. Journal of Time and Frequency, 2025, 48(1): 8-22)
- [19] 路润民, 张杰, 钟世明, 等. 基于 PPP 和共视技术的改进 PPP 时间频率传递方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 168-175 (Lu Runmin, Zhang Jie, Zhong Shiming, et al. Improved PPP Time and Frequency Transfer Method Based on PPP and Common-View [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 168-175)
- [20] 张杰, 钟世明, 韩金阳, 等. 基于 PPP 技术的实时时间频率传递方法性能评估[J]. 时间频率学报, 2022, 45(4): 239-246 (Zhang Jie, Zhong Shiming, Han Jinyang, et al. Performance Evaluation of Real-Time Time-Frequency Transfer Method Based on GNSS PPP Method[J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(4): 239-246)
- [21] Loyer S, Banville S, Geng J H, et al. Exchanging Satellite Attitude Quaternions for Improved GNSS Data Processing Consistency[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(6): 2441-2452
- [22] Allan D W. Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1987, 34(6): 647-654
- [23] 张守建, 李建成, 邹贤才, 等. GRACE 卫星非差运动学精密定轨分析[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(6): 679-682 (Zhang Shoujian, Li Jiancheng, Zou Xiancai, et al. Analysis of Zero-Difference Kinematic POD for GRACE [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(6): 679-682)
- [24] Han J Y, Zhang J, Zhong S M, et al. Ocean Multi-GNSS Kinematic PPP Time Transfer with Doppler Observations and Different System Clock Parameter Solution Strategies [J]. GPS Solutions, 2025, 29(3):
- [25] Kornfeld R P, Arnold B W, Gross M A, et al. GRACE-FO: The Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On Mission[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(3): 931-951

Inter-Satellite Time Synchronization for Low Earth Orbit Satellites Based on Precise Point Positioning

HU Zecheng^{1,2} ZHONG Shiming¹ ZHANG Jie¹
GUO Zhao^{1,2} ZHOU Chongchong^{1,3}

1 State Key Laboratory of Precision Geodesy and Positioning, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430077, China

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Wuhan National Geodetic Observatory, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430077, China

Abstract: The synchronization accuracy of the pseudo-range single-point positioning method is low, making it unable to meet the high-precision time synchronization requirements of low Earth orbit (LEO) satellites. Meanwhile, the inter-satellite link time synchronization method faces challenges in large-scale LEO constellation applications due to factors such as complex payloads, high equipment costs, and susceptibility to interference from the space environment. This study utilizes onboard GPS observation data from the GRACE-FO satellites to design and investigate an inter-satellite time synchronization method for low Earth orbit satellites based on precise point positioning (PPP). Experimental results show that the orbit determination accuracy (RMS) of the GRACE-FO satellites in all directions is approximately 7 cm, and the GNSS timing accuracy (STD) of the two satellites is 0.78 ns and 0.77 ns, respectively, with short-term stability (1 280 s) reaching 2.22×10^{-13} and 2.13×10^{-13} , and long-term stability (10 240 s) reaching 2.69×10^{-14} and 3.21×10^{-14} . Meanwhile, the inter-satellite time synchronization accuracy (STD) is 0.46 ns, with short-term stability (1 280 s) of 2.24×10^{-13} and long-term stability (10 240 s) of 3.47×10^{-14} . These results validate the feasibility of the proposed algorithm and provide an effective approach for high-precision inter-satellite time synchronization in LEO satellite systems.

Key words: low Earth orbit (LEO) satellites; precise point positioning (PPP); precise orbit determination; inter-satellite time synchronization