

GPS 卫星钟差及观测数据采样间隔对 LEO 卫星定轨精度影响

田英国¹ 郝金明¹ 陈明剑¹ 于合理¹ 衡培深²

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州,450001
2 黄河水文勘察测绘局,河南 郑州,450000

摘 要:针对 GPS 卫星钟差及观测数据间隔对 LEO 卫星运动学和约化动力学定轨的影响问题进行了分析,并使用 CODE(the Center for Orbit Determination in Europe) 30 s、5 s 间隔 GPS 卫星钟差分别进行了 30 s 和 10 s 间隔观测数据的 LEO 卫星定轨实验。结果表明,使用 5 s 间隔卫星钟差(10 s 间隔观测数据)相比 30 s 间隔卫星钟差(30 s 间隔观测数据)进行 GRACE 卫星精密定轨,约化动力学定轨精度提高了 16%,运动学定轨精度提高了 8.8%;使用 30 s 间隔卫星钟差和 10 s 间隔观测数据的定轨精度最低;对于 30 s 间隔观测数据,使用 30 s 或 5 s 间隔卫星钟差的定轨精度基本一致。

关键词:GPS 卫星精密钟差;采样间隔;LEO 卫星精密定轨

中图法分类号:P228.41 **文献标志码:**A

自星载 GPS 技术成功应用于 TOPEX/POSEIDON 卫星精密定轨^[1]后,星载 GPS 跟踪技术逐渐成为标准的 LEO(low earth orbit)卫星跟踪技术。随着星载 GPS 接收机和数据处理技术的发展,定轨精度得到了显著的提高^[2-6],特别是在取消选择可用性 S/A 后,星载 GPS 用户可以直接利用地面测站解算的 GPS 卫星钟差,显著提高了星载 GPS 精密定轨的效率。另一方面,LEO 卫星的定轨精度不仅依赖于 GPS 轨道的质量,也依赖于 GPS 钟差解的精度。

虽然 GPS 精密星历产品文件中包含了精度较高的 GPS 卫星钟差改正数,但是由于 GPS 卫星钟差容易受到钟随机噪声和频率的影响,变化复杂难以模型化,而 GPS 精密星历产品中的钟差间隔较大,无法满足高精度应用需求^[7,8]。为此,IGS(International GNSS Service)及各分析中心先后发布了 30 s 间隔的卫星钟差产品^[9,10]。为了支持 GOCE(Gravimetry Field and Steady-state Ocean Circulation Explorer)卫星 1 s 间隔观测数据的处理^[11],CODE(the Center for Orbit Determination in Europe)又发布了 5 s 间隔卫星钟差产品^[12]。此外,增加观测数据样本可以提供更多的

冗余观测信息,从而增强 LEO 卫星精密定轨解的强度。本文研究了不同采样间隔下 GPS 卫星钟差和观测数据对 LEO 卫星精密定轨精度的影响。

1 GPS 卫星钟差内插精度分析

GPS 卫星钟容易受钟随机噪声和频率等因素的影响,变化复杂,难以模型化,因此高阶的线性插值算法不适用于 GPS 卫星钟差内插。GPS 卫星钟差内插精度主要取决于 GPS 卫星钟差的采样间隔和各个卫星钟的 Allan 方差^[13]。Montenbruck 等详细分析了不同 GPS 轨道和钟差产品对 GRACE-B 卫星轨道精度的影响。分析表明,以 5 min 间隔 GPS 卫星钟差产品进行 30 s 间隔观测数据处理,其精度不能满足高精度 LEO 卫星的定轨需求^[8]。

目前还没有相关文献评估 30 s、5 s 间隔 GPS 卫星钟差对 LEO 卫星精密定轨精度的影响。为分析 GPS 卫星钟差产品的内插精度,本文将 CODE 分析中心的 5 s 间隔 GPS 卫星钟差作为基准,并在 5 s 间隔的钟差产品中提取 30 整数倍

s 的历元,从而将 5 s 间隔 GPS 卫星钟差产品降低到 30 s,然后采用线性插值法将 30 s 间隔 GPS 卫星钟差数据内插为 5 s 采样间隔,将插值后的钟差与原始 5 s 钟差数据进行比较。选取 2014 年 11 月 14 日 CODE 公布的 5 s 采样间隔的 GPS 卫星精密钟差产品进行实验分析。图 1 给出了 G05 和 G24 卫星钟差内插结果。

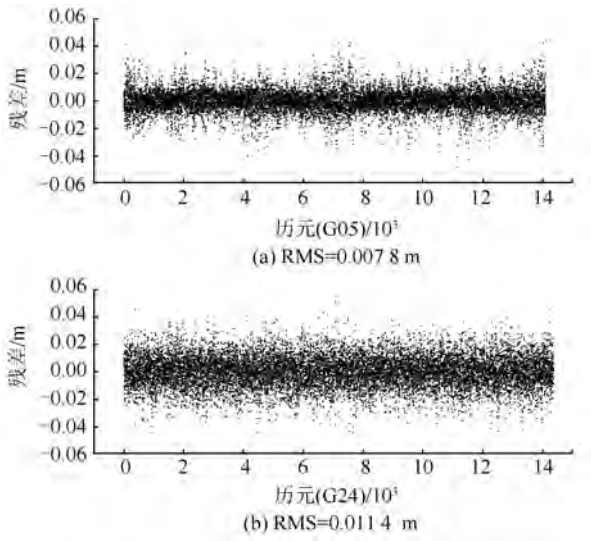


图 1 G05 和 G24 卫星 30 s 钟差内插到 5 s 残差
Fig.1 Error of G05 and G24 Clock Interpolation from 30 s to 5 s Clock Products

由图 1 可知,30 s 间隔卫星钟差内插到 5 s 精度损失约为 0.01 m。根据文献[11],CODE 公布的 5 s 采样间隔的 GPS 卫星钟差的精度为 15 ps(约 0.005 m),30 s 采样间隔的 GPS 卫星钟差的精度约为 20 ps(约 0.006 m)。由此可知,在 LEO 卫星高精度定轨中,应尽量采用 5 s 采样间隔的 GPS 卫星钟差产品,以减小 GPS 卫星钟差内插的精度损失。

2 LEO 精密定轨分析

2.1 数据处理策略

卫星精密定轨数据处理策略是卫星定轨中极为重要的问题,尤其是经验加速度的设置和约束,直接影响到定轨精度。另外,卫星截止高度角相关误差改正模型及力学模型的使用等都会对最终定轨精度产生影响。

本文以 GRACE 卫星为例,进行 LEO 卫星精密定轨实验。GRACE 卫星同时搭载有 GPS 接收机、卫星激光测距(SLR)反射镜、星间频段微波测距 KBR(K band ranging system)测距仪、加

速度计等测量设备^[14],这些设备为 LEO 卫星精密定轨提供了不同的数据源及轨道精度检核手段^[15,16]。GRACE 卫星约化动力学定轨的处理策略^[17]见表 1,运动学精密定轨的处理策略参照约化动力学定轨观测部分。

表 1 GRACE 约化动力学定轨观测模型和力学模型
Tab.1 Reduced-Dynamic POD Observation and Force Model for GRACE

类别	详细描述
观测量	无电离层组合 L3
GPS 卫星高度截止角	5°
GPS 卫星轨道及钟差	CODE 最终轨道及 5 s 采样间隔钟差产品
载波相位模糊度	作为未知参数估计
接收机钟差	历元待估参数
GPS 卫星和接收机天线相位中心改正	考虑
地球重力场模型	EGM2008 120×120
N 体摄动力	太阳、月球以及其他行星摄动(JPL DE450)
潮汐摄动	固体潮、极潮及海洋潮汐
太阳光压和大气阻力	通过经验加速度参数吸收
卫星轨道状态参数	6 个初始轨道根数+3 个常数经验加速度参数
经验加速度	每 6 min 估计一组

2.2 精密定轨结果及分析

为研究 GPS 卫星钟差和观测数据采样间隔对 LEO 卫星精密定轨精度的影响,实验设计了 4 个方案,见表 2,并选取了 2014 年年积日 305~334 共 30 d GRACE 卫星观测数据以及 CODE 的精密 GPS 钟差产品进行分析,GRACE 卫星原始观测数据的间隔为 10 s^[14]。

表 2 GRACE 卫星精密定轨实验方案
Tab.2 POD Experimental Program for GRACE

方案	GPS 观测数据采样间隔/s	GPS 钟差采样间隔/s
1	10	5
2	10	30
3	30	5
4	30	30

2.2.1 与喷气推进实验室参考轨道比较

喷气推进实验室(JPL)公布的 GRACE 卫星的标准轨道是基于该机构自主研发的 GIPSY-OASIS II 平台,采用约化动力学法获得,其轨道精度约为 2 cm^[18],本文将其作为参考轨道以验证不同方案的定轨效果。图 2 给出了 4 种方案每天的定轨结果与 JPL 参考轨道互差的 RMS 变化情况,表 3 给出了 4 种方案不同定轨方法获得的定轨结果与 JPL 参考轨道差值 RMS 的均值。

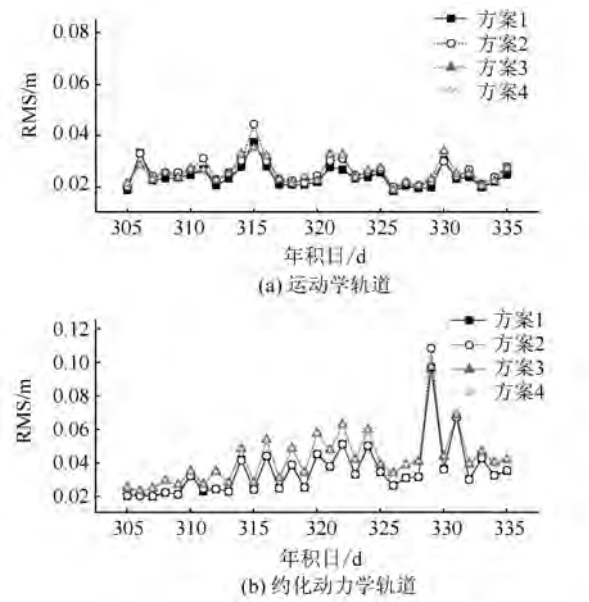


图 2 2014 年年积日 305~334 d 定轨结果与 JPL 参考轨道互差 RMS

Fig.2 RMS of Residuals Between Precise Orbits and JPL Published Reference Orbits for DOY 305~334, 2014

表 3 定轨结果与 JPL 参考轨道差值 RMS 的均值/m

Tab.3 RMS Mean Between Precise Orbits and JPL Published Reference Orbits for DOY 305~334, 2014/m

轨道	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
运动学轨道	0.024 7	0.027 7	0.027 1	0.027 1
约化动力学轨道	0.035 0	0.035 5	0.041 8	0.041 8

据图 2 和表 3,方案 1~4 的约化动力学定轨结果与 JPL 参考轨道的互差均值分别为 0.035 0 m、0.035 5 m、0.041 8 m 和 0.041 8 m,方案 1、2 与方案 3、4 相比分别提高 16%和 15%,表明提高观测数据的采样率能够提高 LEO 卫星约化动力学轨道的精度;方案 1 与方案 2 比较,方案 3 与方案 4 比较,可知观测数据在同等间隔情况下,使用 5 s 间隔 GPS 卫星钟差产品只对 10 s 间的观测数据定轨结果有一定的改进,对 30 s 间隔观测数据定轨结果没有改进。

方案 1~4 运动学定轨结果和 JPL 参考轨道的互差均值分别为 0.024 7 m、0.027 7 m、0.027 1 m 和 0.027 1 m,表明单纯提高观测数据的间隔不能改善运动学轨道的精度。这主要是因为运动学轨道受到 GPS 卫星钟差插值精度的影响较大。方案 1 与方案 3、4 相比定轨精度提高了 8.8%。方案 2 的定轨精度比其他方案的精度低,主要原因是 30 s GPS 卫星钟差内插为 10 s 的精度相对较低,且运动学轨道是离散的位置点,相比约化动力学轨道更容易受到卫星钟差内插精度的影响。

从图 2 中可以看出,GRACE 卫星 329 d 和 331 d 的约化动力学轨道的精度明显低于其他天的轨道,但是相应的运动学轨道精度没有降低,其主要原因可能是当天 GRACE 卫星进行了轨道调整,常规的动力学模型不能正确反映卫星的真实情况,导致当天的定轨精度明显下降。

从理论上分析,提高观测数据的采样间隔能够改善 LEO 卫星约化动力学轨道的精度,主要是因为提高观测数据采样间隔可增加观测信息冗余度,从而提高轨道参数的解算精度;采用方案 1 运动学定轨结果精度较高,主要原因是提高观测数据采样间隔可以促进模糊度参数的求解精度,同时采用高采样率的 GPS 卫星钟差削弱了钟差内插造成的精度损失。

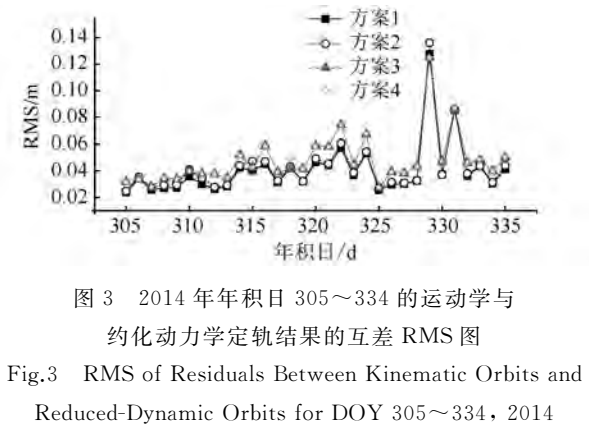
2.2.2 约化动力学与运动学轨道比较分析

运动学与约化动力学轨道之间的差异提供了另外一种轨道精度内部评定的方法。这种差异虽然不能直接表示轨道的精度,但由于运动学轨道对观测数据的质量非常敏感,而约化动力学轨道对力学模型及随机模型的精度非常敏感,因此它们之间的差异可以表征观测数据的质量及力学模型的正确性。图 3 给出了运动学轨道和约化动力学轨道之间的差异。

统计图 3 运动学与约化动力学定轨之间的差异可得方案 1~4 的 RMS 均值分别为 0.041 3 m、0.044 0 m、0.049 9 m 和 0.050 2 m,这与 JPL 参考轨道比对的分析结果基本一致。

2.2.3 轨道 SLR 残差

SLR 的观测值精度较高,但由于数据稀少,一般用于轨道精度验证^[16]。且上述精密轨道确定中未使用 SLR 观测数据,因此,可利用 SLR 观测数据获得 GRACE 卫星精密定轨的外符合精度。在实验计算时间段内共有 17 个 SLR 测站共 2 242 个标准数据点。计算中剔除了残差大于 15 cm(假定轨道的精度为 5 cm,按照 3 倍中误差进



行剔除)的标准数据点,得到 2 223 个标准数据点。图 4 给出了 4 个方案的约化动力学轨道的 SLR 残差。

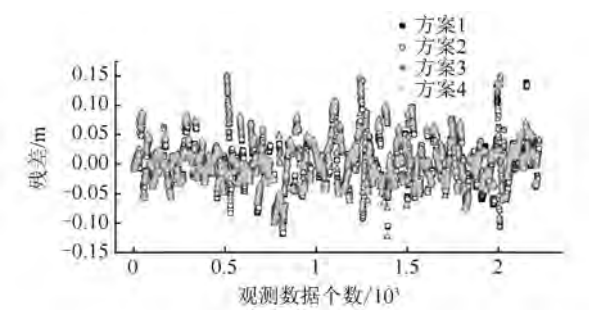


图 4 GRACE 约化动力学轨道 SLR 验证结果残差图
Fig.4 SLR Residuals for GRACE Reduced-Dynamic Orbits

统计图 4 中 GRACE 约化动力学轨道 SLR 验证结果可知,方案 1~4 的 SLR 残差 RMS 分别为 0.038 7 m、0.038 8 m、0.040 6 m 和 0.040 5 m。由此可知,4 种方案的约化动力学轨道的 SLR 验证结果和 JPL 参考轨道验证结果的整体趋势基本一致,说明 GRACE 卫星的定轨外符合精度较好,但两种验证方法之间存在一定的差异。除了 GRACE 卫星定轨自身的误差外,部分原因是 SLR 数据处理时没有对低高度角的观测数据进行进一步处理。

3 结 语

本文对 GPS 卫星钟差及观测数据间隔对 LEO 卫星运动学和约化动力学定轨的影响问题进行了研究,首先对 30 s 间隔 GPS 卫星钟差产品的内插精度进行了分析,而后基于实测数据采用不同间隔的 GPS 卫星钟差及观测数据计算了 2014 年 11 月 1 日至 2014 年 11 月 30 日的 GRACE 卫星的约化动力学和运动学轨道,并根据实验分析得出以下结论。

- 1)通过对 CODE 公布的 GPS 卫星钟差的内插精度分析表明,30 s 间隔卫星钟差内插到 5 s 的精度损失约为 0.01 m,在进行高精度 LEO 卫星定轨时应尽量采用 5 s 间隔 GPS 卫星钟差产品。
- 2)通过 JPL 参考轨道对比、约化动力学与运动学轨道对比以及 SLR 检验表明,提高观测数据的采样间隔能够改善 LEO 卫星约化动力学轨道的精度;同等间隔观测数据,使用 5 s 间隔卫星钟差只对 10 s 间隔观测数据运动学定轨结果有一定的改进。
- 3)使用 5 s 间隔 GPS 卫星钟差和 10 s 间隔

观测数据的定轨结果最优,约化动力学轨道精度最大可以提高 16%,运动学轨道精度最大可以提高 8.8%。

由于 GRACE 卫星观测数据采样间隔的限制,本文所进行的实验仅分析了观测数据采样间隔为 10 s 和 30 s 的情况,未对更高采样率的数据进行实验,这无疑限制了本文方法的适用范围,今后会针对 LEO 卫星更高采样率观测数据做进一步研究。

参 考 文 献

[1] Melbourne W G, Davis E S, Yunck T P, et al. The GPS Flight Experiment on TOPEX/ POSEIDON [J]. *Geophysical Research Letters*, 1994, 21(19): 2 171-2 174

[2] Haines B, Bertiger W, Desai S, et al. Initial Orbit Determination Results for Jason-1: Towards a 1 cm Orbit [J].*Navigation*, 2003, 50(3):171-180

[3] Svehla D, Rothacher M. Kinematic and Reduced-Dynamic Precise Orbit Determination of Low Earth Orbiters [J]. *Advances in Geosciences*, 2003, 1: 47-56

[4] Kang Z, Tapley B, Bettadpur S, et al. Precise Orbit Determination for the GRACE Mission Usingonly GPS Data [J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(6): 322-331

[5] Bock H, Jaggi A, Svehla D, et al. Precise Orbit Determination for the GOCE Satellite Using GPS [J]. *Advances in Space Research*, 2007, 39(10): 1 638-1 647

[6] Zhao Qile, Liu Jingnan, Ge Maorong, et al.Precise Orbit Determination of GPS and CHAMP Satellites with PANDA Software [J].*Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2005, 25(2):113- 116 (赵齐乐, 刘经南, 葛茂荣,等. 用 PANDA 对 GPS 和 CHAMP 卫星精密定轨[J]. *大地测量与地球动力学*, 2005, 25(2):113-116)

[7] Dow J M, Neilan R E, Rizos C. The International GNSS Service in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 83(3-4):191-198

[8] Montenbruck O, Gill E, Kroes R. Rapid Orbit Determination of LEO Satellites Using IGS Clock and Ephemeris Products [J]. *GPS Solutions*, 2005, 9 (3):226-235

[9] Hugentobler U. CODE High Rate Clocks. IGS Mail No. 4913 [OL]. igs.cb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2004/msg00136.html, 2004

[10] Gendt G. Combined IGS Clocks with 30 Second

Sampling Rate. IGS Mail No. 55253[OL]. igsb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2007/msg00003.html, 2006

[11] Bock H, Dach R, Jaggi A, et al. High-Rate GPS Clock Corrections from CODE: Support of 1Hz Applications [J]. *Journal of Geodesy*, 2009, 83(11): 1 083-1 094

[12] Schaer S, Dach R. Model Changes Made at CODE. IGS Mail No.5771[OL]. <http://igsb.jpl.nasa.gov>, 2008

[13] Allan D W. Time and Frequency (Time-Domain) Characterization, Estimation, and Prediction of Precision Clocks and Oscillators [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 1987, 34(6):647-654

[14] Case K, Kruizinga G L H, Wu S C. GRACE Level 1b Data Product User Handbook, JPL D-22027 [OL]. <http://podaac.jpl.nasa.gov/grace/documentation.html>, 2004

[15] Tian Yingguo, Hao Jinming, Liu Weiping, et al. Checking the GRACE Satellite Orbit Precision Using the KBR Data [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015, 31(6):580-583(田英

国, 郝金明, 刘伟平, 等. 利用 KBR 数据检核 GRACE 卫星精密轨道[J]. *测绘科学技术学报*, 2014, 31(6):580-583)

[16] Qin Xianping, Jiao Wenhai, Cheng Luying, et al. Evaluation of CHAMP Satellite Orbit with SLR Measurements[J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(1):38-41(秦显平, 焦文海, 程芦颖, 等. 利用 SLR 检核 CHAMP 卫星轨道[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2005, 30(1):38-41)

[17] Jaggi A. Pseudo-Stochastic Orbit Modeling Low Earth Satellites Using the Global Positioning System [D]. Switzerland: Astronomical Institute University of Berne, 2007

[18] Zhou Xiaoqing, Hu Zhigang, Zhang Xinyuan. Discussion on POD Accuracy Evaluations for Satellite-Borne LEO Satellites [J]. *Geomatic and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(11): 1 342-1 345(周晓青, 胡志刚, 张新远. 低轨卫星星载 GNSS 精密定轨的精度检核方法[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2010, 35(11):1 342-1 345)

Impact of Sample Rate of GPS Satellite Clock and Observation Data on LEO GPS-Based Precise Orbit Determination

TIAN Yingguo¹ HAO Jinming¹ CHEN Mingjian¹ YU Heli¹ HENG Peishen²

1 School of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 The Yellow River Bureau of Surveying and Mapping, Zhengzhou 450000, China

Abstract: The influence of GPS precise clock and observation data sampling internal on LEO kinematic and reduced-dynamic precise orbit determination (POD) was analyzed. The several experiments of LEO POD were carried out respectively by using the 30 s or 5 s sampling interval GPS precise clock from CODE and the 30 s or 10 s GPS observation data. The results show that 5 s GPS clock and 10 s observation data comparing with 30 s clock and 30 s observation data, the accuracy of reduced-dynamic POD is improved by 16%, and the kinematic POD is 8.8%. The accuracy of LEO POD is the worst by using 10 s observation data and 30 s GPS clock. For 30 s observation data, the accuracy of LEO POD by using 30 s GPS clock is consistent with 5 s GPS clock products from CODE.

Key words: GPS satellite precise clocks; sample interval; precise orbit determination for LEO satellite

First author: TIAN Yingguo, PhD candidate, specializes in LEO satellite precise orbit determination. E-mail: tianyg1987@sina.com