

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-01-0066-06

GLONASS 星载钟性能分析

赵丹宁

(宝鸡文理学院 电子电气工程学院, 宝鸡 721016)

摘要: 星载钟性能分析对于系统完好性监测、卫星钟差确定和预报等具有重要作用。GLONASS (Global Navigation Satellite System) 于2011年10月完成全球组网,目前在轨卫星全部搭载铯钟。采用欧洲定轨中心(CODE)提供的2018年4月1日00:00:00至2019年3月31日00:00:00期间的GLONASS事后精密卫星钟差产品,通过频率准确度、漂移率和稳定度3个指标对GLONASS星载钟在轨性能进行了分析。结果表明,GLONASS星载铯钟的频率准确度在 10^{-13} ~ 10^{-12} 量级,频率漂移率小于 $1 \times 10^{-14}/\text{d}$,日稳定度优于 1×10^{-13} 。

关键词: 全球卫星导航系统 (GLONASS); 星载钟; 频率准确度; 频率漂移率; 频率稳定度

Performance analysis of GLONASS satellite clocks

ZHAO Dan-ning

(School of Electrical & Electronic Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China)

Abstract: Analyzing the performance of satellite clock in space plays a key role in navigation system integrity monitoring, and satellite clock bias determination and prediction. By October 2011, Global Navigation Satellite System (GLONASS) had achieved full global coverage. Currently, all the in-flight satellites of GLONASS are equipped with high-precision Cesium clocks. In this paper, the performance of the in-orbit Cesium clocks equipped in GLONASS satellites is analyzed focusing on three indexes, namely frequency accuracy, drift and stability, by using the post precise GLONASS satellite clock products during April 1, 2018 and March 31, 2019 provided by the Center for Orbit Determination in Europe (CODE). The results show that the frequency accuracy of the Cesium clocks is in the order of 10^{-13} ~ 10^{-12} , the frequency drift $1 \times 10^{-14}/\text{d}$, and the frequency stability reaches the 1×10^{-12} level in 1 day interval.

Key words: Global Navigation Satellite System (GLONASS); satellite clocks; frequency accuracy; frequency drift; frequency stability

0 引言

星载钟作为维持导航卫星上时间基准的关键载荷,其性能直接影响卫星导航系统的服务质量。分析星载钟性能对于导航系统性能评估、系统完好性监测以及卫星钟差确定和预报具有重要意义^[1-3]。因此,

收稿日期: 2019-05-17; 2019-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11503031)

作者简介: 赵丹宁,女,讲师,主要从事GNSS空间信号质量监测与评估研究。

星载钟性能分析伴随着卫星导航系统发展的整个过程。国内外学者针对 GPS, Galileo 和 BDS 星载钟性能分析开展了大量的研究^[14-18], 形成了以频率准确度、漂移率与稳定度 3 个指标为参考的评估体系。GPS 和 BDS 星载钟性能的评估结果显示^[10], GPS 星载钟的频率准确度、日漂移率与日稳定度分别在 10^{-12} , 10^{-15} 和 10^{-14} 量级, BDS 星载钟的频率准确度、日漂移率与日稳定度分别在 10^{-11} , 10^{-14} 和 10^{-14} 量级。

随着“拯救 GLONASS 的补星计划”的加快实施, 俄罗斯于 2011 年 10 月完成对 GLONASS 的全球组网。根据俄罗斯联邦太空署信息中心 2019 年 4 月 9 日提供的数据, 目前 GLONASS 有 24 颗卫星正常工作, 1 颗备用、1 颗测试中, 在轨卫星全部为 2007 年后发射入轨运行的 GLONASS-M 系列卫星^[19]。与 GPS, Galileo 和 BDS 等不同, GLONASS 卫星上时间基准全部由铯钟来维持。与 GPS, Galileo 和 BDS 星载钟相比, 关于 GLONASS 星载钟性能分析的报道相对较少^[20], 故开展 GLONASS 星载钟性能分析的相关研究, 对于系统完好性监测、卫星钟差确定和预报等具有重要意义, 此外, 对于了解 GLONASS 系统运行状况, 并和北斗星载钟进行对比也具有现实意义。

GLONASS 自正式运行以来已经积累了大量的卫星钟差数据, 目前国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 分析中心提供 GLONASS 精密卫星钟差产品。本文采用欧洲定轨中心 (Center for Orbit Determination in Europe, CODE) 发布的 GLONASS 事后精密卫星钟差产品, 通过频率准确度、漂移率与稳定度 3 个指标, 对 GLONASS 星载钟的在轨性能进行了分析。

1 频率准确度、漂移率与稳定度计算方法

频率准确度、漂移率和稳定度是表征频率源性能的重要指标, 能够描述频率源的物理特性, 其中, 频率准确度表征频率源实际输出频率与标称频率的一致程度, 频率漂移率描述频率源在连续运行过程中频率值随运行时间单调变化的速率, 频率稳定度是频率源在给定的时间间隔内产生相同频率的一种量度。本节介绍了频率准确度、漂移率和稳定度 3 个指标的定义及计算方法。

1.1 频率准确度

频率准确度反映频率源实际输出频率和标称频率的一致程度, 是指实际输出频率和标称频率之间的相对偏差。频率准确度的计算公式为

$$A = \left| \frac{f_x - f_0}{f_0} \right|, \quad (1)$$

式 (1) 中, A 为频率准确度, f_0 为频率源的标称频率, f_x 为频率源的实际输出频率。由于实践中无法直接测量频率源实际输出频率和标称频率的相对偏差, 故一般情况下是选取某一参考频率源的实际频率作为标称频率来进行测量, 要求所选取的参考频率源的准确度比待测对象小 3 倍或 1 个数量级。

由于系统时准确度较高, 因此, 可以将星载钟相对于系统时的频率偏差认为是星载钟的频率准确度, 即准确度的测量可以转化为相对频率偏差的测量。将卫星钟差数据记为 $\{x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)\}$, 其中, N 为取样个数, t_1, t_2, \dots, t_N 为取样时序, 利用最小二乘法对钟差序列进行线性拟合, 拟合函数为

$$x(t) = \bar{x} + K_T(t - \bar{t}), \quad (2)$$

$$\text{式 (2) 中, } \bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i), \quad k = \frac{\sum_{i=1}^N [x(t_i) - \bar{x}](t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}.$$

将线性拟合的钟差数据记为 $\{\hat{x}(t_1), \hat{x}(t_2), \dots, \hat{x}(t_N)\}$, 准确度的测量可以通过测量平均频率偏差的方法

来实现, 其计算公式为

$$A = \frac{\hat{x}(t + \tau) - \hat{x}(t)}{\tau}, \quad (3)$$

式(3)中, A 为频率准确度, τ 为取样间隔。由于星载钟存在一定程度的频率漂移, 故取样时长不宜过大, 一般取 $\tau = 1\text{d}$ 。以 τ 为取样间隔可以获得多个频率准确度, 通常取多个频率准确度的平均值或最大值作为评估时段准确度的最终值^[4, 10]。

1.2 频率漂移率

频率源在连续运行过程中, 由于受到内部元器件的老化和环境变化的影响, 频率值会随运行时间单调减小或增大, 这种频率值随运行时间单调变化的现象称为频率漂移, 单调变化的速率即为频率漂移率, 也称为频率老化率。频率漂移率的最小二乘解为^[1]

$$D = \frac{\sum_{i=1}^N [y(t_i) - \bar{y}](t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2}, \quad (4)$$

式(4)中, D 为频率漂移率, $y(t_i)$ 为 t_i 时刻的相对频率值, $\bar{y}(\tau)$ 的表达式为

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(t_i), \quad (5)$$

式(5)中, 其他符号意义同上。

1.3 频率稳定度

频率稳定度是衡量频率源性能优劣的重要指标之一。Allan 系列方差是最常用的表征原子钟时域稳定性的统计方差, 其中, 重叠 Allan 方差具有较高的置信度且计算公式相对简单, 本文使用重叠 Allan 方差计算 GLONASS 星载铯钟的频率稳定度。基于钟差数据的重叠 Allan 方差的计算公式为^[5]

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2m^2 \tau_0^2 (N - 2m)} \sum_{i=1}^{N-2m} [x(t_{i+2m}) - 2x(t_{i+m}) + x(t_i)]^2, \quad (6)$$

式(6)中, τ_0 为钟差数据的采样间隔, $m = \tau/\tau_0$ 。

2 星载钟在轨性能分析

星载钟性能分析通常是利用精密卫星钟差产品来开展研究的。本文收集了欧洲定轨中心公开发布的 2018 年 4 月 1 日 00:00:00 至 2019 年 3 月 31 日 00:00:00 共 1 年的 300 s 采样间隔的 GLONASS 事后精密卫星钟差数据进行星载钟性能分析, 该精密钟差数据是利用 GLONASS 地面跟踪站的观测数据进行多星定轨联合求解钟差与轨道获得, 该钟差产品和轨道产品耦合, 是目前国际上精度领先的 GLONASS 卫星钟差产品^[21], 可以较为客观地分析 GLONASS 星载钟的性能。

针对卫星钟差数据异常, 利用具有较好抗差性与时效性的中位数 (median absolute deviation, MAD) 法对每天的钟差数据进行预处理^[11], 简要流程为: 首先基于相位数据来发现相位跳变, 定位相位跳变并处理后, 再将相位数据转换为频率数据进行粗差探测, 探测出的异常钟差所对应的历元标记为数据缺失。

以 1 个月作为时间单元计算频率准确度、漂移率和稳定度, 这样可以获得 12 个计算单元 (1 年) 的准确度、漂移率和稳定度进行分析, 其中, 每个计算单元的准确度、漂移率和稳定度分别采用如下策略进行计算: ① 频率准确度计算: 为避免频率漂移对钟差数据的影响, 以及确保在每个计算单元可以

足够多的相对偏离偏差值,以 1 d 为取样时长对钟差序列进行拟合,取 1 个月内相对频率偏差值的平均值作为每个月的频率准确度;② 频率漂移率计算:考虑到可靠的频率漂移率计算通常需要至少 15 d 的连续数据,以 1 个月为取样时长计算漂移率,即按照 1 个月作为拟合数据处理单元,1 个月拟合 1 个值,结果统一转化到日漂移率;③ 由于日稳定度(简称日稳,取样间隔 $\tau = 84\,600\text{ s}$)是衡量星载钟频率稳定度的一个重要指标,与频率漂移率计算相似,以 1 个月为取样时长计算每个月的天稳定度。

图 1 至图 3 分别给出了 GLONASS 星载钟在 2018 年 4 月 1 日 00:00:00 至 2019 年 3 月 31 日 00:00:00 期间每个月的频率准确度、日漂移率和日稳,需要说明的是,当取样时段数据连续且无数据缺失时则计算该时段的准确度、漂移率和稳定度,否则该时段的准确度、漂移率和稳定度记为空,故某些月份的准确度、漂移率和稳定度值空缺,此外, R12 卫星在此期间一直处于不可用状态,故不予分析。图 1 至图 3 中可以看出, GLONASS 星载钟的频率准确度处于 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 量级;大部分星载钟的频率漂移率小于 $1 \times 10^{-14}/\text{d}$, R09, R11 和 R22 等个别卫星钟的频率漂移率在个别月份出现了比较明显的异常值的情况(在 $2 \sim 4 \times 10^{-14}/\text{d}$ 范围),但随后又会被调整到相对较好的状态,其中 R22 卫星钟表现的较为明显,出现这种现象的可能原因在于,随着星载钟在轨运行时间的推移,其频率漂移率会逐渐变大,当地面监测站监测到卫星钟频率漂移率变大对星载钟准确度造成影响时,会对星载钟进行一定的处理来校准频率漂移; GLONASS 星载钟的日稳处于 10^{-14} 量级,同样存在个别卫星在个别月份出现较大异常值的现象,这可能是由于星载钟调相或调频操作引起的。

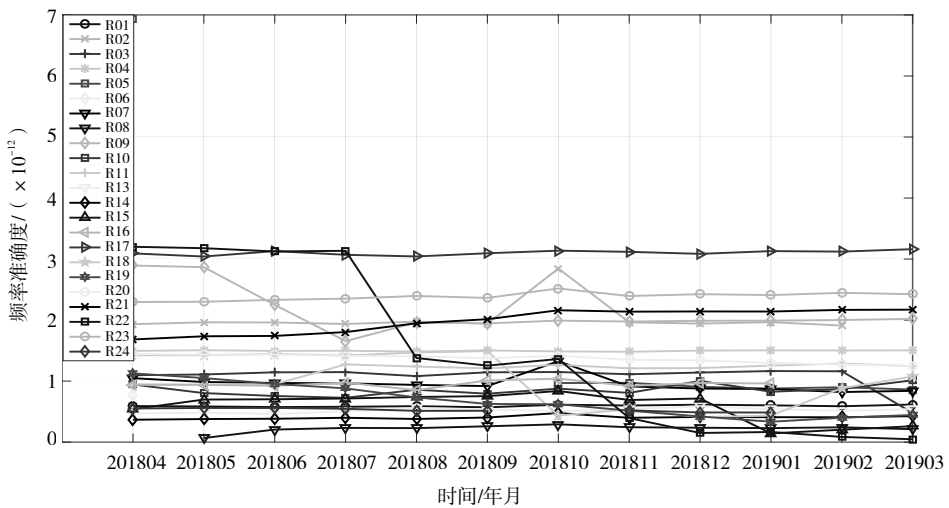


图 1 GLONASS 星载钟频率准确度

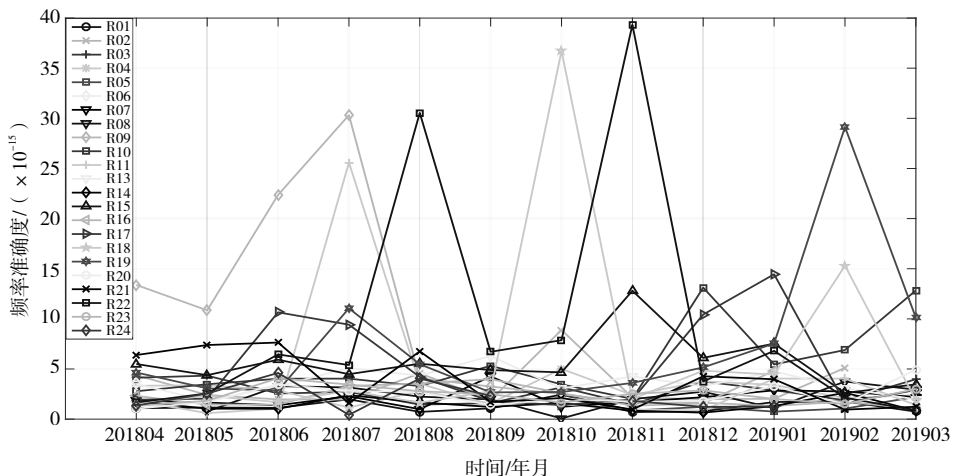


图 2 GLONASS 星载钟频率漂移率

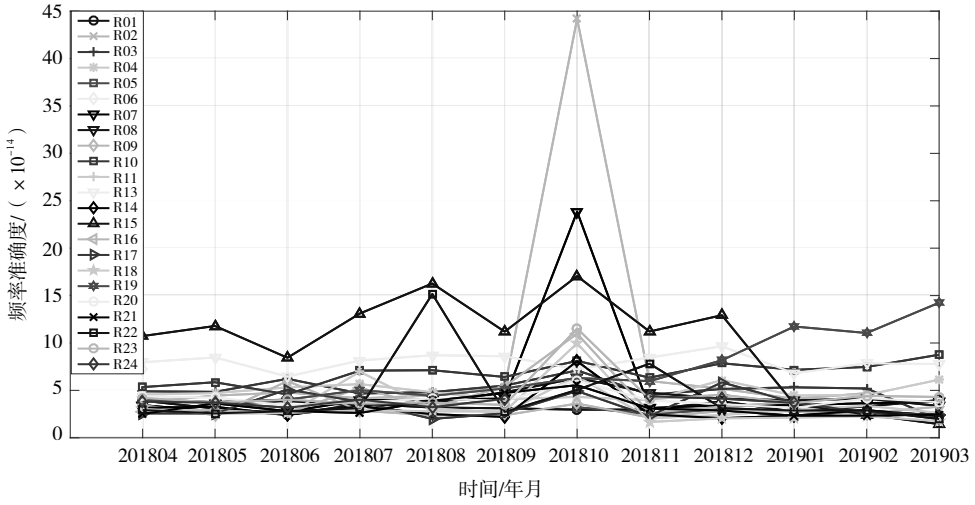


图 3 GLONASS 星载钟日稳定度

表 1 统计了各星载钟 2018 年 4 月 1 日 00:00:00 至 2019 年 3 月 31 日 00:00:00 期间所有月份频率准确度、漂移率和稳定度的平均值, 从表中可以看到, GLONASS 星载钟频率准确度处于 $10^{-13} \sim 10^{-12}$ 量级, 频率漂移率相当小, 均小于 $1 \times 10^{-14}/d$, 日稳维持在 1×10^{-13} 以内。

表 1 GLONASS 星载钟频率准确度、漂移率与稳定度

卫星	准确度/ $(\times 10^{-12})$	漂移率/ $(\times 10^{-15}/d)$	日稳/ $(\times 10^{-14})$
R01	0.59	1.27	3.26
R02	2.03	3.39	8.28
R03	1.08	2.83	5.02
R04	1.50	2.85	4.88
R05	1.78	1.79	2.78
R06	0.77	3.59	7.20
R07	0.96	2.11	5.20
R08	0.22	2.18	4.18
R09	2.13	7.84	3.06
R10	0.86	5.56	6.85
R11	1.17	3.90	3.42
R13	0.52	3.72	8.01
R14	0.40	1.41	3.09
R15	0.58	5.66	9.98
R16	0.95	2.64	4.28
R17	3.10	5.23	3.37
R18	1.04	6.50	3.05
R19	0.68	7.34	7.00
R20	1.37	2.37	4.04
R21	1.99	3.75	3.24
R22	1.46	9.51	4.42
R23	2.39	2.46	4.61
R24	0.53	2.17	3.81
均值	1.22	3.92	4.91

3 结语

本文针对 GLONASS 星载钟性能分析,介绍了频率准确度、漂移率和稳定度的计算方法,并利用欧洲定轨中心公开发布的 GLONASS 事后精密卫星钟差产品,基于准确度、漂移率和稳定度的计算方法对 GLONASS 在轨运行的星载铯钟的性能进行了分析。分析结果表明,频率准确度处于 10^{-13} ~ 10^{-12} 量级,部分星载钟优于 1×10^{-12} ,频率漂移率均小于 $1 \times 10^{-14}/\text{d}$,日稳定度维持在 1×10^{-13} 以内。

相比 GPS 和 BDS 频率准确度、漂移率和稳定度指标^[10],GLONASS 星载钟的频率准确度 (10^{-12}) 和日漂移率 (10^{-15}) 与 GPS 数值量级相当,比 BDS 星载钟的频率准确度 (10^{-11}) 和日漂移率 (10^{-14}) 高一个数量级;GLONASS 星载钟的日稳定度指标与 GPS 和 BDS 处于同一数量级。

参考文献:

- [1] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2006.
- [2] 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.
- [3] 王宇谱. GNSS 星载原子钟性能分析与卫星钟差建模预报研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2017.
- [4] 贾小林, 冯来平, 毛悦, 等. GPS 星载原子钟性能评估[J]. 时间频率学报, 2012, 33(2): 115-120.
- [5] HUANG G, ZHANG Q, LI H, et al. Quality variations of GPS satellite clocks on-orbit using IGS clock products[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 978-987.
- [6] STEIGENBERGER P, HUGENTOBLER U, LOYER S, et al. Galileo orbit and clock quality of the IGS Multi-GNSS Experiment[J]. Advances in Space Research, 2015, 55(1): 269-281.
- [7] GRIGGS E, KURSINSKI E R, AKOS D. Short-term GNSS satellite clock stability[J]. Radio Science, 2015, 50(8): 813-826.
- [8] WANG B, LOU Y D, LIU J N, et al. Analysis of BDS satellite clocks in orbit[J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 783-794.
- [9] 王宇谱, 吕志平, 李林阳, 等. GPS BLOCK IIF 星载原子钟长期性能分析[J]. 天文学报, 2017, 58(3): 11-21.
- [10] 刘帅, 贾小林, 孙大伟. GNSS 星载原子钟性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 277-284.
- [11] 王宇谱, 吕志平, 王宁. BDS 星载原子钟长期性能分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(2): 157-169.
- [12] 王宁, 王宇谱, 李林阳, 等. BDS 星载原子钟频率稳定性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1256-1263.
- [13] 李明哲, 张绍成, 胡友健, 等. 基于高频观测值的不同 GNSS 卫星钟稳定性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10): 1490-1495+1053.
- [14] 钦伟瑾, 葛玉龙, 杨旭海. 伽利略星载被动型氢原子钟性能评估[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 93-99.
- [15] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. 北斗三号试验卫星的钟差评估及预报[J]. 天文学报, 2018, 59(1): 58-71.
- [16] HUANG G W, CUI B B, XU Y, et al. Characteristics and performance evaluation of Galileo on-orbit satellites atomic clocks during 2014-2017[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(9): 2899-2911.
- [17] WU Z Q, ZHOU S S, HU X G, et al. Performance of the BDS3 experimental satellite passive hydrogen maser[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 43.
- [18] 王阳, 胡彩波, 徐金锋, 等. BD-2 在轨卫星钟性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 39(3): 252-255+268.
- [19] Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing. GLONASS constellation status[EB/OL]. (2005-08-10) [2019-04-09]. <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS>.
- [20] 张清华, 王源, 孙阳阳, 等. BDS 与 GPS/GLONASS 星载原子钟性能的比较分析[J]. 海洋测绘, 2015, 35(2): 62-64+68.
- [21] DACH R, SCHAER S, BOCK H, et al. CODE's new combined GPS/GLONASS clock product[C] // International GNSS Service IGS Workshop 2010, IGS: England, 2010.