

引文格式: 樊礼谦, 焦文海, 蔡洪亮, 等. 北斗三号卫星钟长期稳定性分析[J]. 导航定位学报, 2022, 10(4): 11-19. (FAN Liqian, JIAO Wenhai, CAI Hongliang, et al. Long-term stability analysis of BDS-3 satellite clock[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(4): 11-19.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20220402.

北斗三号卫星钟长期稳定性分析

樊礼谦¹, 焦文海², 蔡洪亮², 周巍², 徐颖³, 周舒涵¹

(1. 信息工程大学 地理空间信息学院, 郑州 450001; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094;
3. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094)

摘要: 采用北斗三号 (BDS-3) 卫星 2a 精密钟差产品, 分析了 BDS-3 卫星钟相位和频率的变化情况, 提出了一种跳变频率修复方法并评估了卫星钟的长期稳定性。结果表明: BDS-3 卫星氢钟表现出色, 调频次数明显少于铷钟, 且长期稳定性优于铷钟。中圆地球轨道 (MEO) 卫星氢钟 5 d 以上的稳定度最优可达 3.5×10^{-15} , 重叠哈达玛 (Hadamard) 方差平均值皆小于 8×10^{-15} ; 铷钟 15 d 以内的稳定度优于 9×10^{-14} , 重叠 Hadamard 方差平均值小于 5×10^{-14} , 30 d 以上的稳定度较差; 倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星氢钟在研究的时间段内的稳定度皆优于 3×10^{-14} 。依托长期稳定性评估结果, 可为长期自主守时原子钟加权提供参考依据。

关键词: 北斗三号; 卫星钟; 长期变化; 长期稳定性; 频率跳变

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2022)04-0011-09

Long-term stability analysis of BDS-3 satellite clock

FAN Liqian¹, JIAO Wenhai², CAI Hongliang², ZHOU Wei², XU Ying³, ZHOU Shuhan¹

(1. Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;
2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China;
3. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: The two-year precise clock offset of BeiDou-3 navigation satellite System (BDS-3) satellite was used to analyze the phase and frequency variations of the BDS-3 satellite clock, and a jump frequency repair method was proposed and the long-term stability of the satellite clock was evaluated. The results show that the BDS-3 passive hydrogen maser performs well, with significantly fewer tuning times than the rubidium clock, and better long-term stability than the rubidium clock. The optimal stability of Medium Earth Orbit (MEO) satellite passive hydrogen masers can reach 3.5×10^{-15} above 5 d intervals, and the average value of overlapping Hadamard variances is less than 8×10^{-15} . The stability of the rubidium clocks is better than 9×10^{-14} below 15 d intervals, and the average value of overlapping Hadamard variances is less than 5×10^{-14} , but the stability above 30 d intervals is poor. The stability of Inclined GeoSynchronous Orbit (IGSO) satellite passive hydrogen masers is better than 3×10^{-14} . Relying on the results of the long-term stability assessment, it can provide a reference for long-term autonomous timekeeping atomic clock weighting.

Keywords: BeiDou-3 navigation satellite system; satellite clock; long-term variation; long-term stability; frequency jump

0 引言

原子钟作为导航卫星最核心的产品, 是导航

卫星的“心脏”。北斗三号全球卫星导航系统即北斗三号 (BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3) 的卫星, 皆搭载 4 台原子钟, 其中 12 颗

收稿日期: 2022-03-18

第一作者简介: 樊礼谦 (1997—), 男, 广西玉林人, 硕士研究生, 研究方向为导航星座自主守时方法。

通信作者简介: 焦文海 (1971—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 研究员, 研究方向为时空基准和卫星导航总体技术。

卫星搭载 4 台铷钟, 16 颗卫星搭载 2 台氢钟和 2 台铷钟, 2 颗卫星搭载 1 台氢钟和 3 台铷钟。高精度星载原子钟可有效控制自主导航过程中卫星星座的时间漂移^[1]。星载原子钟是以原子谐振器的频率为参考频率的时钟, 卫星钟则是以星载原子钟输出频率为参考, 通过频率综合技术为卫星各分系统提供频率基准和提供高精度时间基准的星上计时装置。卫星钟在维持天基时间基准上发挥着举足轻重的作用, 性能水平决定导航星座的定位、导航、授时服务质量^[2], 对其进行评估有利于了解原子钟的健康状态, 在系统完好性监测^[3]、卫星钟差预报^[4-6]、导航系统建设以及服务质量提升方面具有重要借鉴意义。

BDS-3 在 2020 年 6 月 23 日完成全球组网, 于 2020 年 7 月 31 日向全球提供服务, 服务性能较北斗卫星导航(区域)系统即北斗二号(BeiDou navigation satellite (regional) system, BDS-2)有了较大提升, 分析其组网卫星钟时频特性具有十分重要的意义。围绕全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)卫星钟性能评估开展的研究较多^[7-9], 为开展 BDS-3 卫星钟时频特性研究提供了参考。文献[10]对全球定位系统(global positioning system, GPS)卫星钟的频率准确度、稳定性和漂移率进行了分析, 并表明 GPS Block IIR 星载铷原子钟日稳定度已经处于 $(1\sim3)\times 10^{-14}$ 水平; 文献[11]分析了格洛纳斯卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)在轨卫星铯钟的相位、频率、漂移率以及噪声长期变化特性, 表明新卫星钟具有更优的物理特性和更低的模型噪声; 文献[12]分别统计了伽利略卫星导航系统(Galileo navigation satellite system, Galileo)和 BDS-2 卫星钟的万秒稳、日漂移率、残差序列、准确度和天稳定度等指标, 从整体上讲, Galileo 卫星钟各项性能指标均优于 BDS-2 卫星钟; 文献[13]分析了 BDS-3 卫星钟的性能, 其频率稳定性较 BDS-2 有了较大提升, 且氢钟长期稳定性明显优于铷钟; 文献[14-15]利用长期精密钟差产品分析了 BDS-3 卫星钟的时频特性, 但因 BDS-3 部分卫星发射较晚, 钟差数据长度较短或者没有可用数据, 未能完全体现卫星钟的长期性能。

在噪声特性和钟漂特性方面, BDS-2 的中圆地球轨道(medium Earth orbit, MEO)卫星钟在长期性能上优于倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbits, IGSO)卫星钟和地球静止轨

道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星钟^[16]; 在稳定度方面, BDS-2 的 MEO 卫星钟稳定性最好, 其次是 IGSO 卫星钟, GEO 卫星钟的稳定性最差, 而 BDS-3 卫星钟的稳定度又显著优于 BDS-2 卫星^[9]。目前 BDS-3 卫星钟的千秒稳定度和万秒稳定度优于 8×10^{-14} ^[13, 17], 氢钟的天稳接近 6×10^{-15} ^[18]。然而, BDS-3 星载原子钟工作时间普遍较短, 鲜有研究对 BDS-3 全部 MEO 卫星钟和 IGSO 卫星钟的长期特性进行分析。一方面是 BDS-3 卫星的精密钟差产品累积过少; 另一方面是卫星钟调频调相以及钟切换行为导致长期稳定性评估困难。而卫星钟的长期稳定性在导航星座自主守时上具有重要的参考价值, 可为原子钟加权提供可靠依据。

为了解决导航星座长期自主守时星载原子钟合理加权问题, 本文利用 2 a 的精密钟差产品分析 BDS-3 卫星钟的长期时频变化基础上, 通过对跳变频率进行修复, 分析了卫星钟的长期稳定性, 得出了有益结果, 可为 BDS-3 自主守时卫星钟加权提供依据。

1 卫星钟评估方法

1.1 数据预处理

人为调整、外界环境影响或者硬件设备异常, 会导致卫星钟时频序列出现跳变或者间断, 对其时频特性分析前需对数据进行预处理。预处理主要是探测并剔除异常值, 因相位数据相对频率数据数值较大, 异常点被淹没, 从而导致相位数据异常值体现不明显^[19]。为了便于粗差的判断与识别, 通常把原始相位数据经过一次差分转换为频率数据。频率数据能够很直观地体现粗差点, 且能反映频率跳变情况。

粗差探测常用中位数法(median absolute deviation, MAD)和多项式拟合法。MAD 具有较好的抗差性和时效性, 是基于数据中值的稳健统计^[20], 表达式为

$$\sigma_{\text{MAD}} = \text{median}\{|y(i) - m|/0.6745\} \quad (1)$$

式中: σ_{MAD} 为粗差探测阈值; i 为频率数据历元数; $y(i)$ 为频率数据序列; $m = \text{median}\{y(i)\}$ 为频率数据序列 $y(i)$ 的中位数。若频率数据 $|y(i)| > (m + n \cdot \sigma_{\text{MAD}})$ (n 取 3, 4, 5), 则认为此值为粗差或异常值, 将其设置为 0^[21], 表示为数据缺失。

MAD 对于粗差的大小不敏感, 具有较好的粗差剔除效果。然而铷钟存在明显的频漂现象, 频率序列不严格遵循正态分布, 当处理数据较长时, 粗

差无法完全剔除, 此类频率序列可采用多项式拟合法进行粗差的探测与剔除。通过对频率数据进行拟合, 计算拟合残差的中误差^[9]为

$$\sigma = \sqrt{V^T V / (t-1)} \quad (2)$$

式中: V 为拟合残差矢量; t 为拟合数据量; $\text{mean}(V)$ 为拟合残差均值, 若 $|V_k - \text{mean}(V)| > 3\sigma$ 则判断为粗差, 其中 V_k 为第 k 个残差值。

因频率序列一般呈线性趋势, 通常采用一阶多项式拟合再经过两次迭代基本可把粗差剔除, 若卫星钟发生调频则分段处理。

经过粗差剔除后, 数据存在不同程度缺失。为了保证足够的采样数据, 在进行稳定性分析前通过插值方式对缺失数据进行填充。

1.2 频率稳定度

频率稳定度主要反映卫星钟频率受环境等因素影响的变化情况, 也表征授时的稳定性, 通常采用阿伦 (Allan) 方差和哈达玛 (Hadamard) 方差表征原子钟稳定度。Allan 方差通常用来分析氢钟稳定性, 但其不能很好地对受频漂影响较为明显的铷钟稳定性进行有意义的估计。若要正确分析铷钟稳定性, 需要对其进行去频漂处理; 而 Hadamard 方差能够有效抑制频率漂移, 处理发散

噪声^[22], 因此 Hadamard 方差常被用来计算铷原子钟的频率稳定度。BDS-3 卫星搭载有氢钟和铷钟, 为了简便有效分析卫星钟频率稳定性, 本文选择重叠 Hadamard 方差进行分析。

基于采样间隔为 τ_0 的相对频率偏差数据序列 $\{y(i), i=1, 2, 3, \dots, M\}$ 的重叠 Hadamard 方差^[20]表示为

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6m'^2(M-3m'+1) \cdot \tau^2} \sum_{j=1}^{M-3m'+1} \sum_{i=j}^{j+m'-1} [y_{i+2m'} - 2y_{i+m'} + y_i]^2 \quad (3)$$

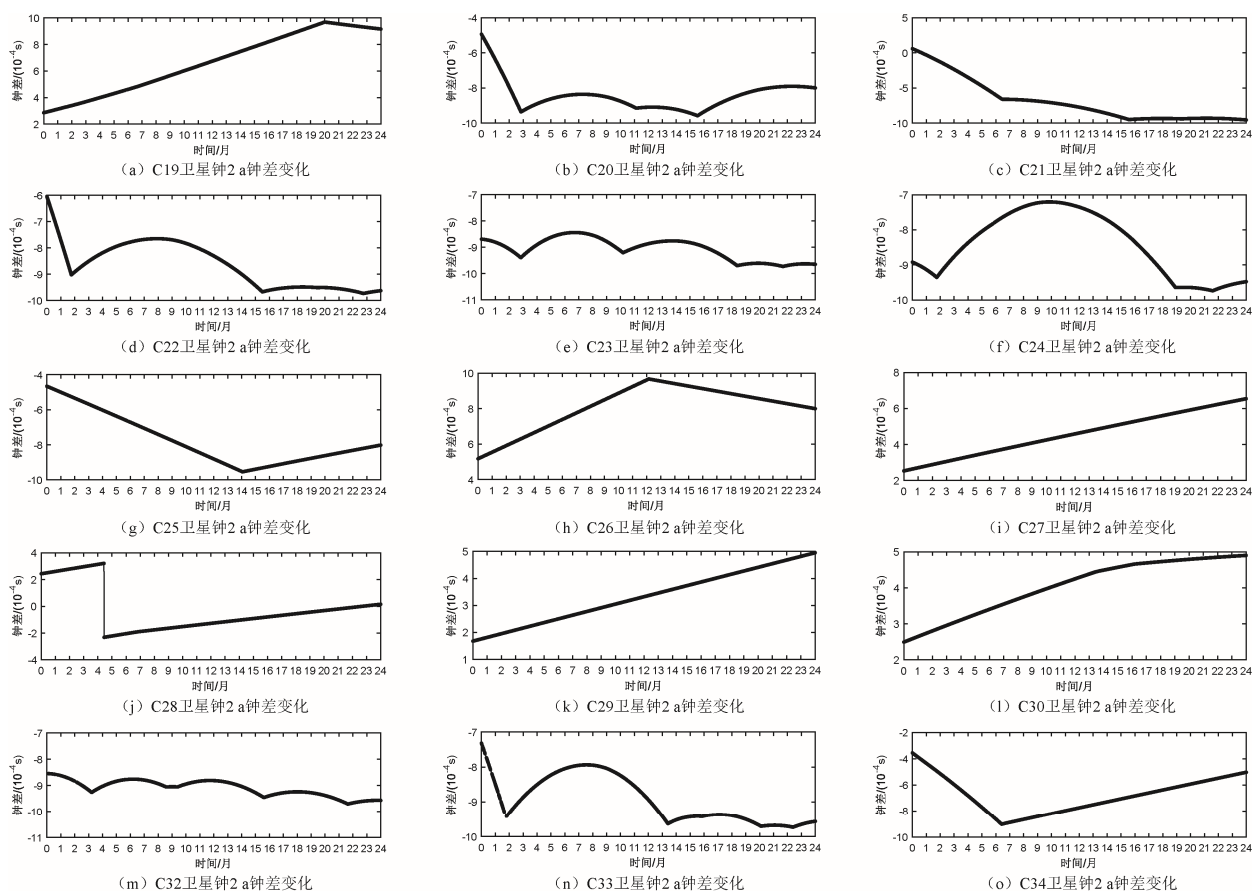
式中: M 为频率数据个数; $\tau = m'\tau_0$ 为平滑时间;

m' 为平滑因子, 取 $1 \leq m' \leq \text{int}\left(\frac{M}{3}\right)$ 。

2 算例分析

2.1 BDS-3 卫星钟长期变化分析

选取德国地学研究中心 (Deutsches GeoForschungsZentrum, GFZ) 提供的 2020 年 1 月 1 日至 2021 年 12 月 31 日连续 2 a 的 BDS-3 卫星精密钟差产品, 数据采样间隔为 5 min, 对 24 颗 MEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星的钟差和频率序列进行绘图分析, 结果如图 1 和图 2 所示, 其中频率序列已经过预处理。



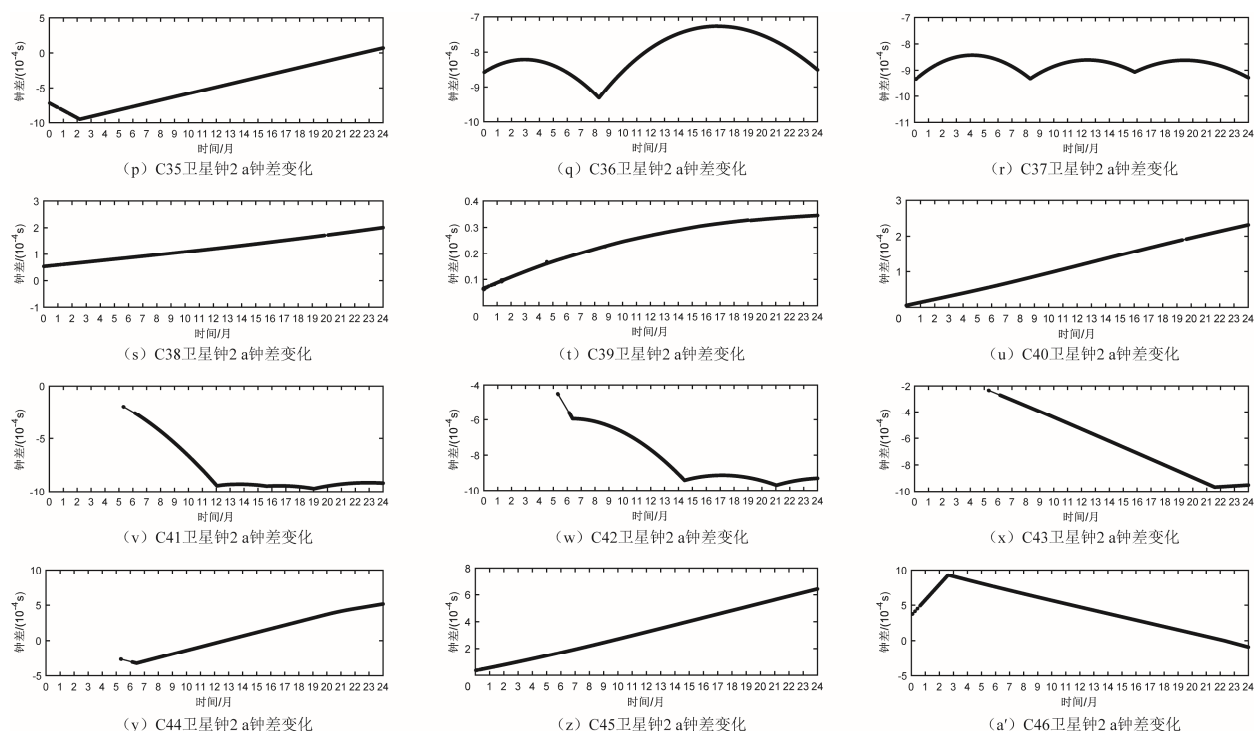
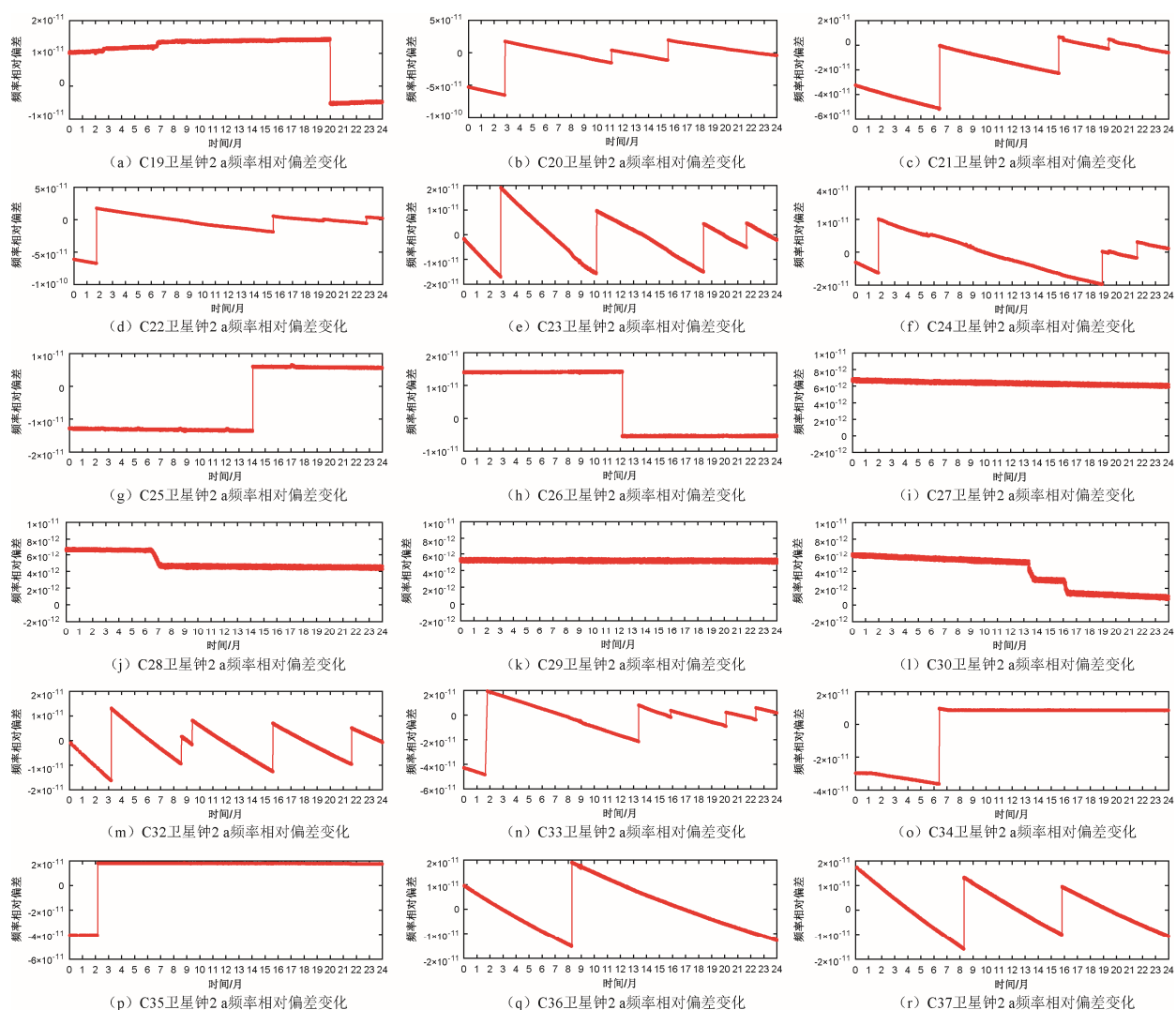


图1 BDS-3 卫星钟差变化长期变化序列



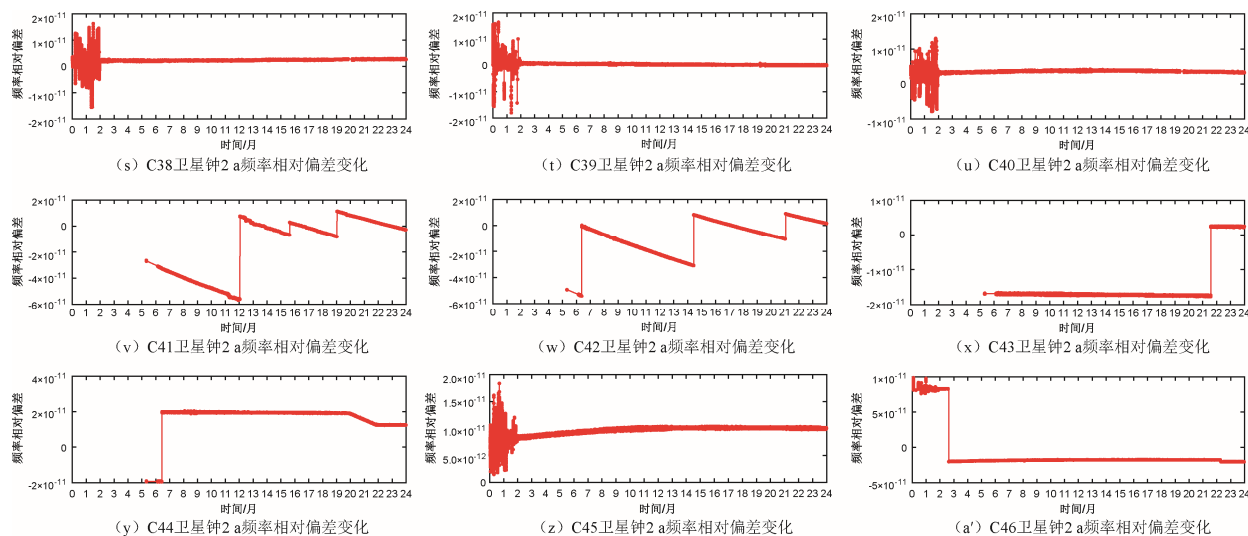


图2 BDS-3 卫星钟频率长期变化序列

根据图1和图2可知,2a 间仅 C28 卫星在 2020 年 5 月 15 日发生了一次调相,C41、C42、C43 和 C44 卫星在 2020 年 6 月 11 日开始有钟差数据,而后缺少 24 d 的钟差数据,直到 2020 年 7 月 6 日 GFZ 才提供连续的钟差产品。C25 卫星的频率序列每隔一段时间出现异常“凸起”,例如 2020 年 3 月、2020 年 6 月、2020 年 9 月、2021 年 1 月和 2021 年 6 月;C41 卫星在 2020 年 12 月至 2021 年 4 月频率跳动频繁。C38、C39、C40、C45 和 C46 卫星在 2020 年前 2 个月钟差数据出现不同

程度缺失且频率跳动较大,可能原因是星载钟刚开始工作时频率不稳定。

BDS-3 大部分卫星钟发生了多次明显的调频现象。调频是为了把卫星钟与北斗系统时间偏差控制在一定范围,避免卫星钟因频率漂移导致时间偏差逐步增大,影响用户服务性能。为了计算调频后的频率跳变量,以跳变处前后分别滑动 1 d 计算的频率平均值差值来表征,卫星钟调频频次和频率跳变量统计结果如表 1 所示。表 1 中,PRN (pseudo random noise code) 为伪随机噪声识别码。

表1 BDS-3 卫星钟频率变化统计

PRN	卫星类型	主钟	主动调频次数	调频时间	调频前频率相对偏差	调频后频率相对偏差	频率相对跳变
C19	MEO-1	铷钟	1	2021-09-01	14.31×10^{-12}	-5.2×10^{-12}	-19.57×10^{-12}
C20	MEO-2	铷钟	3	2020-03-27	-65.32×10^{-12}	17.62×10^{-12}	82.93×10^{-12}
				2020-12-05	-15.44×10^{-12}	4.01×10^{-12}	19.45×10^{-12}
				2021-04-18	-11.39×10^{-12}	19.72×10^{-12}	31.11×10^{-12}
C21	MEO-3	铷钟	3	2020-07-15	-51.26×10^{-12}	-0.59×10^{-12}	50.67×10^{-12}
				2021-04-19	-22.67×10^{-12}	6.58×10^{-12}	29.26×10^{-12}
				2021-08-14	-3.02×10^{-12}	4.70×10^{-12}	7.72×10^{-12}
C22	MEO-4	铷钟	4	2020-02-23	-67.26×10^{-12}	17.63×10^{-12}	84.89×10^{-12}
				2021-04-16	-18.67×10^{-12}	5.70×10^{-12}	24.38×10^{-12}
				2021-08-14	-1.75×10^{-12}	0.65×10^{-12}	2.41×10^{-12}
				2021-11-24	-5.53×10^{-12}	4.19×10^{-12}	9.72×10^{-12}
C23	MEO-5	铷钟	4	2020-03-27	-16.95×10^{-12}	19.02×10^{-12}	35.98×10^{-12}
				2020-11-06	-15.63×10^{-12}	9.66×10^{-12}	25.29×10^{-12}
				2021-07-13	-14.99×10^{-12}	4.48×10^{-12}	19.47×10^{-12}
				2021-10-22	-4.97×10^{-12}	4.72×10^{-12}	9.69×10^{-12}
C24	MEO-6	铷钟	3	2020-02-23	-12.55×10^{-12}	20.04×10^{-12}	32.59×10^{-12}
				2021-07-30	-19.50×10^{-12}	0.39×10^{-12}	19.88×10^{-12}
				2021-10-19	-3.52×10^{-12}	6.20×10^{-12}	9.71×10^{-12}

(续表)

PRN	卫星类型	主钟	主动调频次数	调频时间	调频前频率相对偏差	调频后频率相对偏差	频率相对跳变
C25	MEO-11	氢钟	1	2021-03-04	-13.53×10^{-12}	6.02×10^{-12}	19.55×10^{-12}
C26	MEO-12	氢钟	1	2021-01-05	14.14×10^{-12}	-5.41×10^{-12}	-19.54×10^{-12}
C27	MEO-7	氢钟	0	—	—	—	—
C28	MEO-8	氢钟	0	—	—	—	—
C29	MEO-9	氢钟	0	—	—	—	—
C30	MEO-10	氢钟	0	—	—	—	—
C32	MEO-13	铷钟	5	2020-04-08	-16.20×10^{-12}	12.98×10^{-12}	29.18×10^{-12}
				2020-09-19	-9.41×10^{-12}	1.62×10^{-12}	11.03×10^{-12}
				2020-10-13	-1.46×10^{-12}	8.11×10^{-12}	9.57×10^{-12}
				2021-04-20	-12.46×10^{-12}	6.96×10^{-12}	19.43×10^{-12}
				2021-10-21	-9.51×10^{-12}	5.06×10^{-12}	14.58×10^{-12}
C33	MEO-14	铷钟	5	2020-02-25	-48.29×10^{-12}	19.40×10^{-12}	67.69×10^{-12}
				2021-02-12	-21.20×10^{-12}	8.00×10^{-12}	29.20×10^{-12}
				2021-04-28	-1.54×10^{-12}	3.72×10^{-12}	5.25×10^{-12}
				2021-09-04	-8.96×10^{-12}	2.22×10^{-12}	11.17×10^{-12}
				2021-11-13	-3.74×10^{-12}	5.93×10^{-12}	9.67×10^{-12}
C34	MEO-15	氢钟	1	2020-07-14	-36.33×10^{-12}	9.59×10^{-12}	45.92×10^{-12}
C35	MEO-16	氢钟	1	2020-03-07	-40.65×10^{-12}	18.03×10^{-12}	58.68×10^{-12}
C36	MEO-17	铷钟	1	2020-09-09	-15.12×10^{-12}	18.97×10^{-12}	34.09×10^{-12}
C37	MEO-18	铷钟	2	2020-09-10	-15.88×10^{-12}	13.29×10^{-12}	29.17×10^{-12}
				2021-04-27	-10.02×10^{-12}	9.44×10^{-12}	19.46×10^{-12}
C38	IGSO-1	氢钟	0	—	—	—	—
C39	IGSO-2	氢钟	0	—	—	—	—
C40	IGSO-3	氢钟	0	—	—	—	—
C41	MEO-19	铷钟	3	2021-01-02	-55.88×10^{-12}	7.52×10^{-12}	63.40×10^{-12}
				2021-04-21	-6.88×10^{-12}	2.75×10^{-12}	9.62×10^{-12}
				2021-08-02	-8.15×10^{-12}	11.29×10^{-12}	19.45×10^{-12}
C42	MEO-20	铷钟	3	2020-07-13	-53.93×10^{-12}	-0.34×10^{-12}	53.59×10^{-12}
				2021-03-15	-30.89×10^{-12}	8.11×10^{-12}	39.00×10^{-12}
				2021-10-03	-10.61×10^{-12}	8.85×10^{-12}	19.46×10^{-12}
C43	MEO-21	氢钟	1	2021-10-19	-17.46×10^{-12}	2.50×10^{-12}	19.96×10^{-12}
C44	MEO-22	氢钟	1	2020-07-15	-19.39×10^{-12}	19.74×10^{-12}	39.13×10^{-12}
C45	MEO-23	氢钟	0	—	—	—	—
C46	MEO-24	氢钟	1	2020-03-21	82.99×10^{-12}	-19.93×10^{-12}	-102.92×10^{-12}

从表 1 可以看出, 氢钟发生调频次数较少, 铷钟调频较为频繁。C27、C29 和 C45 三颗 MEO 卫星以及 C38、C39 和 C40 三颗 IGSO 卫星搭载的氢钟 2 a 间皆未发生调相调频, 在钟差预报上无需考虑卫星钟调频带来的影响, 可实现长期可靠的钟差预报。除了比较明显的主动调频外, 卫星钟差天跳变也会导致频率跳变。由于 GFZ 提供的钟差产品采用的是单天解算模式, 引入的基准钟差发生

跳变时, 会以相同量级影响所有卫星^[9], 从而导致天与天之间发生跳变。跳变处的频率会变大, 经过预处理后可被剔除。

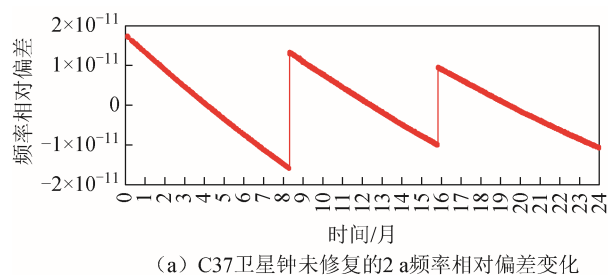
经过主动调频后频率序列的斜率不会改变, 若频率序列斜率发生变化则可推测星载原子钟进行了主备钟切换。C28 卫星在 2020 年 7 月和 2020 年 8 月的频率序列以及 C30 卫星在 2021 年 2 月和 2021 年 5 月的频率序列斜率都出现了较大变化;

C34 卫星的频率序列在 2020 年 2 月和 2020 年 7 月以及 C44 卫星的频率序列在 2021 年 8 月和 2021 年 10 月都出现了斜率改变情况, 推测这些卫星都发生了钟切换操作。

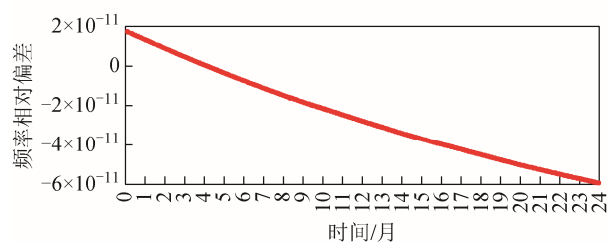
2.2 BDS-3 卫星钟长期稳定性分析

根据卫星钟相位频率长期序列分析结果可知, BDS-3 卫星钟差存在不同程度缺失, 且受到主动调频影响频率会出现跳变, 这对卫星钟评估极其不利。为了有效分析卫星钟的长期稳定度, 对各卫星钟差数据进行筛选, 选择不同时间的钟差数据进行实验。

为了保证计算的重叠 Hadamard 方差可靠要求具备足够的采样数据, 当平滑时间增大时, 需要的连续数据也增多, 可通过对跳变频率进行修复获取足够连续趋势的采样数据。可以对跳变前后的频率数据进行拟合计算频率跳变量, 再对跳变数据进行修复即可获得连续平滑的频率序列。本文提出的另一种简便方法是通过平均值探测频率跳变量, 再进行跳变频率的修复。首先探测出频率跳变的位置, 然后在跳变处前后分别滑动 1 d, 以前后 1 d 的频率平均值之差作为频率跳变量, 对后一段频率序列进行平移。以 C37 卫星为例, 修复前和修复后的频率结果如图 3 所示。



(a) C37 卫星钟未修复的 2 a 频率相对偏差变化



(b) C37 卫星钟修复后的 2 a 频率相对偏差变化

图 3 C37 卫星钟跳变频率修复

对所有存在频率跳变的卫星钟数据进行修复, 利用修复后的频率数据进行稳定性分析, 使用重叠 Hadamard 方差表征卫星钟频率稳定度, 稳定度变化趋势如图 4 所示, 表 2 分别统计了氢钟和铷钟的 5 d 稳定度、10 d 稳定度、15 d 稳定度、30 d 稳定度和 60 d 稳定度, 因部分卫星数据长度不足, 故只统计了部分指标。

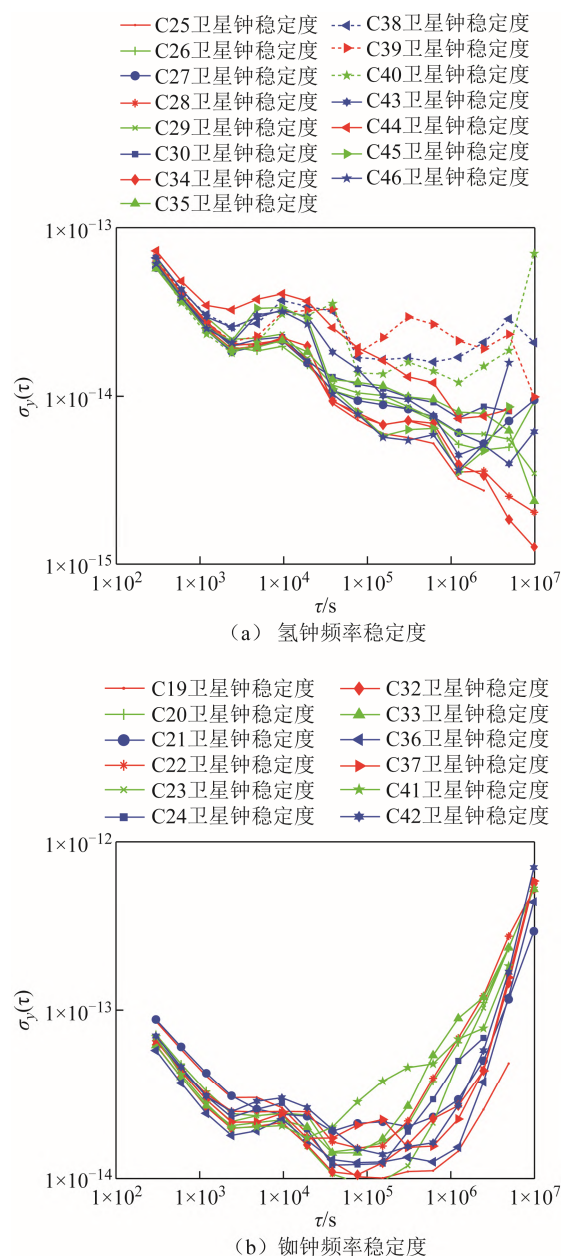


图 4 频率稳定度

从图 4 可以看出, MEO 卫星搭载的氢钟 5 d 以上的稳定度最优可达 3.5×10^{-15} , 重叠 Hadamard 方差平均值皆小于 8×10^{-15} ; 铷钟 15 d 以内的稳定度优于 9×10^{-14} , 重叠 Hadamard 方差平均值小于 5×10^{-14} , 30 d 以上的稳定度较差, 部分卫星钟稳定度在 $(1 \sim 3) \times 10^{-13}$ 范围。总体而言, 氢钟的长期稳定性优于铷钟。对于 C38、C39 和 C40 三颗 IGSO 卫星, 频率的稳定度都优于 3×10^{-14} , 平滑时间为 5、10、15 和 30 d 的重叠 Hadamard 方差平均值分别为 2.02×10^{-14} 、 1.74×10^{-14} 、 1.68×10^{-14} 和 1.86×10^{-14} , 表明 IGSO 卫星钟具有较高的长期稳定性, 但劣于 MEO 卫星氢钟稳定度, 原因是 IGSO 卫星受到的轨道误差大于 MEO 卫星, 而精密定轨

表 2 BDS-3 卫星钟频率稳定度结果统计

卫星钟类型	PRN	5 d 的稳定度	10 d 的稳定度	15 d 的稳定度	30 d 的稳定度	60 d 的稳定度
MEO 氢钟	C25	5.87×10^{-15}	4.06×10^{-15}	—	—	—
	C26	7.78×10^{-15}	6.27×10^{-15}	5.11×10^{-15}	4.81×10^{-15}	4.94×10^{-15}
	C27	7.79×10^{-15}	6.89×10^{-15}	5.96×10^{-15}	5.31×10^{-15}	7.32×10^{-15}
	C28	6.96×10^{-15}	4.77×10^{-15}	3.51×10^{-15}	3.65×10^{-15}	—
	C29	8.15×10^{-15}	6.33×10^{-15}	6.05×10^{-15}	5.86×10^{-15}	5.53×10^{-15}
	C30	8.97×10^{-15}	8.86×10^{-15}	7.28×10^{-15}	8.95×10^{-15}	—
	C34	7.15×10^{-15}	5.46×10^{-15}	3.85×10^{-15}	3.31×10^{-15}	—
	C35	9.47×10^{-15}	8.73×10^{-15}	7.92×10^{-15}	7.78×10^{-15}	—
	C43	8.77×10^{-15}	5.77×10^{-15}	4.42×10^{-15}	5.24×10^{-15}	—
	C44	1.25×10^{-14}	9.33×10^{-15}	7.34×10^{-15}	7.65×10^{-15}	—
	C45	6.65×10^{-15}	4.83×10^{-15}	3.57×10^{-15}	4.86×10^{-15}	—
	C46	5.91×10^{-15}	4.91×10^{-15}	3.62×10^{-15}	5.42×10^{-15}	—
	平均值	8.00×10^{-15}	6.35×10^{-15}	5.33×10^{-15}	5.71×10^{-15}	5.93×10^{-15}
MEO 铷钟	C19	1.06×10^{-14}	1.19×10^{-14}	1.51×10^{-14}	—	—
	C20	2.70×10^{-14}	5.05×10^{-14}	6.63×10^{-14}	1.16×10^{-13}	2.46×10^{-13}
	C21	2.06×10^{-14}	2.57×10^{-14}	3.04×10^{-14}	5.33×10^{-14}	—
	C22	2.82×10^{-14}	5.42×10^{-14}	7.06×10^{-14}	1.29×10^{-13}	2.89×10^{-13}
	C23	1.47×10^{-14}	3.28×10^{-14}	5.28×10^{-14}	1.09×10^{-13}	—
	C24	2.28×10^{-14}	3.81×10^{-14}	5.23×10^{-14}	—	—
	C32	1.85×10^{-14}	2.61×10^{-14}	2.69×10^{-14}	4.78×10^{-14}	—
	C33	3.76×10^{-14}	7.37×10^{-14}	9.09×10^{-14}	1.24×10^{-13}	—
	C36	1.37×10^{-14}	1.21×10^{-14}	1.62×10^{-14}	4.05×10^{-14}	1.33×10^{-13}
	C37	1.41×10^{-14}	1.83×10^{-14}	2.31×10^{-14}	4.77×10^{-14}	1.72×10^{-13}
	C41	4.50×10^{-14}	5.87×10^{-14}	6.78×10^{-14}	7.94×10^{-14}	—
	C42	1.43×10^{-14}	2.07×10^{-14}	2.85×10^{-14}	6.21×10^{-14}	—
	平均值	2.23×10^{-14}	3.52×10^{-14}	4.51×10^{-14}	8.08×10^{-14}	2.10×10^{-13}
IGSO 氢钟	C38	1.61×10^{-14}	1.62×10^{-14}	1.72×10^{-14}	2.13×10^{-14}	—
	C39	2.88×10^{-14}	2.37×10^{-14}	2.10×10^{-14}	1.93×10^{-14}	—
	C40	1.55×10^{-14}	1.22×10^{-14}	1.22×10^{-14}	1.52×10^{-14}	—
	平均值	2.02×10^{-14}	1.74×10^{-14}	1.68×10^{-14}	1.86×10^{-14}	—

和时间同步法 (orbit determination and time synchronization, ODTS) 同时估计轨道和钟差参数的模式导致轨道和钟差高度耦合^[23], 轨道误差影响了钟差精度, 进而影响评估结果。对于主钟为氢钟的卫星, 评估了 C25 卫星钟 5 d 的稳定度和 10 d 的稳定度, 2 个指标皆优于其他卫星, C28、C34 和 C45 卫星钟 15 d 的稳定度和 30 d 的稳定度较优; 对于主钟为铷钟的卫星, C19 卫星钟 5 d 的稳定度、10 d 的稳定度和 15 d 的稳定度最优, C36 和 C37 卫星钟稍差, 但二者 30 d 的稳定度和 60 d 的稳定度较好。从图 4 同时可以看出,

在平滑时间为 10 000 s 附近存在明显的“上翘”趋势, 随后趋势向下, 出现此波动现象的原因是钟差受到轨道周期项的影响。铷钟在平滑时间为 100 000 s 后趋势向上, 表明当平滑时间过大时, 调频闪变游走噪声和调频随机奔跑噪声成为铷钟的主导噪声。

3 结束语

采用 BDS-3 的 MEO 卫星和 IGSO 卫星 2 a 精密钟差数据, 对 BDS-3 卫星钟长期时频变化以及稳定度进行了分析, 可以得到以下结论:

1) 铷钟频率调整较为频繁, 多数卫星钟调频次数大于2次; 氢钟频率调整次数较少, 调频次数最多为1次; IGSO卫星氢钟2a内未发生调频操作。

2) MEO卫星氢钟5d以上的稳定度最优可达 3.5×10^{-15} , MEO卫星铷钟30d以内的稳定度比MEO卫星氢钟低1个数量级, 60d的稳定度低2个数量级。IGSO卫星氢钟的稳定度优于 3×10^{-14} , 比MEO卫星氢钟低1个数量级。

3) 卫星钟频率跳变不适合自主守时, 60d自主守时期间需要保证频率不调整; 卫星钟的长期稳定度可作为自主守时原子钟加权的重要依据。氢钟调频次数少且长期稳定性较好, 以氢钟为主附加权重, 可提高长期自主守时能力。

致谢 感谢GFZ提供精密钟差产品, 感谢中国科学院微小卫星创新研究院和中国空间技术研究院提供北斗三号卫星时频技术支持。

参考文献

- [1] YANG Y X, MAO Y, SUN B J. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1-8.
- [2] 赵琳琳. BDS/GPS/Galileo星载原子钟长期在轨性能评估分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.
- [3] 唐升, 刘娅, 李孝辉. 星载原子钟自主完好性监测方法研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(1): 39-45.
- [4] 艾青松. GNSS星载原子钟时频特性分析及钟差预报算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [5] 王宇谱. GNSS星载原子钟性能分析与卫星载钟差建模预报研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2017.
- [6] 王宇谱. GNSS星载原子钟性能分析与卫星载钟差建模预报研究[J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 1026.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 崔博斌. GNSS卫星钟时频特性及预报算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 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*, 2010, 33(2): 115-120.
- [11] 赵丹宁, 雷雨. GLONASS星载原子钟的长期特性分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(6): 895-904.
- [12] 薛慧杰. BDS/Galileo星载原子钟长期性能分析及钟差实时预报算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- [13] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. BDS-3卫星钟差特性分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, 45(1): 53-61.
- [14] 刘洋洋. BDS-3/Galileo星载钟时频特性及短期预报性能分析[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2020.
- [15] 彭森. BDS-3星载钟特性分析及钟差预报研究[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- [16] 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.
- [17] 杨宇飞, 杨元喜, 陈金平, 等. 北斗三号星座拟稳钟差测定及其预报[J]. *测绘学报*, 2021, 50(12): 1728-1737.
- [18] 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): 1-13.
- [19] 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: 信息工程大学, 2006.
- [20] RILEY W J. Handbook of frequency stability analysis[M]. Boulder, CO: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2008.
- [21] RILEY W J. A test suite for the calculation of time domain frequency stability[EB/OL]. (1996-06-05) [2022-01-18]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/560270>.
- [22] BREGNI S, JMODA L. Improved estimation of the Hurst parameter of long-range dependent traffic using the modified Hadamard variance [EB/OL]. (2006-06-11) [2022-01-18]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4024188>.
- [23] COLLILIEUX X, METIVIER L, ALTAMIMI Z, et al. Quality assessment of GPS reprocessed terrestrial reference frame[J]. *GPS Solutions*, 2011, 15(3): 219-231.