

北斗系统星载原子钟周期性波动的频谱分析校正方法*

李骁逸, 龚航, 彭竞, 于美婷, 孙广富
(国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073)

摘要: 在建立卫星导航系统星座自主守时时间基准时, 必须消除星载原子钟钟差数据中包含的周期性波动, 以免将其引入系统时间。针对这一问题, 基于国际卫星导航服务组织(International GNSS Service, IGS)提供的北斗系统星载原子钟钟差产品, 提出了一种基于频谱分析的星载原子钟周期性波动校正方法。通过比较校正前后钟差数据的频率稳定度性能差异, 确认该方法能够消除由环境因素引起的钟差数据周期性波动。北斗系统各类卫星星载原子钟的性能在校正后都得到了提升。地球同步轨道卫星星载原子钟的万秒频率稳定度提升 50% 左右, 中轨道地球卫星星载原子钟的万秒频率稳定度提升 23% 左右, 倾斜地球同步轨道卫星星载原子钟的万秒频率稳定度提升 15% 左右。经过校正, 北斗二号和北斗三号系统中的星载原子钟普遍达到了地面站铯钟的频率稳定度性能, 为完全基于星载原子钟的星座自主守时提供了基础。

关键词: 北斗卫星导航系统; 星载原子钟; 频率稳定度; 周期性波动

中图分类号: TN967.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2021)05-086-07

Correction method for periodic fluctuation of the BDS satellite atomic clocks based on spectrum analysis

LI Xiaoyi, GONG Hang, PENG Jing, YU Meiting, SUN Guangfu

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to avoid introducing periodic fluctuations in the clock offset of onboard atomic clock into the system time, it is necessary to eliminate the periodic fluctuations when establishing the autonomous time benchmark of satellite navigation system constellation. Based on the clock offset of BeiDou atomic clock provided by IGS, a method of periodic fluctuation correction for onboard atomic clock based on spectrum analysis was proposed. By comparing the performance of frequency stability of onboard atomic clock offset before and after correction, it is proved that this method can successfully eliminate the periodic fluctuation of satellite clock offset caused by environmental factors. Performances of different types of onboard atomic clock of BeiDou are improved after correction. Through this method, performances of onboard atomic clocks with different orbital types in the system have been improved remarkably. Among them, the frequency stability in 10 000 seconds of GEO(geostationary satellite) satellite-borne atomic clocks has been improved about 50%, MEO(medium orbit earth satellite) about 23%, and IGSO(inclined geosynchronous orbit satellite) about 15%. Through this correction method, the frequency stability of cesium clocks in ground stations has been achieved in both BDS-2 and BDS-3 satellite-borne atomic clocks, which lays foundation to the star autonomous timekeeping based entirely on satellite-borne atomic clocks.

Keywords: BeiDou navigation satellite system; onboard atomic clock; frequency stability; periodic fluctuation

系统时间基准是卫星定位系统实现定位功能的前提。目前北斗卫星导航系统(简称北斗三号系统, BDS-3)的系统时间基准由地面站原子钟通过综合原子时算法计算生成。一旦地面站出现异常, 系统时间基准的生成就会中断。为了保证系统时间基准的稳定可靠, 必须降低对地面站的依赖。

北斗卫星导航系统卫星载有高精度的国产新型铷钟和被动型氢原子钟。根据北斗三号系统卫

星数目及单个卫星星载原子钟数目可知, 北斗三号系统星载原子钟总数已经超过 100 颗。大量的星载原子钟为北斗三号系统时间基准生成计算摆脱对地依赖提供了可能。将星载原子钟逐步纳入系统时间基准的计算, 最终实现完全基于星载原子钟的系统时间基准生成是卫星定位系统时间基准生成的发展方向。

由于受到太空环境的影响, 星载原子钟进入轨道后的实际性能与地面钟存在较大差距。目前

* 收稿日期: 2020-10-25

基金项目: 国家部委基金资助项目(2019-JCJQ-JJ-190)

作者简介: 李骁逸(1990—), 男, 云南丽江人, 博士研究生, E-mail: 18867426225@sina.com;

龚航(通信作者), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: gong_hang@163.com

已有的研究探明了卫星原子钟性能受到太空环境负面影响的主要表现为钟差数据中的周期性波动^[1-3]。Kenneth 等指出星载原子钟钟差数据中存在的周期性波动与卫星的轨道周期有一定一致性但又未严格符合,同时还与日食周期、测量性能等多种因素相关^[4]。对于北斗二号(BDS-2)卫星星载原子钟钟差数据的研究表明,不同的原子钟对工作环境的敏感程度不同,由此导致其钟差数据受到环境干扰而产生周期性波动时,其周期性波动的周期和幅度都各不相同^[5-7]。虽然北斗三号系统的星载原子钟相比于北斗二号系统已经有了显著的性能提升,但是钟差数据中的周期性波动依然存在^[8-9]。根据上述已有研究可以确定,不论何种卫星类型或原子钟类型,其钟差数据都存在周期性波动。在未能消除周期性波动前不应将星载原子钟纳入系统时间基准的计算,以携带周期性波动的卫星钟差进行系统时间基准计算会将上述波动引入系统时间。对于这一问题,本文提出了一种对钟差数据中的周期性波动进行校正的方法。该方法不能提升卫星原子钟的性能,但却可以提升原子钟输出的钟差数据的性能,从而避免将卫星原子钟的周期性波动引入系统时间。本文基于国际卫星导航服务组织(International GNSS Service, IGS)对北斗系统卫星由2020年5月1日至5月30日之间连续30d的钟差观测数据计算了北斗系统卫星的幅频特性、相频特性及频率稳定度性能,并提出了消除星载原子钟钟差数据中周期性波动的方法。

1 北斗系统星载原子钟特性分析

1.1 时域特性分析

能够体现原子钟时域特性的因素包括相位、频率和频率漂移。通常情况下,原子钟的相位差数据(即钟差)模型采用包含这三个因素的二次多项式模型。

$$x(t) = x_0 + y_0 t + 0.5z_0 t^2 + \varepsilon(t) \quad (1)$$

其中: x_0 和 y_0 是相位和频率偏差; z_0 表示频率偏差的线性变化,通常称为老化或频率漂移; $\varepsilon(t)$ 是随机噪声; t 为钟差数据 $x(t)$ 的采样时间序列。

但是星载原子钟的相位差数据还包含多种周期性波动。星载原子钟周期性波动项的来源较为复杂,受到地月运行、地球公转、相对论及温度光压和相对论效应等多种因素的影响,在原子钟相位差数据的常规表达式中需要增加周期项来表达星载原子钟的周期性波动。因此星载原子钟的相

位差数据被描述为以下等式:

$$x(t) = x_0 + y_0 t + 0.5z_0 t^2 + \sum_{l=0}^k A_l \sin(\omega_l t + \varphi_l) + \varepsilon(t) \quad (2)$$

其中, A_l 是周期性波动的振幅, ω_l 是周期性波动的频率, φ_l 是周期性波动正弦变化的相移。

1.2 频率稳定度分析

本文首先对卫星钟差数据进行了预处理,消除了相位跳变、频率跳变和野值,然后以阿伦偏差来计算各星载原子钟的频率稳定度。各卫星进行校正前的原始频率稳定度如图1所示。

图1中横轴为频率稳定度采样间隔,纵轴为频率稳定度计算结果。其中,红色曲线为地球同步轨道(GEOstationary, GEO)卫星频率稳定度,蓝色曲线为星载原子钟为铷钟的中轨道(Medium Orbit, MEO)地球卫星频率稳定度,黄色曲线为星载原子钟为氢钟的MEO卫星频率稳定度,绿色曲线为倾斜地球同步轨道(Inclined GeoSynchronous Orbit, IGSO)卫星频率稳定度。

频率稳定度计算表明,卫星轨道类型对星载原子钟的性能具有显著影响。在星载原子钟同为铷钟的情况下,IGSO卫星的频率稳定度在万秒以下稳定度计算步长上比MEO卫星和GEO卫星更差,而在万秒以上数值则与MEO卫星和GEO卫星相当。GEO卫星的短期稳定度弱于MEO强于IGSO,万秒以上稳定度与MEO和IGSO相当。MEO卫星在万秒以下平均时间中具有最好的频率稳定度性能,但是在万秒以上平均时间下性能比GEO卫星差。

比较三类卫星的频率稳定度性能可以发现,北斗三号系统的MEO卫星具有最集中的性能分布。而北斗二号的GEO卫星、IGSO卫星和MEO卫星的性能分布更加松散,且北斗二号的C12、C14号MEO卫星的性能相比于GEO卫星和IGSO卫星优势并不显著。这一结果表明,即使同为铷钟,北斗三号系统的铷钟性能也优于北斗二号系统的铷钟。

频率稳定度计算结果也表明,星载原子钟的类型对星载原子钟的性能也具有显著影响。除去搭载铷钟的卫星,北斗三号系统还拥有部分星载钟为氢钟的MEO卫星。这一类卫星不仅万秒以下稳定度和铷钟卫星中短期稳定度性能最好的北斗三号铷钟MEO卫星相当,在万秒及更长的平均时间中更是表现出了所有卫星中最好的性能。

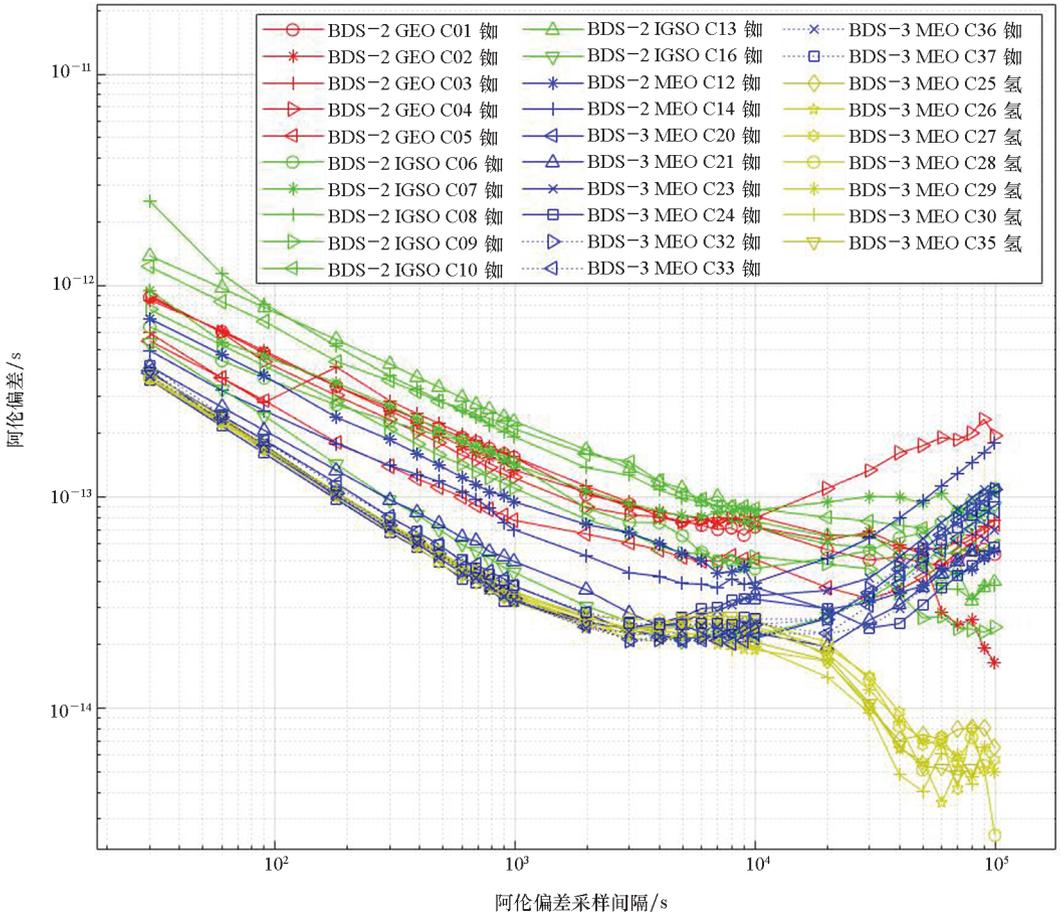


图 1 阿伦偏差计算结果

Fig. 1 Calculated results of Allan deviation

计算结果显示 MEO 卫星上的氢钟比铷钟在万秒及更长采样间隔下的频率稳定度性能上具有极大的性能优势。计算结果同时显示,在同为铷钟的情况下,IGSO 卫星和 GEO 卫星在天及更长的采样间隔上的频率稳定度性能优于 MEO 卫星,这表明 IGSO 卫星轨道和 GEO 卫星轨道比 MEO 更有利于保持原子钟的长期频率稳定度性能。因此,将 IGSO 卫星和 GEO 卫星上的铷钟也更换为氢钟是值得尝试的,IGSO 卫星和 GEO 卫星上的氢原子钟极有可能获得比 MEO 卫星氢钟更好的长期频率稳定度性能。

由于 MEO 卫星星载被动型氢钟的性能在各个平均时间下的频率稳定度都具有最佳性能。在星座自主守时的设计中,应当以使用被动型氢钟的 MEO 卫星作为综合原子时计算的参考钟或时间基准物理信号的生成钟。同时根据系统的设计指标,灵活运用 IGSO 卫星、GEO 卫星和载有铷钟的 MEO 卫星,根据具体需求决定这三类卫星在联合守时中的权重。

1.3 频域特性分析

本文在去除钟差数据的二次趋势项之后,对

获得的钟差残差数据进行快速傅里叶变换获得卫星钟差的周期特性。由于篇幅限制,本文在所有卫星中选择了 13 颗卫星,使例证包含了全部卫星类型和星载原子钟类型。本文选择 GEO 卫星 C02(铷钟)、C05(铷钟),IGSO 卫星 C07(铷钟)、C13(铷钟),北斗二号系统的 MEO 卫星 C11(铷钟)、C12(铷钟)以及北斗三号系统的 MEO 卫星 C23(铷钟)、C36(铷钟)、C25(氢钟)、C29(氢钟)为例。卫星钟差幅频曲线如图 2、图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出,北斗二号系统及北斗三号系统所有类型的各卫星均有不同程度的 24 h、12 h、8 h、6 h 等多种周期项。比较北斗二号系统各卫星与北斗三号系统各卫星可以发现,北斗二号系统各卫星星载原子钟更容易受到多重外部因素的影响且自身噪声更大,导致周期性波动项不仅更多,且在幅频曲线中难以显著地体现出来。北斗三号系统各卫星原子钟自身噪声较小导致其周期性波动项相对北斗二号系统格外显著,同时其周期性波动项数量更少,表明对环境因素也具有更好的耐受性。由于北斗系统的授时精度在 20 ns 左右^[10],为了满足卫星定位系统的精度

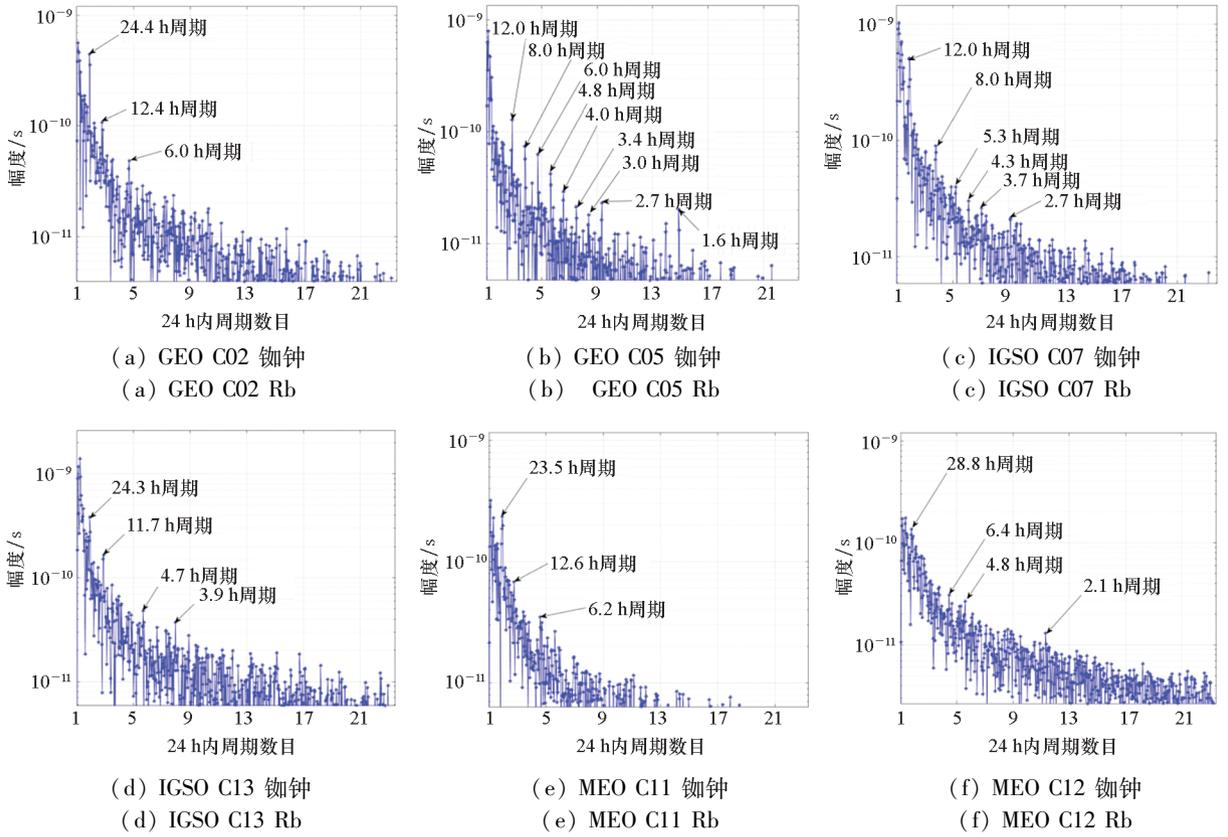


图 2 北斗二号系统卫星频谱分析

Fig. 2 Frequency analysis of BDS-2 satellites

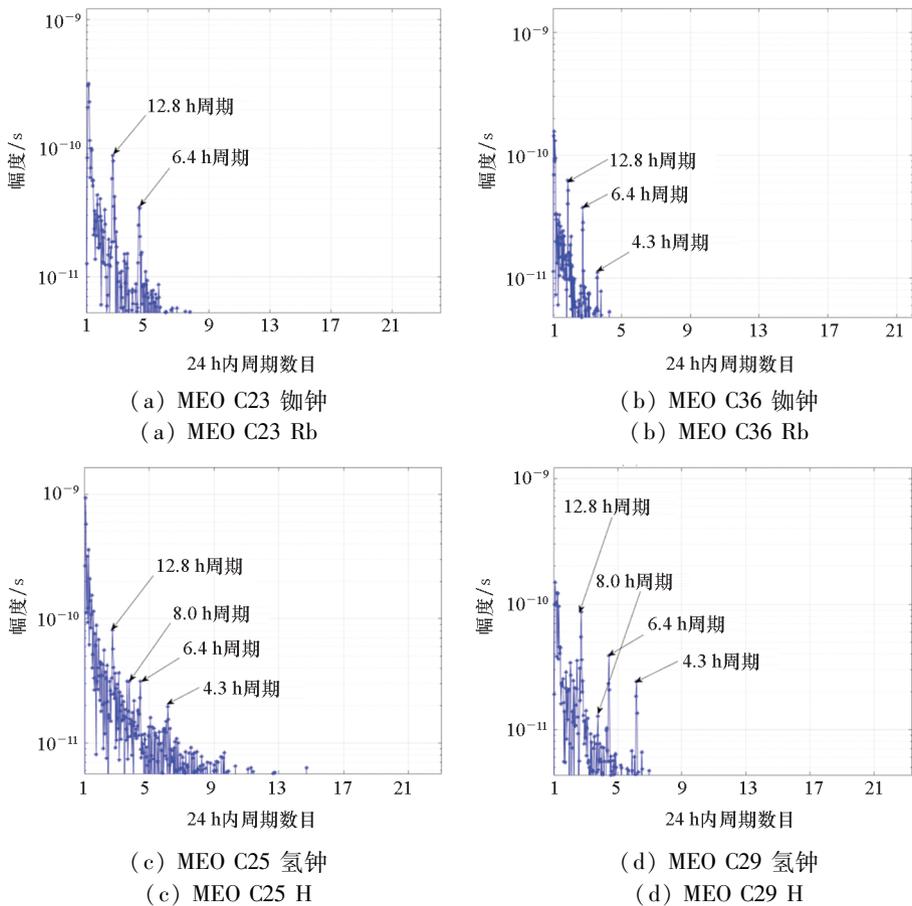


图 3 北斗三号系统卫星频谱分析

Fig. 3 Frequency analysis of BDS-3 satellites

需求,在进行周期性波动项校正时,不能仅仅计算少数几个主要周期项,而应以周期性波动幅度为考虑因素。本文将幅频曲线中所有幅值大于 0.01 ns 的周期项全部作为校正目标。

2 北斗三号系统星载原子钟周期性波动校正

2.1 周期性波动校正时域模型

本文基于式(2)所示星载原子钟钟差模型公式,构建如式(3)所示的星载原子钟相位差数据校正模型。

$$x'(t) = x(t) - \sum_{l=0}^k A_l \sin(\omega'_l t + \varphi'_l) \quad (3)$$

其中: $x'(t)$ 为经过校正后的钟差数据; A_l 为求得的各周期性波动项幅值; ω' 为求得的各周期性波动项频率; φ'_l 为求得的各周期性波动正弦变化的相移。

具体方法为,在式(2)所示的星载原子钟钟差数据时域模型上添加周期项,使新添加的周期项与星载原子钟固有的周期项频率幅度相同而相

位相反,从而将卫星钟差固有的周期性波动抵消。通过傅里叶变换求得精确的 A'_l 、 ω'_l 、 φ'_l 数值,即可通过式(3)消除星载原子钟钟差数据内的周期性波动项,同时无须考虑该周期性波动的成因和来源。

2.2 校正后钟差数据频率稳定度分析

图 4 和图 5 分别为校正前后的北斗二号系统和北斗三号系统卫星星载原子钟钟差数据频率稳定度计算结果对比。

由图 4 和图 5 可以看出,所有的卫星都产生了显著的性能提升效果。从卫星轨道类型上来看,GEO 卫星的性能提升效果最佳,其次是 IGSO 卫星,MEO 卫星的提升效果在三种卫星中最弱。从原子钟类型上来看,北斗二号系统铷钟的性能提升效果最佳,其次是北斗三号系统的铷钟,北斗三号系统的氢钟性能提升最弱。但是不论是何种轨道类型、何种原子钟类型的卫星,校正后的稳定度曲线都正确地削去了原稳定度曲线的异常隆起,校正后的稳定度曲线有较大改善。

稳定度数据的具体提升数值如表 1 所示。

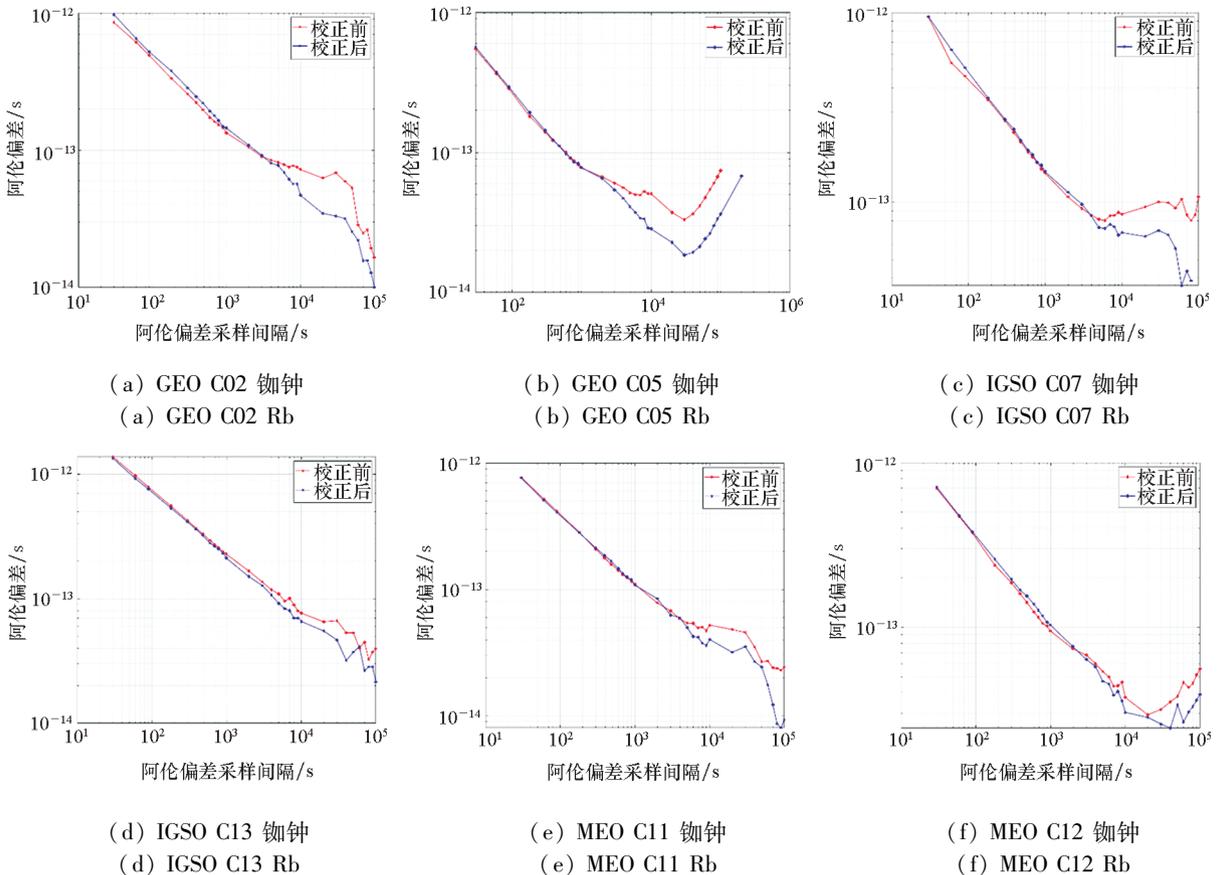


图 4 北斗二号系统星载原子钟性能提升效果

Fig. 4 Improvement for atomic clocks loaded on BDS-2 Satellites

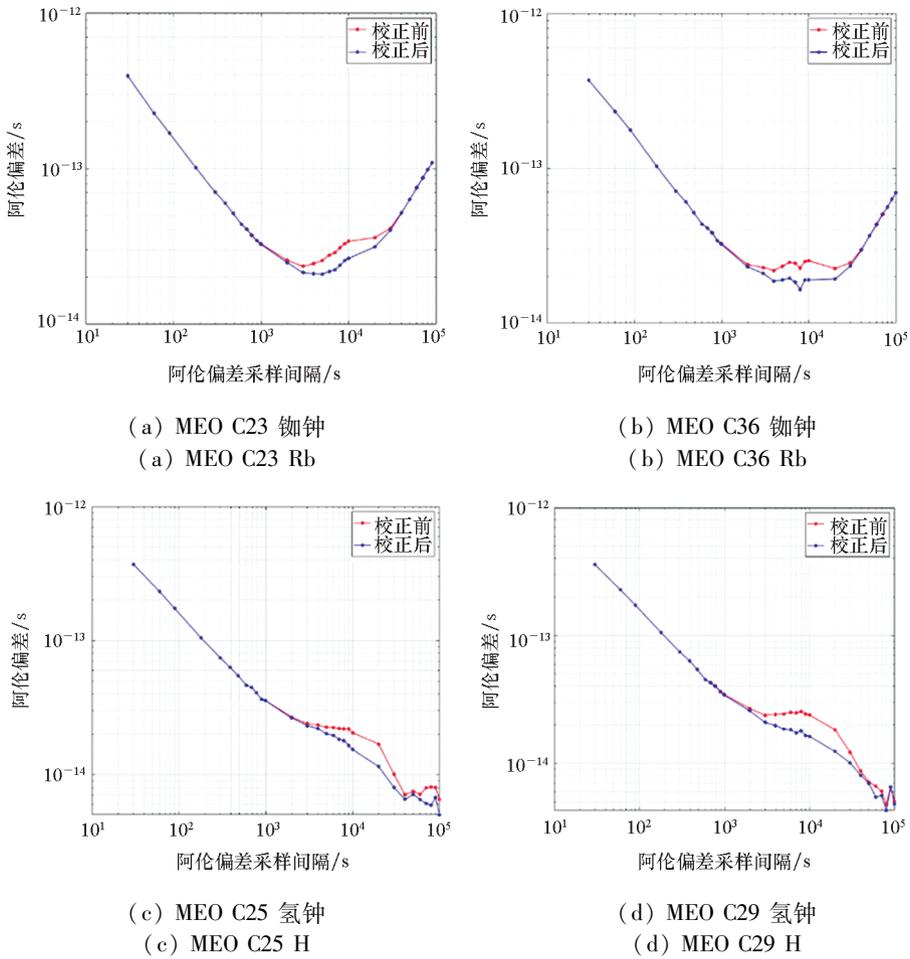


图5 北斗三号系统星载原子钟性能提升效果

Fig. 5 Improvement for atomic clocks loaded on BDS - 3 Satellites

表1 星载原子钟性能提升效果

Tab. 1 Improvement for satellite-borne atomic clocks

卫星号	卫星及钟类型	万秒频率稳定度/s		最优稳定度步长/s	最优稳定度步长下的稳定度/s	
		校正前	校正后		校正前	校正后
C02	GEO(铷)	7.2×10^{-14}	4.6×10^{-14}	$> 1 \times 10^5$	1.6×10^{-14}	1.0×10^{-14}
C05	GEO(铷)	5.1×10^{-14}	2.8×10^{-14}	3×10^4	3.3×10^{-14}	1.9×10^{-14}
C07	IGSO(铷)	8.6×10^{-14}	6.9×10^{-14}	6×10^4	10.4×10^{-14}	3.6×10^{-14}
C13	IGSO(铷)	7.6×10^{-14}	6.5×10^{-14}	$> 1 \times 10^5$	3.9×10^{-14}	2.2×10^{-14}
C11	MEO(铷)	5.2×10^{-14}	4.0×10^{-14}	9×10^4	2.4×10^{-14}	0.8×10^{-14}
C12	MEO(铷)	3.7×10^{-14}	3.0×10^{-14}	4×10^4	3.5×10^{-14}	2.4×10^{-14}
C23	MEO(铷)	3.4×10^{-14}	2.6×10^{-14}	5×10^3	2.5×10^{-14}	2.1×10^{-14}
C36	MEO(铷)	2.5×10^{-14}	1.9×10^{-14}	8×10^3	2.2×10^{-14}	1.6×10^{-14}
C25	MEO(氢)	2.0×10^{-14}	1.5×10^{-14}	$> 1 \times 10^5$	0.7×10^{-14}	0.5×10^{-14}
C29	MEO(氢)	2.3×10^{-14}	1.6×10^{-14}	$> 1 \times 10^5$	0.5×10^{-14}	0.5×10^{-14}

由表1可以看出,所有卫星的频率稳定度性能都获得了显著的提升,万秒频率稳定度提升范围在14% ~ 45%不等。其中,C02卫星的提升效

果最为显著,万秒频率稳定度由 7.2×10^{-14} s 提升到 4.6×10^{-14} s,在10万秒频率稳定度已达到 1.0×10^{-14} s,与地面站铷原子钟相当。其余各卫

星在万秒稳定度及最佳稳定度步长下的稳定度性能也都达到了地面站铯原子钟的性能(万秒频率稳定度 7×10^{-14} s, 5071A 型铯原子钟), 差于地面站氢钟(万秒频率稳定度 2×10^{-15} s, MMH-2010 型氢原子钟)。

3 结论

通过比较校正前后星载原子钟钟差数据的频率稳定度性能差异, 本文所述方法能够成功消除由卫星运行环境引起的卫星钟差数据周期性波动, 提高星载原子钟钟差数据的计算性能。通过该方法校正后, 系统中不同轨道类型的卫星星载原子钟的性能都得到了显著的提升。其中, GEO C05 卫星星载原子钟的万秒频率稳定度提升 45%, MEO C29 卫星星载原子钟的万秒频率稳定度提升 30%, IGSO C07 卫星星载原子钟的万秒频率稳定度提升 20%。通过本文所述方法的校正, 北斗二号和北斗三号星载原子钟普遍达到了地面站铯钟的频率稳定度性能, 为北斗系统基于星载原子钟的星座自主守时提供了支撑。

参考文献 (References)

- [1] HUANG G W, CUI B B, ZHANG Q, et al. An improved predicted model for BDS ultra-rapid satellite clock offsets[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 60-78.
- [2] 黄观文, 余航, 郭海荣, 等. 北斗在轨卫星钟中长期钟差特性分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(7): 982-988.
HUANG Guanwen, YU Hang, GUO Hairong, et al. Analysis of the mid-long term characterization for BDS on-orbit satellite clocks[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(7): 982-988. (in Chinese)
- [3] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, SCHÖNEMANN E,

- et al. Flight characterization of new generation GNSS satellite clocks[J]. Journal of the Institute of Navigation (ION), 2012, 59(4): 291-302.
- [4] KENNETH L S, JIM R R, RONALD L B. Characterization of periodic variations in the GPS satellite clocks[J]. GPS Solutions, 2008, 3: 211-225.
- [5] HANG G W, CUI B B, ZHANG Q, et al. Switching and performance variations of on-orbit BDS satellite clocks[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(5): 1681-1696.
- [6] 孙广, 朱翔宇, 李双钦, 等. 不同 GNSS 星载原子钟周期特性分析[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(5): 109-114.
SUN Guang, ZHU Xiangyu, LI Shuangqin, et al. Periodicity analysis of different GNSS on-board atomic clocks[J]. Navigation Positioning & Timing, 2019, 6(5): 109-114. (in Chinese)
- [7] 马卓希, 杨力, 贾小林. BDS 星载原子钟周期项特性及预报研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2017, 37(3): 292-296.
MA Zhuoxi, YANG Li, JIA Xiaolin. Research on prediction and characterization of periodic variations in BDS satellite clocks[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(3): 292-296. (in Chinese)
- [8] 闵扬海. BDS 原子钟特征分析与钟差预报研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
MIN Yanghai. Characteristic analysis of BDS atomic clock and study on the prediction of clock offsets[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] 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.
MAO Ya, WANG Qianxin, HU Chao, et al. Performance analysis and prediction of clock offsets for the BDS-3 test satellites[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(1): 53-61. (in Chinese)
- [10] 张大众, 郑作亚, 刘一, 等. 北斗卫星导航系统单星授时精度分析[J]. 测绘通报, 2019(4): 7-10.
ZHANG Dazhong, ZHENG Zuoya, LIU Yi, et al. Accuracy analysis of single satellite timing of BeiDou navigation satellite system[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(4): 7-10. (in Chinese)