

# BDS-3 卫星与其他 GNSS 系统卫星原子钟性能分析

伏军胜<sup>1</sup>, 贾小林<sup>2</sup>, 刘家龙<sup>1</sup>, 许瑾<sup>1</sup>, 贺延伟<sup>1</sup>, 张奋<sup>2</sup>

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 西安测绘研究所, 西安 710054)

**摘要:**星载原子钟是决定星上时间基准的基础。利用一年的事后精密钟差数据,对北斗三号(BDS-3)和其他全球卫星导航系统的准确度、漂移率和稳定度进行了分析,以评估全球卫星导航系统(GNSS)在轨原子钟性能。结果表明:BDS-3的铷原子钟准确度在 $2.62 \times 10^{-13} \sim 2.54 \times 10^{-11}$ 之间,氢原子钟在 $1.64 \times 10^{-14} \sim 6.77 \times 10^{-11}$ 之间;BDS-3氢原子钟的漂移率显著优于铷原子钟;BDS-3多数氢原子钟的稳定度可达到 $10^{-15}$ 量级。BDS-3的稳定度表现最好,其次是全球定位系统(GPS)、北斗二号(BDS-2)、伽利略(Galileo)和格洛纳斯系统(GLONASS)。

**关键词:**星载原子钟;稳定度;准确度;漂移率;性能评估

中图分类号:TH714.1<sup>4</sup>;P288

文献标志码:A

文章编号:1006-7086(2022)05-0615-08

DOI: 10.3969/j.issn.1006-7086.2022.05.017

## Performance Evaluation and Comparison between Spaceborne Atomic Clocks of BDS-3 Satellites and Other GNSS Systems

FU Junsheng<sup>1</sup>, JIA Xiaolin<sup>2</sup>, LIU Jialong<sup>1</sup>, XU Jin<sup>1</sup>, HE Yanwei<sup>1</sup>, ZHANG Fen<sup>2</sup>

(1. School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Research Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The spaceborne atomic clock is the basis for determining the time base of satellite. The Beidou-3 (BDS-3) and other global satellites were analyzed in terms of accuracy, drift and stability using one year's post-event precise clock error data to evaluate the in-orbit atomic clock of the Global Navigation Satellite System (GNSS). The results show that the accuracy of the rubidium clock of BDS-3 and the hydrogen maser are in the range of  $2.62 \times 10^{-13} \sim 2.54 \times 10^{-11}$  and  $1.64 \times 10^{-14} \sim 6.77 \times 10^{-11}$  respectively. The frequency drift of the hydrogen maser of BDS-3 is much better than that of rubidium clocks. In terms of stability, most hydrogen masers of BDS-3 can reach the order of  $10^{-15}$ . The average frequency stability value of BDS-3 is the best, followed by Global Positioning System (GPS), Beidou-2 (BDS-2), Galileo and GLONASS.

**Key words:** spaceborne atomic clock; stability; accuracy; drift; performance evaluation

## 0 引言

星载原子钟对卫星导航系统的性能起到决定性作用<sup>[1]</sup>。我国的北斗三号卫星导航系统(Beidou Global Navigation Satellite System, BDS-3)已于2020年7月31日正式宣布开通。研究分析BDS-3的原子钟性能,对于预测卫星导航系统的导航、定位和授

时精度,推动星载原子钟发展是十分必要的。

国内外学者对星载原子钟的性能进行了大量研究,Zhao等<sup>[2]</sup>对BDS-3的卫星钟差特性进行了系统分析。张清华等<sup>[3]</sup>分析对比了北斗二号(Beidou Regional Navigation Satellite System, BDS-2)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)和格洛纳斯系统

收稿日期:2022-02-17

基金项目:国家自然科学基金(41874041)

作者简介:伏军胜,硕士研究生,主要从事卫星钟性能评估研究。E-mail:867418423@qq.com

引文信息:伏军胜,贾小林,刘家龙,等. BDS-3 卫星与其他 GNSS 系统卫星原子钟性能分析[J]. 真空与低温, 2022, 28(5): 615-622.

FU J S, JIA X L, LIU J L, et al. Performance evaluation and comparison between spaceborne atomic clocks of BDS-3 satellites and other GNSS systems[J]. Vacuum and Cryogenics, 2022, 28(5): 615-622.

(Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema Global'naya, GLONASS)原子钟的性能,指出 BDS-2 在准确度和漂移率方面同 GPS 和 GLONASS 接近,但平均稳定性与 GPS 和 GLONASS 尚有一定的差距。目前对 BDS-3 星载原子钟的研究相对较少,尤其是针对北斗 C37 以后组网的卫星。本文利用一年的事后精密钟差数据研究 BDS-3 后期组网卫星原子钟的性能,并与其他 GNSS 卫星导航系统的原子钟性能进行分析比较。

## 1 星载原子钟性能评估基本原理

不同的卫星导航系统搭载着不同类型的原子钟,其中 BDS-2 全部为铷钟, BDS-3 主要是铷钟,也有部分氢钟。GPS 主要搭载的是铷钟,还有少量的铯钟。Galileo 主要搭载的是氢钟,只有 E11 为铷钟。GLONASS 搭载的都是铯钟,表 1 根据不同的轨道和卫星原子钟类型进行了分类统计。

表 1 GNSS 卫星原子钟类型  
Tab. 1 GNSS satellite atomic clock types

系统	PRN(卫星编号)	轨道类型	原子钟类型
BDS-2	C01、C02、C03、C04、C05	GEO	铷钟
	C06、C07、C08、C09、C10、C13、C16	IGSO	铷钟
	C11、C12、C14	MEO	铷钟
BDS-3	C19、C20、C21、C22、C23、C24、C32、C33、C36、C37、C45、C46、C57、C58	MEO	铷钟
	C25、C26、C27、C28、C29、C30、C34、C35、C41、C42、C43、C44	MEO	氢钟
	C38、C39、C40、C56	IGSO	氢钟
	C59、C60、C61	GEO	氢钟
GPS	G02、G11、G13、G14、G16、G18、G19	Block IIR	铷钟
	G20、G21、G22、G23、G28		
	G05、G07、G12、G15、G17、G29、G31	Block IIR-M	铷钟
	G01、G03、G04、G06、G09、G10、G25、G26、G27、G30、G32	Block IIF	铷钟
	G08、G24	Block IIF	铯钟
Galileo	E11	MEO (IOV)	铷钟
	E12、E19	MEO (IOV)	氢钟
	E01、E02、E03、E04、E05、E07、E08、E09 E21、E24、E25、E26、E27、E30、E31、E33	MEO (FOC)	氢钟
GLONASS	R01、R02、R03、R04、R05、R06、R07、R08	MEO	铯钟
	R09、R10、R11、R12、R13、R14、R15、R16		
	R17、R18、R19、R20、R21、R22、R23、R24		

### 1.1 频率准确度

准确度表征的是真实值与理想值的关系,计算如下:

$$\sigma = \frac{f_1 - f_2}{f_2} \quad (1)$$

式中: $\sigma$ 为频率准确度; $f_1$ 和 $f_2$ 分别为测量对象的实际频率和标称频率。

### 1.2 频率漂移率

频率漂移率又称频率老化率,是描述原子钟频率变化特征的参数。频率漂移通常是由于卫星运行过程中频标关键器件的老化和外界环境的影响造成的,频率值通常会随运行时间单调递增或递减。频率漂移率计算为:

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

式中: $D$ 为频率漂移率; $y_i$ 为 $t_i$ 时刻频标的相对频率值; $t_i$ 为测量相对频率值的时刻; $N$ 为取样数; $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$ 为相对频率 $y_i$ 的平均值; $\bar{t}$ 为时刻的平均值,即 $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$ 。

### 1.3 频率稳定度

稳定度是表征振荡器在一定时间内产生同样时间和频率的能力,是表示给定时间内的频率偏差或时间偏差相对于平均频率偏差值或平均时间偏差值波动情况的统计特性。目前常用于稳定度计

算的方差有标准方差、阿伦系列方差(Allan)和哈达玛系列方差(Hadamard)等<sup>[4]</sup>,目前评估卫星的稳定度采用最多的是哈达玛系列方差,是一种三次采样方差,适用于分析频漂比较明显的原子钟。由于阿伦系列方差不考虑线性漂移问题,而目前原子钟都

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6(M-2)} \sum_{i=1}^{M-2} [\bar{y}_{i+2m}(m) - 2\bar{y}_{i+m}(m) + \bar{y}_i(m)]^2 \quad (3)$$

$$H\sigma_x^2(\tau) = \frac{1}{6\tau^2(N-3)} \sum_{i=1}^{N-3} [x_{i+3m}(m) - 3x_{i+2m}(m) + 3x_{i+m}(m) - x_i(m)]^2 \quad (4)$$

式中: $H\sigma_y^2(\tau)$ 为计算得到的哈达玛方差, $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间; $\tau_0$ 为采样间隔; $M$ 为平滑时间内 $\bar{y}_i(m)$ 的个数; $m$ 为采样数; $\bar{y}_i(m)$ 为第*i*个平滑时间内频率数

有明显的频率漂移现象,所以选用哈达玛系列方差解决线性漂移问题。对于频率数据,哈达玛系列方差计算如式(3)。

对于相位数据,哈达玛方差计算如式(4)。

据的平均值; $N$ 为平滑时间内相位数据总个数, $N = M + 1$ , $x_i(m)$ 为第*i*个平滑时间内相位数据的值。

图1为星载原子钟性能评估的流程。

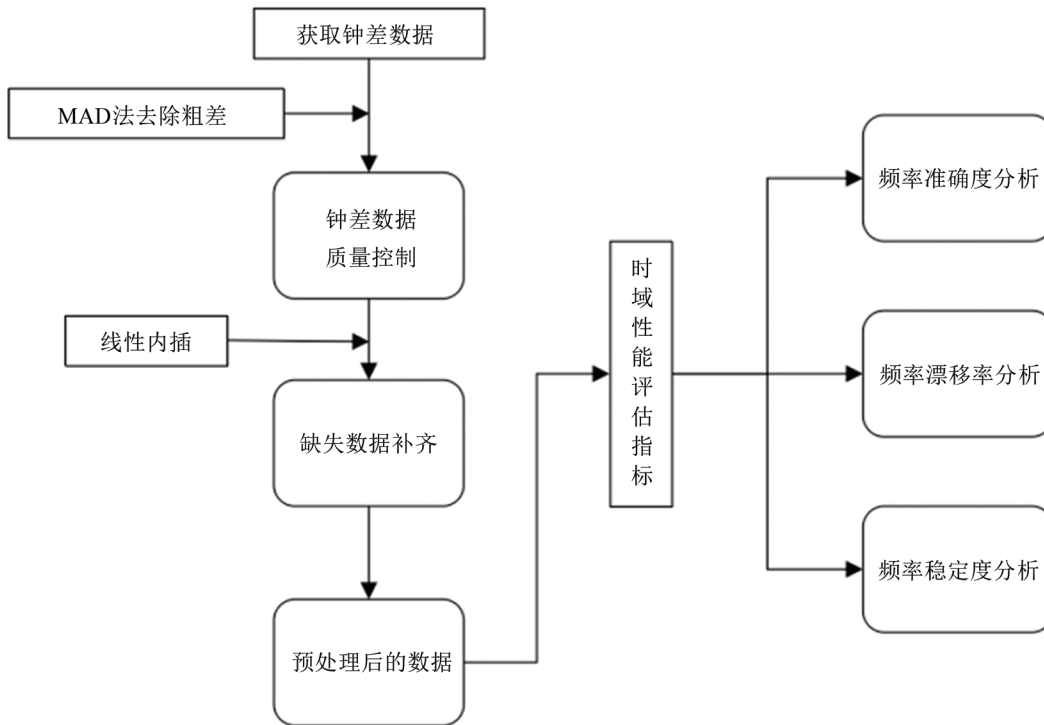


图1 星载原子钟性能评估流程图

Fig. 1 Analysis flow chart of spaceborne atomic clock

## 2 实验算例与分析

### 2.1 数据来源

实验采用德国地学研究中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)的事后精密钟差数据,数据日期为20200801-20210731。由于有数据缺失的情况,实验数据共363 d,采样间隔为30 s。

### 2.2 处理方法

卫星在轨期间受到外部环境的影响,钟差序列会产生粗差周跳等异常现象。为了消除基准钟不同产生的误差和参考基准跳变问题,可首先选取五颗

性能表现较好的基准星对其钟差求取平均值,然后将各卫星的钟差与其作差得到的钟差数据进行计算。BDS-3选取了C26、C27、C28、C29和C30作为基准;GPS选取了G09、G10、G18、G25和G27为基准;GLONASS选取了R04、R11、R14、R15和R17为基准;Galileo选取了E04、E08、E12、E21和E24为基准。本文采用中位数法(Median Absolute Deviation, MAD)对粗差进行探测,该方法能够有效剔除钟差数据中的粗差。在数据处理时首先以天为单位对该天缺失的相位数据进行补全,使用线性内插的方

法获得补全后的数据,统计缺失的天数并做标记,对数据进行分段。对于个别天没有对应的钟差文件或该颗卫星某一天钟差数据较差被整天剔除时,自动删除这些数据。粗差别除时采用分段处理策略,当数值大于5倍中位数时进行剔除,对每段数据进行性能评估,包括频率准确度、频率漂移率和频率稳定度。其中稳定度包括千秒稳、万秒稳和天稳。得到各段结果后,对其取绝对值后求平均值进行分析,因此在结果中准确度和漂移率均是正数。

### 2.3 准确度分析

准确度是描述测量值与理想值符合程度的物理量。对一年的事后精密钟差数据,以月为单位对每颗星的准确度取平均值来进行分析。图 2 为 GNSS 原子钟的频率准确度变化情况。目前 BDS-3 处于  $2.62 \times 10^{-13} \sim 4.77 \times 10^{-11}$  范围内,准确度均值随着

月份的增加而有所提高;其中 MEO 卫星的氢原子钟的准确度均值为  $8.22 \times 10^{-12}$ , IGSO 卫星的准确度为  $2.81 \times 10^{-12}$ , GEO 卫星的准确度为  $4.18 \times 10^{-12}$ , MEO 卫星铷原子钟的准确度为  $1.14 \times 10^{-11}$ ;三种轨道类型中 IGSO 卫星氢原子钟的准确度最高, MEO 铷原子钟的准确度最低。GPS 多数卫星准确度位于  $10^{-12}$  量级, G17 和 G24 在后期的准确度数值较大;其中铷原子钟的准确度均值为  $5.21 \times 10^{-12}$ , 铯原子钟的准确度均值为  $4.31 \times 10^{-12}$ 。Galileo 氢原子钟准确度均值为  $9.54 \times 10^{-12}$ ;只有 E11 为铷原子钟, E11 的准确度均值较氢原子钟高出两个数量级。GLONASS 系统均为铯钟,准确度均值为  $1.29 \times 10^{-12}$ 。通过准确度分析, BDS-3 氢原子钟的准确度好于铷原子钟,使用氢原子钟的 IGSO 卫星准确度最高,优于 MEO 和 GEO 卫星。

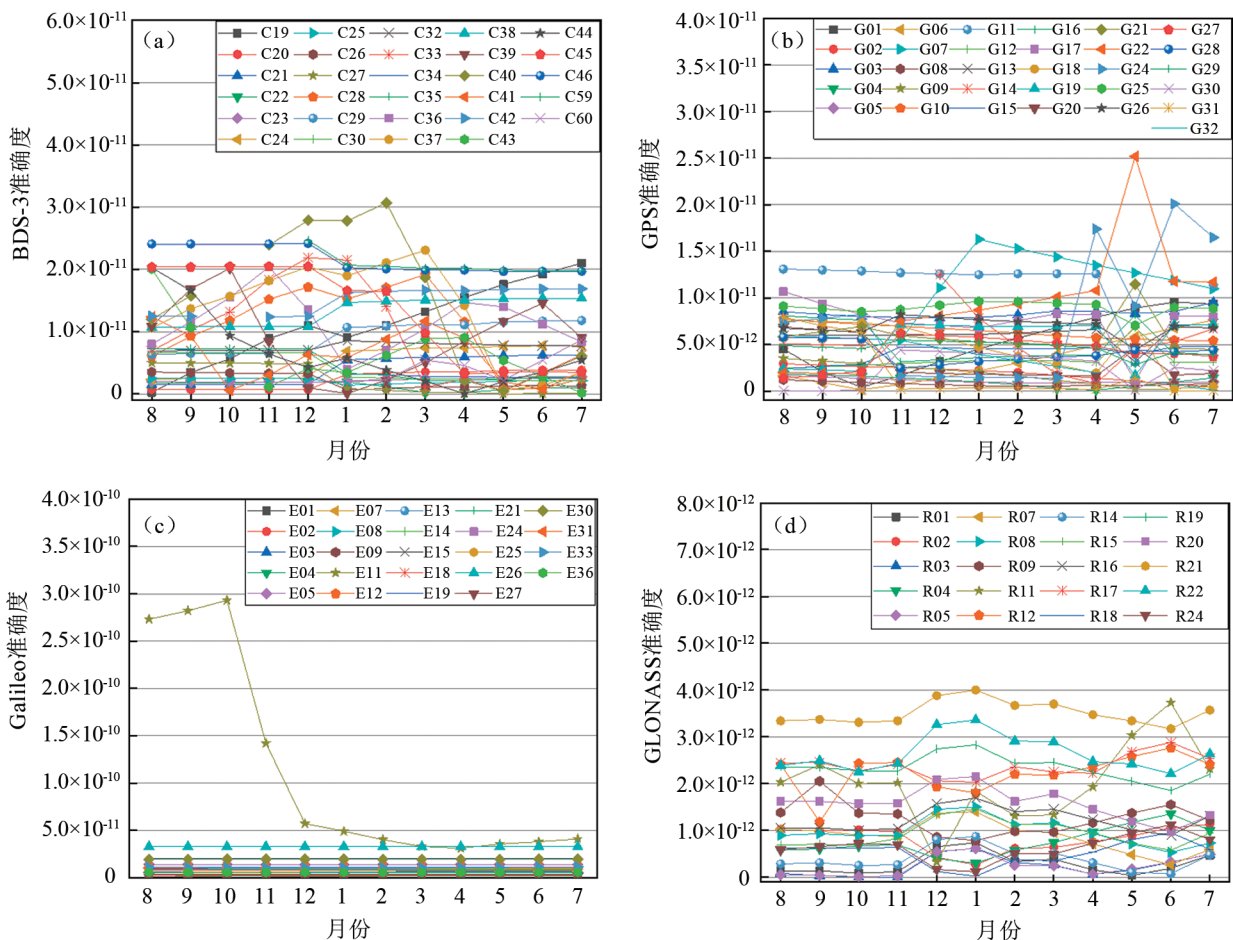


图 2 GNSS 星载原子钟频率准确度

Fig. 2 Accuracy of GNSS on-board atomic clocks

### 2.4 漂移率分析

频率漂移率反映的是原子钟的老化速度,是描述原子钟频率变化特征的特征参数。图 3 为 GNSS 原子

钟的频率漂移率。目前 BDS-3 里 MEO 卫星铷原子钟的漂移率为  $7.67 \times 10^{-15}/d$ , 氢原子钟的漂移率为  $5.31 \times 10^{-16}/d$ , 铷原子钟的漂移率明显大于氢原子钟;

IGSO 卫星氢原子钟的漂移率为  $4.63 \times 10^{-16}/d$ , GEO 卫星氢原子钟的漂移率为  $9.99 \times 10^{-16}/d$ 。GPS 漂移率位于  $2.26 \times 10^{-16}/d \sim 8.68 \times 10^{-15}/d$  范围内, 其中 G14、G22 和 G24 的漂移率较大; 铷原子钟的漂移率均值为  $1.53 \times 10^{-15}/d$ , 铯原子钟的漂移率  $1.21 \times 10^{-15}/d$ 。Galileo 卫星氢原子钟漂移率均值为  $1.29 \times 10^{-16}/d$ , E11 铷原子

钟的漂移率为  $2.05 \times 10^{-14}/d$ , 高于其他卫星 2 个量级。GLONASS 卫星的平均漂移率为  $7.63 \times 10^{-16}/d$ 。由上述数据可知 BDS-3 氢原子钟的漂移率更好, 比铷原子钟更加稳定, IGSO 卫星氢原子钟的漂移率优于 MEO 卫星和 GEO 卫星。

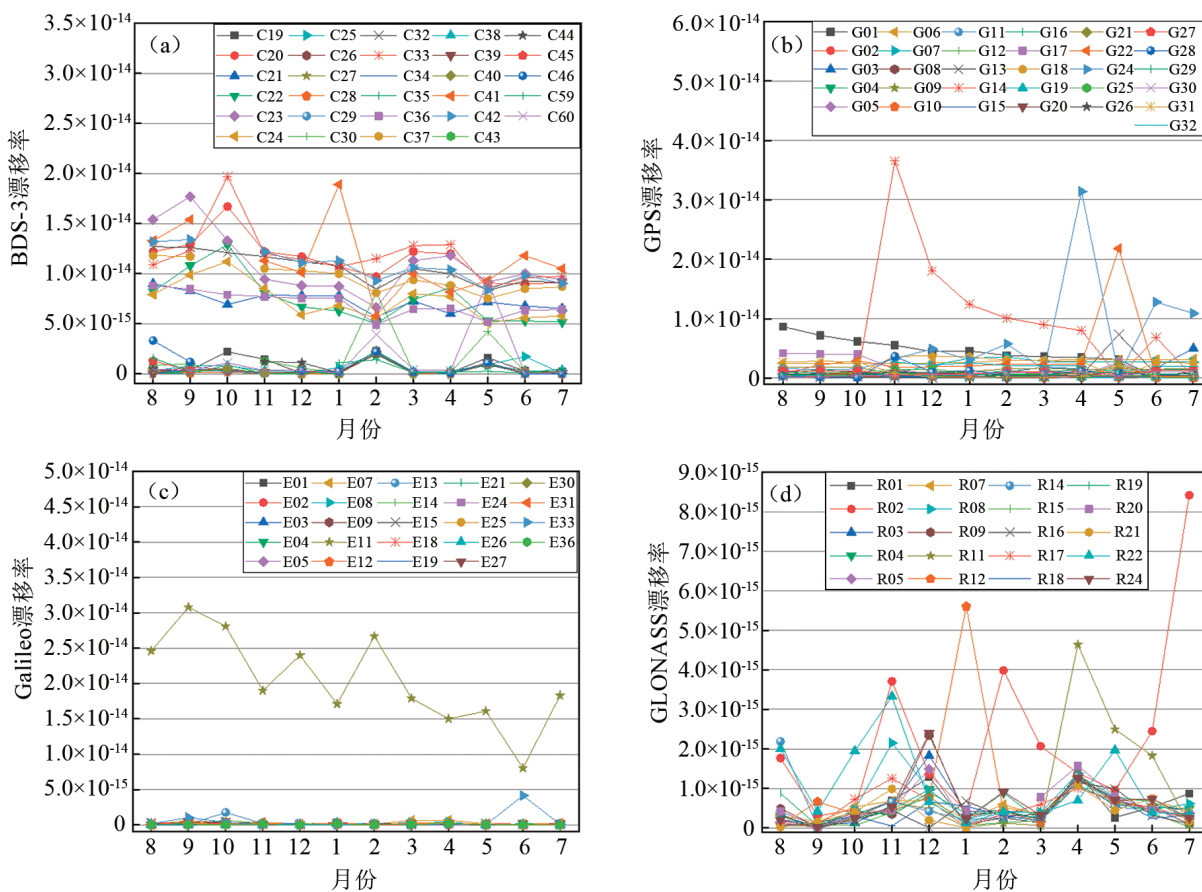


图3 GNSS星载原子钟漂移率  
Fig. 3 Drift rate of GNSS on-board atomic clocks

2.5 稳定度分析

天稳定度(天稳)是描述卫星性能的重要指标。表2、表3根据不同的卫星轨道类型和原子钟类型对 BDS-3 的频率稳定度进行了分类统计。MEO 卫星铷原子钟的千秒稳、万秒稳、天稳分别为  $3.57 \times 10^{-14}/1\ 000\ s$ 、 $2.63 \times 10^{-14}/10\ 000\ s$ 、 $1.15 \times 10^{-14}/d$ , 同轨道卫星氢原子钟的千秒稳、万秒稳、天稳分别为  $3.21 \times 10^{-14}/1\ 000\ s$ 、 $2.56 \times 10^{-14}/10\ 000\ s$ 、 $1.09 \times 10^{-14}/d$ , 说明氢原子钟的短期稳定性、长期稳定性都优于铷原子钟。IGSO 卫星氢原子钟的频率稳定度与 MEO 卫星的氢原子钟相当, 优于 GEO 卫星。

图4为 GNSS 星载原子钟频率稳定度月份变化图。BDS-3 的 MEO 卫星铷原子钟稳定度均值为

$1.15 \times 10^{-14}/d$ , 氢原子钟为  $1.09 \times 10^{-14}/d$ , IGSO 卫星氢原子钟稳定度均值为  $9.70 \times 10^{-15}/d$ 。GPS 卫星原子钟的稳定度处于  $1.88 \times 10^{-15}/d \sim 6.24 \times 10^{-14}/d$  范围内, 铷原子钟的稳定度为  $1.13 \times 10^{-14}/d$ , 铯原子钟稳定度为  $6.23 \times 10^{-14}/d$ , 其中 G08、G24、G28 的稳定度较差, 明显高于其他卫星。Galileo 卫星氢原子钟的稳定度为  $4.80 \times 10^{-15}/d$ , 频率稳定度在四个系统中最优, E11 铷原子钟的稳定度为  $6.35 \times 10^{-14}/d$ , 比其他卫星高出一个量级。GLONASS 卫星的稳定度均值为  $4.17 \times 10^{-14}/d$ , 在四个系统中的表现最差。以上数据可以看出 BDS-3 里 IGSO 氢原子钟的稳定度最优, 其次是 MEO 氢原子钟、MEO 铷原子钟、GEO 氢原子钟。

表 2 BDS-3 哈达玛方差对铷钟的统计结果

Tab. 2 Statistical results of the Hadamard variance of the rubidium clock of BDS-3

轨道类型	卫星编号PRN (铷钟)	千秒稳	万秒稳	天稳
MEO	C19	$4.58 \times 10^{-14}$	$2.47 \times 10^{-14}$	$1.32 \times 10^{-14}$
	C20	$3.73 \times 10^{-14}$	$2.53 \times 10^{-14}$	$1.02 \times 10^{-14}$
	C21	$4.56 \times 10^{-14}$	$2.48 \times 10^{-14}$	$2.70 \times 10^{-14}$
	C22	$3.58 \times 10^{-14}$	$2.38 \times 10^{-14}$	$1.29 \times 10^{-14}$
	C23	$3.17 \times 10^{-14}$	$2.23 \times 10^{-14}$	$0.75 \times 10^{-14}$
	C24	$2.80 \times 10^{-14}$	$2.56 \times 10^{-14}$	$0.95 \times 10^{-14}$
	C32	$3.00 \times 10^{-14}$	$2.18 \times 10^{-14}$	$0.64 \times 10^{-14}$
	C33	$3.05 \times 10^{-14}$	$2.12 \times 10^{-14}$	$0.99 \times 10^{-14}$
	C36	$2.82 \times 10^{-14}$	$2.20 \times 10^{-14}$	$0.60 \times 10^{-14}$
	C37	$3.39 \times 10^{-14}$	$2.15 \times 10^{-14}$	$0.63 \times 10^{-14}$
	C45	$4.57 \times 10^{-14}$	$4.07 \times 10^{-14}$	$1.6 \times 10^{-14}$
C46	$3.60 \times 10^{-14}$	$4.20 \times 10^{-14}$	$1.25 \times 10^{-14}$	
平均值		$3.57 \times 10^{-14}$	$2.63 \times 10^{-14}$	$1.15 \times 10^{-14}$

表 3 BDS-3 哈达玛方差对氢钟的统计结果

Tab. 3 Statistical results of the Hadamard variance of the hydrogen maser of BDS-3

轨道类型	卫星编号PRN (氢钟)	千秒稳	万秒稳	天稳
MEO	C25	$3.15 \times 10^{-14}$	$2.20 \times 10^{-14}$	$0.88 \times 10^{-14}$
	C26	$2.57 \times 10^{-14}$	$1.63 \times 10^{-14}$	$0.56 \times 10^{-14}$
	C27	$2.35 \times 10^{-14}$	$2.02 \times 10^{-14}$	$0.52 \times 10^{-14}$
	C28	$2.66 \times 10^{-14}$	$2.06 \times 10^{-14}$	$0.54 \times 10^{-14}$
	C29	$2.75 \times 10^{-14}$	$1.94 \times 10^{-14}$	$0.56 \times 10^{-14}$
	C30	$2.55 \times 10^{-14}$	$1.79 \times 10^{-14}$	$1.45 \times 10^{-14}$
	C34	$2.92 \times 10^{-14}$	$2.18 \times 10^{-14}$	$0.49 \times 10^{-14}$
	C35	$2.89 \times 10^{-14}$	$2.41 \times 10^{-14}$	$0.61 \times 10^{-14}$
	C43	$3.87 \times 10^{-14}$	$3.02 \times 10^{-14}$	$1.43 \times 10^{-14}$
	C41	$4.28 \times 10^{-14}$	$3.39 \times 10^{-14}$	$2.43 \times 10^{-14}$
	C42	$4.06 \times 10^{-14}$	$3.77 \times 10^{-14}$	$1.58 \times 10^{-14}$
C44	$4.49 \times 10^{-14}$	$4.37 \times 10^{-14}$	$2.09 \times 10^{-14}$	
平均值		$3.21 \times 10^{-14}$	$2.56 \times 10^{-14}$	$1.09 \times 10^{-14}$
IGSO	C38	$3.44 \times 10^{-14}$	$3.64 \times 10^{-14}$	$0.88 \times 10^{-14}$
	C39	$3.31 \times 10^{-14}$	$3.12 \times 10^{-14}$	$1.07 \times 10^{-14}$
	C40	$2.83 \times 10^{-14}$	$3.06 \times 10^{-14}$	$0.97 \times 10^{-14}$
	平均值	$3.19 \times 10^{-14}$	$3.27 \times 10^{-14}$	$0.97 \times 10^{-14}$
GEO	C59	$3.78 \times 10^{-14}$	$6.51 \times 10^{-14}$	$3.70 \times 10^{-14}$
C60	$3.53 \times 10^{-14}$	$6.58 \times 10^{-14}$	$2.49 \times 10^{-14}$	
平均值		$3.66 \times 10^{-14}$	$6.55 \times 10^{-14}$	$3.10 \times 10^{-14}$

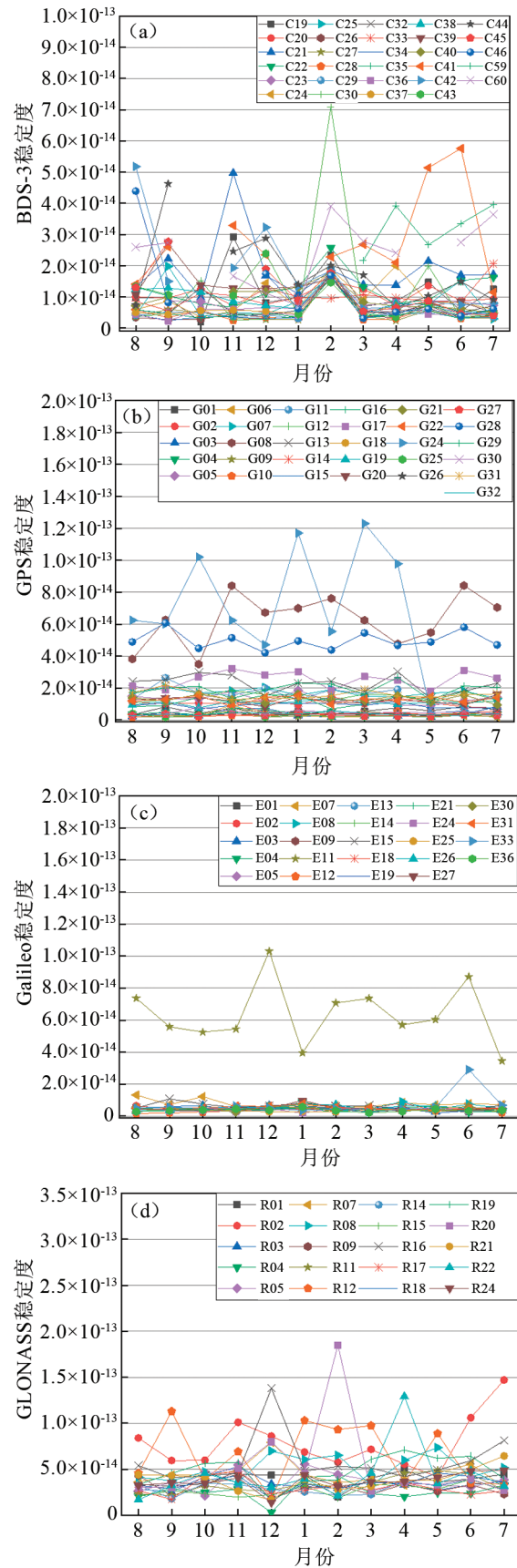


图 4 GNSS 星载原子钟稳定度

Fig. 4 Stability of GNSS on-board atomic clocks

### 3 分析与结论

原子钟是卫星导航系统的核心,根据 GBM 一年的精密钟差数据,从频率准确度、频率漂移率和频率稳定度三个方面分析星载原子钟的性能,表 4 给出了分类统计。通过分析 GNSS 卫星时域稳定性发现,准确度方面 BDS-3 的 MEO 和 IGSO 卫星、Galileo 使用氢原子钟卫星、GPS 和 GLONASS 都处于  $10^{-12}$  量级, BDS-2 和 Galileo 的铷原子钟处于  $10^{-11}$  量级,其中 BDS-3 的新型铷原子钟较 BDS-2 铷原子钟有较

大提升。BDS-3MEO 和 IGSO 卫星的氢原子钟精度高于 GEO 卫星。GPS 第三代中 IIR-M 卫星准确度高于 IIR 卫星,第四代的 IIF 卫星精度高于第三代卫星,其中铯原子钟的准确度最高。Galileo 的氢原子钟优于铷原子钟, E11 的铷原子钟在评估时间内的前几个月准确度较差,后期准确度显著提升。GLONASS 铯原子钟的准确度高于 BDS、GPS、Galileo 的原子钟,整体来看 GLONASS 铯原子钟的精度高于其他系统的氢原子钟和铷原子钟。

表 4 GNSS 星载原子钟性能均值

Tab. 4 Average performance of GNSS on-board atomic clocks

系统	轨道类型	原子钟类型	频率准确度( $10^{-11}$ )/s	频率漂移率( $10^{-15}$ )/d	频率稳定度( $10^{-14}$ )/d
BDS-2		铷钟	6.23	36.4	2.94
		铷钟	1.14	7.67	1.15
		氢钟	0.82	0.53	1.09
BDS-3	GEO	氢钟	4.18	0.99	3.10
	IGSO	氢钟	0.28	0.46	0.97
		铷钟	0.47	1.52	0.39
GPS	IIF	铯钟	0.43	3.56	6.23
	IIR	铷钟	0.60	1.91	1.55
	IIR-M	铷钟	0.48	0.93	1.64
Galileo	MEO	铷钟	10.0	20.5	6.35
		氢钟	0.95	0.13	0.48
GLONASS	MEO	铯钟	0.13	0.76	4.17

漂移率方面 BDS-3 和 Galileo 的铷原子钟日漂移率在  $10^{-14}$  量级,氢原子钟在  $10^{-16}$  量级, BDS-3 的铷原子钟较 BDS-2 铷原子钟精度提升一个量级, BDS-3 氢原子钟漂移率优于铷原子钟,这说明铷原子钟有明显的频率漂移。三种轨道类型的卫星里, IGSO 氢原子钟的漂移率最小, GEO 氢原子钟的漂移率最大。GPS 铷原子钟漂移率优于 BDS 和 Galileo 的铷原子钟,其中 IIR-M 原子钟的漂移率小于 IIR 卫星。Galileo 的氢原子钟的漂移率在四个系统中最小, GLONASS 铯原子钟的漂移率与 BDS-3 氢原子钟相当。

稳定度方面氢原子钟相比于铷原子钟和铯原子钟更稳定, BDS-3 的铷原子钟的稳定度较 BDS-2 提升一倍左右。GPS 里最新一代的 IIF 卫星铷原子钟的表现优于铯原子钟,第三代的 IIR 和 IIR-M 卫星原子钟稳定度相当, IIF 卫星铷原子钟较 IIR 和 IIR-M 有较大提升, IIF 卫星的铯原子钟和 GLONASS 的铯原子钟稳定度略差。Galileo 氢原子钟的稳定性与 GPS 的 IIF 相当,但其铷原子钟的稳定度较差。

目前 BDS-3 已全面组网完成,原子钟的性能表现备受关注,本文通过一年的事后精密钟差数据分析了 BDS-3、GPS、Galileo 和 GLONASS 星载原子钟的性能表现。结果表明 BDS-3 的铷原子钟较 BDS-2 性能提升明显, BDS-3 的氢原子钟的准确度和漂移率显著优于 BDS-3 的铷原子钟,天稳定度方面 BDS-3 多数氢原子钟可达到  $10^{-15}$  量级。BDS-3 原子钟天稳定度的平均值最优,其次是 GPS、BDS-2、Galileo 和 GLONASS。对原子钟的性能分析可以为后续卫星导航系统性能的提升提供参考。随着原子钟精度的不断提高,导航卫星的定位与授时精度也会得到进一步提高。

#### 参考文献:

- [1] 王省超, 贾小林, 艾青松, 等. BDS 在轨卫星原子钟性能评估分析[J]. 导航定位学报, 2018, 6(1): 60-66.
- [2] ZHAO Q, WANG C, GUO J, et al. Precise orbit and clock determination for Beidou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 4-9.

- [3] 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.
- [4] 毛悦,陈建鹏,戴伟,等. 星载原子钟稳定性影响分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(10):1182-1186.
- [5] 程梦飞,王宇谱,薛申辉,等. 北斗二号卫星导航系统运行末期卫星钟性能评估[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(3):372-379.
- [6] 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.
- [7] 王天,王璐. 北斗导航系统卫星原子钟性能评估[J]. 测绘通报,2013(S1):40-43.
- [8] 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,2019,39(3):252-255.
- [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.
- [10] 程彤,王潜心,胡超,等. BDS-2和BDS-3卫星原子钟特性分析[J]. 测绘科学,2020,45(12):69-76.
- [11] 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.
- [12] 赵琳琳,刘万科,李建龙,等. Galileo/GPS星载原子钟在轨性能评估与分析[J]. 测绘地理信息,2020,45(1):13-19.
- [13] 赵丹宁,雷雨. GLONASS星载原子钟长期特性分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2021,46(6):1-11.
- [14] 潘雄,杨玉锋,卿晨昕,等. Galileo在轨卫星钟性能评估与分析[J]. 中国惯性技术学报,2020,28(1):53-59.
- [15] 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.

(责任编辑:郭云)