

北斗与GPS系统在轨原子钟钟差数据分析与评估

张照瑞, 廉吉庆*

(兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 在卫星导航系统中, 原子钟是时间测量的基准和核心组成部件, 其性能直接决定导航、定位和授时的质量。在轨原子钟性能评估是保证卫星导航系统正常运行的前提和基础, 对于原子钟产品性能改进具有重要的参考价值。介绍了原子钟性能评估的主要参数和评估方法。分析和对比了北斗与GPS原子钟钟差数据, 结果表明: 北斗二号与GPS相比, 铷原子钟的准确度、稳定性和漂移率有一定的差距; 北斗三号搭载了铷原子钟和氢原子钟, 性能指标均有较大的提升, 氢原子钟10天稳定性和天稳定度普遍达到了 10^{-15} 量级, 其性能指标与GPS相当; 最新的GPS Block IIF型卫星搭载的铷原子钟长期频率稳定度有了显著的提升, 国产铷原子钟的性能指标还有进一步提升的空间。

关键词: 星载原子钟; 在轨性能评估; 准确度; 漂移率; 稳定性

中图分类号: TB71; TH714.1⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7086(2024)06-0691-06

DOI: 10.12446/j.issn.1006-7086.2024.06.012

Analysis and Evaluation of Clock Difference Data in Orbit Atomic Clock of Beidou and GPS System

ZHANG Zhaorui, LIAN Jiqing*

(Science and Technology on Vacuum technology and physics Laboratory,
Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In the satellite navigation system, the atomic clock is the time measurement benchmark and the core component. Its performance directly determines the quality of navigation, positioning and time service. The performance evaluation of in-orbit atomic clock is the precondition and foundation to ensure the normal operation of satellite navigation system, and also has important reference value for the improvement of atomic clock product performance. The main parameters and evaluation methods of atomic clock performance evaluation are introduced. The clock difference data between Beidou and GPS atomic clocks is analyzed and compared. The results show that the accuracy, stability and drift rate of the Beidou-2 rubidium atomic clock are different from those of the GPS atomic clock. Beidou-3 is equipped with rubidium atomic clocks and hydrogen atomic clocks, and its performance indicators have been greatly improved. The 10 days stability and daily stability of hydrogen atomic clocks have generally reached the 10^{-15} level, and their performance indicators are equivalent to GPS. The long-term frequency stability of the rubidium atomic clock carried by the latest GPS Block IIF satellite has been significantly improved, and the performance indicators of the domestic rubidium atomic clock need to be further improved.

Key words: space-borne atomic clock; in-orbit performance evaluation; accuracy; drift rate; stability

0 引言

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite

System, GNSS)是以时间测量为基础的系统。星载

原子钟是卫星导航系统的核心载荷和测量基准, 星

收稿日期: 2023-09-27

基金项目: 真空技术与物理重点实验室基金(6142207220102)

作者简介: 张照瑞, 工程师, 主要从事原子钟物理部分及电路研究。E-mail: 407520041@qq.com

通信作者: 廉吉庆, 高级工程师, 主要从事原子频标技术研究, E-mail: lianjiqing@alu.uestc.edu.cn

引用信息: 张照瑞, 廉吉庆. 北斗与GPS系统在轨原子钟钟差数据分析与评估[J]. 真空与低温, 2024, 30(6): 691-696.

ZHANG Z R, LIAN J Q. Analysis and evaluation of clock difference data in orbit atomic clock of Beidou and GPS system[J]. Vacuum and Cryogenics, 2024, 30(6): 691-696.

载原子钟的性能直接决定给地面导航、定位和授时的质量^[1-3],所以对星载原子钟在轨运行状态的评估是保证卫星导航定位系统正常运行的前提和基础^[4-5]。

星载原子钟在轨运行期间不可避免地受到外部空间环境和设备逐渐老化等因素的影响,导致其输出的钟差序列存在粗差、跳变、数据间断等异常现象,对在轨原子钟钟差(Satellite Clock Bias, SCB)数据分析,需要评估其在轨工作性能和运行状况^[6-10]。根据北斗导航系统(BDS)提供的信息,北斗二期搭载了国产第二代铷原子钟,北斗三期搭载了第三代国产铷原子钟和氢原子钟,同时在北斗三期试验星上还对国产星载铯原子钟进行了搭载和性能验证。所以迫切需要对北斗导航系统新搭载的国产星载原子钟性能指标进行评估,并与美国 GPS 导航系统星载原子钟的性能指标进行对比,以对比结果作为参考,进一步提高国产星载原子钟的性能指标。

美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL)对 GPS 星载原子钟做了大量的工作,此外,国内外学者针对星载原子钟的性能进行了深入的探讨和研究,星载原子钟的性能评估伴随着整个导航系统的发展过程,逐渐确立了以频率准确度、漂移率和稳定性三项主要性能参数作为参考的在轨原子钟评估方法^[11]。本文叙述了星载原子钟性能评估的主要参数和相应参数的评估方法,通过使用来自于全球连续监测评估系统(IGMAS)的钟差数据,分析了北斗导航系统和 GPS 卫星导航系统的在轨原子钟钟差数据,比较两种系统的频率准确度、稳定性和漂移率,并给出评估结果,也为星载原子钟性能改进提供参考数据。

1 原子钟性能参数的评估方法

利用 IGMAS 提供的钟差数据,对卫星导航系统在轨原子钟性能参数进行评估,主要是评估在轨原子钟频率准确度、频率稳定性和频率漂移率。

1.1 频率准确度

频率准确度(简称准确度)表征的是原子钟输出信号频率与标称频率的符合程度,描述实际测量值和标称值之间的相对关系,是反映原子钟性能的一项重要指标。因为输出频率有短期的波动,准确度有正有负,原子钟钟差实际值是无法精确测量的,一般通过时差比对的方法来计算频率准确度。

将钟差数据标记为 $x_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 设采样周期为 T (通常取采样时间的 1 h 以上数据的计算平均值), 基于最小二乘法, 通过线性函数 $x = \bar{x} +$

$K_T(t - \bar{t})$ 便可求得此段时间的频率准确度 K_T , t 为此段取样时间, 如(1)式所示^[12]:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (1)$$

式中: $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i$, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, t_i 为取样时序; $\bar{t}$ 为取样平均时间; $\bar{x}$ 为取样平均钟差。

1.2 频率漂移率

频率漂移率(简称漂移率)表征的是原子钟输出频率值随运行时间变化的程度, 衡量原子钟自主守时能力。通常频率漂移呈现出波动特性, 定义为连续工作的频率源输出频率在单位时间内的平均变化量。

对于铷原子钟来说, 光频移、微波功率频移、碰撞频移和腔牵引效应等因素均有可能引起频率漂移。铷原子钟相对于频率偏差将随着运行时间单调增加或减少、频率漂移率的大小直接影响原子钟长期稳定度的性能。

日漂移率, 采用最小二乘法计算, 乘以 1 天采样间隔下所有历元个数, 基于频率准确度数据的漂移率 D_T 计算方法, 如式(2)所示^[13-14]

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

式中: $y_i(\tau)$ 为 t_i 时原子钟的频率准确度; τ 为取样时间间隔; $\bar{t}$ 、 $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$ 分别为 τ 时间段内钟差测量时间、钟差数据和相对频率准确度的均值, $\bar{y}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i(\tau)$ 。在工程中通常以 1 天为单位计算原子钟频率漂移率^[15]。

1.3 频率稳定度

频率稳定度(简称稳定度)是通过统计频率偏差受噪声影响而产生的相对于平均频率偏差的随机起伏, 表征一定时间内原子钟输出频率的平均波动变化情况, 也是在一定时间内产生同样频率的能力, 通常用 Allan 方差、Hadamard 方差表示, 或两种方差的改进模型进行计算。

Allan 方差为二次取样方差, 它易受线性频漂影响。Hadamard 方差为三次采样方差, 在计算过程中采用了频率数据的二阶差分、相位数据的三阶差分。因此, Hadamard 方差适应频率的二阶平稳过程, 在计算稳定度时不受线性频率漂移的影响。

对于频率序列数据, Hadamard 方差的定义为^[16]:

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

式中: λ 为平滑时间; M 为数据总个数; $\bar{y}_i$ 为相应时间段内的相对频率偏差均值, $\bar{y}_i = \frac{x_{i+1} - x_i}{\tau}$; x_i 为取样时序。

对于相位(时差)数据, Hadamard 方差定义为:

$$H\sigma_y^2(\lambda) = \frac{1}{6\lambda^2(N-3)} \sum_{i=1}^{N-3} (x_{i+3} - 3x_{i+2} + 3x_{i+1} - x_i)^2 \quad (4)$$

频率稳定度是衡量原子钟性能优劣的重要指标之一。铷原子钟通常采用 Hadamard 方差计算频

率稳定度, 以消除线性漂移的影响。氢原子钟和铯原子钟通常采用 Allan 方差计算频率稳定度。同时, Hadamard 方差具有较高的置信区间, 适合于计算较短时间的频率稳定度。

2 在轨铷原子钟钟差数据分析与讨论

本文数据引自于“国际 GNSS 监测评估系统”发布的 IGMAS 数据(见表 1 和表 2), 通过频率准确度、稳定度和漂移率对在轨原子钟的性能进行评估。

表 1 BDS 系统及 GPS 系统在轨铷原子钟天频率漂移率
Tab. 1 Daily frequency drift rate of on orbit rubidium atomic clock for BDS and GPS system

BDS 系统		GPS 系统	
卫星代号	天频率漂移率	卫星代号	天频率漂移率
C01	$-4.886\,07 \times 10^{-15}$	G02-IIR-RB	$8.173\,49 \times 10^{-15}$
C02	$-1.192\,62 \times 10^{-14}$	G03-IIF-RB	$-4.943\,24 \times 10^{-15}$
C05	$-4.773\,87 \times 10^{-14}$	G04-III-RB	$6.082\,77 \times 10^{-15}$
C06	$1.062\,45 \times 10^{-13}$	G05-IIR-M-RB	$1.219\,16 \times 10^{-15}$
C07	$-2.517\,45 \times 10^{-14}$	G06-IIF-RB	$2.881\,34 \times 10^{-14}$
C08	$-7.890\,26 \times 10^{-14}$	G07-IIR-M-RB	$1.732\,4 \times 10^{-15}$
C09	$-1.146\,04 \times 10^{-14}$	G09-IIF-RB	$1.348\,85 \times 10^{-14}$
C10	$-1.634\,49 \times 10^{-14}$	G10-IIF-RB	$1.415\,21 \times 10^{-14}$
C11	$-8.149\,72 \times 10^{-15}$	G12-IIR-M-RB	$-3.324\,21 \times 10^{-15}$
C12	$6.016\,24 \times 10^{-14}$	G14-III-RB	$2.770\,27 \times 10^{-15}$
C13	$-1.704\,22 \times 10^{-15}$	G15-IIR-M-RB	$1.417\,97 \times 10^{-16}$
C14	$1.702\,24 \times 10^{-13}$	G16-IIR-RB	$-4.265\,5 \times 10^{-15}$
C16	$-1.093\,51 \times 10^{-13}$	G17-IIR-M-RB	$-4.814\,35 \times 10^{-15}$
C19	$1.042\,97 \times 10^{-14}$	G19-IIR-RB	$3.837\,78 \times 10^{-16}$
C22	$-9.023\,84 \times 10^{-14}$	G20-IIR-RB	$5.589\,01 \times 10^{-16}$
C24	$-7.855\,87 \times 10^{-14}$	G21-IIR-RB	$-6.010\,16 \times 10^{-15}$
C33	$-1.196\,23 \times 10^{-13}$	G22-IIR-RB	$2.204\,34 \times 10^{-14}$
C36	$-1.020\,42 \times 10^{-13}$	G25-IIF-RB	$1.850\,17 \times 10^{-14}$
C37	$-2.509\,3 \times 10^{-14}$	G26-IIF-RB	$-6.230\,9 \times 10^{-15}$
C03	$1.792\,76 \times 10^{-13}$	G27-IIF-RB	$9.848\,78 \times 10^{-15}$
C04	$1.308\,78 \times 10^{-13}$	G28-IIR-RB	$-8.262\,08 \times 10^{-15}$
C20	$-6.193\,61 \times 10^{-14}$	G29-IIR-M-RB	$6.466\,68 \times 10^{-15}$
C21	$-8.245\,05 \times 10^{-14}$	G30-IIF-RB	$7.533\,62 \times 10^{-15}$
C23	$-1.610\,09 \times 10^{-13}$	G31-IIR-M-RB	$4.571\,09 \times 10^{-16}$
C32	$-1.398\,67 \times 10^{-13}$	G32-IIF-RB	$-2.387\,72 \times 10^{-14}$

在轨卫星遥测数据的处理说明: 在轨遥测数据信号在下传过程中会受到电离层和对流层的影响, 同时在接收过程中会对其中的一些参数产生干扰噪声, 但其变化的趋势不会改变; 由于部分在轨卫星的原子钟数据存在重新启动原子钟或切换备份原子钟的情况, 这里截取处理的钟差数据采用单台

原子钟连续工作的在轨数据。

BDS 和 GPS 卫星的钟差数据各取 25 台在轨运行的铷原子钟钟差数据进行处理分析, 计算天频率漂移率, 计算结果如表 1 所列。对以下铷原子钟的天频率漂移率数据取绝对值, 并按照 $1.0 \times 10^{-13} \leq D \leq 9.9 \times 10^{-13}$ 、 $1.0 \times 10^{-14} \leq D \leq 9.9 \times 10^{-14}$ 、 $1.0 \times 10^{-15} \leq D \leq$

9.9×10^{-15} 、 $1.0 \times 10^{-16} \leq D \leq 9.9 \times 10^{-16}$ 四个量级区间进行统计, 其中 D 为天频率漂移率。

表 2 各类型原子钟的平均频率稳定度 (数据采样间隔 300 s)

Tab. 2 Average frequency stability of various types of atomic clocks (Data sampling interval 300 s)

时间/s	平均频率稳定度				
	BDS2-Rb	BDS3-Rb	BDS3-H	GPSIIR-Rb	GPSIIF-Rb
3.00×10^2	2.89×10^{-13}	1.52×10^{-13}	1.25×10^{-13}	6.99×10^{-13}	1.14×10^{-13}
6.00×10^2	2.01×10^{-13}	9.13×10^{-14}	7.99×10^{-14}	3.86×10^{-13}	7.34×10^{-14}
1.20×10^3	1.45×10^{-13}	5.64×10^{-14}	5.19×10^{-14}	2.06×10^{-13}	4.86×10^{-14}
2.40×10^3	1.03×10^{-13}	3.74×10^{-14}	3.84×10^{-14}	1.09×10^{-13}	3.50×10^{-14}
4.80×10^3	6.94×10^{-14}	2.77×10^{-14}	2.98×10^{-14}	6.58×10^{-14}	3.19×10^{-14}
9.60×10^3	6.10×10^{-14}	2.82×10^{-14}	2.94×10^{-14}	5.56×10^{-14}	3.59×10^{-14}
1.92×10^4	5.56×10^{-14}	2.03×10^{-14}	2.41×10^{-14}	3.59×10^{-14}	2.47×10^{-14}
3.84×10^4	5.90×10^{-14}	1.64×10^{-14}	1.95×10^{-14}	1.52×10^{-14}	1.03×10^{-14}
7.68×10^5	3.45×10^{-14}	2.09×10^{-14}	1.98×10^{-14}	1.30×10^{-14}	7.54×10^{-15}
1.54×10^6	2.79×10^{-14}	2.05×10^{-14}	1.86×10^{-14}	1.10×10^{-14}	6.50×10^{-15}

图 1 和图 2 分别为 BDS 卫星和 GPS 卫星搭载的铷原子钟天频率漂移率数据。可以看出, BDS 导航卫星搭载的铷原子钟天频率漂移率数据处于 $1.0 \times 10^{-14} \leq D \leq 9.9 \times 10^{-14}$ 区间内的数量最多, 占比 48%, 天频率漂移率数据处于 $1.0 \times 10^{-15} \leq D \leq 9.9 \times 10^{-15}$ 区间内的数量次之, 占比为 28%。而 GPS 搭载的铷原子钟天频率漂移率数据处于 $1.0 \times 10^{-15} \leq D \leq 9.9 \times 10^{-15}$ 区间内的数量最多, 占比为 60%。通过数据的比较可知, 铷原子钟天频率漂移率 BDS 与 GPS 存在一定的差距, 虽然已满足了 BDS 卫星导航系统使用的要求, 但国产铷原子钟的性能参数还有进一步提升的空间。

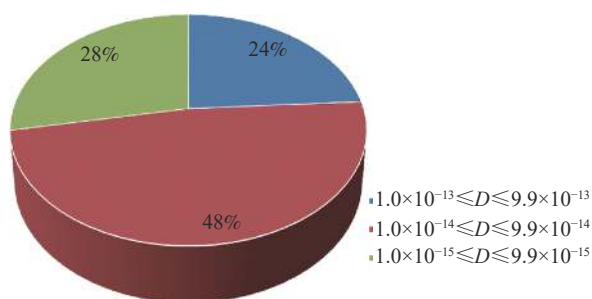


图 1 BDS 导航在轨铷原子钟天频率漂移率分析

Fig. 1 Analysis of frequency drift rate of BDS navigation in orbit rubidium atomic clock

根据卫星种类不同, 分别将 14 颗北斗二号卫星铷原子钟为一组(代号: BDS2-Rb), 10 颗北斗三号卫星铷原子钟为一组(代号: BDS3-Rb), 8 颗北斗三号卫星氢原子钟为一组(代号: BDS3-H), 11 颗 GPS IIR/IIR-M 卫星铷原子钟为一组(代号: GPSIIR-Rb), 9 颗 GPS IIF 卫星铷原子钟为一组(代号:

GPSIIF-Rb), 进行频率稳定度数据计算。为了尽可能地体现原子钟自身频率稳定度, 选择连续 100 天无明显异常频率跳变的钟差数据进行计算, 并计算每组原子钟频率稳定度的平均值, 如式(5)所示:

$$V(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^n H(\tau)_i}{n} \quad (5)$$

式中: V 为平均频率稳定度; H 为使用 Hadamard 方差计算出的频率稳定度; n 为样本数量。

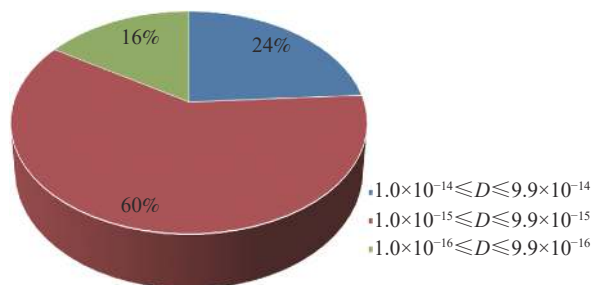


图 2 GPS 在轨铷原子钟天频率漂移率分析

Fig. 2 Analysis of frequency drift rate of GPS in orbit rubidium atomic clock

平均频率稳定度计算结果如表 2 和图 3 所示。

通过数据对比可知, GPS IIR 铷原子钟 1 h 内的频率稳定度较差, 但天稳定度较好, 接近 1×10^{-14} 。BDS2 铷原子钟的短期稳定度比 GPS IIR 铷原子钟的稍好, 但万秒后的频率稳定度有一定的差距, 天频率稳定度接近 3×10^{-14} 。BDS3 铷原子钟和氢原子钟的频率稳定度相当, 天稳定度均接近 2×10^{-14} 。GPS IIF 铷原子钟的频率稳定度较好, 在万秒以内的频率稳定度与 BDS3 铷原子钟和氢原子钟相当,

天稳定度达到 10^{-15} 量级。从同一导航系统的不同卫星种类来看,不论是 BDS3 原子钟与 BDS2 原子钟相比,还是 GPS IIF 原子钟与 GPS IIR 相比,1 h 内的短期稳定度都有了较大提升。

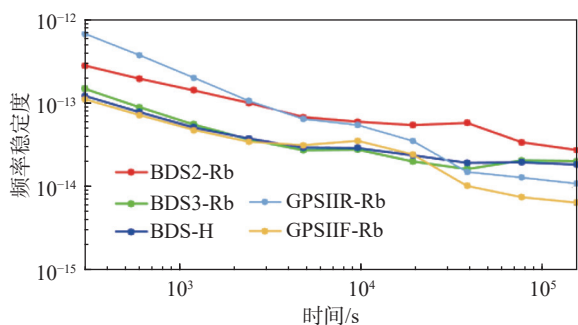


图3 在轨原子钟频率稳定度数据比较

Fig. 3 Comparison of frequency stability data of in-orbit atomic clock

图4为GPS导航系统部分卫星铷钟在轨工作的频率准确度变化曲线,数据取样时间约1年。从图可以看出,大多数GPS星载铷钟的频率准确度存在拐点,从而在计算长期频率漂移率时得到了抵消,使得长期频率稳定度得到优化。

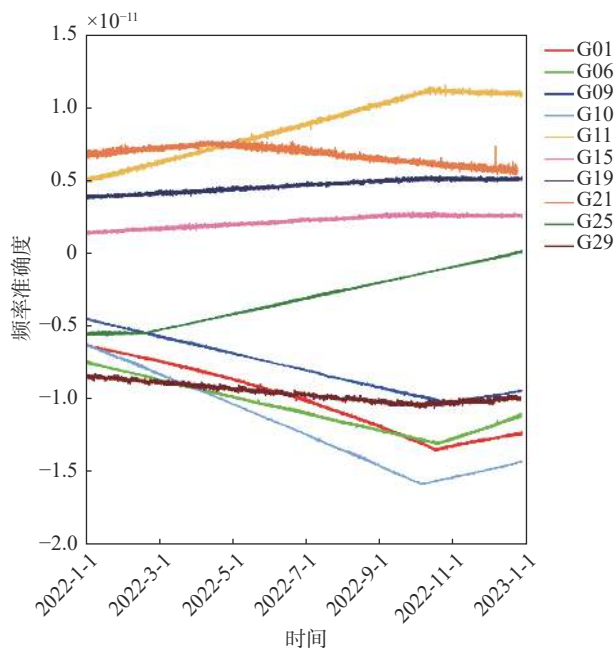


图4 GPS系统卫星1年的频率准确度测量曲线
(IGS监测数据)

Fig. 4 Frequency accuracy measurement curve of GPS satellite length in one year (IGS monitor data)

图5是GPS系统G18卫星从开机到现在的频率准确度测试曲线,G18的频率准确度被控制在

$5.0 \times 10^{-12} \sim -5.0 \times 10^{-12}$ 的范围内波动。将该频率准确度按照漂移的方向可分为6段,分别计算每段的频率漂移率,得出第1段为 -9.2296×10^{-14} 、第2段为 9.4136×10^{-15} 、第3段为 -1.2612×10^{-14} 、第4段为 6.1408×10^{-15} 、第5段为 -2.1073×10^{-15} 和第6段为 1.0549×10^{-15} 。可以看出这6段的绝对值在不断减小,漂移率在不断下降。数据不符合铷原子钟频率准确度的变化规律,因为铷原子钟的频率准确度数值是随时间单调变化,且变化率逐渐趋近于零。而GPS铷钟的频率准确度数值存在拐点,可以推测GPS铷钟输出的频率准确度进行了算法优化,根据当时的频率漂移率进行校频,使得铷原子钟长期稳定度有了明显提高,增强了铷原子钟长期单独工作的能力。

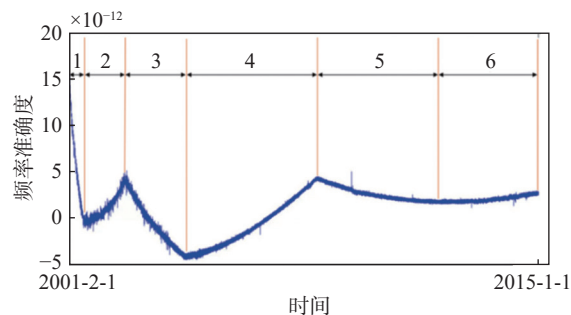


图5 GPS系统G18卫星频率准确度测量曲线
(IGS监测数据)

Fig. 5 Frequency accuracy measurement curve of GPS system G18 satellite (IGS monitor data)

图6为BDS的C37-BD3卫星连续监测450天的频率准确度变化曲线,频率准确度数值不存在拐点,仅存在因校频而产生的阶跃跳动,这表明相对于GPS铷钟,BDS在长稳方面还有一定的差距。

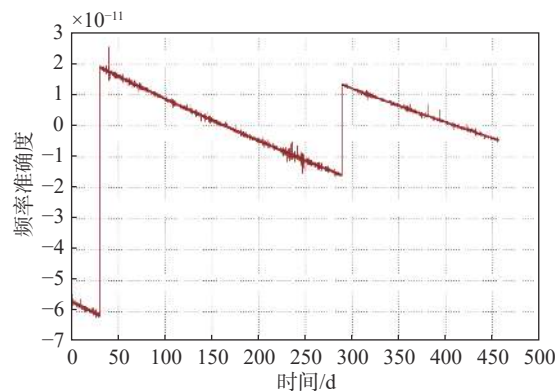


图6 BDS系统C37-BD3卫星频率准确度测量曲线
(IGS监测数据)

Fig. 6 Frequency accuracy measurement curve of BDS system C37-BD3 satellite (IGS monitor data)

IGMAS 最终钟差数据的原子钟频率准确度评估不可避免地存在一定误差, 基于 IGMAS 钟差数据的北斗导航原子钟(包含铷钟和氢钟)频率准确度换算后会出现一些如图 7 所示的频率台阶。台阶持续时间通常为 1 个完整的自然日, 幅度通常在 $10^{-14} \sim 10^{-13}$ 量级间(图 7 中幅度约 5×10^{-13})。由于部分台阶幅度很小, 在对原子钟评估时不易将其完全去除, 未去除的频率台阶会影响对原子钟长期频率稳定度的评估, 因此可以推测 BDS 导航原子钟的实际频率稳定度要优于本文的评估值。

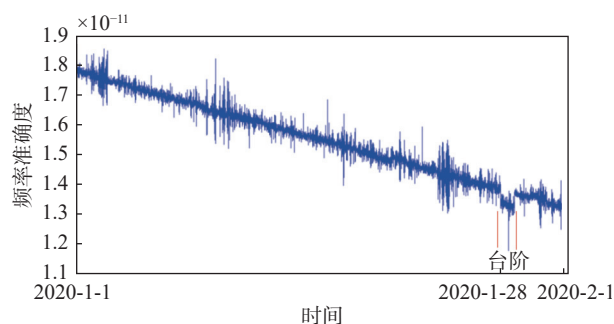


图 7 BDS 铷钟 1 月频率准确度测量曲线(IGS 监测数据)

Fig. 7 Frequency accuracy measurement curve of BDS rubidium atomic clock in January(IGS monitor data)

目前国内外导航卫星搭载的原子钟有铷原子钟、铯原子钟和氢原子钟。目前 BDS 主要搭载铷原子钟和氢原子钟, 从稳定度变化趋势可以看出, 运行时间超过 1.5×10^6 s, 铷原子钟稳定度开始变差, 而氢原子钟的长期稳定度依然持续保持稳定, 混合搭载实现互补, 弥补了铷原子钟长期频率稳定度的不足。评估结果表明, 北斗三号卫星使用的原子钟性能明显优于北斗二号, 其中氢原子钟的长期性能更好, 10 天稳定度和天漂移率普遍达到 10^{-15} 量级, 其长期频率稳定度与 GPS 相当。

3 结束语

通过对国际 GNSS 监测评估系统的在轨卫星数据分析和原子钟性能参数评估, 对比北斗与 GPS 在轨原子钟钟差数据, 结论如下:

北斗二号与 GPS 相比, 铷原子钟的准确度、稳定性和漂移率有一定的差距; 北斗三号搭载了铷原子钟和氢原子钟, 性能指标均有较大的提升, 氢原子钟 10 天稳定度和天稳定度普遍达到了 10^{-15} 量级, 其性能指标与 GPS 相当; 最新的 GPS Block IIF 型卫星搭载的铷原子钟长期频率稳定度有了显著

的提升, 国产铷原子钟的性能指标还有进一步提升的空间。

参考文献:

- [1] 谢军. 北斗导航卫星的技术发展及展望 [J]. 中国航天, 2013(3): 7-11.
- [2] 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.
- [3] 王义道、王庆吉、傅济时, 等. 量子频标原理 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [4] 谭述森. 卫星导航定位工程 [M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2010.
- [5] 刘基余. GPS 卫星导航定理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [6] 张清华, 隋立芬, 贾小林, 等. 全球定位系统 BLOCK IIF 星载原子钟性能评估 [J]. 导航定位学报, 2014, 2(1): 46-50.
- [7] YANG J, ZHENG N, CUI J Z, et al. Ground environment test and in-orbit performance verification of spaceborne cesium atomic clock[C]//China Satellite Navigation Conference Proceedings, Nanchang, China, 2021: 172-179.
- [8] MA P, XIE J, CUI J Z, et al. Analysis of in-orbit data of domestic space-borne cesium atomic clock[C]//China Satellite Navigation Conference Proceedings, Nanchang, China, 2021: 180-189.
- [9] 周忠谟、易杰军、周琪. 卫星测量原理及应用 [M]. 北京: 测量出版社, 2002: 226-230.
- [10] 顾亚楠、陈忠贵、帅平. 国外导航卫星星载原子钟技术发展概况 [J]. 国际太空, 2008(10): 12-16.
- [11] 姜秋晨, 赵琳琳, 刘万科, 等. BD-2 星载原子钟长期在轨性能评估 [J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(10): 1047-1052.
- [12] 郭美军, 占勇杰, 朱翔宇, 等. BDS 和 GPS 星载原子钟性能评估 [C]//2019 年中国卫星导航学术年会, 2021.
- [13] 毛悦, 宋小勇, 张清华, 等. BDS-3 卫星钟在轨性能评估与分析 [J]. 测绘学报, 2023, 52(3): 349-356.
- [14] 王宇谱, 吕志平, 孙大双, 等. 一种改进钟差二次多项式模型的导航卫星钟差预报方法 [J]. 天文学报, 2016, 57(1): 78-90.
- [15] 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.
- [16] 李孝辉, 杨旭海, 刘娅, 等. 时间频率信号的精密测量 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.

(责任编辑: 郭云)