



伽利略偏心轨道卫星星载原子钟在轨性能评估分析

白云龙, 王乐, 黄观文, 解世超, 谢威, 曹钰, 范丽红

引用本文:

白云龙, 王乐, 黄观文, 等. 伽利略偏心轨道卫星星载原子钟在轨性能评估分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2026, 46(6): 685–694.
Bai Yunlong, Wang Le, Huang Guanwen, et al. On-Orbit Performance Assessment of Onboard Atomic Clocks for Galileo Eccentric-Orbit Satellites[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2026, 46(6): 685–694.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2025.09.315>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

丽江台超导重力仪检测的漾濞 $M_S6.4$ 与玛多 $M_S7.4$ 地震同震重力变化

Coseismic Gravity Changes of Yangbi $M_S6.4$ and Maduo $M_S7.4$ Earthquakes Detected by Superconducting Gravimeter at Lijiang Station

大地测量与地球动力学. 2023, 43(12): 1246–1252 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.12.007>

GRACE-FO卫星非差运动学精密定轨及精度分析

Zero-Difference Kinematic Precise Orbit Determination and Accuracy Analysis of GRACE-FO Satellite

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1178–1182 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.014>

多轨道时序InSAR拟稳基准平差方法研究

Research on Quasi-Stable Datum Adjustment Method for Multi-Track Time Series InSAR

大地测量与地球动力学. 2023, 43(11): 1199–1204 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.11.018>

火星极移时变分析与预报

Time-Varying Analysis and Long-Term Prediction of Mars Pole Motion

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 991–996 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.001>

基于多路径修正的BDS-3差分码偏差估计

Estimation of BDS-3 Differential Codes Bias Based on Multipath Correction

大地测量与地球动力学. 2023, 43(10): 1008–1014 <https://doi.org/10.14075/j.jgg.2023.10.004>

伽利略偏心轨道卫星星载原子钟在轨性能评估分析

白云龙¹ 王 乐^{1,2,3} 黄观文^{1,2,4} 解世超^{1,5} 谢 威⁶ 曹 钰¹ 范丽红⁶

1 长安大学地质工程与测绘学院, 西安, 710054

2 智能北斗陕西省高校工程研究中心, 西安, 710054

3 陕西省黄河科学研究院, 西安, 710054

4 自然资源部生态地质与灾害防控重点实验室, 西安, 710054

5 河海大学地球科学与工程学院, 南京, 211100

6 中国科学院国家授时中心, 西安, 710600

摘 要: 利用 2022-01—2025-04 连续 1 216 d 的 ESA 精密钟差产品, 结合钟差拟合参数、频率稳定度与频谱分析, 对星载原子钟开展长时序分析。结果表明, 在此期间 E14 发生 3 次相位跳变和 2 次频率跳变, 次数高于正常圆轨道卫星。2024-04 频率跳变后, 其频漂和拟合精度下降, 残差峰值超 10 ns, 并出现约 0.63 h 异常周期, 振幅不断增大且无显著次级周期, 同时频率稳定度下降, 在 100 s 附近表现出振荡; 2025-03 再次频率跳变后, 残差和稳定度明显改善, 100 s、1 000 s、10 000 s 的稳定度分别提升至 2.50×10^{-13} 、 6.52×10^{-14} 和 9.70×10^{-14} , 但无显著主导周期, 频漂存在系统性偏差, 且频率稳定度在 4 000 s 附近呈“凹陷”特征。相比之下, 同一轨道面的 E18 卫星钟在轨运行稳定, 拟合残差稳定在 ± 0.2 ns, 无显著的高频周期项, 稳定度与正常圆轨道相近, 未出现异常现象。

关键词: Galileo; 偏心轨道; E14; E18; 钟差多项式拟合; 频谱分析

中图分类号: P228

文献标识码: A

Galileo 系统的建设由欧洲空间局(ESA)和欧盟委员会(EC)联合发起, 规划部署由 24 颗工作卫星与 6 颗备用卫星组成的 30 颗中圆地球轨道(MEO)卫星星座^[1]。2024-09 随着最后 2 颗第一代 Galileo 卫星成功入轨, 系统整体稳健性进一步提升。而作为 Galileo 系统进入全面运行能力(FOC)阶段的首批卫星 E14(GSAT0202)和 E18(GSAT0201), 于 2014-08-22 被送入偏离计划的轨道^[2], 为确保 2 颗卫星在轨安全, ESA 联合多家机构制定了补救措施, 借助剩余燃料进行分阶段多次变轨, 将轨道偏心率由 0.23 降至 0.16, 修正后卫星姿态和电源稳定, 导航和搜救载荷得以开通测试。短期测试后, 2 颗卫星一度作为备用卫星纳入可用序列, 但根据 2021-02-16 发布的 Galileo 用户公告(NAGU), 出于高精度用户兼容性与系统一致性考量, 其健康标识度被设为“不可用(not usable)”, 不再纳入 Galileo 开放服务卫星序列中。这一决定可能与早期研究指出两者卫星钟差异异常导致实时动态定位

(RTK)中每日存在周期性误差有关^[3]。

目前, 这 2 颗卫星仍在运行并持续播发导航信号, 但不参与定位解算。这并不意味着卫星闲置, 一方面, 其搜救载荷仍持续为国际 COSPAS-SARSAT 系统提供遇险信号中继服务^[4]; 另一方面, 2 颗卫星也为 Galileo 系统提供了珍贵的冗余资源和在轨测试平台^[5], 在未来地面监控与技术保障能力进一步完善后, 会被重新激活并纳入导航定位服务。此外, E14 与 E18 卫星提供了独特的在轨观测条件, 有学者选用其作为典型样本, 探讨长期轨道摄动特性及相对论引力红移效应^[6-8]; 另有学者专注于研究偏心轨道卫星对 GNSS 整体性能的影响, 包括定位精度、信号空间测距误差(SISRE)与几何精度因子(DOP)分析^[5,9]。这些研究普遍指出, 2 颗卫星在精密定位服务中具备潜在的优势, 但在实时服务中则需谨慎对待其可能引入的卫星星历误差^[10]。也有学者就 2 颗偏心轨道卫星的精密定轨技术、钟差建模、导航信号质量评估及完好性监测等方面开展

收稿日期: 2025-09-17

项目来源: 国家自然科学基金(42374025); 长安大学中央高校基本科研业务费专项(300102265503, 300102261301)。

第一作者简介: 白云龙, 硕士生, 主要研究方向为 GNSS 精密钟差, E-mail: baiyunlong@chd.edu.cn。

通讯作者简介: 王乐, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星精密数据处理及完好性技术, E-mail: wangle18@chd.edu.cn。

研究^[11-14],验证被标记为“不可用”卫星在适当处理下安全且有效融入多星座组合定位服务的可行性与潜力,并给出轨道修正建议^[15]。

星载原子钟作为 Galileo 卫星导航系统的核心载荷,其性能优劣直接决定系统定位、导航与授时(PNT)服务水平^[16],其中 1 ns 的卫星钟差将引起约 0.3 m 的测距误差^[17]。在对四大全球卫星导航系统星载原子钟的性能评估中发现,多颗卫星的钟差拟合残差存在周期性波动,其中 E14 卫星最为显著,而目前尚无对该异常现象的系统分析与机理解释的研究。鉴于 E14 和 E18 卫星长期星地数据完备,且具有特殊性和代表性,本文聚焦于 E14 和 E18 卫星钟差的异常周期波动,对 2 颗偏心轨道卫星的星载原子钟开展长期性能评估与分析,揭示其时序性能与异常特征,为 Galileo 地面控制系统制定监测与重新启

用策略提供参考依据。

1 数据收集

高精度卫星钟差产品能够客观、精准地反映卫星钟差的实际性能^[18-19]。目前,多家国际分析中心均提供 Galileo 卫星钟差产品^[20-21],本文选用 ESA 发布的事后精密钟差产品,该产品数据连续性好,精度稳定,采样间隔 30 s,覆盖 2022-01-01—2025-04-30 共 1 216 d。同时,为对比 E14、E18 卫星与正常的圆轨道卫星,选取一颗配备氢原子钟(PHM)的圆轨道卫星作为对照。鉴于圆轨道搭载 PHM 的卫星钟整体表现较为稳定且差异较小,本文以 E21 为典型对照样本,作为圆轨道 PHM 卫星钟性能的参照基准。表 1 列出了 3 颗选定 Galileo 卫星的参数信息。

表 1 3 颗选定 FOC Galileo 卫星的部分参数信息

Tab.1 Partial orbital parameters of the three chosen FOC Galileo satellites

PRN	系统编号	原子钟类型	轨道面	a/km	e	$i/(^{\circ})$	T/h	发射日期	状态
E14	GSAT0202	氢钟	Ext02	27 977.6	0.162	49.850	12.97	2014-08-22	不可用
E18	GSAT0201		Ext01						
E21	GSAT0215		A03	29 599.8	0.0	56.000	14.08	2017-12-12	可用

2 基本原理

2.1 数据预处理与钟差拟合模型

星载原子钟在复杂太空环境中易受多种外界因素的影响,如光照、温度、磁场等^[22],导致钟差数据出现异常,从而影响性能评价的客观性。为抑制异常值,本文采用中位数绝对偏差(MAD)方法对数据进行预处理^[23]。为客观评价所选 Galileo 卫星钟的运行性能及物理特征,选用二次多项式模型对卫星钟差序列进行拟合,具体表达式^[24-25]为:

$$x_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \epsilon_i \quad (1)$$

式中, t_i 和 t_0 为观测历元和参考历元; a_0 、 a_1 和 a_2 为通过序贯最小二乘方法得到的相位、频率和频漂指标; x_i 为卫星钟差数据; ϵ_i 为钟差拟合模型的拟合残差。模型拟合精度通过均方根误差(RMS)来衡量:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\epsilon_i)^2}{N}} \quad (2)$$

式中, N 为单日钟差数据的历元数量; ϵ_i 为对应

的拟合残差。

2.2 周期项探测模型

Galileo 卫星钟差产品一般采用轨道确定与时间同步联合解算(ODTS)获得,因此钟差序列往往与轨道周期存在较强的耦合关系,从而呈周期性波动。已有研究表明,卫星钟差中的主要周期项并非星载原子钟自身引起^[26],因此有必要进行周期项探测。针对钟差数据的离散特征,本文采用快速傅里叶变换(FFT)进行周期项分析:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i\frac{2\pi}{N}kn} \quad (3)$$

式中, x_n 为消除趋势后的钟差拟合残差序列; N 为数据点数; $e^{-i\frac{2\pi}{N}kn}$ 为复数旋转因子; X_k 为 k 个频率分量对应的频谱幅值。

2.3 频率稳定度模型

频率稳定度反映原子钟频率输出受噪声等因素影响的波动程度^[27]。对于频漂较小的氢钟,频率稳定度通常使用重叠阿伦方差(AVAR)进行估计,相比于经典阿伦方差,重叠阿伦方差能更有效地提高稳定度估计的置信水平,其计算公

式^[28]为：

$$\sigma_y(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(N-2m)\tau^2} \sum_{i=1}^{N-2m} (x_{i+2m} - 2x_{i+m} + x_i)^2}$$

(4)

式中, $\sigma_y(\tau)$ 为频率稳定度; N 为数据点数; $\tau =$

$m\tau_0$ 为平滑时间, 其中 m 为平滑因子, τ_0 为采样间隔, $\tau_0 = 30$ s。本文取 m 为 4、34 和 334, 即 τ 为 120 s、1 020 s 和 10 020 s 来表征单日内的 100 s、1 000 s 和 10 000 s 稳定度。

本文所选 3 颗 Galileo 卫星钟的在轨性能评估流程如图 1 所示。

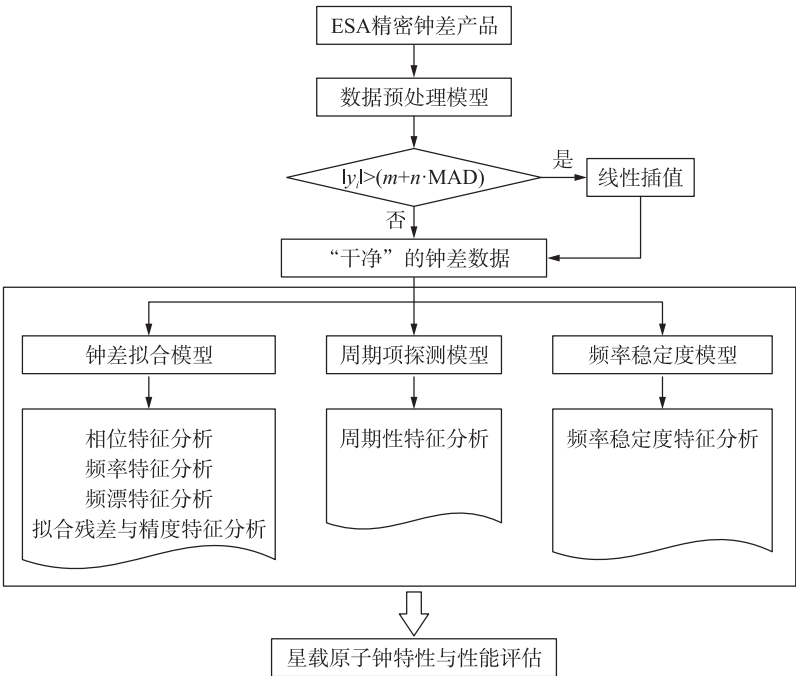


图 1 在轨 Galileo 卫星原子钟特性与性能评估流程

Fig.1 Flowchart of the characteristics and performance evaluation process of on-orbit Galileo satellite atomic clocks

3 实验结果与分析

3.1 相位特征分析

相位表示原子钟输出时间相对于系统参考时间的瞬时偏差, 是钟差最基本的表征量。图 2 为 3 颗 Galileo 卫星钟的相位序列, 期间 E14、E18 和 E21 卫星钟分别发生 3 次、3 次和 1 次相位跳变。理论上, 搭载氢原子钟的 Galileo 卫星相位应呈现近似线性趋势。然而, E14 卫星钟自 2024-04 发生相位跳变后出现明显的非线性趋

势, 且在 2025-03 初相位序列呈现显著下降趋势; E18 卫星钟的相位序列变化稳定, 整体呈线性上升趋势。一般而言, Galileo 卫星钟相位跳变通常源于 2 类因素: 1) 星载原子钟长期运行导致硬件老化, 钟差误差累积至一定程度时, 地面运控站进行主动时间同步修正; 2) 星载主原子钟与热备原子钟之间发生切换, 每颗 Galileo 卫星通常装载 4 台原子钟 (2 台 PHM 与 2 台 Rb), 主备钟切换时可能会导致明显的相位跳变^[19]。

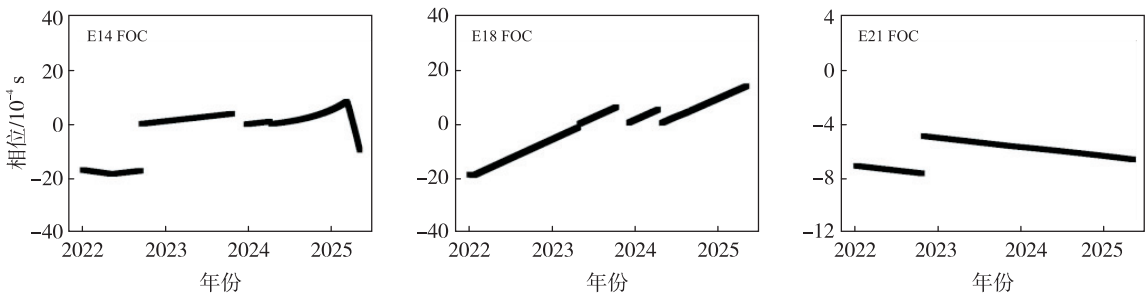


图 2 所选 3 颗 Galileo 卫星原子钟的相位变化序列

Fig.2 Phase evolution sequences of the three selected Galileo satellite atomic clocks

综合分析 Galileo 星座所有卫星钟的相位跳变次数发现,2 颗偏心轨道卫星平均跳变次数为 3 次,明显高于圆轨道卫星的平均值 1.21 次,这种现象可能是偏心轨道卫星运行环境更为复杂、卫星服役时间较长导致硬件老化所致。根据 NAGU 内容显示,2024-04-06 Galileo 星座服务曾出现精度下降的情况,其中受影响卫星中包括 E14 卫星,且星座整体服务性能一度跌至服务定义文件所规定的最低水平,约 1 h 后恢复正常,结合本文相位序列分析,E14 的相位跳变时间与该事件高度一致。

3.2 频率特征分析

频率是相邻历元相位差归一化得到的相对频率偏移,用于反映钟速的瞬时变化。图 3 为所选 3 颗 Galileo 卫星钟的频率序列,期间 E14、E18 和 E21 卫星钟分别发生了 2 次、3 次和 1 次频率跳变。Galileo 卫星钟的频率跳变通常源于 2 个方面:一是地面运控站为维持钟差输出精度实施的调频操作;二是卫星主备原子钟切换,由于不同原子钟性能参数存在差异,切换过程会导致频率斜率显著变化^[28]。

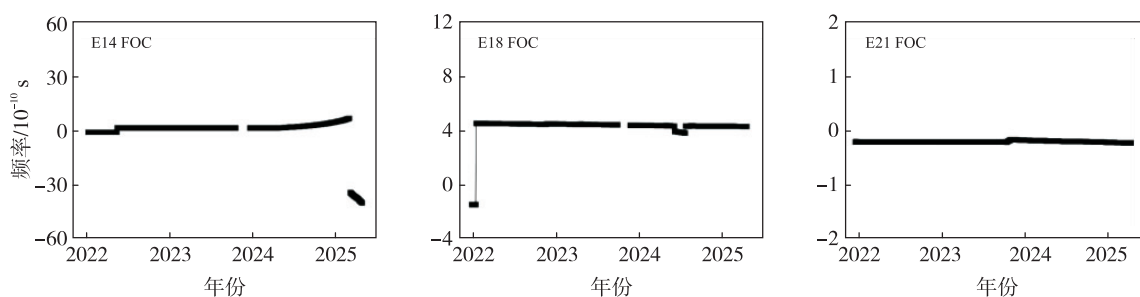


图 3 所选 3 颗 Galileo 卫星原子钟的频率变化序列

Fig.3 Frequency evolution sequences of the three selected Galileo satellite atomic clocks

理论上,PHM 原子钟的频漂不显著,频率序列斜率应接近 0,一旦显著偏离则需重点关注。由图 3 可见,E14 卫星在 2024-04 前频率序列稳定,斜率接近 0,且频率跳变前后斜率无明显变化,推测源于地面调频操作。然而,2024-04 起其频率序列呈持续增大的非线性变化趋势,斜率明显偏离 0;2025-03 初其频率再次显著跳变,数值与斜率均发生明显变化,此次事件可能与主备原子钟切换有关;而 E18 卫星钟的频率跳变前后变化稳定,可能为地面运控站的调频操作。

3.3 频漂特征分析

频漂反映卫星钟输出频率的长期稳定性,是衡量星载原子钟老化状态的重要指标。图 4 显

示,E18 和 E21 卫星钟的频漂 RMS 分别为 2.74×10^{-17} s 和 1.41×10^{-17} s。理论上 PHM 原子钟的频漂并不显著,但评估期间 E14 卫星钟的频漂 RMS 高达 3.49×10^{-16} s,较轨道环境相似的 E18 高近 1 个量级。图 4 中 RMS_1 、 RMS_2 分别表示 E14 卫星钟 2024-04 前、后的 RMS 统计值,可以看出,E14 卫星钟 2024-04 前频漂较稳定,与 E21 相近,但 2024-04 后频漂显著增大并持续恶化;2025-03 频率跳变后,频漂相比之前明显偏离 0 值且呈现系统性偏差。由此推测,2024-04 后 E14 卫星钟所装载的 PHM 原子钟大概率发生异常,2025-03 的频率跳变可能为主备原子钟切换导致。

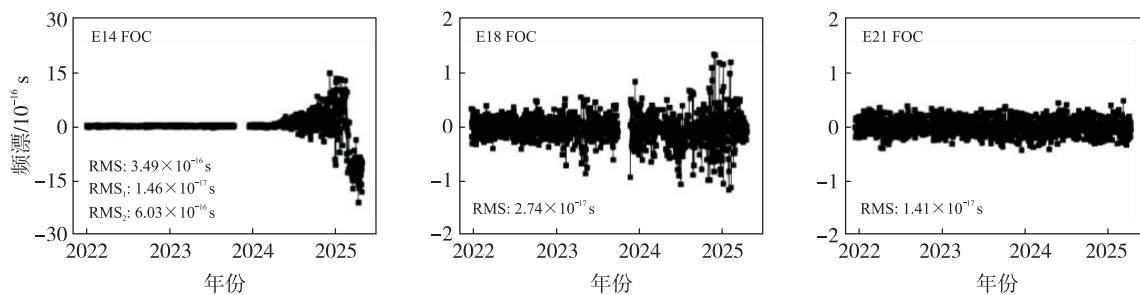


图 4 所选 3 颗 Galileo 卫星钟的频漂变化序列

Fig.4 Frequency drift evolution sequences of the three selected Galileo satellite atomic clocks

3.4 拟合残差与精度特征分析

拟合残差与拟合精度可有效表征星载原子

钟的噪声水平,对于提升卫星钟差预报的可靠性与精度具有重要意义^[23]。图 5 显示,E14 卫

星钟 2024-04 前拟合残差稳定在 ± 0.3 ns 以内,之后迅速增大,2025 年峰值超过 ± 10 ns;相比之下,轨道环境相似的 E18 残差稳定在 ± 0.2 ns 以内,表明 E14 卫星钟的异常可能不源于轨道环境,更可能由原子钟自身老化或故障所致。然而,2025-03 初该异常现象明显改善,综合前述分析推测此时可能存在星载原子钟的切换操作。

整体而言,Galileo 星座卫星钟精度表现优异,绝大多数搭载 PHM 原子钟的卫星拟合精度稳定在 0.3 ns 以内,体现了系统大规模、常态化采用高精度 PHM 原子钟所具备的性能优势。图 6 中正方形与三角形分别代表 2024-04 前与后的钟差平均拟合精度,可以看出,E14 卫星钟拟合精度在频率跳变后显著改善至 0.48 ns,较跳变前提升约 66%。

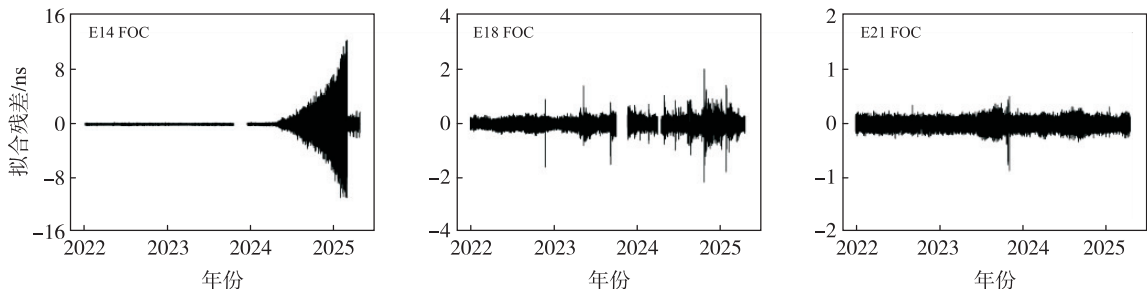


图 5 所选 3 颗 Galileo 卫星钟的拟合残差变化序列

Fig.5 Residual time series of clock fitting for the three selected Galileo satellite clocks

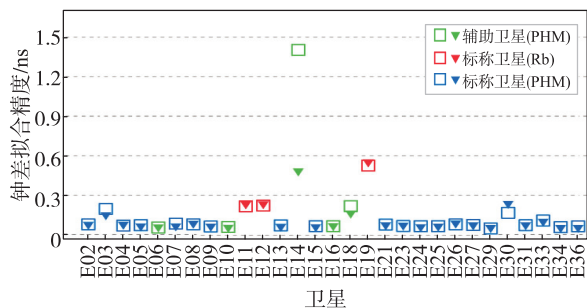


图 6 所有 Galileo 卫星钟差的拟合精度

Fig.6 Fitting accuracy of clock offsets for all satellites in the Galileo constellation

3.5 周期性特征分析

为分析所选 3 颗 Galileo 卫星钟的周期特征,本文基于 1 216 d 精密钟差数据进行预处理与去趋势处理,并采用 8 d 滑动窗口进行频谱分析^[26],

图 7 为 2024 年起连续 486 d 的钟差拟合残差频谱结果。在 2024-04—2025-03 期间,E14 卫星钟存在一个特殊的周期波动,周期约为 0.63 h,其振幅总体呈现上升趋势,峰值接近 6 ns。同时,E14 卫星钟的低频长周期振幅亦呈现增强趋势,并在 0.025 Hz 与 0.030 Hz 频段伴随高频噪声,峰值虽小但逐渐升高。值得注意的是,该异常在 2025-03 后消失,未再观测到明显的异常波动。相比之下,E18 卫星钟虽轨道环境相似,却未出现类似的特殊周期波动,仅在 300 d 之后有部分振幅不超过 0.6 ns 的低频噪声;圆轨道的 E21 卫星钟表现稳定,未出现明显的异常高频噪声,振幅控制在 0.12 ns 以内,体现出优良的钟差拟合精度。

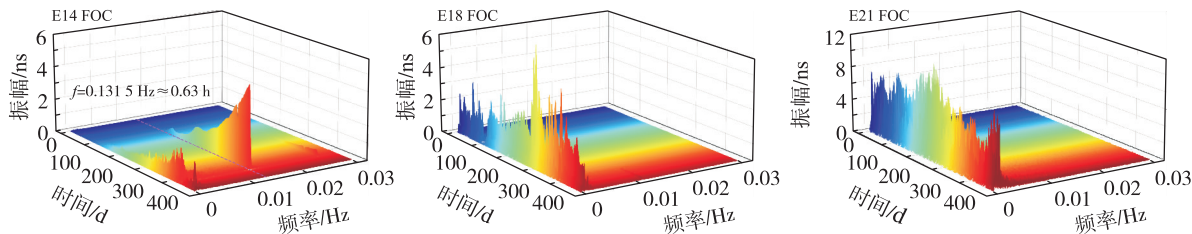


图 7 所选 3 颗 Galileo 卫星钟的滑动窗口频谱分析结果

Fig.7 Sliding window spectral analysis results of the selected three Galileo satellite clocks

图 8 为 3 颗 Galileo 卫星钟在 1 216 d 观测期内振幅最大的前 3 个主导周期(周期 1、周期 2、周期 3)。其中,主导周期通过对钟差残差序列进行快速傅里叶变换,并在正频率范围内按谱幅大小排序,选取幅度最高的 3 个频率分量来确定。除 E14 和 E18 外,其余 Galileo 卫星均为典型 MEO 卫星,2 类卫星的轨道周期见表 1。分析表明,无

异常时 E14 卫星钟的主周期为 6.5 h 和 13 h,其中 6.5 h 最显著。但 2024-04 起 E14 出现新的 0.63 h 周期项,并取代原有主周期成为第一主导周期,且无明显的第二、第三主导周期,推测与其星载原子钟异常有关。相比之下,E18 卫星钟主周期同样为 6.5 h 和 13 h,但以 13 h 最显著;E21 卫星钟主周期为 7 h 和 14 h,7 h 为第一主周期。

总体上,主周期通常与轨道周期的 1/2 或 1 倍一致,这主要源于 ESA 精密钟差产品采用 ODTS 方法计算,使钟差与轨道周期存在耦合关系^[25]。E14 卫星钟的 0.63 h 异常周期项,可能源于星载原子钟出现异常,目前尚无明确成因。值得注意的是,该异常在 2025-03 频率跳变后消失,

可能得益于星载原子钟的切换。同时,异常期间 E14 卫星钟的 6.5 h 和 13 h 周期项并未消失,其谱峰功率呈上升趋势。此外,E14 卫星钟的异常起始时间与 IGS2024 年度技术报告所示一致,二者均指向性能衰退来自星载原子钟本身而非轨道异常^[30]。

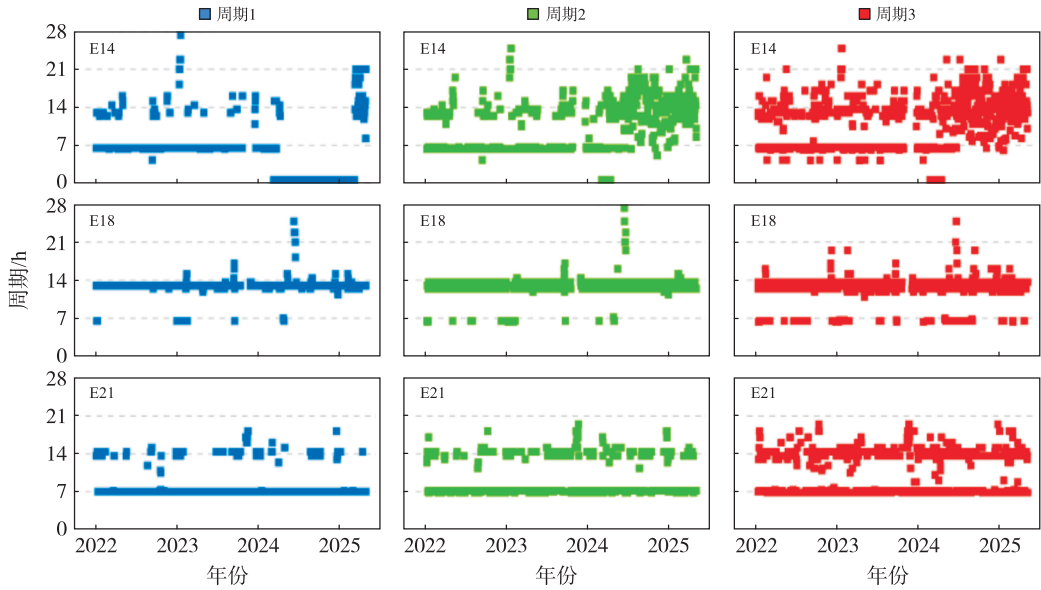


图 8 所选 3 颗 Galileo 卫星钟的主导周期项

Fig.8 Dominant periodic components of the three selected Galileo satellite clocks

3.6 频率稳定度特征分析

图 9 为通过重叠阿伦方差方法计算得到的长时序频率稳定度变化^[29],涵盖 100 s、1 000 s 和 10 000 s 三种时间尺度,相关稳定度统计均值见表 2。结合图 3 频率分析结果可知,E14 卫星钟在 2024-04 前虽发生过频率跳变,但属于地面运控站的常规调频操作,对 100 s、1 000 s 和 10 000 s 稳定度影响不显著。然而在 2024-04—2025-02 其频率稳定度明显恶化,100 s 和 1 000 s 稳定度分别上升至约 4.0×10^{-12} 和 7.0×10^{-12} ,主要受 0.63 h 周期项振幅持续增大的影响。虽然 10 000 s 稳定度受该噪声影响较小,但仍呈小幅

上升趋势。相比之下,E18 与 E21 卫星钟频率稳定度整体较为平稳,其中圆轨道的 E21 卫星钟在 10 000 s 稳定度表现更优,而 E18 卫星钟在 10 000 s 比 1 000 s 稳定度波动范围更大。统计结果显示,E14 卫星钟的平均稳定度分别为 1.45×10^{-12} 、 2.13×10^{-12} 和 9.67×10^{-14} ,在星座中仅优于已退役的 E01。但值得注意的是,2025-03 频率跳变后,E14 卫星钟的上述异常现象消失,稳定性显著改善并趋于平稳,平均稳定度分别为 2.50×10^{-13} 、 6.52×10^{-14} 、 9.70×10^{-14} ,但仍低于 E18 和 E21。

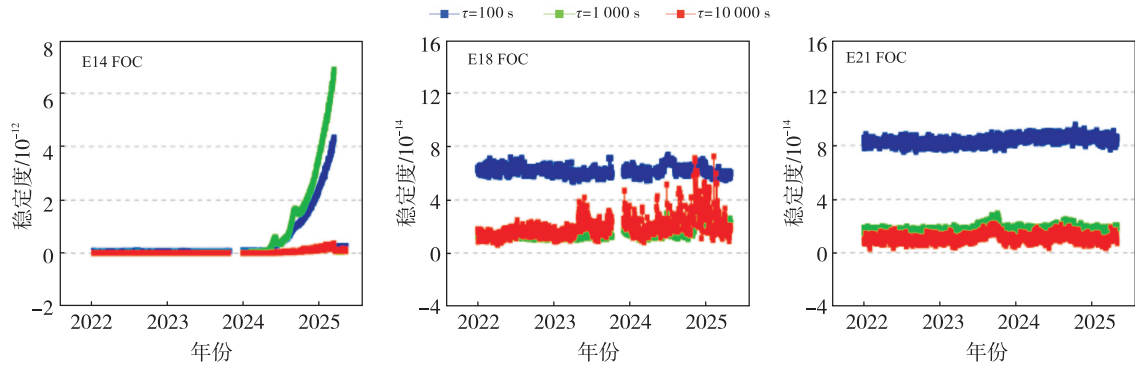


图 9 所选 3 颗 Galileo 卫星钟的频率稳定度变化

Fig.9 Frequency stability variations of the three selected Galileo satellite clocks

表 2 所选 3 颗 Galileo 卫星钟的频率稳定度比较
Tab.2 Comparison of the frequency stability of the three selected Galileo satellite clocks

PRN	时段 1(2024-04—2025-03)			时段 2(2025-03—04)		
	$\tau=100\text{ s}$	$\tau=1\ 000\text{ s}$	$\tau=10\ 000\text{ s}$	$\tau=100\text{ s}$	$\tau=1\ 000\text{ s}$	$\tau=10\ 000\text{ s}$
E14	1.45×10^{-12}	2.13×10^{-12}	9.67×10^{-14}	2.50×10^{-13}	6.52×10^{-14}	9.70×10^{-14}
E18	6.26×10^{-14}	1.83×10^{-14}	2.69×10^{-14}	5.79×10^{-14}	2.33×10^{-14}	1.87×10^{-14}
E21	8.61×10^{-14}	1.82×10^{-14}	1.17×10^{-14}	8.45×10^{-14}	1.75×10^{-14}	1.12×10^{-14}

除长时序稳定度外,本文还开展了单天尺度的频率稳定度分析。图 10(a)和 10(b)分别为 2025-03-04 和 03-08 的重叠阿伦方差结果。由图 10(a)可见,尽管 E14 与 E18 卫星均搭载 PHM 原子钟,但其频率稳定性差异显著,E14 卫星钟的稳定度数值比 E18 高出近 2 个数量级,并在 100 s 后开始呈现明显的周期性振荡,这与其 0.63 h 周期波动紧密相关。相比之下,E18 卫星钟 600 s 之前的稳定度表现甚至优于正常圆轨道卫星

E21,而在更长时间尺度上,E21 卫星钟表现更稳定;E18 卫星钟在 1 000 s 附近还出现“凸起”特征,其 1 000 s 稳定度为 2.84×10^{-14} 。由图10(b)可见,E14 卫星钟在 2025-03 频率跳变后稳定性显著改善,周期性振荡消失,整体稳定度提高约 1 个数量级。值得注意的是,其在 4 000 s 附近呈现“凹陷”现象,且之后稳定度随平滑时间增加逐渐变差。

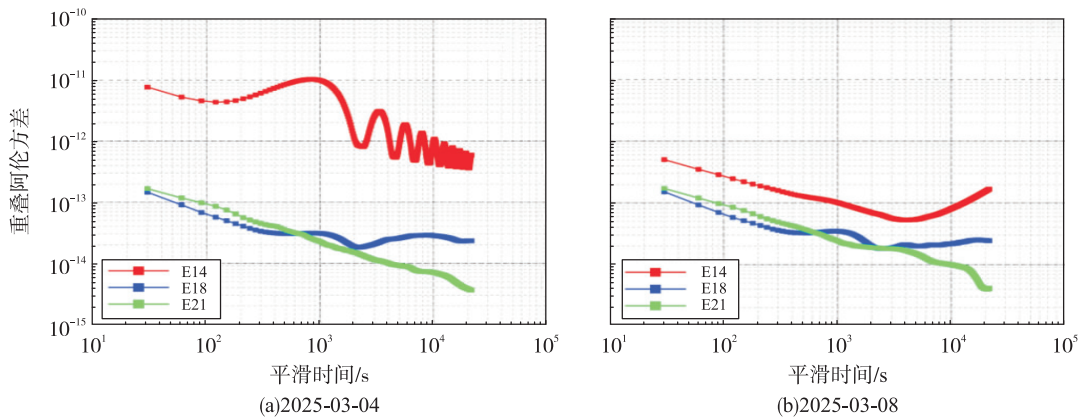


图 10 所选的 3 颗 Galileo 卫星原子钟的重叠 Allan 方差
Fig.10 Overlapping Allan variance of the selected three Galileo satellite clocks

3.7 定位结果验证

图 11 为 2 种不同策略下的 Galileo 单系统动态 PPP 结果,策略 S1 为在解算中纳入经特殊处理后的 E14 与 E18 卫星,策略 S2 为 Galileo 单系统定位策略(无 E14 和 E18 卫星),其中特殊处理指在定位解算中不依据卫星健康度标志屏蔽 E14 与 E18,使其与其他 Galileo 卫星共同参与解算。为确保对比一致性,收敛起始时间设定在 E14 卫星过境开始时,选取 IGS 的 5 个测站,实验日期为 2025-03-11,即 E14 卫星在频率跳变后 0.63 h 异常周期消失后的时期。

综合图 11 与表 3 可知,在策略 S1 下,各测站的动态 PPP 收敛时间整体较 S2 更短,部分测站在 2 种策略下差异不大,但仍有多站在 S1 下实现更早收敛,其中 WILL 站的改善最为突出,主

要源于其 N 方向收敛明显加快,从而显著缩短了整体收敛时间。与此同时,5 个测站平均统计结果显示,策略 S1 的收敛起始时刻可见,卫星数由 7 颗增至 8 颗,PDOP 从 1.87 降至 1.61,几何强度提升约 14%,说明在纳入 2 颗偏心轨道卫星后,初始几何构型得到了一定的改善。总体来看,在适当处理后引入 2 颗偏心轨道卫星能够改善 Galileo 单系统 PPP 的几何构型,使收敛过程更为平滑可靠。虽然最终收敛精度在 2 种策略间差异有限,但结果明确表明,E14 与 E18 卫星的加入具备有效融入定位服务的可行性与潜力。需要指出的是,2 颗偏心轨道卫星当前仍面临一定的问题^[3],但随着 Galileo 系统运营策略的不断调整及接收机厂商在软硬件层面的优化,其重新启用的时间有望进一步加快。

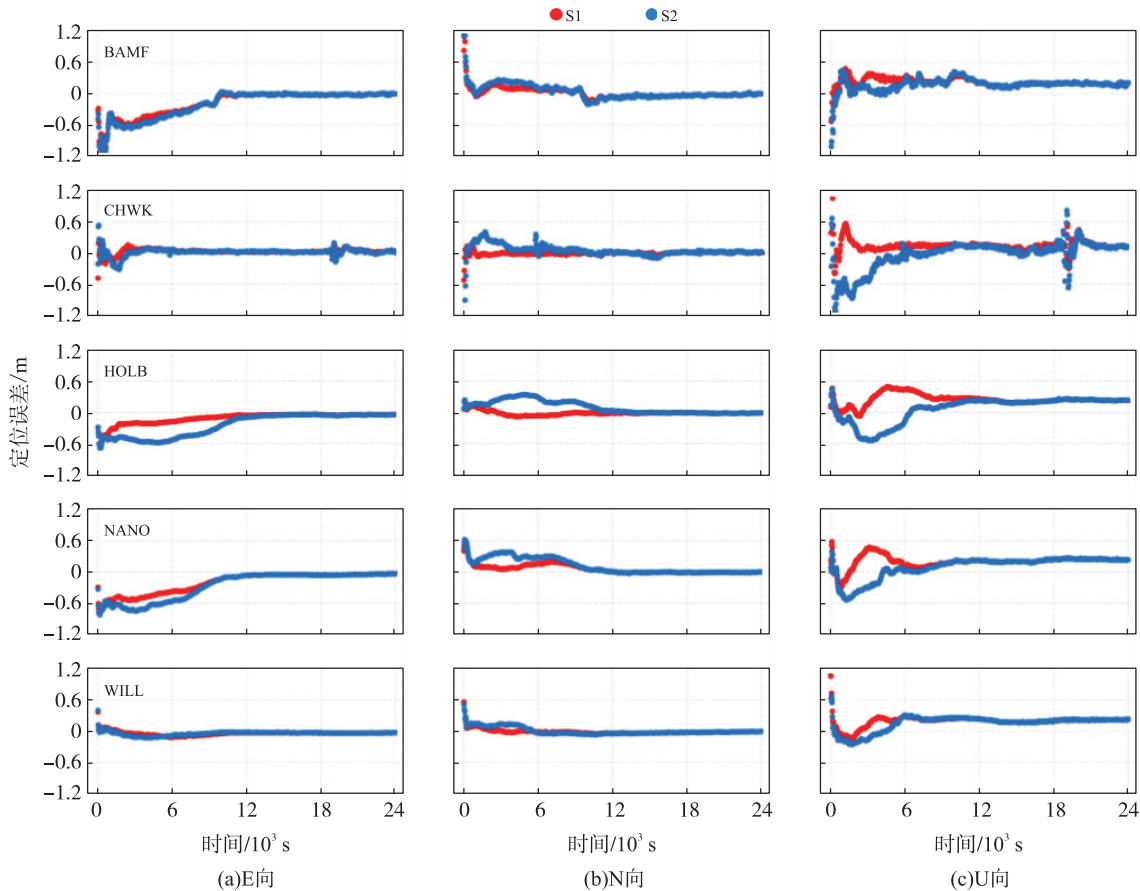


图 11 Galileo 单系统动态 PPP 不同策略下的收敛结果

Fig.11 Convergence results of Galileo-only kinematic PPP under different strategies

表 3 所选 5 个测站的动态 PPP 结果统计

Tab.3 Statistical results of kinematic PPP for the five selected stations

测站	S1				S2			
	收敛时间/min	E/cm	N/cm	U/cm	收敛时间/min	E/cm	N/cm	U/cm
BAMF	217.50	2.37	4.20	17.87	221.00	2.22	4.23	17.88
CHWK	57.00	4.08	1.81	14.70	79.00	3.80	5.05	14.13
HOLB	243.50	4.32	1.25	22.78	242.00	4.79	1.10	22.77
NANO	234.50	5.20	0.90	23.20	234.50	5.25	0.90	23.18
WILL	31.00	5.00	2.28	21.84	234.00	2.67	1.89	20.73
平均值	156.70	4.19	2.09	20.08	202.10	3.75	2.63	19.74

4 结 语

本文基于 ESA 发布的事后精密钟差产品，对伽利略 E14 和 E18 卫星星载原子钟开展了长时序性能评估与异常特征分析，得出以下结论：

1)E14 卫星钟在 2024-04 相位跳变后，相位与频率序列均呈现非线性上升趋势，伴随频漂与拟合残差波动范围显著扩大，拟合精度下降。2025-03 频率跳变后，其异常现象消失，钟差特性显著改善，可能与星载原子钟切换有关。但其频漂序列中仍存在系统性偏移，可能与地面主控操

作或原子钟异常有关。相比之下，E18 卫星钟在轨运行期间整体表现稳定，各项指标略低于正常圆轨道卫星。

2)E14 卫星钟在 2024-04 后出现约 0.63 h 的异常周期波动，振幅随时间增大且无显著次级、三级周期。该异常在 2025-03 频率跳变后消失，此后 100 s 和 1 000 s 稳定度显著改善，10 000 s 稳定度变化不大；亚天尺度下周期性振荡消除，但在 4 000 s 附近出现“凹陷”特征。相比之下，E18 卫星钟在整个分析时段频率稳定度表现良好，未出现类似异常。同时，在经过适当处理后，

2 颗偏心轨道卫星仍体现出重新融入定位服务体系的应用潜力。

3) 整体来看, Galileo 系统得益于大规模装载高精度 PHM 原子钟, 在轨精度与稳定性表现突出。除 E14 卫星钟和部分 Rb 型原子钟外, 其余卫星钟差拟合精度平均为 0.084 ns, 10 000 s 稳定度处于 10^{-14} 量级, 体现出优异的时频性能。Galileo 卫星钟的主周期通常与其轨道周期的 1/2 或 1 倍一致, 主要源于 ODTs 方法解算中钟差与轨道周期的耦合效应。

值得关注的是, E14 卫星钟的异常周期成因目前尚不明确, 考虑到 2 颗偏心轨道卫星在 PNT 服务中的潜力, 未来有必要结合多层面深入探讨, 并为其他系统原子钟异常机理研究提供借鉴。

参考文献

- [1] Steigenberger P, Montenbruck O. Galileo Status: Orbits, Clocks, and Positioning[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 319-331
- [2] Sosńska K, Bury G, Zajdel R, et al. General Relativistic Effects Acting on the Orbits of Galileo Satellites[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2021, 133(4)
- [3] Simsky A, Schellekens D. Are Elliptical Galileo Satellites Usable for RTK? [C]. 2021 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), Tampere, 2021
- [4] Khandker S, Jurczok K, Pöpper C. COSPAS Search and Rescue Satellite Uplink: A MAC-Based Security Enhancement[C]. 2024 Workshop on Security of Space and Satellite Systems, San Diego, 2024
- [5] Wu W W, Guo F, Zheng J Z. Analysis of Galileo Signal-in-Space Range Error and Positioning Performance during 2015-2018[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1)
- [6] Delva P, Puchades N, Schönemann E, et al. A New Test of Gravitational Redshift Using Galileo Satellites: The GREAT Experiment[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2019, 20(3): 176-182
- [7] Kouba J. Testing of General Relativity with Two Galileo Satellites in Eccentric Orbits[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(4)
- [8] Sosńska K, Bury G, Zajdel R, et al. GPS, GLONASS, and Galileo Orbit Geometry Variations Caused by General Relativity Focusing on Galileo in Eccentric Orbits[J]. *GPS Solutions*, 2022, 26(1)
- [9] Robustelli U, Pugliano G. Galileo Single Point Positioning Assessment Including FOC Satellites in Eccentric Orbits[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13)
- [10] Robustelli U, Benassai G, Pugliano G. Accuracy Evaluation of Doresa and Milena Galileo Satellites Broadcast Ephemerides [C]. 2018 IEEE International Workshop on Metrology for the Sea: Learning to Measure Sea Health Parameters (MetroSea), Bari, Italy, 2018
- [11] Paziewski J, Sieradzki R, Wielgosz P. On the Applicability of Galileo FOC Satellites with Incorrect Highly Eccentric Orbits: An Evaluation of Instantaneous Medium-Range Positioning[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2)
- [12] Robustelli U, Benassai G, Pugliano G. Signal in Space Error and Ephemeris Validity Time Evaluation of Milena and Doresa Galileo Satellites [J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1786
- [13] Tao E Z, Guo N N, Xu K X, et al. Validation of Multi-Year Galileo Orbits Using Satellite Laser Ranging[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(22)
- [14] Zhang H J, Li X H, Zhu F, et al. Galileo In-Orbit Satellite Clocks Performance Assessment at NTSC[C]. 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), New Orleans, 2016
- [15] Buson S, Bettanini C. Retrospective Proposals for the Orbital Correction of GSAT0201 & GSAT0202[J]. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2023, 102(3): 177-186
- [16] 杨元喜, 姚铮, 毛悦, 等. 星基弹性 PNT 体系设计及其关键技术[J]. *中国科学: 地球科学*, 2025, 55(3): 686-698 (Yang Yuanxi, Yao Zheng, Mao Yue, et al. Resilient Satellite-Based PNT System Design and Key Technologies[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2025, 55(3): 686-698)
- [17] 黄观文, 曹钰, 谭粤, 等. GNSS 星载原子钟在轨性能评估技术进展[J]. *测绘地理信息*, 2024, 49(1): 20-28 (Huang Guanwen, Cao Yu, Tan Yue, et al. Technical Progress of Performance Evaluation for GNSS On-Board Atomic Clocks [J]. *Journal of Geomatics*, 2024, 49(1): 20-28)
- [18] Ai Q S, Maciuk K, Lewinska P, et al. Characteristics of Onefold Clocks of GPS, Galileo, Beidou and GLONASS Systems[J]. *Sensors*, 2021, 21(7)
- [19] 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
- [20] 王天润, 袁德宝, 李允钊, 等. 不同 IGS 分析中心 BDS-3 实时精密轨道和钟差产品精度评估[J]. *大地测量与地球动力学*, 2024, 44(5): 461-467 (Wang Tianrun, Yuan Debao, Li Yunzhao, et al. Evaluation of Real-Time Precise Orbit and Clock Products for BDS-3 from Different IGS Analysis Centers[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2024, 44(5): 461-467)
- [21] 耿江辉, 闫哲, 温强. 多系统 GNSS 卫星钟差和偏差产品综合: IGS 第 3 次重处理[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2023, 48(7): 1070-1081 (Geng Jianghui, Yan Zhe, Wen Qiang. Multi-GNSS Satellite Clock and Bias Product Combination: The Third IGS Reprocessing Campaign[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1070-1081)
- [22] 李星星, 张伟, 袁勇强, 等. GNSS 卫星精密定轨综述: 现

状、挑战与机遇[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1271-1293 (Li Xingxing, Zhang Wei, Yuan Yongqiang, et al. Review of GNSS Precise Orbit Determination: Status, Challenges, and Opportunities[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(7): 1271-1293)

[23] 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)

[24] Cao Y, Huang G W, Xie W, et al. Assessment and Comparison of Satellite Clock Offset between Beidou-3 and Other GNSS[J]. Acta Geodaetica et Geophysica, 2021, 56(2): 303-319

[25] Xie W, Huang G W, Cui B B, et al. Characteristics and Performance Evaluation of QZSS Onboard Satellite Clocks[J]. Sensors, 2019, 19(23)

[26] Cao Y, Huang G W, Xie S C, et al. An Evaluation Method of GPS Satellite Clock In-Orbit with Periodic Terms Deduced[J]. Measurement, 2023, 214

[27] Riley W J. Handbook of Frequency Stability Analysis[M]. US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD, 2008

[28] Xie W, Huang G W, Wang L, et al. Long-Term Performance Detection and Evaluation of GLONASS Onboard Satellite Clocks[J]. Measurement, 2021, 175

[29] 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

[30] Dach R, Bockmann E. International GNSS Service Technical Report 2024 (IGS Annual Report)[R]. Bern: IGS Central Bureau and University of Bern, 2025

On-Orbit Performance Assessment of Onboard Atomic Clocks for Galileo Eccentric-Orbit Satellites

BAI Yunlong¹ WANG Le^{1,2,3} HUANG Guanwen^{1,2,4}
XIE Shichao^{1,5} XIE Wei⁶ CAO Yu¹ FAN Lihong⁶

- 1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 Engineering Research Center of Intelligent BDS, Universities of Shaanxi Province, Xi'an 710054, China
3 Shaanxi Yellow River Science Research Institute, Xi'an 710054, China
4 Key Laboratory of Ecological Geology and Disaster Prevention, MNR, Xi'an 710054, China
5 School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China
6 National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, China

Abstract: In this study, 1 216 consecutive days of ESA precise clock products (January 2022 to April 2025) were analyzed by combining clock-fit parameters, frequency-stability metrics, and spectral analysis to assess the long-term behavior of the onboard clocks. Results show that E14 experienced three phase jumps and two frequency jumps during this period, more frequently than nominal circular-orbit satellites. Following the frequency jump in April 2024, its frequency drift and fitting accuracy deteriorated markedly; residual peaks exceeded 10 ns, and an anomalous periodicity of about 0.63 h emerged with increasing amplitude and no evident secondary component. The frequency stability simultaneously worsened, showing oscillatory behavior near 100 s. After another frequency jump in March 2025, both residuals and stability improved, with stability reaching 2.50×10^{-13} , 6.52×10^{-14} , and 9.70×10^{-14} at 100 s, 1 000 s, and 10 000 s, respectively. No dominant periodic term was observed afterward, but the drift exhibited a systematic bias, and a “dip” feature appeared near 4 000 s. In contrast, the co-orbital E18 satellite maintained stable performance throughout the same period, with fitting residuals confined within ± 0.2 ns, no significant high-frequency periodic components, and frequency stability comparable to that of nominal MEO satellites, showing no anomalous behavior.

Key words: Galileo; eccentric-orbit; E14; E18; clock offset polynomial fitting; spectrum analysis