

引用格式:董明,易晓,王天翔,等.基于两级驾驭和模型精化的星载时频生成方法研究[J].时间频率学报, 2025,48(3):181-187.

基于两级驾驭和模型精化的星载时频生成方法研究

董明^{1,2,†}, 易晓^{3,4}, 王天翔^{3,4}, 李星^{1,2}, 卢鋆^{1,2}, 董日昌^{3,4}

- 1.北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094;
- 2.智能空间信息国家级重点实验室,北京 100094;
- 3.中国科学院微小卫星创新研究院,上海 200120;
- 4.中国科学院大学,北京 100049

摘要:高精度高连续时频系统是导航卫星的核心,面向构建下一代弹性时间基准需求,针对故障条件下保持时频系统功能连续、性能不降级的难题,提出了一种基于两级驾驭和模型精化的星载时频生成方法,优化设计了单星时频两级驾驭方案,提出了故障模式下的星载热备钟模型精化、快速评估和补偿技术。采用新一代积分球冷原子钟、主动型氢钟及铷钟作为星载钟的仿真实验表明,在配置两个高性能星载守时钟的正常工作模式下,基于两级驾驭方法可以实现兼具积分球冷原子钟的长期稳定度性能和主动型氢钟的短期稳定度性能,星载时频秒稳定度可达 1.9×10^{-13} ,天稳定度可达到 1.4×10^{-15} ,充分发挥新一代星载钟的优势;在故障模式下,其中一台高性能守时钟保持对热备铷钟的连续评估和驾驭,并同时利用驾驭后的主动型氢钟对热备铷钟进行时钟模型精化、评估和补偿,补偿后的铷钟信号天稳定度可达到 2.4×10^{-14} ,有效降低铷钟本身频率漂移影响,从而增强星载时频弹性。提出的两级驾驭时频生成方案与模型精化、评估和补偿技术,可为下一代星载时间基准构建提供参考,充分发挥单星高性能钟优势,显著提升故障场景下星载时频精度、连续性和可靠性。

关键词:星载原子钟;弹性时间基准;两级驾驭;模型精化;频率稳定度

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2025-03-0181-07

Research on a satellite time-frequency generation method based on two-level steering and model refinement

DONG Ming^{1,2,†}, YI Xiao^{3,4}, WANG Tian-xiang^{3,4}, LI Xing^{1,2}, LU Jun^{1,2}, DONG Ri-chang^{3,4}

- 1.Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China;
- 2.National Key Laboratory of Intelligent Spatial Information, Beijing 100094, China;
- 3.Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China;
- 4.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The high-precision and high-continuity time-frequency system is the core of navigation satellites. Considering the need to build next-generation resilient time reference and the challenge of maintaining continuous functionality and non-degraded performance of the time-frequency system under

fault conditions, a spaceborne time-frequency generation method based on two-level steering and model refinement is proposed. This approach optimizes the design of a two-level steering scheme for a single satellite's time-frequency system and introduces techniques for refining, rapidly evaluating, and compensating the spaceborne hot-standby clock model in fault modes. Simulation experiments using a new-generation integral sphere cold atom clock, active hydrogen maser, and rubidium clock as spaceborne clocks show that in normal operation mode with two high-performance spaceborne clocks, the two-level steering method can achieve both the long-term stability performance of the integral sphere cold atom clock and the short-term stability performance of the active hydrogen maser. The spaceborne time-frequency stability can reach 1.9×10^{-13} at second intervals and 1.4×10^{-15} per day, fully leveraging the advantages of the new-generation spaceborne clocks. In fault mode, one of the high-performance timekeeping frequency standards continuously evaluates and steers the hot-standby rubidium clock, while simultaneously using the steered active hydrogen maser to refine, evaluate, and compensate the clock model of the hot-standby rubidium clock. The compensated rubidium clock signal can achieve a stability of 2.4×10^{-14} per day, effectively reducing the impact of the rubidium clock's inherent frequency drift, thereby enhancing the resilience of the spaceborne time-frequency system. The proposed two-level steering time-frequency generation scheme, along with the model refinement, evaluation, and compensation techniques, can provide a reference for building the next-generation spaceborne time reference, fully leveraging the advantages of high-performance clocks on a single satellite, and significantly improving the accuracy, continuity, and reliability of spaceborne time-frequency in fault scenarios.

Keywords: spaceborne atomic clock; resilient time reference; two-level steering; model refinement; frequency stability

准确且稳定的时间频率信号基准是实现整个卫星导航系统高精度定位、测速和授时功能的基本要素和条件,时间频率体系的高精度维持及测量能力也直接决定了卫星导航系统的服务质量。时间频率系统的准确性、稳定性决定着卫星导航系统服务能力的理论极限^[1-3]。

当前全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)中单个导航卫星搭载星载原子钟的种类数量配置有一定区别,但时频生成方案原理基本相近。为了增加系统的可靠性与冗余度,导航系统的单星时频生成架构一般会采用主备钟模式,即主钟和备用钟搭配生成时频信号^[4-5]。目前主备钟工作模式也存在未充分利用单星时频资源及发挥高精度潜力的局限性,同时天基自主守时高精度星座时间基准对单星卫星钟性能也有更高的要求,需满足下一代GNSS的高精度高稳健的需求,因此需要对现有的单星时频生成架构进行升级改造,进一步增强单星时频系统冗余机制。

面向下一代GNSS弹性时间基准构建需求,当前北斗导航系统采用的是传统主备钟工作模式,在正常运行时,时频系统仅输出单一工作钟信号,在

主星钟异常时,主备原子钟仅基于硬切换措施保障系统的连续可靠性,同时地面段仅进行监测和事后干预处理^[6-7]。因此,下一代北斗导航系统需要进行代际提升,在兼容目前北斗导航系统工作模式架构的基础上,进行多钟激活工作连续比对、直接监测快速归因异常等,且需要实时评估备钟短、长期性能,采用星上直接比对手段利用星上数据训练精化时钟模型,评估优化星载时钟模型特性,保证故障下时频系统功能连续且性能不降级。

针对上述技术难题,本文提出了一种基于两级驾驭和热备钟模型精化的单星时频生成总体架构,设计了新型高精度守时钟参与下的下一代GNSS星载原子钟合理配置方案策略,并对星载两级驾驭和模型精化关键技术原理展开论述,最后给出了仿真验证和结论分析。

1 下一代星载时频改进方案总体架构

高稳健性、高可靠性的时频体系架构是下一代单星时频系统的重要服务升级特征^[8]。本文提出的基于两级驾驭和模型精化的单星时频体系架构如图1所示。

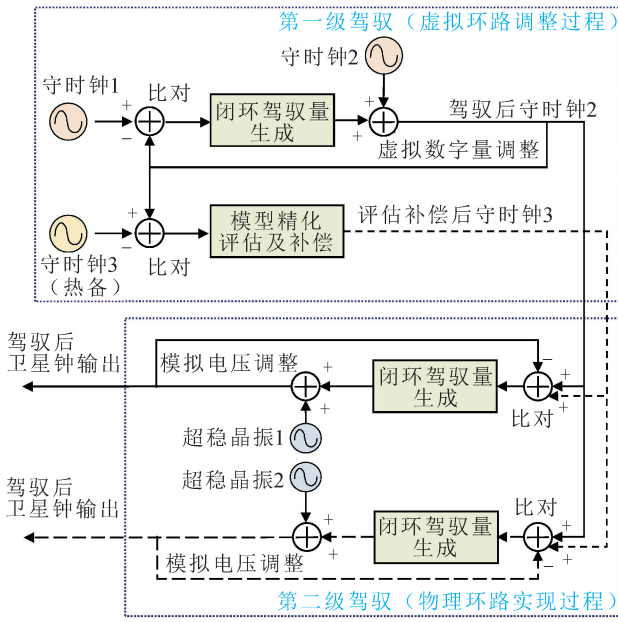


图1 基于两级驾驭和模型精化的星载时频生成架构图

本文星载时频架构的设计包含三台守时原子频标及两台晶振频标,依据采用虚拟数字量或模拟控制电压的频标实际调整方式,划分了守时钟1对守时钟2的虚拟环路调整过程,以及驾驭后守时钟2对晶振的信号物理环路实现过程,从而根据两类调整过程建立了两级闭环驾驭的系统架构。下一代星载时频生成改进方案可按照正常工作模式和故障模式分为两层。

1)在正常工作模式下,高性能守时钟1输出时频信号,与守时钟2时频信号进行连续的数字相位测量,通过闭环驾驭模型生成驾驭量,直接驯服守时钟2,驾驭后的守时钟2时频信号作为反馈重新参与相对守时钟1和3的连续相位测量,对热备守时钟3持续完成模型精化评价及补偿操作,此时一级驾驭完成。驾驭后守时钟2的信号参与相对超稳晶振的连续相位测量,接着生成相应的闭环驾驭量驯服超稳晶振,同时驾驭后的晶振信号继续执行反馈测量,此时二级驾驭完成,最终输出的晶振信号即为两级驾驭后的卫星钟时频信号。

2)在故障模式下,守时钟1驾驭守时钟2的虚拟环路则被撤销,守时钟1和2在钟组内作为同等地位可非串行独立与超稳晶振建立闭环控制环路完成直接驾驭,守时钟故障不影响物理环路驾驭晶振。守时钟3持续利用一级驾驭后信号进行模型精化评价及补偿,因此评估补偿后的守时钟3输出的时频信号具有更低频率漂移率特性,该信号再通过

驾驭超稳晶振,同时生成相应的闭环驾驭量作为反馈传回评估补偿后的信号,此时故障模式下的备用钟驾驭完成,输出的信号即为故障模式下的卫星钟时频信号,保障故障模式下时频系统功能连续且性能不显著降级。

因此,所提出的下一代星载时频生成体系架构主要分为正常模式和故障模式,通过多台守时原子钟的多级驾驭及额外精化措施首先保障了钟组守时环节的弹性。此外,针对单点超稳晶振的故障风险局限性,进一步考虑在工程方案上采用两台晶振构成超稳晶振组,并行运行输出卫星时频信号从而增加两级驾驭架构物理信号实现的弹性。从而整体上提高了单星时频生成的可靠性和稳健性,最大化地利用了单星时频资源,同时降低了单个时钟故障对单星时频系统稳健运行的风险。

2 星载时频生成技术算法原理

2.1 星载原子钟模型

原子钟时间偏差数学模型采用二次多项式来描述,输出钟差由确定性的变化趋势和随机噪声项共同组合而成:

$$x(t) = x_0 + y_0 t + \frac{d_0 t^2}{2} + \epsilon_x(t). \quad (1)$$

式(1)中:确定性趋势项包括初始时差 x_0 ,初始频率偏差 y_0 ,老化和温度变化引起的线性频率漂移率 d_0 。 $\epsilon_x(t)$ 为平稳噪声和非平稳噪声等不同类型噪声的时间偏差随机变化分量。

五类相互独立的基本频率噪声通过线性叠加来表征综合噪声,其频域统计特性可以用噪声幂律谱模型表示^[9]:

$$S_y(f) = \sum_{a=-2}^2 h_a f^a. \quad (2)$$

式(2)中: f 为边带频率, h_2, h_1, h_0, h_{-1} 和 h_{-2} 分别代表了五种独立噪声过程的强度系数,其依次为相位白噪声(white phase modulation, WPM),相位闪烁噪声(flicker phase modulation, FPM),频率白噪声(white frequency modulation, WFM),频率闪烁噪声(flicker frequency modulation, FFM)以及频率随机游走噪声(random walk frequency modulation, RWFM)。

2.2 时频驾驭算法

为满足时频体系对单个独立卫星的高精度高可靠时频信号生成的要求,体现跨代架构设计优势,通过单星两级驾驭算法实现多台新型高性能守

时钟时频信号的性能复合,形成高精度的复合时钟卫星输出信号,通过闭环驾驭最优控制量匹配算法可保障时频输出信号兼顾较好的短期及长期频率稳定度^[10]。

根据状态空间模型设计星载闭环频率驾驭算法,线性二次型高斯控制(linear quadratic gaussian, LQG)驾驭模型是一种输出反馈控制,在频标驾驭系统中引入控制项 u_k 来参与状态估计^[11]:

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi \mathbf{X}_k + \mathbf{B} u_k + \mathbf{w}_k. \quad (3)$$

式(3)中: $\mathbf{B} = (\tau \ 1)^T$ 是控制值的传播矩阵, τ 为驾驭的时间间隔。含有被驯服频标与参考时间基准之间的相位和频率偏差的状态估计向量表示为 $\mathbf{X}_k = (x(k) \ y(k))^T$, Φ 为状态转移矩阵, \mathbf{w}_k 为过程噪声。

LQG 系统通过最小化二次损失函数 J 的期望来确定最优控制输入 u_k , 其表达式为^[12]:

$$J = E \left[\sum_k \left[\mathbf{X}_k^T \mathbf{W}_Q \mathbf{X}_k + u_k^T \mathbf{W}_R u_k \right] \right] \rightarrow \min. \quad (4)$$

针对给定的损失函数 J , 用稳态 Riccati 方程的解可以获得最优状态反馈增益 $\hat{\mathbf{G}}_0$ 。最优控制输入 u_k 可以用反馈增益 $\hat{\mathbf{G}}_0$ 缩放状态估计来计算给出:

$$u_k = -\hat{\mathbf{G}}_0 \hat{\mathbf{X}}_{k,k}. \quad (5)$$

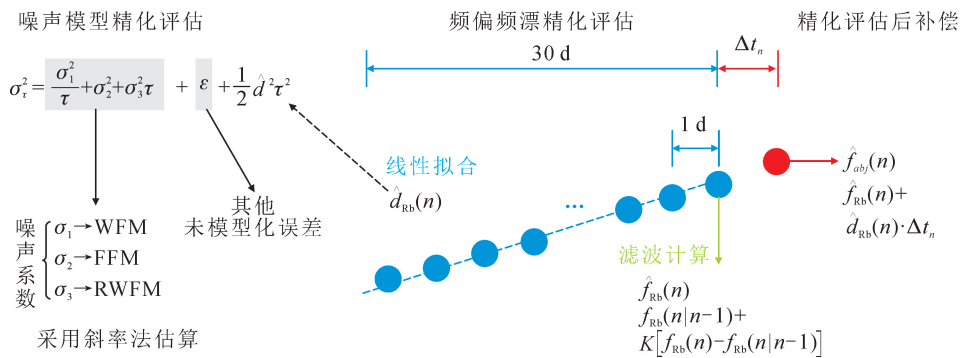


图2 时钟模型精化及补偿原理图

3 实验验证

3.1 星载原子钟数据仿真

多台原子钟同时运行的实验输入可根据原子钟产品的典型性能指标,采用时钟噪声模型进行数字化模拟,如图3所示。本实验中使用 Stable32 软件模拟了多类型时钟的时差数据序列,模拟时间间隔被设置为 1 s,模拟持续时间为 15 天。采用了支撑下一代北斗卫星的星载积分球冷原子钟(integrated sphere cold atomic clock, ISCAC)工程样

LQG 算法可通过进一步调整 \mathbf{W}_Q 和 \mathbf{W}_R 参数,计算状态反馈增益,实现对频率调整值的最优选择^[13-14]。

2.3 时钟精化评估及补偿模型

关于热备钟时钟模型的精化评估与补偿,以驾驭后守时钟 2 作为自由运转的热备守时钟 3 的测量参考,星上直接持续地获取相对钟差评估数据用于时钟模型精化,整体的精化及补偿原理框图如图 2 所示。对于备钟模型非确定性项的精化,根据幂律谱噪声构建备钟的多类随机噪声模型,并根据评定出的备钟频率稳定度,估算出各项噪声模型系数^[15]。对于备钟模型确定性部分的精化,考虑初步利用 30 天长窗口的测量钟差数据,线性拟合计算出准确的备钟漂移,同时基于 1 天短窗口的测量数据,通过卡尔曼滤波迭代实测及更新的方式获取准确的备钟频偏^[16-17]。频偏和频漂估计精度与原始数据窗口等因素相关,模型精化评估的数据窗口大,则分辨率低,反之则模型长期精度高^[18]。此外,通过精化时钟模型持续进行补偿,每次的频率补偿量根据补偿间隔以及评估的备钟漂移和滤波频率推算,从而生成性能改进的热备钟,进一步为故障模式下导航单星卫星钟驾驭过程提供星载时频系统的冗余可靠性。

机以及星载主动型氢钟(active hydrogen maser, AHM)工程样机的实测性能,作为新型高精度守时钟的典型指标^[19-21]。采用了当前北斗三号在轨实测的星载铷钟(rubidium atomic frequency standard, RAFS)数据,作为高可靠守时钟的典型性能指标^[22]。同时,根据超稳晶振(ultra stable crystal oscillator, USO)产品实测性能作为时频系统驾驭过程物理实现载体的典型性能指标。各时钟数字化模拟的结果与典型性能一致,为后续算法验证奠定基础。

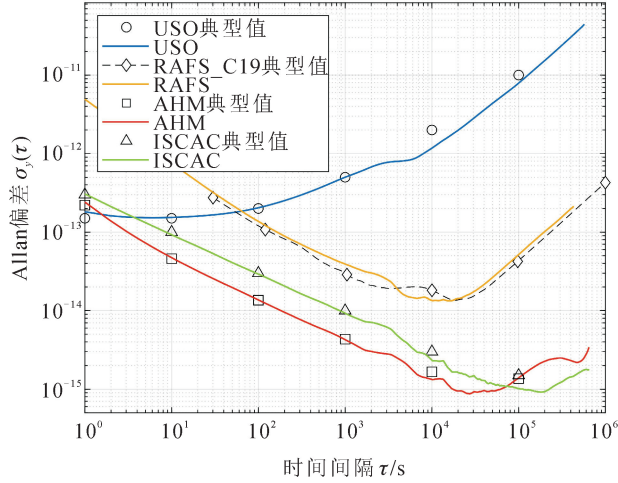


图3 单星架构星载原子钟频率稳定度数据数字化模拟

3.2 星载时频信号生成仿真结果

依据上文提到的单星时频生成方案,进行单星时频输出信号的两级驾驭生成。

图4展示的是所提的单星一级驾驭输出时频信号的频率稳定度,作为2台星载新型高精度守时钟,主动型氢钟和积分球冷原子钟整体性能接近,在短期稳定度上,主动型氢钟更有优势,在长期稳定度上,积分球冷原子钟更有优势,因此综合两台星载高精度钟的优点,一级驾驭生成综合时频信号。生成的单星一级驾驭时频信号在短期稳定度方面性能优于积分球冷原子钟,在长期稳定度方面性能优于主动型氢钟,秒稳定度可达 2.2×10^{-13} ,天稳定度可达到 1.4×10^{-15} 。搭载的高性能新型原子钟在提升整体频率稳定度方面可以发挥较大的助力优势。

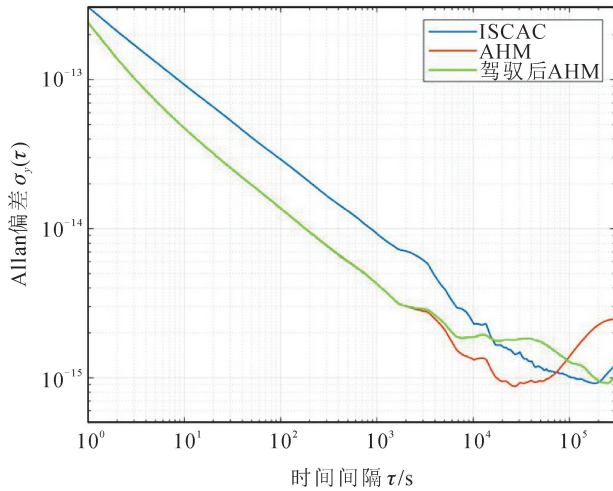


图4 星载时频信号的频率稳定度(一级驾驭)

图5展示的是所提的单星二级驾驭输出时频信号的频率稳定度,与一级驾驭后的时频信号性能相比,超稳晶振长期稳定度性能较差,因此需要借助

一级驾驭后的时频信号去驾驭超稳晶振,以获得性能较好的二级驾驭时频信号。在几乎所有的置信平滑时间,利用单星二级驾驭算法所生成的时频信号也被验证比原始超稳晶振生成的时频信号表现出更好的稳定度性能,秒稳定度可达 1.9×10^{-13} ,天稳定度可达到 1.4×10^{-15} ,提高了单星时频生成系统的冗余性和可靠性。

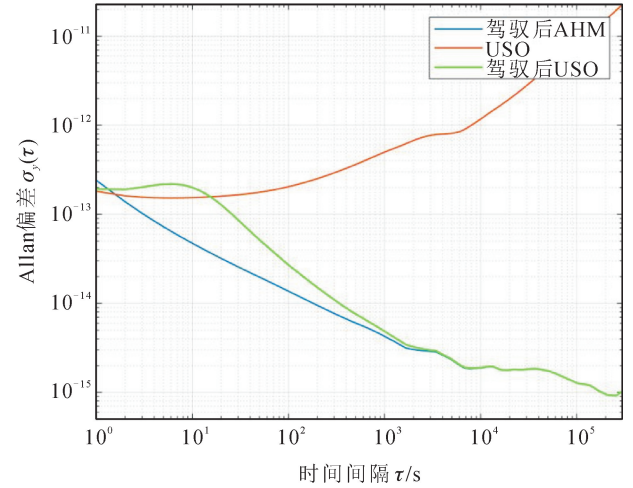


图5 星载时频信号的频率稳定度(二级驾驭)

3.3 单星热备钟模型精化补偿仿真结果

在3.2节生成单星钟组时频信号的基础上,依据第2章星载原子钟模型、时频驾驭算法和时钟精化评估及补偿模型设计单星热备钟模型精化补偿方案。

图6展示了采用单星热备钟模型精化方案的单星时差仿真结果。从图中不难看出,一级驾驭后的时差可以用原子钟二次多项式模型精化表征,该精化多项式频率、频漂参数后续可用来进行单星热备钟的模型修正,以提高故障状态下单星输出时频信号的性能。

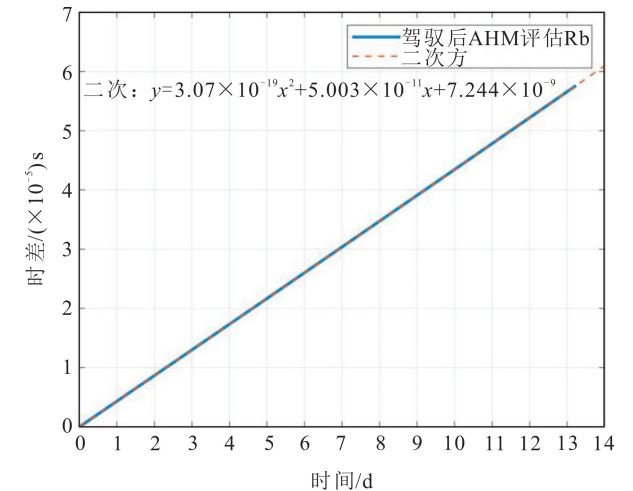


图6 单星热备钟模型精化的时差

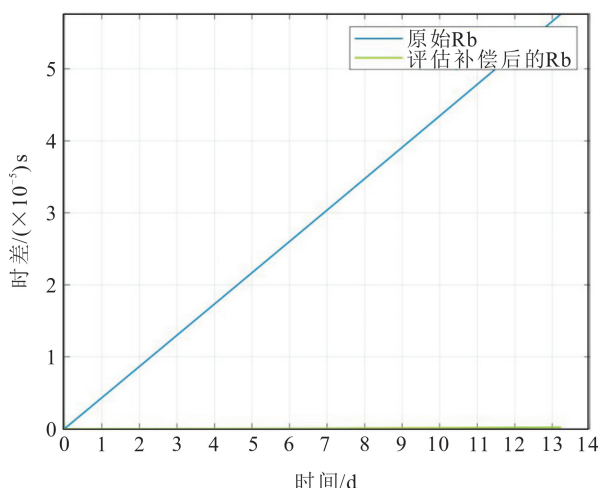


图7 单星热备钟模型补偿的时差

图7展示了单星热备钟原始时差和评估补偿后的时差仿真结果。从图中不难看出,原始热备铷钟时差随时间增大而累积,十几天后累积钟差在 10^{-5} s量级,而经过模型评估和补偿后的热备铷钟时差在10 ns量级。模型补偿结果提高了热备钟的时差精度,同时增加了单星时频生成系统的冗余性和稳定性。

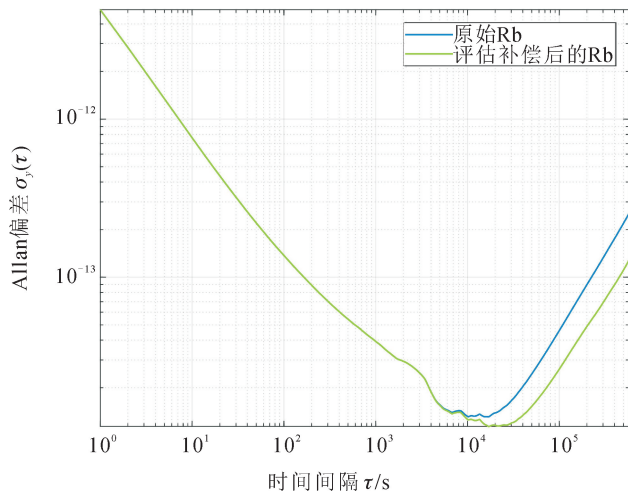


图8 单星热备钟模型补偿的频率稳定度

图8展示了单星热备钟原始频率稳定度和评估补偿后的频率稳定度仿真结果。在超过万秒的置信平滑时间,经过模型评估和补偿的单星热备铷钟频率稳定度性能优于原始单星热备铷钟,秒稳定度可达 5×10^{-12} ,天稳定度可达到 2.4×10^{-14} ,频率漂移的影响可被有效降低。验证了单星热备钟模型补偿和评估方法的可行性,增强了星载时频系统在故障情况下的性能和冗余机制。

4 结论

针对下一代GNSS弹性时频体系构建面临的单星时频生成方案和应用策略、保证故障下时频系统功能连续且性能不降级等难题,本文提出了一种基于两级驾驭和模型精化的单星时频生成方法,优化设计了单星时频体系两级驾驭方案,提出了故障模式下的单星热备钟模型精化、评估和补偿技术。

在正常工作模式下,单星配置的两颗高性能守时钟(积分球冷原子钟和主动型氢钟)通过两级驾驭的模式依次驾驭主动型氢钟和超稳晶振,生成输出的时频信号具有积分球冷原子钟的长期稳定度性能和主动型氢钟的短期稳定度性能,充分发挥了星载高性能钟的优势;在故障模式下,其中一台高性能守时钟一直连续评估和驾驭热备铷钟,并利用模型精化、评估和补偿的方法对热备铷钟生成输出的时频信号进行优化,所输出的时频信号再去驾驭超稳晶振,最终生成输出的时频信号优于热备铷钟的性能,提高了单星时频生成系统的稳健性和冗余性。

本文提出的二级驾驭时频生成方案与模型精化、评估和补偿技术,可为下一代单星时频生成体系提高宝贵的经验,充分发挥单星高性能钟的优势,实现故障场景下单星时频系统功能连续且性能不降级。

参考文献:

- [1] HAN C, LIU L, CAI Z, et al. The space-time references of BeiDou navigation satellite system[J]. Satellite Navigation, 2021, 2: 1-10.
- [2] YANG Y, MAO Y, SUN B. Basic performance and future developments of BeiDou Global Navigation Satellite System[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 1.
- [3] GAO W, ZHOU W, TANG C, et al. High-precision services of BeiDou Navigation Satellite System(BDS): current state, achievements, and future directions[J]. Satellite Navigation, 2024, 5(1): 20.
- [4] 贺玉玲, 何克亮, 王国永, 等. 导航卫星时频系统发展综述[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(5): 61-70.
- [5] 卢璠, 武建峰, 袁海波, 等. 北斗三号系统时频体系设计与实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(8): 1340-1348.
- [6] JANIS J P, JONES M R, Quackenbush N F. Benefits of operating multiple atomic frequency standards for GNSS satellites[J]. GPS Solutions, 2021, 25(4): 141.

- [7] WANG Q, ROCHAT P. ONCLE (One Clock Ensemble) for Galileo's next-generation robust timing system[J]. NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation, 2022, 69(3): 1-15.
- [8] DONG R, LU J, TANG C, et al. A Method for establishing elastic time-frequency reference for navigation constellation[C]//China Satellite Navigation Conference. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023: 331-344.
- [9] LEESON D B. Oscillator phase noise: A 50-year review [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(8): 1208-1225.
- [10] YI X, YANG S, DONG R, et al. A composite clock for robust time-frequency signal generation system onboard a navigation satellite[J]. GPS Solutions, 2024, 28(1): 6.
- [11] GODEL M, FURTHNER J. Robust ensemble time on-board a satellite[C]//Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, 2017: 26-43.
- [12] YI X, YANG S, DONG R, et al. Architecture and algorithm design of navigation satellite robust ensemble clock system[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(10): 17054-17066.
- [13] FARINA M, GALLEANI L, TAVELLA P, et al. A control theory approach to clock steering techniques[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(10): 2257-2270.
- [14] MISHAGIN K G, LYSENKO V A, MEDVEDEV S Y. A practical approach to optimal control problem for atomic clocks[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2019, 67(5): 1080-1087.
- [15] ZUCCA C, TAVELLA P. The clock model and its relationship with the Allan and related variances[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(2): 289-296.
- [16] DIEV J, D'ANGELO P, FERNANDEZ A. Clock errors simulation and characterisation[C]//Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2006). 2006: 815-821.
- [17] 李国俊, 史丰丰, 徐金锋, 等. 基于钙离子光钟的 160 d 连续守时性能分析[J]. 光学学报, 2025, 45(4): 126-133.
- [18] 李雨薇. 精密时频信号产生与性能评估方法研究[D]. 西安: 中国科学院大学(中国科学院国家授时中心), 2019.
- [19] OUYANG X C, YANG B W, DENG J L, et al. An effective pumping method for increasing atomic utilization in a compact cold atom clock[J]. Chinese Physics B, 2021, 30(8): 083202.
- [20] ESNAULT F X, ROSSETTO N, HOLLEVILLE D, et al. HORACE: A compact cold atom clock for Galileo [J]. Advances in Space Research, 2011, 47(5): 854-858.
- [21] 胡旺旺, 王瑞, 帅涛, 等. 主动型氢原子钟数字电路控制系统研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(3): 227-236.
- [22] 阙昊宇, 胡志刚, 吕逸飞, 等. 利用不同时间同步体制钟差评估北斗三号星载原子钟性能[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(4): 604-610.