

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311921

NIM5 驾驭氢钟守时能力分析*

王玉琢, 徐倩, 刘昆, 房芳, 张爱敏

(1. 中国计量科学研究院 北京 100029; 2. 国家市场监督管理总局重点实验室(时间频率与重力计量基准) 北京 100029)

摘要:时间频率量值源头的独立自主是建设我国综合 PNT 体系的重要基础。为进一步评估基于我国国家秒长基准的原子时标守时能力,利用改进的有限脉冲响应钟差预测与频率调控方法,对激光冷却铯原子喷泉钟与氢钟的频差实测数据进行后处理,分别产生了自主型时标和溯源型时标。通过国际原子时合作链路将两个时标与协调世界时进行了长期比对实验,结果表明:2021 年 12 月~2022 年 12 月期间,两个时标的时间偏差均优于 ± 4 ns、频率稳定度均优于 $8 \times 10^{-16}/5$ d。

关键词:铯原子喷泉钟;秒长基准;原子时标;原子钟;驾驭算法

中图分类号: TH761.2 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.80

Timekeeping capability analysis of steering hydrogen maser to NIM5

Wang Yuzhuo, Xu Qian, Liu Kun, Fang Fang, Zhang Aimin

(1. National institute of metrology, Beijing 100029, China; 2. Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard), Beijing 100029, China)

Abstract: The independence of time and frequency standards is an important basis for the comprehensive PNT system construction in China. To further evaluate the timekeeping capability of the atomic time scale based on the national primary frequency standard, the improved FIR clock difference prediction and frequency control method is used to post-process the frequency difference of the cesium atomic fountain clock relative to the hydrogen maser. By post-processing, the autonomous time scale and traceable time scale are generated respectively. The two-time scales are compared with UTC by the international atomic cooperation link. The long-term experimental results show that both of the time differences between the two-time scales and UTC are less than ± 4 ns and the frequency stability is less than $8 \times 10^{-16}/5$ d from December 2021 to December 2022.

Keywords: cesium atomic fountain clock; national primary frequency standard; atomic time scale; atomic clock; steering algorithm

0 引 言

精密时间频率广泛应用于交通、通信、电力、金融以及卫星导航等领域,是现代化工业体系和国防建设的重要基础^[1-3]。国际上认可的统一时间是协调世界时(coordinated universal time, UTC),全球各时间频率实验室依托本地守时钟组、国际原子时(international atomic time, IAT)合作比对链路等资源实现本地协调世界时 UTC(k) (k 为实验室代号)。国际计量局(Bureau international des poids et mesures, BIPM)负责组织全世界

80 多家时间频率实验室参与国际原子时合作^[4]。以德国国家计量院为中心构建星型卫星比对网络实现各实验室之间的时间频率国际比对,国际计量局将全球时间频率实验室分为两类:G1 和 G2,国际计量局仅负责对少数 G1 实验室开展链路校准,G1 实验室负责所在计量区域内的 G2 实验室链路校准^[5]。目前,中国计量科学研究院时间频率实验室是全球 9 家 G1 实验室之一^[6],主要负责亚太区域内 G2 实验室链路校准。通过周期性的全球链路校准保障了国际原子时合作中国际比对的准确性,进而实现了各实验室保持的 400 多台原子钟之间的相互比对,加权平均这些原子钟读数产生自由原子时(EAL),

收稿日期:2023-09-15 Received Date: 2023-09-15

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB3900701)、国家市场监督管理总局科技计划项目(2023MK178)、国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(42227802)资助

经各实验室保持的铯原子喷泉钟及次级秒定义复现装置驾驭产生国际原子时(TAI),再经闰秒后得到协调世界时(UTC)^[1,7-10]。

国际计量局每月执行上述 UTC 计算工作,并发布时间公报(Circular T),主要报道各实验室保持的 UTC(k)的时间偏差及其不确定度、原子钟权重等信息^[4,7-8,11-12]。UTC(k)时间偏差的统计值是所在实验室原子时标技术水平的主要体现,通常采用一段时期内的最大偏差和稳定度(时间稳定度或频率稳定度)相结合表征,同时其不确定度与实验室卫星链路的比对能力、远程比对的解算方法及卫星链路校准相关^[13-15]。由此可见,UTC是为了实现全球统一时间而产生的一种后处理时间,其主要用户就是参与国际原子时合作的全部实验室,而各实验室保持的 UTC(k)是 UTC 的物理实现,直接输出标准时间和标准频率信号,承载着 UTC 时间发播的功能。例如,北京时间为 UTC+8 h,全球所有参与国际原子时合作的实验室都能发播北京时间,亦可发布巴黎时间。其次,UTC 计算的基础是参与各实验室保持的原子钟之间比对的钟差数据,依据原子钟钟差的稳定性或可预测能力计算权重,在现有比对链路技术成熟的条件下主要体现了原子钟自身的稳定性,与所在实验室技术能力关系不大。

近年来,我国卫星导航、工业数字化等领域高速发展,带动了时间频率基础设施和时频装备自主化水平的稳步提升^[16]。中国计量科学研究院开展了基准钟(铯原子喷泉钟、锶原子光晶格钟)、原子时标、时频传递比对及链路校准工作的研究^[9,17-22],代表中国长期参与国际原子时合作,其中喷泉钟 NIM5 及原子时标 UTC(NIM)是我国的时间频率计量基准。目前,国内多家机构成功研制了守时型原子钟(氢钟和铯钟),逐步实现量产;同时国内光钟研究取得了突破性进展,频率不确定度达到了 10^{-18} 量级^[9,20,23-24]。然而,由于设计原理及工艺限制,目前铯原子喷泉钟和光钟仍不能保证长期连续运行,导致与本地飞轮的频差比对存在测量死区,进一步影响了本地飞轮的外推能力,尤其是在利用卡尔曼滤波或者多项式拟合方法^[22,25-27]对飞轮外推与频率调控时易产生过拟合或欠拟合现象,导致参数失谐、调控能力下降。结合团队的前期研究经验,有限脉冲响应(FIR)滤波器对瞬态模型的不确定性表现出了良好的鲁棒性,对噪声统计量初始值的依赖性较弱^[28-29],有望缓解上述问题,尤其是在测量死区随机性强、占空比较大时。

本文聚焦基于国家秒长基准 NIM5 驾驭主动型氢原子钟的守时技术方案,着重阐述时标系统结构、频率预测与控制方法、NIM5 及氢钟的频率特性及原子时标性能指标评估等内容。

1 基本原理

为了验证 NIM5 参与守时的能力,搭建了原子时标验证系统。NIM5 主要用于保障时标的准确度,本地飞轮作为时标的连续参考,保障时标具备连续稳定输出和短期(≤ 1 天)频率稳定度。采用了基于 FIR 钟差预测与调控方法缓解了 NIM5 的不连续性导致的数据缺失问题,提升了飞轮钟差预测与驾驭的鲁棒性。以 UTC(NIM)为中介通过 TAI 合作链路将本地时标溯源至 UTC,经后处理,精细控制飞轮输出频率,使其输出频率和时刻值接近 UTC。

1.1 系统结构

原子时标验证系统,如图 1 所示。本地飞轮主动型氢钟(VCH1003M)提供标准频率(5 MHz)作为相位微跃单元的输入信号,提供标准频率(100 MHz)作为铯原子钟喷泉钟(NIM5)的参考频率;NIM5 作为系统的本地频率参考,定期输出与氢钟的相对频率偏差,保障时标的准确度;频率测量单元采用双混频时差测量法测量本地飞轮与 UTC(NIM)的输出频率,同时 UTC(NIM)通过 TAI 合作链路(远程比对)与 UTC 保持连续比对;解算控制单元根据氢钟相对于 NIM5 的历史测量数据,评估氢钟的频率偏差,并均衡时标的准确度和稳定度给出频率调整量 Δf ;相位微跃单元依据参考频率和频率调整量输出标准时间(1PPS)信号和标准频率(5 MHz)信号。

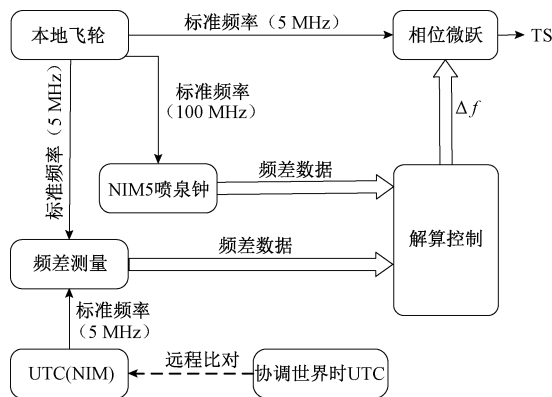


图 1 原子时标验证系统结构

Fig. 1 The system structure of the TS

1.2 改进的 FIR 钟差预测

NIM5 铯原子喷泉钟作本地参考频率,一般采用非连续运行模式,本地飞轮与 NIM5 的测量数据在周期性统计窗口内呈现异方差特性,甚至缺失统计窗口内全部测量数据。为了保障基于本地参考频率的飞轮频率预测能力,设计了一种改进的 FIR(finite impulse response)钟差优化预测方法^[30-32]。

本地飞轮(原子钟)输出频率模型:

$$y(n) = y_0 + a \cdot n + \varepsilon(n) \quad (1)$$

其中, y_0 为初始频率偏差; n 为采样间隔时序标识; a 为频率漂移率; $\varepsilon(n)$ 为随机扰动, 通常忽略不计。考虑到原子钟存在的白噪声、闪频噪声与随机游走噪声, 改进 FIR 预测方法利用不同统计窗口内测量数据的异方差特性, 缓解缺失数据或者粗大误差对原子钟频率预测的影响。

原子钟频差的预测值 $\hat{y}(n)$ 由各统计窗口内历史数据点的加权平均获得:

$$\hat{y}(n) = \sum_{i=1}^K H(i) y(n-i) \quad (2)$$

其中, 统计窗口的权重 $H(i)$ 由式(3)求解。

$$H(i) = h(i) w(i) c(i) \quad (3)$$

其中, 权重系统由 3 部分组成: $h(i)$ 为 FIR 滤波器系数; $w(i)$ 为历史数据是否存在的标识位, 存在为 1, 缺失为 0; $c(i)$ 是 $y(i)$ 的加权系数, 与所在统计窗口内数据的方差倒数成比例关系, 如式(4)所示。

$$c(i) = \frac{\frac{1}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{\sigma_i^2}} \quad (4)$$

其中, σ_i 代表第 i 个统计窗口内数据的标准偏差; K 为统计窗口的总数量。当所有统计窗口内测量数据统计方差一致时 $c(i) = \frac{1}{K}$ 。

$$\hat{y}(n) = y(n) \quad (5)$$

$$y_0 + an = \sum_{i=1}^K H(i) [y_0 + a(n-i)] \quad (6)$$

结合式(5)和(6)对零阶与 1 阶项进行整合, 得到

$$y_0 = \sum_{i=1}^K H(i) y_0 \quad (7)$$

$$an = \sum_{i=1}^K H(i) a(n-i) \quad (8)$$

由式(7)和零阶限定条件可以获得:

$$g_0 = \sum_{i=1}^K H(i) - 1 = 0 \quad (9)$$

由式(8)和 1 阶限定条件可以得到:

$$g_1 = \sum_{i=1}^K iH(i) \quad (10)$$

假定噪声因子独立分布, 滤波器的噪声增益表示为:

$$F(h(1), \dots, h(K)) = \sum_{i=1}^K [h(i)]^2 \quad (11)$$

使用拉格朗日算子结合限制条件 g_0, g_1 去优化噪声增益 $F(h(1), \dots, h(K))$ 使其达到最小。

$$\begin{aligned} L((h(1), \dots, h(K)), \lambda_0, \lambda_1) = \\ F(h(1), \dots, h(K)) + \lambda_0 g_0 + \lambda_1 g_1 = \\ \sum_{i=1}^K [h(i)]^2 + \lambda_0 \left[\sum_{i=1}^K H(i) - 1 \right] + \lambda_1 \left[\sum_{i=1}^K iH(i) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

为了确保 L 的各项参数的偏导为 0, 需满足如下公式:

$$\frac{\partial L}{\partial h(i)} = 2h(i) + \lambda_0 + i\lambda_1 = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_0} = \sum_{i=1}^K H(i) - 1 = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_1} = \sum_{i=1}^K iH(i) = 0 \quad (15)$$

参数 λ_0 和 λ_1 由式(16)计算得到,

$$\begin{bmatrix} S^0 & S^1 \\ S^1 & S^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_0 \\ \lambda_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中:

$$S^l = \sum_{i=1}^K i^l w(i) c(n-i) \quad (17)$$

上标参数 $l = 0, 1$ 或 2 ; $w(i)$ 和 $c(n-i)$ 通过统计测量数据获得。

唯一不确定的参数 $h(i)$ 由式(18)解算获得:

$$h(i) = -\frac{\lambda_0 + i\lambda_1}{2} \quad (18)$$

综合上述, 预测频差 $\hat{y}(n)$ 通过式(2)和(18)计算获得。

1.3 时标驾驭策略

1) 自主型时标

自主型时标即仅依托本地资源进行长期守时, 在本文中本地资源主要是铯原子钟喷泉钟(NIM5)和飞轮(HM)。如图1所示, 飞轮为相位微跃单元提供标准频率 5 MHz 的参考信号, 频率调整量 Δf 由解算单元依据飞轮相对于 NIM5 的频率偏差测量数据进行计算。采用改进的 FIR 方法预测飞轮钟差, 频率调整量 Δf 由两部分组成:

$$\Delta f = -\Delta f_{\text{prediction}} + \Delta f_{\text{offset}} \quad (19)$$

其中, $\Delta f_{\text{prediction}}$ 为下一时刻的飞轮频率偏差的估计值, Δf_{offset} 为当前时刻的飞轮频率偏差的实测值。执行飞轮频率预测前通常采用 3σ 法则去除粗大误差, 历史数据窗口长度一般为 7~20 d。

按照式(19)对飞轮进行迭代驾驭, 进一步对飞轮频率残差进行积分, 获得自主型时标 TS_1 与本地飞轮的时间偏差 x_{TS_1-HM} , 如式(20)所示:

$$x_{TS_1-HM} = -\int_{t_0}^t \Delta f(t) dt \quad (20)$$

其中, t_0 为初始时间。

在此期间, 通过国际原子时合作链路可以获得本地飞轮相对于协调世界时的时间偏差, 溯源链路为: $TS_1 \rightarrow HM \rightarrow UTC(NIM) \rightarrow UTC$ 。

自主型时标 TS_1 完全依托本地频率资源产生并维持, NIM5 保障时标的准确性, 飞轮保障时标的稳定性(尤其是短期)和连续性。

2) 溯源型时标

在自主型时标的基础上引入 UTC 作为外部资源,与铯原子喷泉钟 NIM5 协同驾驭本地飞轮,如图 1 所示。溯源型时标 TS₂ 的频率调整量 Δf 包括 4 个部分:

$$\Delta f = -\Delta f_{\text{prediction}} + \Delta f_{\text{offset}} + \Delta f_{\text{Rate}} + \Delta f_{\text{LRD}} \quad (21)$$

其中, Δf_{Rate} 为 NIM5 相对于国际原子时(TAI)的频率偏差; Δf_{LRD} 为 TS₂ 与最新 UTC 时间公报中最后一天的时间偏差的引入的频率偏差^[33-34]。时标驾驭与溯源过程与自主型时标一致。外部资源 UTC 的引入,将降低时标 TS₂ 对本地资源的依赖,进一步保持与协调世界时(UTC)的一致性。

2 数据分析

铯原子喷泉钟 NIM5 长期向 BIPM 报数,参与驾驭 TAI。BIPM 依据全球秒定义(铯原子喷泉钟)和次级秒定义复现装置的总体报数情况,结合全球守时钟钟差数据,计算产生 TAI,每月发布的时间公报给出了参与当月 TAI 计算的每台铯原子喷泉钟的相对频率偏差及不确定度。如图 2 所示,铯原子喷泉钟 NIM5 在时间公报第 408~420 期的相对频率偏差(优于 $\pm 1 \times 10^{-15}$)及其相应的频率不确定度($\sim 1 \times 10^{-15}$)。

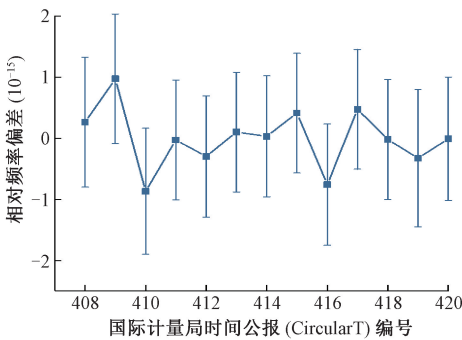


图 2 NIM5 相对国际原子时(TAI)的相对频率偏差

Fig. 2 Fractional frequency difference of NIM5 relative to TAI

作为本地飞轮的氢钟相对于 NIM5 的相对频率偏差如图 3 所示,利用~1 年的实际测量数据通过最小二乘拟合评估氢钟漂移率 $\sim 1 \times 10^{-17}/\text{d}$,表现出了优异性能。同时采用分段(~ 120 d)统计方法,进一步评估了氢钟频率漂移率的波动,如图 4 所示,其最大值 $\leq 1.5 \times 10^{-17}/\text{d}$ 。氢钟的频率稳定度如图 5 所示,由于氢钟自身优异的频率漂移率,频率稳定度到达了 $\sim 8 \times 10^{-16}/\text{d}$,当平均时间 $\sim 10^6$ s 后氢钟频率稳定度开始逐步恶化。

3 实验验证

3.1 自主型时标

利用本文所述的时标控制方法对 NIM5 相对于氢钟

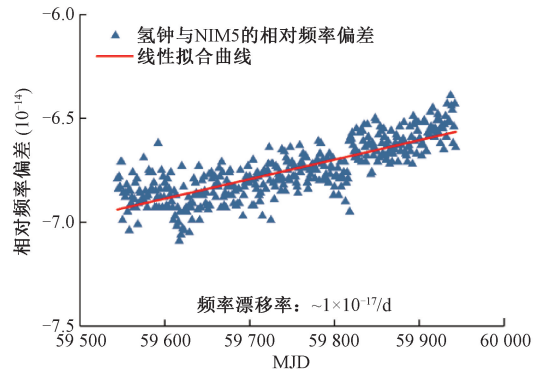


图 3 氢钟相对于 NIM5 的相对频率偏差

Fig. 3 Fractional frequency difference of hydrogen maser relative to NIM5

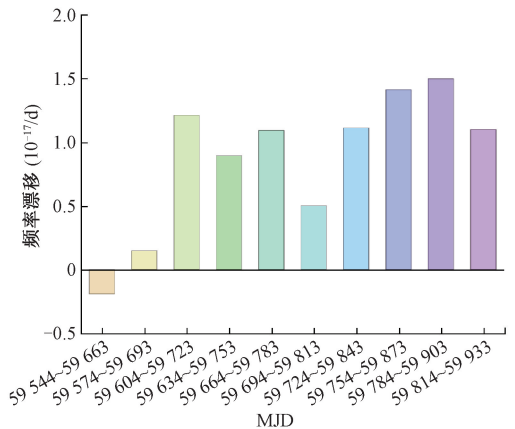


图 4 氢钟相对于 NIM5 的频率漂移率

Fig. 4 Frequency drift of hydrogen maser relative to NIM5

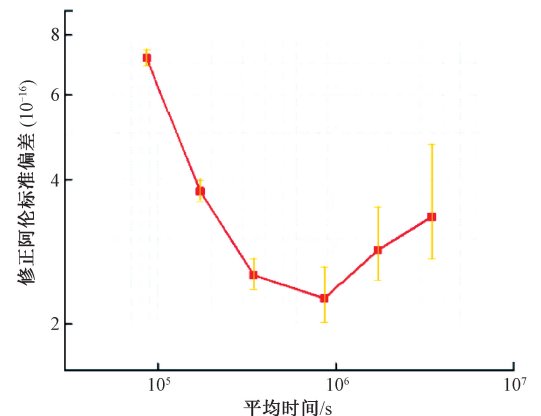


图 5 氢钟相对于 NIM5 的频率稳定度

Fig. 5 Frequency stability of hydrogen maser relative to NIM5.

的实测数据进行后处理,氢钟相对于 NIM5 外推预测误差(取样间隔为 1 天)如图 6 所示,预测误差均值 ~ 0 ,标准偏差 $\sim 1 \times 10^{-15}$,从而保证 TS₁ 的整体性能。利用 UTC

(NIM) 国际原子时合作链路, 将本地产生的自主时标 TS_1 与 UTC 进行比对, 获得 TS_1 相对于 UTC 的时间偏差。自主时间 TS_1 相对于 UTC 的时间偏差和频率稳定度如图 7 所示, 时间偏差优于 ± 4 ns, 其中图 7 的阴影部分为 NIM5 频率不确定度累计后的时间偏差, 即依托 NIM5 独立守时理论上的不确定度; 长期频率稳定度优于 $5 \times 10^{-16}/d$, 如图 8 所示。

综合上述, NIM5 的频率不确定度虽然与国际领先指标 ($\leq 2 \times 10^{-16}$) 仍有差距, 但其运行率较高, 具备长期稳定运行能力, 且通过连续 13 月的国际比对结果分析, 其对于 TAI 的相对频率偏差较小且基本稳定。结合本地性能优异的主动型氢原子钟 (频率稳定度 $\leq 5 \times 10^{-16}/d$, 频率漂移率 $\leq 1 \times 10^{-16}/d$), 能够实现本地自主守时时标的技术指标达到同期 UTC(k) 的国际先进水平。

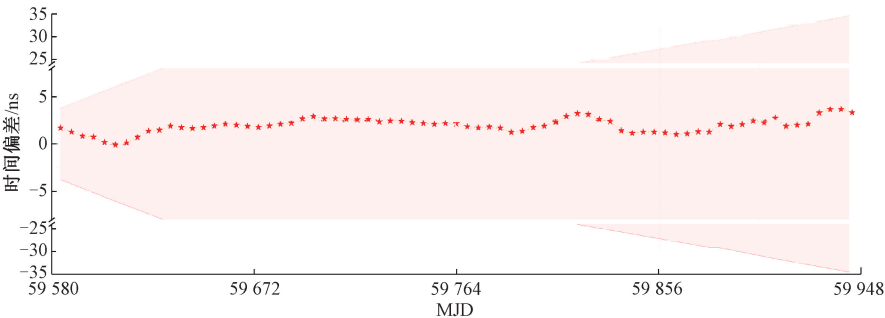


图 7 TS_1 相对 UTC 的时间偏差
Fig. 7 Time difference between TS_1 and UTC

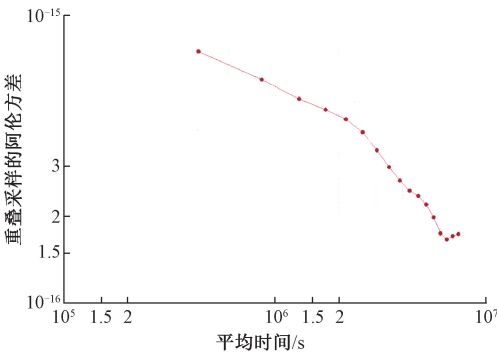


图 8 TS_1 相对 UTC 的频率稳定度
Fig. 8 Frequency stability of TS_1 relative to UTC

3.2 溯源型时标

依托 TAI 合作链路, 结合 BIPM 发布的时间公报获得频率调控量 Δf_{LRO} 和 Δf_{Rate} , 如图 9 所示, 两者均优于 $\pm 3 \times 10^{-16}$, 远小于氢钟频率预测误差。溯源型时标 TS_2 的频率调控量 Δf , 如图 10 所示。利用本地 TAI 合作链路, 将本地产生的时标 TS_2 经 UTC(NIM) 与 UTC 进行比对, 获得 TS_2 相对于 UTC 的时间偏差如图 11 所示, 其中

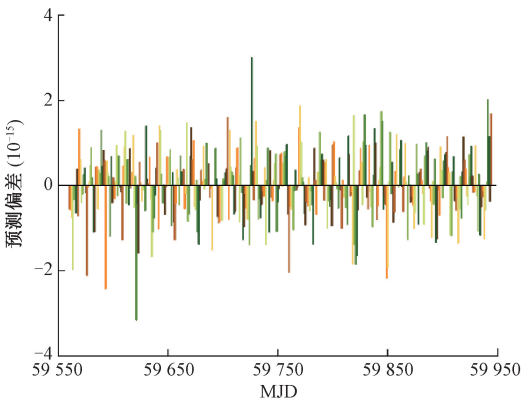


图 6 氢钟相对 NIM5 的预测偏差
Fig. 6 Prediction error of fractional frequency difference of hydrogen maser relative to NIM5

图 11 (a) 中立柱为自主型时标 TS_1 相对于溯源型时标 TS_2 的时间偏差, 图 11 (b) 为 TS_2 相对于 UTC 的时间偏差。由此可见, 引入 UTC 后, 本地时标向 UTC 进一步靠近, 时间偏差由 ± 4 ns 缩小到 ± 2 ns, 提升了时标的准确度。同时, 利用重叠采样的阿伦标准偏差表征时标的频率稳定度, 如表 1 所示, 频率稳定度 $\sim 7.2 \times 10^{-16}/5 d$, 长期频率稳定度 $\sim 4.2 \times 10^{-16}/50 d$ 。

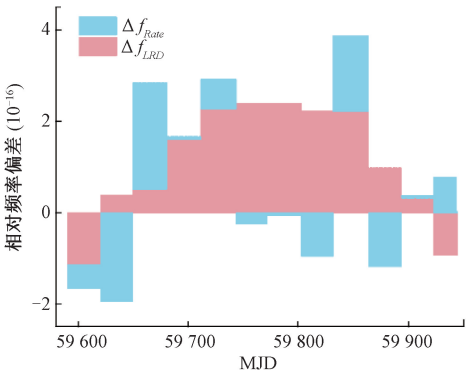


图 9 时标 TS_2 相对于 TS_1 增加的频率调整量
Fig. 9 Additional frequency adjustment of TS_2 relative to TS_1

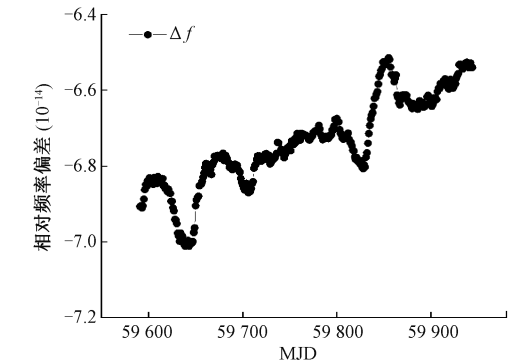
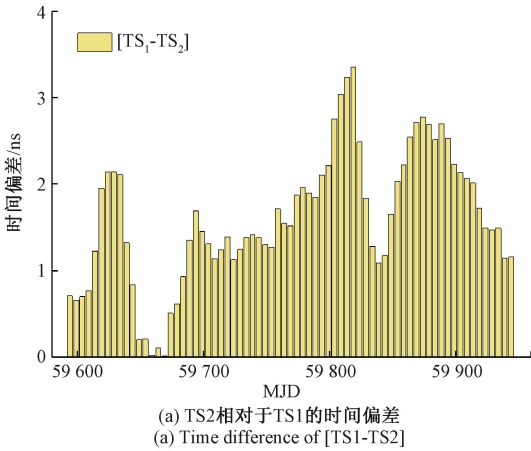
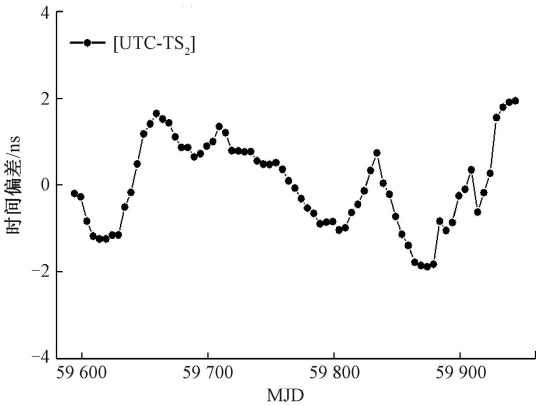


图 10 频率调整量

Fig. 10 Adjustment of relative frequency differences



(a) TS₂相对于TS₁的时间偏差
(a) Time difference of [TS₁-TS₂]



(b) TS₂相对于UTC的时间偏差
(b) Time difference of [UTC-TS₂]

图 11 TS₂ 相对于 TS₁ 和 UTC 的时间偏差

Fig. 11 Time difference of [TS₁-TS₂] and [UTC-TS₂]

表 1 自主型时标 TS₁、溯源型时标 TS₂ 的频率稳定度

Table 1 Frequency stability of TS₁ and TS₂

平均时间/d	TS ₁ 重叠采样的阿伦 标准偏差 (10 ⁻¹⁶)	TS ₂ 重叠采样的 阿伦标准偏差 (10 ⁻¹⁶)
5	7.49	7.14
10	5.97	5.68
20	4.71	5.41
50	2.46	4.11

4 结 论

时间频率体系的独立自主主要体现拥有独立稳定的时频量值源头,即在没有外部参考的情况下,仍能保持一定时期内原子时标的准确性、稳定性和连续性。本文针对基准钟(如铯原子喷泉钟、光钟等)不能连续运行的特点,采用了改进后的 FIR 钟差预测与频率调控方法,利用铯原子喷泉钟 NIM5 相对于主动型氢钟超过 1 年的实测数据,评估了自主型时标和溯源型时标的守时能力。实验结果表明,自主型和溯源型时标的时间偏差均优于 ± 4 ns、频率稳定度均优于 $8 \times 10^{-16}/5$ d,验证了驾驭与评估方法的有效性,为建立高精度独立自主的时间频率体系奠定了基础。

致谢

有幸曾与李天初先生共事:策划学术讨论专题、求教时间频率技术、漫谈计量历史文化。先生之行,堪为楷模、事必躬亲;先生之见,立存高远、纯真朴实,吾辈受益良多。常念先生教导之恩,遗憾未及言谢,唯有践行先生之志,以励吾辈。

参考文献

[1] 房芳, 张爱敏, 李天初. 时间: 从天文时到原子秒[J]. 计量技术, 2019(5): 7-10.
FANG F, ZHANG AI M, LI T CH. Time: From astronomical time to atomic time[J]. Metrology Science and Technology, 2019(5): 7-10.

[2] 房芳, 张爱敏, 林弋戈, 等. 时间: 天文时-原子秒-基于常数重新定义秒[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2021, 51(7): 101-111.
FANG F, ZHANG AI M, LIN Y G, et al. Time: Astronomical time-atomic time-redefining second based on constant[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2021, 51(7): 101-111.

[3] 曹士英, 房芳. 秒定义变革及我国时间频率基准的发展和应对[J]. 信息通信技术与政策, 2022(7): 2-8.
CAO SH Y, FANG F. Redefinition of unit of time and research progress of primary frequency standard in NIM[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2022(7): 2-8.

[4] ARIAS E F, PANFILO G, PETIT G. Timescales at the

- BIPM[J]. *Metrologia*, 2011, 48(4): S145.
- [5] PETIT G, DEFRAIGNE P. Calibration of GNSS stations for UTC[J]. *Metrologia*, 2023, 60.
- [6] DEFRAIGNE P, ACHKAR J, COLEMAN M J, et al. Achieving traceability to UTC through GNSS measurements[J]. *Metrologia*, 2022, 59(6): 064001.
- [7] PANFILO G, ARIAS F. The coordinated universal time (UTC)[J]. *Metrologia*, 2019, 56(4): 042001.
- [8] PANFILO G, HARMEGNIES A, TISSERAND L. A new weighting procedure for UTC [J]. *Metrologia*, 2014, 51(3): 285-292.
- [9] WANG Y Z, LIN Y G, GAO Y, et al. Traceability of optical frequency to SI second via UTC (NIM) [J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 970450.
- [10] 高源, 张爱敏, 李天初. 原子时标: 闰秒和取消闰秒[J]. *物理*, 2015, 44(6): 385-389.
- GAO Y, ZHANG AI M, LI T CH. Atomic time scale: leap second and leap second cancellation[J]. *Physics*, 2015, 44(6): 385-389.
- [11] LEVINE J, TAVELLA P, MILTON M. Towards a consensus on a continuous coordinated universal time[J]. *Metrologia*, 2023, 60(1): 014001.
- [12] MILTON J, PANFILO G. The maximum weight in UTC: proposal for a new approach[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, 2022.
- [13] 马凤鸣. 地方自由原子时的计算[J]. *计量学报*, 1984(1): 28-35.
- MA F M. Calculation of local free atomic time scale[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1984(1): 28-35.
- [14] WHIBBERLEY P B, DAVIS J A, SHEMAR S L. Local representations of UTC in national laboratories [J]. *Metrologia*, 2011, 48(4): S154.
- [15] ZHANG A, GAO Y, LIANG K, et al. Reconstruction of UTC (NIM [C]. Joint European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), 2013.
- [16] 杨玉婷, 刘晨帆, 蔺玉亭, 等. 我国守时系统发展现状与性能分析[J]. *自动化仪表*, 2021, 42(7): 93-97, 102.
- YANG Y T, LIU C F, LIN Y T, et al. Development status and performance analysis of china's time-keeping systems[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2021, 42(7): 93-97, 102.
- [17] ZHANG A M, LIANG K, GAO Y, et al. Time keeping and time transfer activities at NIM[J]. *Proceedings of the 50th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, 2019.
- [18] LI Z X, LEE K J, CABALLERO R N, et al. Measuring clock jumps using pulsar timing [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2019, 63(1): 219512.
- [19] LI T C, LIN P W, LI M S, et al. The transportable cesium fountain clock NIM5: its construction and performance[M]. *Frequency Standards And Metrology*, 2009.
- [20] LIN Y G, WANG Q, MENG F, et al. A ^{87}Sr optical lattice clock with 2.9×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Metrologia*, 2021, 58(3): 035010.
- [21] ZHANG Y, WANG Y Z, LIU N F, et al. Traceability of network time service to UTC (NIM): online calibration[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(5): 055008.
- [22] WANG Y Z, CHEN Y, GAO Y, et al. Atomic clock prediction algorithm: Random pursuit strategy [J]. *Metrologia*, 2017, 54(3): 381-9.
- [23] 张佳, 史田田, 缪健翔, 等. 主动光钟研究进展[J]. *计测技术*, 2023, 43(3): 1-16.
- ZHANG J, SHI T T, LIAO J X, et al. Research progress of active optical clock [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(3): 1-16.
- [24] 赵国栋, 卢晓同, 常宏. 光学频率标准研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(11): 44-55.
- ZHAO G D, LU X T, CHANG H. Research progress of the optical frequency standard [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(11): 44-55.
- [25] WANG Y Z, ZHANG A M, GAO Y, et al. Uncertainty analysis of clock prediction based on a random pursuit strategy [J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(7): 075015.
- [26] ZHU L, LIN Y G, WANG Y Z, et al. Preliminary study of generating a local time scale with NIM ^{87}Sr optical lattice clock[J]. *Metrologia*, 2022, 59.
- [27] 宋会杰, 董绍武, 屈俐俐, 等. 基于 Sage 窗的自适应 Kalman 滤波用于钟差预报研究[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(7): 1809-1816.

- SONG H J, DONG SH W, QU L L, et al. Research on clock difference prediction using adaptive Kalman filter based on Sage window[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(7): 1809-1816.
- [28] SHMALIY Y S, LEHMANN F, ZHAO S, et al. Comparing robustness of the Kalman, H_{∞} , and UFIR filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2018, 66(13): 3447-3458.
- [29] ZHAO S, SHMALIY Y S, AHN C K, et al. An improved iterative fir state estimator and its applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(2): 1003-1012.
- [30] SHMALIY Y S. On real-time optimal FIR estimation of linear tie models of local clocks[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2007, 54(11): 2403-2406.
- [31] SHMALIY Y S, IBARRA-MANZANO O. Optimal FIR filtering of the clock time errors[J]. Metrologia, 2008, 45(5): 571.
- [32] XU Q, JIA Z, ZHANG Y, et al. An optimized FIR predictor for incomplete measurement data of hydrogen masers relative to an optical clock[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-7.
- [33] BAUCH A, WEYERS S, PIESTER D, et al. Generation of UTC(PTB) as a fountain-clock based time scale[J]. Metrologia, 2012, 49(3): 180.

- [34] ROVERA G D, BIZE S, CHUPIN B, et al. UTC(OP) based on LNE-SYRTE primary frequency standards: Five years of continuous operation [C]. Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), 2018.

作者简介



王玉琢, 2015 年获北京理工大学博士学位, 现为中国计量科学研究院副研究员, 主要研究方向为时间尺度算法和精密时频测量。

E-mail: wangyzh@nim.ac.cn

Wang Yuzhuo received his Ph.D. degree from Beijing Institute of Technology in 2015. He is currently an associate researcher at National Institute of Metrology (NIM). His main research interests include time scale algorithm and precise measurement about time and frequency.



张爱敏(通信作者), 1987 年获北京大学学士学位, 1990 年获中国计量科学研究院硕士学位。现为中国计量科学研究院首席研究员, 主要研究方向为时间频率计量。

E-mail: zhangam@nim.ac.cn

Zhang Aimin (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Peking University in 1987, and M.Sc. degree from National Institute of Metrology (NIM) in 1990. She is currently the chief researcher at NIM. Her main research interest is time and frequency metrology.