

## 一种优化的频率驾驭算法研究

赵书红<sup>①②</sup> 董绍武<sup>\*①②③④</sup> 白杉杉<sup>①②</sup> 高喆<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院国家授时中心 西安 710600)

<sup>②</sup>(中国科学院时间频率基准重点实验室 西安 710600)

<sup>③</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

<sup>④</sup>(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

**摘要:** 为满足各应用领域对高精度时间性能不断提升的需求, 该文设计实现了一种迭代的优化频率驾驭算法, 主要分为纸面时间计算和实际物理信号实现两个部分。其中纸面时间计算采用ALGOS算法, 利用实时原子钟数据和Circular T公报数据计算获得准确可靠的时间尺度, 保障了驾驭参考的准确性和实时性。实时物理信号实现采用最优二次型高斯控制算法与Kalman算法综合, 通过实时调整参数, 计算出最优的频率驾驭量, 将该驾驭量输送至频率调整设备, 最终实现高精度时间信号的输出, 整个驾驭系统是闭环的。该文基于我国时间基准保持系统和原子钟组, 搭建试验平台, 采用该算法对一台氢钟进行为期140天的频率驾驭, 最终对输出的物理信号进行性能评估。试验结果表明, 该算法有效提高了驾驭后物理信号的准确度和稳定度, 驾驭后信号与国际标准时间协调世界时(UTC)相比, 相位偏差保持在 $\pm 3$  ns以内, 且30天稳定度优于 $5 \times 10^{-16}$ 。

**关键词:** 高精度时间; 时间尺度; 时间保持; 频率驾驭; Kalman算法; 最优二次型高斯控制算法

中图分类号: TN96; TH714

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1457-08

DOI: [10.11999/JEIT190980](https://doi.org/10.11999/JEIT190980)

## Research on An Optimized Frequency Steering Algorithm

ZHAO Shuhong<sup>①②</sup> DONG Shaowu<sup>\*①②③④</sup> BAI Shanshan<sup>①②</sup> GAO Zhe<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, China)

<sup>②</sup>(Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, National Time Service Center, CAS, Xi'an 710600, China)

<sup>③</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

<sup>④</sup>(School of Astronomy and Space Science, UCAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to meet the increasing demands for the performance of time in various application fields, an optimized frequency steering algorithm is designed and implemented in this paper, which is mainly divided into two parts: paper time scale calculation and physical signal implementation. ALGOS algorithm is adopted for the paper time scale calculation, and then an accurate and reliable time scale is calculated by using real-time atomic clock data and Circular T data, which ensures the accuracy and real-time steering reference scale. Real-time physical signals are implemented using an optimal Linear Quadratic Gaussian (LQG) control algorithm and Kalman algorithm. By adjusting parameters in real time, the optimal frequency steering value is generated, this value is sent to the frequency adjustment device, and finally the output of the high-precision time signal is realized. The entire steering system is closed-loop. Based on time keeping system and atomic clock assemble, a test platform is built, and the algorithm is used to perform a 140 days frequency steering on a hydrogen maser clock, and finally the performance evaluation of the output physical signal is performed. Experimental results show that this algorithm improves effectively the accuracy and stability of the output physical signal. Compared with Universal Time Co-ordinated (UTC), the output time signal maintains a time deviation within  $\pm 3$  ns, and its stability is better than  $5 \times 10^{-16}$  at 30 days.

收稿日期: 2019-11-20; 改回日期: 2020-11-17; 网络出版: 2020-12-03

\*通信作者: 董绍武 sdong@ntsc.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金(11773030); 中国科学院青年创新促进会资助项目(2020402)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (11773030), The Youth Innovation Promotion Association Foundation of the Chinese Academy of Sciences(2020402)

**Key words:** High precision time; Time scale; Time keeping; Frequency steering; Kalman algorithm; Linear quadratic Gaussian control algorithm

## 1 引言

时间是一个国家科技、经济、军事和社会生活中至关重要的参量,其应用范围从基础研究(相对论验证、基础物理常数测量等),渗透到工程技术应用领域(导航定位、深空探测等)。特别在现代高科技领域和国防建设中,如全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)、现代军事通信系统、航空航天系统等,高精度、稳定可靠的时间更是其未来技术迅速发展的核心要素。

目前国际标准时间是协调世界时(Coordinated Universal Time, UTC),由国际权度局(International Bureau of Weights and Measures, BIPM)以Circular T公报形式发布。但UTC是“纸面时间”,滞后40~45 d,不满足用户对高精度时间信号的实时性要求,因此各守时实验室需要独立产生和保持一个稳定的标准时间系统UTC(k),即UTC在本地的物理实现<sup>[1]</sup>。目前,全球多数时间实验室利用一定数量的原子钟(氢钟、铯钟等)联合计算得到地方原子时尺度TA(k),即“纸面时间”。以TA(k)作为驾驭参考,采用最小二乘估计方法预测待驾驭原子钟的频率,使其尽可能接近或符合纸面时间尺度的频率,依据该值对原子钟进行频率驾驭,最终实现实时物理信号UTC(k)的输出<sup>[2]</sup>。

实时物理信号UTC(k)产生的过程中,往往会有各种各样的随机因素存在,比如观测噪声、设备噪声以及外部干扰等,同时这些随机因素也是随时间而变化的,但最小二乘估计方法没有很好消除噪声影响,且易受异常数据和异常信号的影响,因此现有的频率驾驭算法还有改进的空间。自适应的控制方法是基于运行期间的测量值来改变增益矩阵,而不再是依据经验来选择,可以更好地控制系统达到期望的目标,因此本文采用基于自适应的控制方法,即最优二次型高斯控制算法(Linear Quadratic Gaussian control, LQG),利用最小化二次代价函数不断地逼近最优控制。再通过Kalman滤波方法,构造增益矩阵的递推公式,将控制值和滤波器不断迭代直至收敛,最终得到最优滤波器<sup>[3]</sup>。

本文提出了一种优化的频率驾驭算法,主要分为纸面时间计算和实际物理信号实现两个部分。第1步,基于实时的原子钟数据和BIPM公布的Circular T公报的数据,采用ALGOS算法,产生一组氢铯联合时间尺度,发挥了氢钟和铯钟的特性,保证驾驭参考的准确性和实时性。第2步,通过调整最优

二次型高斯控制算法中的参数,使得代价函数最小化,再利用Kalman算法计算最优的氢钟频率驾驭量输送至频率调整设备中,保证输出的实时物理信号性能,整个驾驭过程是优化、闭环的。基于我国时间基准保持系统,对一台氢钟进行了为期140 d的频率驾驭试验,分别在氢铯联合时间尺度算法、LQG算法参数选择以及优化的频率驾驭算法等方面开展试验,分析试验结果,验证了该算法的有效性。

## 2 基本原理

### 2.1 ALGOS算法

BIPM提出了ALGOS算法,目的是通过收集全世界时间实验室的原子钟数据,产生一个稳定的自由原子时(Échelle Atomique Libre, EAL),并利用多台基准频标的频率(进行广义相对论和黑体辐射改正后)的加权平均,对EAL的频率进行驾驭得到既稳定又准确的时间尺度——国际原子时(International Atomic Time, TAI)。

若有 $N$ 台原子钟,其读数为 $h_i(t)$ , $i=1,2,\dots,N$ ,利用加权平均算法,建立一个时间尺度TA( $t$ )。ALGOS算法的基本公式如式(1)所示<sup>[4,5]</sup>

$$x_j(t) = \text{TA}(t) - h_j(t) = \sum_{i=1}^N \omega_i(t) [h'_i(t) - x_{i,j}(t)] \quad (1)$$

其中, $\omega_i$ 为钟 $H_i$ 的权重, $h_i(t)$ 为钟 $H_i$ 在 $t$ 时刻上的读数, $h'_i(t)$ 为原子钟预报的修正。 $x_{i,j}(t)$ 是第 $i$ 台钟和第 $j$ 台钟的相位差数据,可直接通过测量获得。

$$x_{i,j}(t) = h_j(t) - h_i(t) \quad (2)$$

原子钟的频率预报模型为

$$\begin{aligned} \hat{h}'_i(t) &= \hat{a}_{i,I_k}(t_k) + \hat{B}_{ip,I_k}(t) \cdot (t - t_k) \\ &+ \frac{1}{2} \hat{C}_{ip,I_k}(t) \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot (t - t_k) \\ &+ \frac{1}{2} \hat{C}_{ip,I_k}(t) \cdot (t - t_k)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\hat{a}_{i,I_k}$ 为 $t_k$ 时刻,钟 $H_i$ 相对于TA的估计值; $\hat{B}_{ip,I_k}$ 为 $[t_k, t]$ 时间间隔里,钟 $H_i$ 相对于TA的频率估计值; $\hat{C}_{ip,I_k}$ 为 $[t_k, t]$ 时间间隔里,钟 $H_i$ 相对于TA的频漂估计值。

参与时间尺度计算的原子钟,根据其预报残差来确定权重。实际频率值 $y(i, I_k)$ 与预报值 $\hat{y}(i, I_k)$ 的绝对偏差为

$$\sigma_i = |y(i, I_k) - \hat{y}(i, I_k)| \quad (4)$$

其中,下标 $i$ 表示第 $i$ 台钟, $I_k$ 表示计算时间间隔。

考虑最大权限制，权重计算方法如式(5)、式(6)所示

$$\omega_i = \frac{1/\sigma_i^2}{\sum_{i=1}^N 1/\sigma_i^2} \quad (5)$$

$$\omega_i(t) \geq W_{\max}, \begin{cases} \omega_i(t) = W_{\max} \\ W_{\max} = \frac{A}{N} \end{cases} \quad (6)$$

其中， $W_{\max}$ 表示最大权， $A$ 为需多考虑参与计算的原子钟的性能的参数。

## 2.2 实际物理信号实现算法

实际物理信号实现算法是Kalman算法和LQG算法的综合，本节重点介绍Kalman算法、LQG算法原理和实际物理信号实现算法流程。

### 2.2.1 Kalman算法

Kalman算法的状态方程，如果假设为线性微分方程，仅描述了自由运转的原子钟模型，与频率驾驭量的实际应用情况不符，因此状态模型不能简单用线性微分方程表示，必须增加控制项 $b(\tau)u(t_k)$ <sup>[6-8]</sup>。

含有控制量的状态方程描述为

$$\mathbf{X}(t_{k+1}) = \phi(\tau)\mathbf{X}(t_k) + \mathbf{b}(\tau)u(t_k) + w(t_k) \quad (7)$$

其中， $\mathbf{X}$ 为原子钟相位和频率的状态向量， $t_k$ 为离散时间， $\tau=t_{k+1}-t_k$ 为时间间隔， $\phi(\tau)$ 为状态转移矩阵， $b(\tau)$ 为传播项， $u(t_k)$ 为 $t_k$ 时刻的频率驾驭值， $w(t_k)$ 是原子钟噪声，在时域上互不相关， $w(t_k) \sim N(0, Q(\tau))$ 。

$$\phi(\tau) = \begin{pmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{b} = \begin{pmatrix} \tau \\ 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

原子钟的状态方程仅考虑原子钟本身的噪声，不考虑测量过程中引入的噪声。测量矩阵 $h$ 描述系统测量过程，即描述待驾驭原子钟与TA的相位偏差过程，并且测量噪声 $v(t_k) \sim N(0, R(t_k))$ 。Kalman算法的测量方程为

$$z(t_k) = \mathbf{h}x(t_k) + v(t_k) \quad (10)$$

$$\mathbf{h} = (1 \ 0) \quad (11)$$

### 2.2.2 最优二次型高斯控制算法

最优二次型高斯控制算法(LQG算法)是一种较为灵活的算法，通过调整 $W_Q$ 和 $W_R$ 参数值，优化频率驾驭值。为保证LQG算法计算获得最优的主钟频率驾驭值，必须保证代价函数 $J$ 最小<sup>[9-11]</sup>。

$$J = E \left[ \sum_k [\mathbf{x}^T(t_k)W_Q\mathbf{x}(t_k) + \mathbf{u}^T(t_k)W_R\mathbf{u}(t_k)] \right] \quad (12)$$

从式(12)可以看出，通过调整 $W_Q$ 和 $W_R$ 参数，可以实现快速驾驭( $W_R \gg W_Q$ )或慢速驾驭( $W_R \ll W_Q$ )<sup>[12, 13]</sup>。利用稳态Ricatti方程得到线性二次调节器 $\hat{K}_0$ 。

$$\hat{K}_0 = \phi^T(\tau)\hat{K}_0\phi(\tau) + W_Q - \phi^T(\tau) \cdot \hat{K}_0\mathbf{b}(\mathbf{b}^T\hat{K}_0\mathbf{b} + W_R)^{-1}\mathbf{b}^T\hat{K}_0\phi(\tau) \quad (13)$$

然后使用Kalman算法预测估计下一时刻的 $x(t_k)$ 和增益 $\hat{G}_0$ ，将其应用于驾驭原子钟

$$\begin{aligned} u(t_k) &= -(\mathbf{b}^T\hat{K}_0\mathbf{b} + W_R)^{-1}\mathbf{b}^T\hat{K}_0\phi(\tau)\hat{x}(t_k) \\ &= -\hat{G}_0\hat{x}(t_k) = \text{TA}(t) - h_j(t) \end{aligned} \quad (14)$$

### 2.2.3 物理信号实现算法流程

物理信号实现算法包括预测和修正步骤。在预测步骤中，利用Kalman状态方程确定下一时刻的估计。在修正步骤中，使用最新测量值修正模型预测的偏差<sup>[14, 15]</sup>。

预测：

$$\hat{x}(t_k) = \phi(\tau)\hat{x}(t_{k-1}) + \mathbf{b}u(t_{k-1}) \quad (15)$$

$$P^-(t_k) = \phi(\tau)P(t_{k-1})\phi^T(\tau) + Q(\tau) \quad (16)$$

修正：

$$K(t_k) = P^-(t_k)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}P^-(t_k)\mathbf{H}^T + R(t_k)]^{-1} \quad (17)$$

$$\hat{x}(t_k) = \hat{x}^-(t_k) + K(t_k)[z(t_k) - \mathbf{H}\hat{x}^-(t_k)] \quad (18)$$

$$P(t_k) = [I - K(t_k)\mathbf{H}]P^-(t_k) \quad (19)$$

## 3 优化的频率驾驭算法

优化的驾驭方法通过寻找驾驭函数 $u(t)$ ，在满足状态方程式(7)和测量方程式(10)的条件下，使得代价函数 $J$ 达到最小。针对实时物理信号UTC(k)产生的随机控制问题，其全局最优频率驾驭函数的确定是比较困难的。利用LQG算法使得最小化二次代价函数不断地逼近最优控制，再通过Kalman滤波方法，构造增益矩阵的递推公式，将控制值和滤波器不断迭代直至收敛，最终得到最优滤波器。该算法可以很好地降低各种类型噪声对系统的影响，并在最短时间可以消除异常值对频率驾驭的影响，最终提高频率驾驭后信号的稳定性和系统的可靠性。

优化的频率驾驭算法分为纸面时间和实际物理信号实现两个部分。纸面时间实现算法，基于氢原子钟和铯原子钟的原子钟数据，采用ALGOS算法产生一个准确、稳定的纸面时间TA(k)，该纸面时间尺度的稳定度优于任何一台原子钟的稳定度。物理信号实现算法，以氢钟与纸面时间TA(k)的相位

偏差数据作为一组输入数据,考虑到氢钟的外部频率驾驭操作,综合Kalman算法和LQG算法计算主钟的频率驾驭量,将该值输送至相位微调器中,最终实现物理信号输出。该物理信号作为本地原子钟数据采集的输入信号,参与纸面时间计算,循环往复,整个过程是闭环的。氢钟的频率驾驭过程如图1所示,图中MC为氢钟经频率驾驭后的输出信号。

## 4 测试及分析评估

### 4.1 氢铯联合时间尺度TA产生

利用我国时间基准系统的原子钟测量比对系统,选择2019年1月1日(修正的儒略日期(Modified Julian Date, MJD)=58484)至2019年5月23日(MJD=58623)的原子钟比对数据,采用在线连续运行的20台原子钟(13台铯钟和7台氢钟)与标准时间UTC(NTSC)的相位比对数据,采样间隔为1 h。经钟差预测、频率预报以及权重估计等,利用ALGOS算法,计算得到纸面时间尺度TA。

由于环境异常或设备故障等因素,可能造成原子钟比对数据中出现缺失、异常数据等现象。为保障纸面时间尺度的准确性和连续性,必须对原始的原子钟数据进行数据预处理,试验中选用滑动的 $3\sigma$ 粗差剔除法和三次样条插值方法解决异常数据和缺失数据。

数据预处理后,基于ALGOS方法,利用7台氢原子钟,产生一个氢原子钟组成的时间尺度 $TA_{HM}$ 。同时又利用13台铯原子钟组以及经过TAI速率校正后综合产生的原子时尺度 $TA_{Cs}$ 。这两个时间尺度互为参考,利用 $TA_{HM}$ 来减小铯原子钟的短期波动,

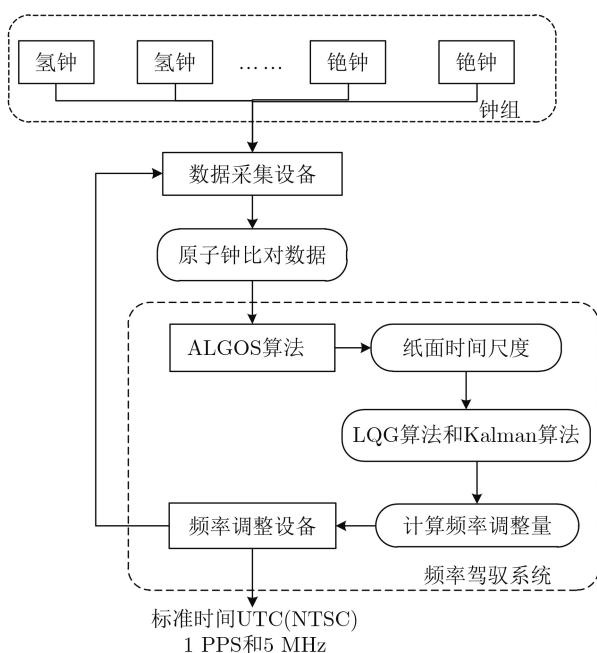


图1 氢钟的频率驾驭框图

而利用 $TA_{Cs}$ 来修正 $TA_{HM}$ 的长期漂移,综合两者得到稳定性和准确度最优的时间尺度TA。由于参与计算的原子钟数据为实时的,且计算前后的时间尺度经过链接,因此最终计算获得的时间尺度TA是连续且实时的<sup>[16,17]</sup>。

从图2可以看出,氢铯联合时间尺度TA与标准时间UTC(NTSC)的相位偏差保持在 $\pm 5$  ns以内,对比国际标准时间UTC与标准时间UTC(NTSC)的结果(数据来源于BIPM的Circular T公报),两组结果基本吻合。从图3可以看出,氢铯联合时间尺度TA与UTC的相位偏差均值为 $-0.38$  ns,均方根误差(Root Mean Square, RMS)为 $0.78$  ns,并且30 d稳定度达到 $4.7 \times 10^{-16}$ <sup>[18,19]</sup>,因此氢铯联合时间尺度TA是一个准确可靠的驾驭参考。

### 4.2 实时物理信号产生

#### 4.2.1 LQG算法的参数确定

LQG算法通过调整 $W_Q$ 和 $W_R$ 参数,可以计算获得最优的主钟频率驾驭量,其中 $W_Q$ 是具有两个非零对角线的 $2 \times 2$ 矩阵,有两个可变参数, $W_R$ 是1维可变参数。给定 $W_Q$ 和 $W_R$ 参数,利用2.2.2节中式(12)、式(13),可以计算出LQG算法的增益 $\hat{G}_0$ , $\hat{G}_0 = (g_x, g_y)$ ,其中 $g_x$ 为相位增益, $g_y$ 为频率增益。

图4(a)和图4(b)分别显示了 $W_R=10^9$ , $W_Q$ 的两个参数选择范围从 $(10^{-14}, 10^{14})$ 取值时,相位增益 $g_x$ 和频率增益 $g_y$ 的3维曲面图。从图中可以看出,当 $g_x$ 和 $g_y$ 取值接近零值时,随着 $W_R$ 的增大, $W_Q(1,1)$ 和 $W_Q(2,2)$ 的取值范围变大。

$W_Q$ 和 $W_R$ 参数选择可以利用式(20),当函数值为0时,选取参数的最优值<sup>[12]</sup>。

$$f = (\tau g_x + g_y - 2)^2 - 4(1 - g_y) \quad (20)$$

当 $W_Q = \begin{pmatrix} 10^{-9} & 0 \\ 0 & 10^4 \end{pmatrix}$ , $W_R = 10^{(0.1, \dots, 14)}$ 时,函数 $f$ 的取值变化如图5所示,则本文试验选择参数 $W_Q = \begin{pmatrix} 10^{-9} & 0 \\ 0 & 10^4 \end{pmatrix}$ , $W_R = 10^9$ 。取该参数时, $f$ 的取值为 $0.0165$ ,基本接近零,且 $\hat{G}_0 = [3.16 \times 10^{-10} \quad 0.0018]$ 。

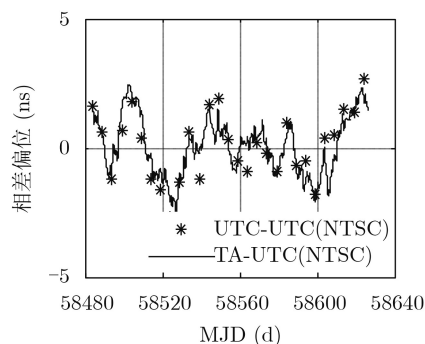


图2 TA、UTC与UTC(NTSC)相位偏差结果

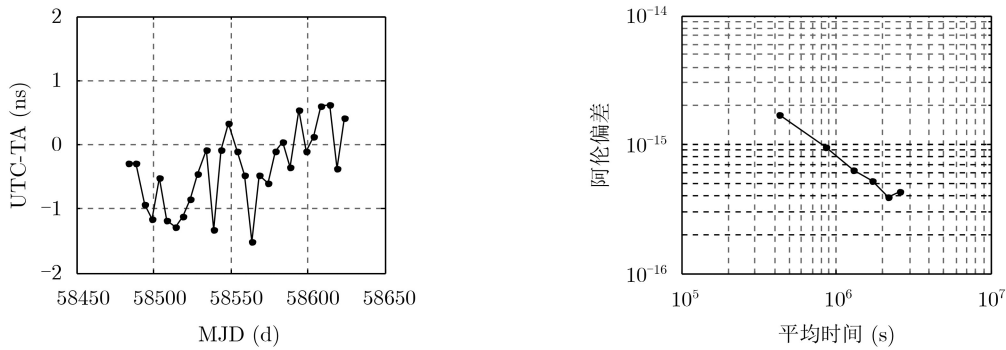
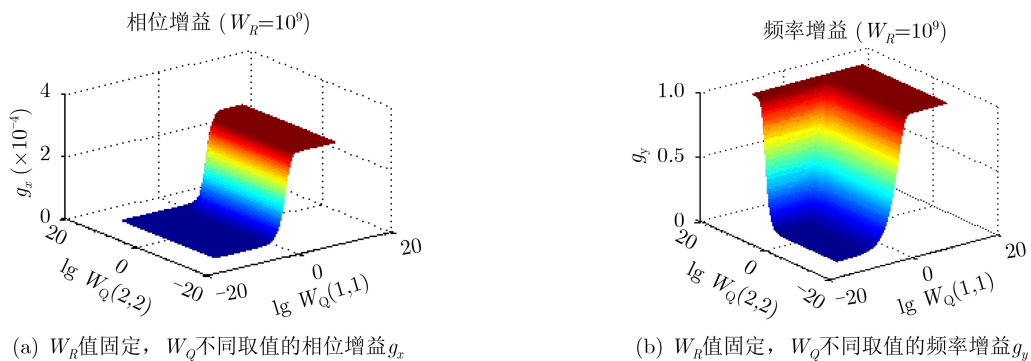


图3 TA相对于UTC的相位偏差以及稳定度结果



(a)  $W_R$ 值固定,  $W_Q$ 不同取值的相位增益 $q_x$

(b)  $W_R$ 值固定,  $W_Q$ 不同取值的频率增益 $q_y$

图4  $W_R$ 值固定,  $W_Q$ 不同取值的增益

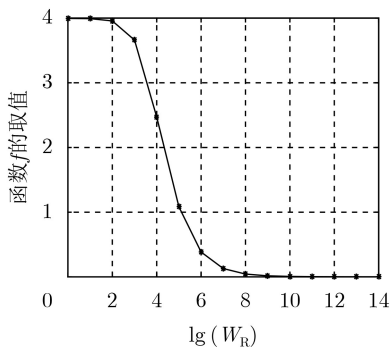


图5  $W_Q$ 值固定,  $W_R$ 不同取值的函数 $f$ 变化曲线

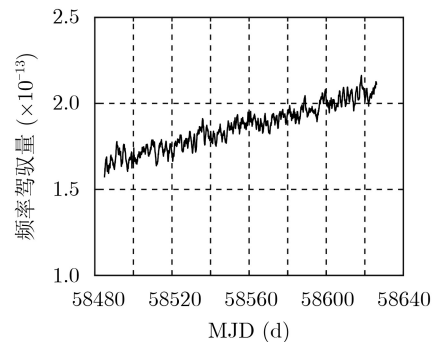


图6 氢原子钟的频率驾驭量

### 4.2.2 最优频率驾驭量计算

选择编号为H067的氢钟(型号为VCH-1003)作为被驾驭的主钟, 以4.1节计算的TA作为实时物理信号的参考, 选取 $\mathbf{W}_Q = \begin{pmatrix} 10^{-9} & 0 \\ 0 & 10^4 \end{pmatrix}$ ,  $\mathbf{W}_R = 10^9$ , 利用优化的频率驾驭算法, 计算获得频率调整量, 频率驾驭量的曲线如图6所示, 可以看出频率调整量随时间增大, 这主要受氢钟频漂的影响。

图7中黑色虚线代表氢钟H067相较于纸面时间TA的相位偏差(扣除了二次趋势), 红色实线代表应用优化的频率驾驭算法后的输出信号与纸面时间TA的相位偏差。从图中可以看出, 采用优化的频率驾驭算法, 驾驭后信号一直稳定在零处。相比于优化的频率驾驭算法, 采用最小二乘估计方法驾驭, 扣除了二次趋势后, 驾驭后的信号波动明显增

大, 由此表明优化的频率驾驭算法可以很好地实现原子钟的频率驾驭。

当时间间隔在100~10000 s时, 氢钟噪声以频率白噪声为主; 当时间间隔在10000 s~7 d时, 氢钟噪声以频率闪烁噪声为主; 从图8可以看出, 利用优化的频率驾驭算法, 有效地抑制了频率白噪声和频率闪烁噪声, 同时很好地消除了氢钟的2次项趋势, 使得驾驭后的信号与氢铯联合时间尺度TA的相位偏差控制在 $\pm 1$  ns以内, 并提高了驾驭后信号的频率稳定度<sup>[20,21]</sup>。

利用国家授时中心的溯源链路, 将驾驭后的时间信号溯源至国际标准时间UTC。从图9可以看出, 驾驭后的实时物理信号与国际标准时间UTC相比, 保持在 $\pm 3$  ns以内, 且实时物理信号30 d的

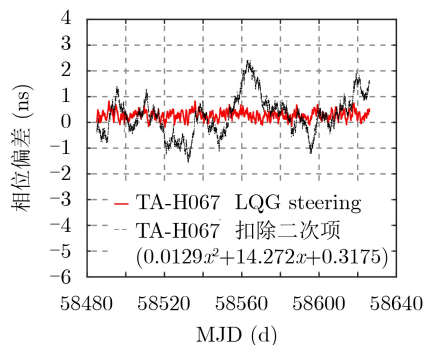


图7 采用优化的频率驾驭算法和最小二乘估计方法, 驾驭后的输出信号与TA的结果分析

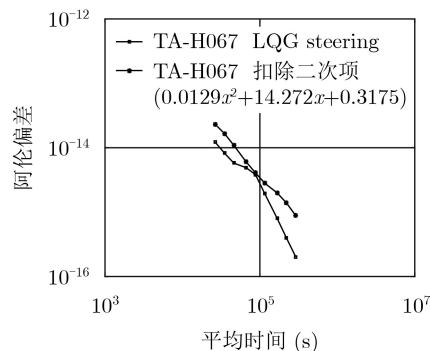


图8 采用优化的频率驾驭算法和最小二乘估计方法, 驾驭后的输出信号与TA的稳定度结果

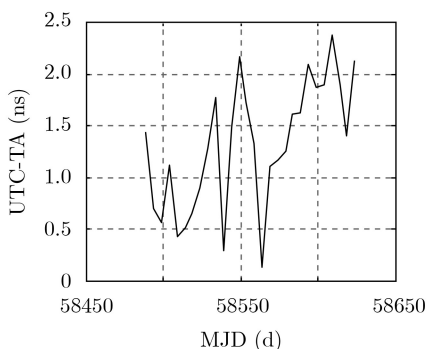
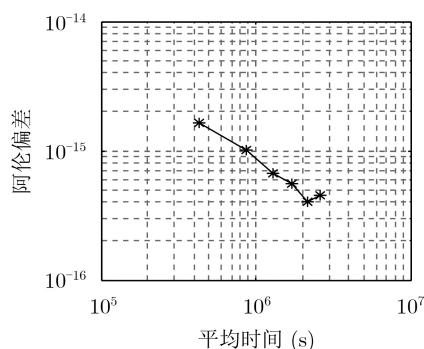


图9 采用优化的频率驾驭算法, 驾驭后的输出信号与UTC的结果分析



稳定度优于 $5 \times 10^{-16}$ [15]。图10中带圈虚线代表氢钟H067的稳定度, 实线代表了纸面时间TA的稳定度, 以及带框实线代表可驾驭后输出信号的稳定度。从图中可以看出, 氢钟受频漂和随机游走噪声等的影响, 频率稳定度随时间推移变差。多台原子钟综合计算获得的纸面时间尺度TA, 很大程度上消除了频漂和随机游走噪声的影响, 短期稳定性和长期稳定性相比于氢钟的稳定度均得到了提高。而应用优化的频率驾驭算法, 驾驭输出后的物理信号稳定度与纸面时间TA的稳定度基本保持一致, 驾驭后实时物理信号的稳定度优于氢钟的自身稳定度。

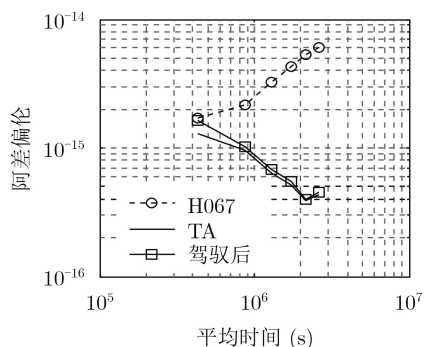


图10 以UTC作为参考, 氢钟H067, 纸面时间TA和驾驭后实时物理信号的稳定度结果

### 5 结束语

随着各领域对高精度时间的精度不断提高的要求, 更高精度的时间产生技术的研究受到广泛的关注。频率驾驭算法作为高精度时间产生的重点研究问题, 其算法的有效性取决于驾驭参考的时间尺度、最优驾驭量计算等方面。因此本文提出了一种优化的频率驾驭算法, 综合ALGOS算法、Kalman算法和LQG算法, 迭代计算出最优频率驾驭量, 利用频率调整设备, 最终实现高精度时间信号输出。

基于我国时间基准系统搭建了试验平台, 利用优化的频率驾驭算法, 对一台氢原子钟进行140 d的频率驾驭试验, 试验结果说明, 该算法可以提高输出实时物理信号的准确度和稳定度, 驾驭输出的时间信号与国际标准时间UTC相比, 相位偏差保持在 $\pm 3$  ns以内, 且30 d稳定度优于 $5 \times 10^{-16}$ , 为提高我国时间基准的性能提升奠定了基础。

### 参考文献

[1] 杨文哲, 杨宏雷, 王学运, 等. 高精度光纤时间频率一体化传递[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1579-1586. doi: 10.11999/JEIT180807.  
 YANG Wenzhe, YANG Honglei, WANG Xueyun, et al. High precision time and frequency integration transfer via optical fiber[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1579-1586. doi: 10.11999/

- JEIT180807.
- [2] PANFILO G, HARMEGNIES A, and TISSERAND L. A new prediction algorithm for the generation of International Atomic Time[J]. *Metrologia*, 2012, 49(1): 49–56. doi: [10.1088/0026-1394/49/1/008](https://doi.org/10.1088/0026-1394/49/1/008).
- [3] 侯志强, 王帅, 廖秀峰, 等. 基于样本质量估计的空间正则化自适应相关滤波视觉跟踪[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(8): 1983–1991. doi: [10.11999/JEIT180921](https://doi.org/10.11999/JEIT180921).  
HOU Zhiqiang, WANG Shuai, LIAO Xiufeng, *et al.* Adaptive regularized correlation filters for visual tracking based on sample quality estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(8): 1983–1991. doi: [10.11999/JEIT180921](https://doi.org/10.11999/JEIT180921).
- [4] PETIT G. Towards an optimal weighting scheme for TAI computation[J]. *Metrologia*, 2003, 40(3): 252–256. doi: [10.1088/0026-1394/40/3/304](https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/3/304).
- [5] ZHAO Shuhong, DONG Shaowu, QU Lili, *et al.* A new steering strategy for UTC(NTSC) based on hydrogen maser[C]. Proceedings of 2016 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), New Orleans, USA, 2016: 227–231.
- [6] ZHAO Shuhong, WANG Zhengming, and YIN Dongshan. A study on the steering strategy for the master clock[J]. *Chinese Astronomy and Astrophysics*, 2015, 39(1): 118–128. doi: [10.1016/j.chinastron.2015.01.008](https://doi.org/10.1016/j.chinastron.2015.01.008).
- [7] GREENHALL C A. A review of reduced Kalman filters for clock ensembles[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(3): 491–496. doi: [10.1109/TUFFC.2012.2219](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2012.2219).
- [8] 王雪梅, 刘文强, 邓自立. 不确定系统鲁棒协方差交叉融合稳态Kalman滤波器[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1900–1905. doi: [10.11999/JEIT141515](https://doi.org/10.11999/JEIT141515).  
WANG Xuemei, LIU Wenqiang, and DENG Zili. Robust covariance intersection fusion steady-state Kalman filter for uncertain systems[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1900–1905. doi: [10.11999/JEIT141515](https://doi.org/10.11999/JEIT141515).
- [9] 耿友林, 解成博, 尹川, 等. 基于卡尔曼滤波的接收信号强度指示差值定位算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 455–461. doi: [10.11999/JEIT180268](https://doi.org/10.11999/JEIT180268).  
GENG Youlin, XIE Chengbo, YIN Chuan, *et al.* Received signal strength indication difference location algorithm based on Kalman filter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(2): 455–461. doi: [10.11999/JEIT180268](https://doi.org/10.11999/JEIT180268).
- [10] KOPPANG P and LELAND R. Linear quadratic stochastic control of atomic hydrogen masers[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1999, 46(3): 517–522. doi: [10.1109/58.764838](https://doi.org/10.1109/58.764838).
- [11] GÖDEL M and FURTHNER J. Robust ensemble time onboard a satellite[C]. Proceedings of the 48th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Monterey, USA, 2017: 26–43.
- [12] 张泉, 尹达一, 张茜丹, 等. 压电执行器动态迟滞建模与LQG最优控制器设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(11): 2744–2753. doi: [10.3788/OPE.20182611.2744](https://doi.org/10.3788/OPE.20182611.2744).  
ZHANG Quan, YIN Dayi, ZHANG Xidan, *et al.* Dynamic hysteresis modeling and LQG optimal controller design of piezoelectric actuators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2744–2753. doi: [10.3788/OPE.20182611.2744](https://doi.org/10.3788/OPE.20182611.2744).
- [13] 崔挺, 严运兵, 肖小城. LQG/LTR控制在二级倒立摆系统中的应用研究[J]. 武汉科技大学学报, 2014, 37(4): 300–304.  
CUI Ting, YAN Yunbing, and XIAO Xiaocheng. Application of LQG/LTR control in double inverted pendulum system[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2014, 37(4): 300–304.
- [14] DAVIS J A, GREENHALL C A, and STACEY P W. A Kalman filter clock algorithm for use in the presence of flicker frequency modulation noise[J]. *Metrologia*, 2005, 42(1): 1–10. doi: [10.1088/0026-1394/42/1/001](https://doi.org/10.1088/0026-1394/42/1/001).
- [15] PANFILO G and TAVELLA P. Atomic clock prediction based on stochastic differential equations[J]. *Metrologia*, 2008, 45(6): 108–116. doi: [10.1088/0026-1394/45/6/S16](https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/6/S16).
- [16] FELBACH D, SOUALLE F, STOPFKUCHEN L, *et al.* Clock monitoring and control units for navigation satellites[C]. Proceedings of 2010 IEEE International Frequency Control Symposium, Newport Beach, USA, 2010: 474–479.
- [17] 白杉杉, 董绍武, 赵书红, 等. 主动型氢原子钟性能监测及评估方法研究[J]. 天文学报, 2018, 59(6): 56–66.  
BAI Shanshan, DONG Shaowu, ZHAO Shuhong, *et al.* Research on the method of performance monitoring and evaluation for active hydrogen maser[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2018, 59(6): 56–66.
- [18] BAI Shanshan, ZHAO Shuhong, DONG Shaowu, *et al.* Joint time scale algorithm of UTC(NTSC) and UTC(SU)[C]. European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), Olympic Valley, USA, 2018: 197–201.
- [19] ZUCCA C and 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. doi: [10.1109/TUFFC.2005.1406554](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2005.1406554).
- [20] 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. doi: [10.1109/TUFFC.2010.1687](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1687).

- [21] ZHAO Shuhong, YIN Dongshan, DONG Shaowu, *et al.* A new steering strategy for UTC(NTSC)[C]. Proceedings of the 1st IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS), Taipei, China, 2014: 210–213.

赵书红: 女, 1984年生, 副研究员, 博士, 研究方向为UTC(NTSC)时间保持技术、原子钟频率驾驭技术、北斗系统时间基准和时间传递方法.

董绍武: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为标准时间的产生与保持(守时)技术、GNSS时间系统.

白杉杉: 女, 1987年生, 助理研究员, 博士生, 研究方向为原子钟频率驾驭技术、时间尺度算法.

高 喆: 女, 1991年生, 研究实习员, 硕士生, 研究方向为高精度卫星双向时间传递.

责任编辑: 马秀强