

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312202

# 钙离子光时标守时技术研究\*

史丰丰<sup>1</sup>,程梦飞<sup>1</sup>,王德豪<sup>2</sup>,徐金锋<sup>1</sup>,李国俊<sup>1</sup>

(1. 北京卫星导航中心 北京 100094; 2. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 武汉 430071)

**摘要:**近年来光学频率标准(光钟)技术快速发展,国际时间频率咨询委员会计划于2030年用光钟重新定义“秒”,并提出了技术路线,光时标的研究也成为时间频率领域的研究热点。利用钙离子光钟驾驭微波氢钟,开展高精度光时标信号TS(Ca<sup>+</sup>)产生技术研究。结果表明,钙离子光钟准连续稳定运行率可达87%,稳定度达 $8 \times 10^{-17}/\text{day}$ 。对光钟和氢钟的频率比对测量分别采用微波频率锁定方案(上转换)和光子超稳微波方案(下转换),上转换方案引入了并放大了噪声,测量数据比氢钟稳定度差,而下转换方案产生超稳微波,测量数据频率稳定度与氢钟几乎重合,实现了光钟对氢钟的准确测量。将测量得到的频差数据直接置入相位微跃计,产生光时标TS(Ca<sup>+</sup>),独立运行的光时标TS(Ca<sup>+</sup>)在一个月与UTC偏差保持在0.6 ns以内。研究成果为报送秒定义数据和驾驭自由原子时TAI提供技术基础,为提升我国光时标守时能力提供了宝贵的技术支持和工程经验。

**关键词:**钙离子光钟;光时标;上转换测量;下转换测量;光钟驾驭微波钟

**中图分类号:** TH714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Research on the optical time scale based on an optical clock with the single <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> ion

Shi Fengfeng<sup>1</sup>, Cheng Mengfei<sup>1</sup>, Wang Dehao<sup>2</sup>, Xu Jinfeng<sup>1</sup>, Li Guojun<sup>1</sup>

(1. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China; 2. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Optical atomic clocks have been improved greatly in recent years. The Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) proposes the redefinition of the second in the International System of Units SI based on the optical clocks by 2030. The technology plans and practical steps are discussed. Therefore, the development of optical time scales with optical clocks and microwave clocks is the leading research topic at home and abroad. By an optical clock with a single <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> ion (TOC-729) steering a microwave clock H, we study the optical time scale TS(Ca<sup>+</sup>). The uptime of this TOC-729 is 87% over 7 months, and the frequency instability is  $8 \times 10^{-17}/\text{day}$  expressed by the Allan deviation. There are two measurement methods of the optical clock TOC-729 relative to the microwave clock H, namely locking an optical frequency to a microwave clock frequency (the up-converting method) and conversion of an optical clock frequency into the RF range (the down-converting method). The up-converting method amplifies noises from the microwave clock H. The frequency instability of measurement data is inferior to the microwave clock H. For the down-converting method, the frequency instability of measurement data is almost the same as the microwave clock H, showing that the optical clock can accurately measure the microwave clock H with this method. The free-running H clock is compared with the signal down-converted from TOC-729 by recording the phase difference, and the frequency offset in H clock frequency is corrected by a phase micro stepper. The optical time scale (Ca<sup>+</sup>) is independent, which steering to UTC is 0.6 ns in a month. The research is significant to establish and maintain the international time scale TAI with highly stable optical standards redefining the second, and the work can also improve and develop the national time scales in China.

**Keywords:** an optical clock with a single <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> ion; an optical time scale; the up-converting method; the down-converting method; an optical clock steering a microwave clock

## 0 引言

时间是国际单位值(SI)的7个基本单位之一,高精度的时间频率系统已经成为国家关键基础设施,航空航天、卫星导航、金融、电力、通信等各个领域都需要高精度的时间基准。从天文时到原子时,近现代科学技术飞速发展,对时间的测量越来越精确。目前国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)保持的协调世界时(coordinated universal time, UTC)是国际通用的时间基准。基于分布于全球多个实验室的自由运转的600余台原子钟加权平均计算出自由原子时(echelle atomique libre, EAL),经基准频标驾驭形成国际原子时(international atomic time, TAI),在TAI基础上引入闰秒与世界时UT1接近,形成UTC。UTC的基准频标选用实验室喷泉钟来复现秒定义,成为一级频率标准,目前铯原子喷泉钟的系统不确定度在 $2 \times 10^{-16}$ 左右<sup>[1-2]</sup>。

近年来随着原子物理的发展,基于光学频率跃迁的光学频率标准(即光钟)被提出。实现光钟主要分为两种技术路线,分别是单离子光钟和基于大量中性原子的光晶格钟。离子光钟基于单个离子的冷确和俘获,选用 $^{199}\text{Hg}^+$ 、 $^{117}\text{In}^+$ 、 $^{40}\text{Ca}^+$ 、 $^{27}\text{Al}^+$ 、 $^{171}\text{Yb}^+$ 、 $^{88}\text{Sr}^+$ 等,光晶格钟是将大量中性原子囚禁在光晶格中,主要选用铯原子( $^{87}\text{Sr}$ 、 $^{85}\text{Sr}$ )和镱原子( $^{171}\text{Yb}$ )。由于冷原子物理、激光稳频和飞秒光学频率梳等技术的发展,光钟在近20年取得了令人瞩目的发展,系统不确定度达到了 $\times 10^{-18}$ 量级,甚至 $\times 10^{-19}$ 量级,比微波基准钟高2个数量级<sup>[3-4]</sup>。

随着光钟技术的发展,国际时间频率咨询委员会(Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF)开始考虑利用光钟来重新定义“秒”,并初步计划于2030年第29届国际计量大会上修改秒定义。CCTF提出了用光钟定义秒的技术路线:光钟系统相对频率不确定度要小于 $2 \times 10^{-18}$ ,频率比对测量的不确定度要小于 $5 \times 10^{-18}$ ,具备稳定运行和常规驾驭TAI的能力。截至2023年6月,共有基于5种元素的10条光频跃迁被CCTF推荐为“秒的次级表示”参考<sup>[2,5]</sup>。国际上已经有机构向CCTF报送一级和次级秒定义数据<sup>[6]</sup>。

近年来,国外的科学家们开始利用光钟驾驭微波钟进行守时研究<sup>[7-11]</sup>。2016年,法国巴黎天文台国家计量实验室(LNE-SYRTE)向BIPM报送了其两台铯光钟的数据,作为二级秒定义数据在国际时间公报Circular T公布。这是光钟首次向国际计量局报送次级秒定义数据,获准参与驾驭TAI<sup>[6]</sup>。同样在2016年,日本国家信息通信技术研究所(NICT)也开始向Circular T报送铯光钟的数据,并参与驾驭TAI<sup>[7]</sup>。2018年,美国国家标准与技术研究院(NIST)从理论上梳理了光钟驾驭氢钟组时标的

关键理论问题,提出了光钟驾驭氢钟守时的指导方法,并报送了镱原子光晶格钟的次级秒定义数据<sup>[8-10]</sup>。

目前,国内最前沿守时系统还处于第二代,即中国计量院建立的铯喷泉钟驾驭微波钟守时系统,其基准钟采用自研的NIM5(不确定度为 $9 \times 10^{-16}$ ),中国计量院于2014年通过国际频率基准工作组评审,参与驾驭TAI<sup>[2]</sup>。截至目前,中国计量院仍是我国唯一参与驾驭TAI的单位<sup>[6]</sup>。开展光钟及其守时技术研究已经成为国内外时频方向研究热门<sup>[12]</sup>。

由一台小型化可搬运准连续运行的钙离子光钟、氢原子钟、飞秒光学频率梳、拍频测量单元、频率驾驭控制中心、相位微跃器、性能评估软件等,建立一套钙离子光钟驾驭氢钟的光时标TS( $\text{Ca}^+$ )系统。开展光钟和氢钟测量比对技术研究,分别采用微波频率锁定方案和光生超稳微波方案进行频率测量,开展守时驾驭算法研究,用线性拟合法进行氢钟频差预测,生成连续稳定的光时标TS( $\text{Ca}^+$ ),并进行光时标性能评估。为光时标守时技术提供工程经验和基础,为报送秒定义数据和常规驾驭TAI提供支持,提高我国标准时间守时能力。

## 1 钙离子光钟驾驭氢钟生成光时标技术

### 1.1 自动化准连续运行的小型可搬运钙离子光钟

实现光钟的小型化可搬运,根据光钟系统各个部件的功能,力、热、电磁特性对它们进行统一规划,并进一步划分为多个模块,各个模块内部独立安装和调试,模块之间采用标准的光学、电气连接方式,易于系统操作和维护,集成到立式机柜中,可整体搬运,组成一套完整的小型可搬运钙离子光钟,输出 $\lambda = 729 \text{ nm}$ 钟跃迁光信号<sup>[13-15]</sup>,如图1所示。

实现光钟长期准连续运行,关键是提高物理系统的可靠性,包括囚禁离子的稳定性和稳频激光的稳定性。囚禁离子的稳定性方面,包括离子的快速产生与单离子的高效,长时间囚禁,是光钟长期、准连续锁定的关键前提。稳频激光方面,低漂移、抗干扰的连续激光锁定是光钟长期运行的关键保障。

实现光钟自动化运行,针对光钟运行锁定中可能出现的失锁情况进行探测和分析,当光钟失锁时,能够及时判断并发出纠正信号,使光钟恢复正常锁定。包括激光失锁的判断与自动重锁,离子进入暗态后的快速恢复、单离子的高效产生与载入、囚禁参数的自动诊断与优化等等。

### 1.2 基于掺铒光纤飞秒光学频率梳的频率测量

#### 1) 微波频率锁定方案

微波频率锁定方案是指,掺铒光纤飞秒光学频率梳

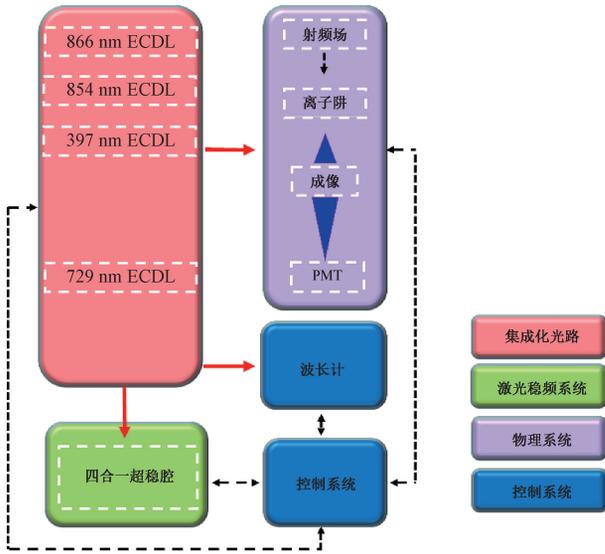


图 1 小型化可搬运钙离子光钟结构

Fig. 1 The design of a robust compact transportable optical clock with a trapped single  $^{40}\text{Ca}^+$  ion

可以锁定到微波频率上,作为绝对频率测量工具,来测量光频信号,实现光钟与氢钟的比对,也称为上变频方案<sup>[8,16-17]</sup>。

利用微波频率锁定方案产生光时标,如图 2 所示,钙离子光钟输出 729 nm 钟跃迁光信号,飞秒光学频率梳的信号锁定到氢钟 10 MHz 标准参考信号,利用光梳对光钟信号进行拍频测量,获得光钟与氢钟的相对频差  $\Delta y$ ,根据测量比对数据评估氢钟的频率准确度、频率漂移率等模型参数,构建氢钟的预报模型,结合光钟的实际运行率,利用相位调整微跃迁进行精密驾驭控制,生成连续稳定的光时标信号 TS( $\text{Ca}^+$ )。

上变频测量方案,如图 3 所示,掺铒光纤飞秒光学频率梳以氢原子钟为参考信号,可以直接锁定激光器重复频率(即相邻梳齿间隔)  $f_r$  和载波包络位相偏移频率  $f_0$ 。其中  $f_r$  的探测是利用光学二极管实现,  $f_0$  的探测需要对激光器输出的脉冲进行倍频程扩谱,通过  $f-2f$  干涉系统来实现,即  $f_0 = 2(nf_r + f_0) - (2nf_r + f_0)$ 。光学频率梳中第  $n$  个梳齿谱线的频率为  $f_n = n \times f_r + f_0$ ,由于光梳的序列

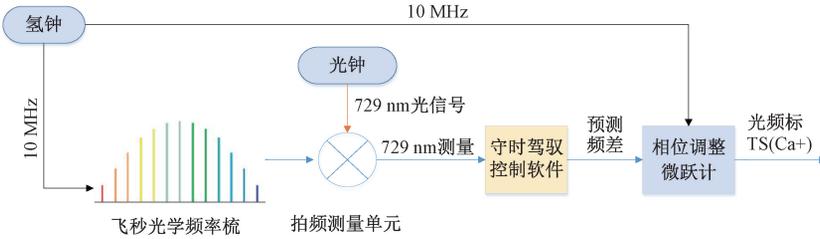


图 2 微波频率锁定方案产生光时标

Fig. 2 Generating an optical time scale using the method of locking an optical frequency to a microwave clock frequency

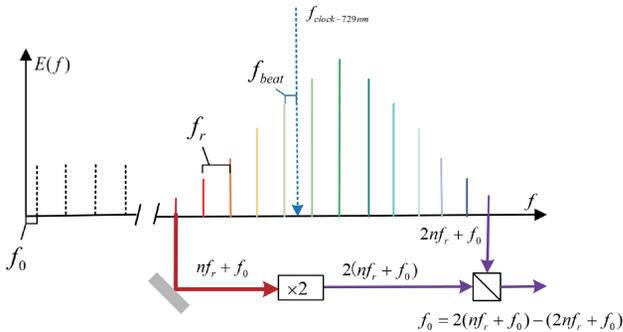


图 3 上变频测量方案

Fig. 3 The up-converting method to measure the optical clock relative to the microwave clock H

数  $n$  较大(可达上百万量级),  $f_r$  锁定到微波频率后,梳齿频率会将微波频率噪声放大。将钙离子光钟 729 nm 光信号引入到光梳外部的拍频测量单元,可以得到拍频测量频率  $f_{beat}$ 。

经高程修正的波长  $\lambda = 729 \text{ nm}$  钙离子光信号的绝对频率  $f_{729\text{绝对频率}}$ ,  $f_{beat} = f_{729\text{绝对频率}} - f_0$ 。因此,可以计算得出 729 nm 钙离子光钟的频率测量值,如式(1)所示,其中梳齿序数的计算方法是  $N = \left\lfloor \frac{f_{729 \text{ nm绝对频率}}}{f_r} \right\rfloor$ 。

$$f_{729\text{测量频率}} = N \times f_r + f_0 + f_{beat} \quad (1)$$

根据拍频测量结果,可以得到钙离子光钟与氢钟的相对频差值  $\Delta f$ ,如式(2)所示。

$$\Delta y = \frac{f_{729\text{测量频率}} - f_{729\text{绝对频率}}}{f_{729\text{绝对频率}}} \quad (2)$$

### 2) 光生超稳微波方案

光生微波方案是指,将光钟信号转换到微波频率上,获得稳定度继承光频的超稳微波,即也称下变频方案。主要有两种方法,一种方法是将光梳  $f_r$  窄锁到超稳光信号,将载波包络位相偏移频率  $f_0$ 、拍频频率  $f_{beat}$  分别锁定在微波频率上,光电探测器获得光梳重复频率  $f_r$  的  $M$  次谐波,参考式(1),梳齿序数会将微波频率的噪声减小,

获得超稳微波<sup>[18-19]</sup>。另一种是采用以光梳作为传递振荡器,获得超稳微波<sup>[17,20-21]</sup>,驾驭氢钟产生光时标,如图4所示。

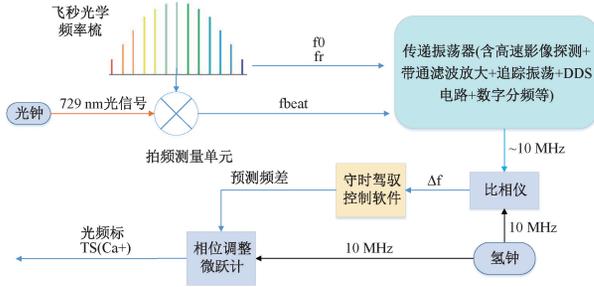


图4 光生超稳微波产生光时标

Fig. 4 Generating an optical time scale using conversion of an optical clock frequency into the RF range

下变频测量方案采用第2种传递震荡方案,如图5所示<sup>[20-21]</sup>,将钙离子光钟 $\lambda = 729 \text{ nm}$ 光信号引入到光梳外部的拍频测量单元,高速影像探测器分别探测到光梳的激光器重复频率 $f_r$ 、载波包络位相偏移频率 $f_0$ 和拍频测量频率 $f_{beat}$ 。传递振荡器是以光梳重频的 $M$ 次谐波为基础,联合 $(f_0 + f_b)$ ,通过微波频率变换合成超稳微波,微波频率比例变换 $k$ 通过直接数字频率合成器 DDS 电路实现,合成超稳微波经分频得到 10 MHz 超稳微波。

$$\begin{aligned} f_{out} &= k \times f_{laser} \\ &= k \times (N \times f_r + f_0 + f_b) \\ &= k \times N \times (f_r + f_0 + f_b) - k \times (N-1) \times (f_0 + f_b) \end{aligned}$$

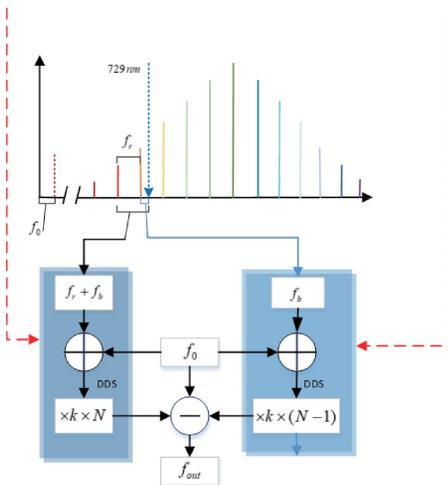


图5 下变频测量方案

Fig. 5 The down-converting method to measure the optical clock relative to the microwave clock H

根据传递振荡方案获得光频的任意比例分频, $k$ 是分频系数,如式(3)所示, $f_{laser}$ 是钙离子光钟 729 nm 光信

号的频率值。

$$f_{out} = M \times f_r + k \times (f_0 + f_b) = k \times f_{laser} \quad (3)$$

在比相仪中,与氢钟信号进行比较,得到钙离子光钟与氢钟的相对频差值 $\Delta y$ ,如式(4)所示。

$$\Delta y = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{f_{\text{氢钟}} - 10 \text{ MHz} - f_{\text{光生微波}} - 10 \text{ MHz}}{f_{\text{光生微波}} - 10 \text{ MHz}} \quad (4)$$

根据评估的氢钟参数,预测氢钟频差,经相位调整微跃计对氢钟进行驾驭,生成连续稳定的光时标信号 TS(Ca<sup>+</sup>)。

### 1.3 光钟驾驭氢钟的守时策略

氢钟作为守时钟,提供连续稳定的信号,光钟作为基准钟,评估和驾驭氢钟,生成本地物理时标。目前,光钟驾驭微波钟守时的驾驭算法有两种思路,一是基于窗口化线性拟合方法的频差模型,二是基于卡尔曼滤波方法的频差模型。第1种方法是指,积累钙离子光钟与氢钟的相对频差比对测量数据,经一段时间测量计算可直接预测钙离子光钟与氢钟的相对频差值。第2种方法是指,根据积累的比对测量数据,分析氢钟信号的噪声分布和漂移情况,预测氢钟频差<sup>[19]</sup>。研究基于频差数据开展氢钟“紧驾驭”时标方法,重点研究驾驭周期、驾驭频度对氢钟稳定度影响,并比较这两种方法生成的光时标性能。

当光钟系统正常工作时,利用氢钟与光钟的频率比对,由守时控制驾驭软件计算出氢钟的频率控制量,通过相位微跃器对氢钟进行控制,从而实现对氢钟的驯服。当光钟系统不能正常工作时,根据驯服的历史数据,对氢钟保持过程进行适当补偿,提高其频率准确度。通过分析驾驭周期、驾驭频率等参数对驾驭结果的影响,最终确定驾驭算法的最优参数,提高光时标 TS(Ca<sup>+</sup>)稳定性。

## 2 实验结果

### 2.1 光钟运行率

光钟运行率是指在给定的一段时间内,光钟能够给出正常频率输出量值的时长与该段时间总时长的比值。或是在某个考察时间段内,光钟能够给出正常频率输出量值的概率或时间占有率的期望值<sup>[22]</sup>,是光钟稳定运行的重要考核指标之一。

如图6所示,小型化钙离子光钟经搬运安装后,自2023年3月~11月准连续稳定运行230天,其中5天激光器故障导致光钟信号中断,在连续运行的225天中,平均日运行率达87%。

### 2.2 光钟频率稳定度

光钟稳定度测量方式可采用自比对和多台钟相互比对的方式。自比方式用于单台光钟的自评估,两台光

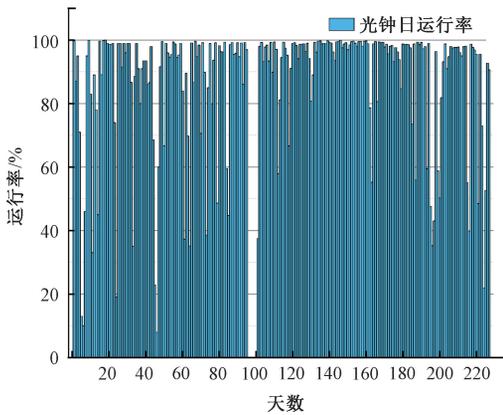


图 6 钙离子光钟运行率统计图

Fig. 6 The uptime of this robust compact transportable optical clock

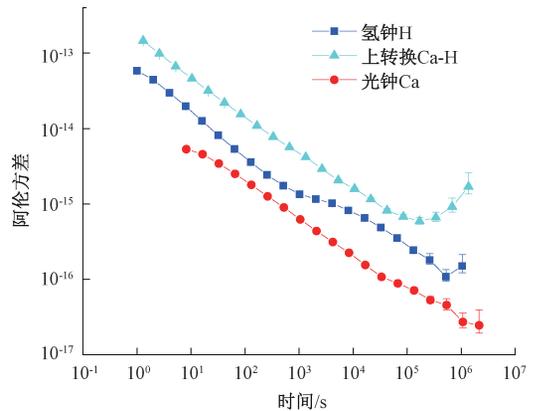


图 8 上转换 Ca-H 测量信号稳定度

Fig. 8 The frequency instability of measure data Ca-H in the up-converting method

钟互比获得的是较差光钟的稳定度,3 台以上光钟两两互比,可获得每台光钟的稳定度<sup>[22-23]</sup>。受条件限制,采用自比对方式评估单台光钟的稳定度。

如图 7 所示,采用自比对方式评估钙离子光钟频率稳定度,由 Allan 方差计算,2023 年 4 月~10 月运行期间,频率稳定度可达  $8 \times 10^{-17}/\text{day}$ 。

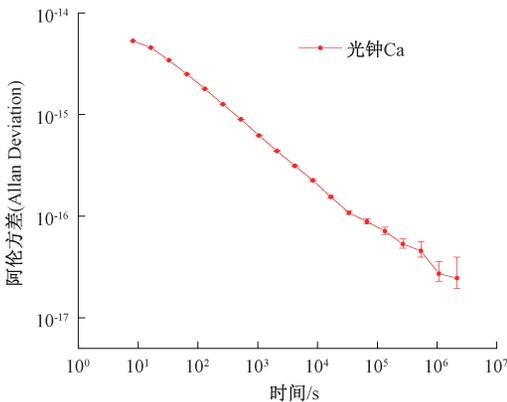


图 7 钙离子光钟的自比对稳定度

Fig. 7 The frequency instability of this optical clock

### 2.3 光钟与氢钟的频率测量比对

#### 1) 微波频率锁定方案

光钟经微波频率锁定方案进行频率上转换,经拍频测量单元得到光钟测量信号与微波频率氢钟的频率比对数据,如图 8 所示,用 Allan 方差计算其频率稳定度约为  $6.5 \times 10^{-16}/\text{day}$ ,大于氢钟自身稳定度  $3 \times 10^{-16}/\text{day}$ 。测量链路中存在多种噪声源,光梳锁定电路中有噪声影响,同时光梳的重复频率  $f_r$  和载波包络位相偏移频率  $f_o$  锁定在氢钟频率上,梳齿序数较大,梳齿频率会将微波参考频率噪声放大,因此上转换后光钟与氢钟的频率测量比对数据质量比氢钟差,无法准确反映氢钟的特性。

#### 2) 光生超稳微波方案

光钟经光生超稳微波方案进行频率下转换后生成超稳微波,超稳微波信号与微波频率氢钟在比相仪中进行比对,如图 9 所示,比对的频率稳定度与氢钟几乎重合。因此实现了将光钟作为基准,对微波氢钟的准确测量,从而可以开展对氢钟频率准确度、频率漂移率等模型参数的准确评估。

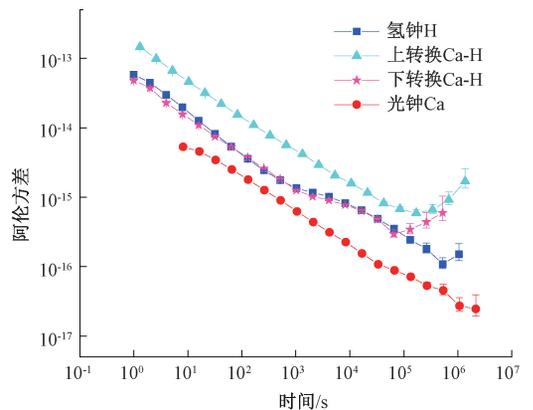


图 9 下转换 Ca-H 测量信号稳定度

Fig. 9 The frequency instability of measure data Ca-H in the down-converting method

#### 2.4 光钟驾驭氢钟策略对比

利用比相仪每天测量光生微波的 10 MHz 信号和氢钟的 10 MHz 信号,得出每天用光钟评估的氢钟频率,积累数据,利用线性拟合法,可以得出氢钟当前的频率和漂移率,如图 10 所示。每天将氢钟当前计算的频率直接置入相位微跃计,驾驭控制氢钟信号,产生光时标 TS ( $\text{Ca}^+$ ) 信号。因此,光时标的准确度、稳定度与驾驭控制方法密切相关。

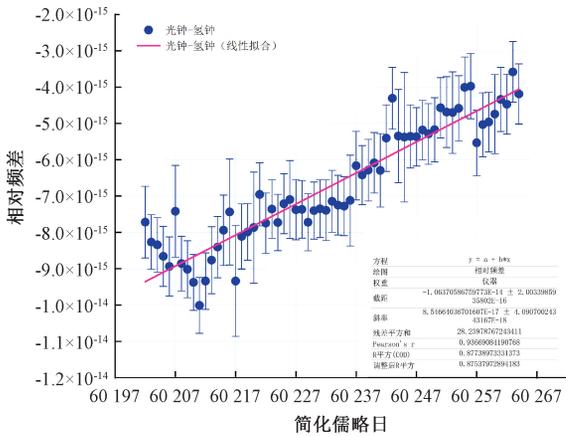


图 10 根据频率测量结果直接预测频差

Fig. 10 The frequency offset of the H clock measured by the optical clock

通过卫星链路以及每月 BIPM 公布的 Circular T 数据将光时标 TS(Ca<sup>+</sup>)与 UTC 进行比对,如图 11 所示。目前采用的溯源链路不确定度约为 0.3 ns,独立运行的光时标 TS(Ca<sup>+</sup>)一个月内与 UTC 偏差保持在 0.6 ns 以内。

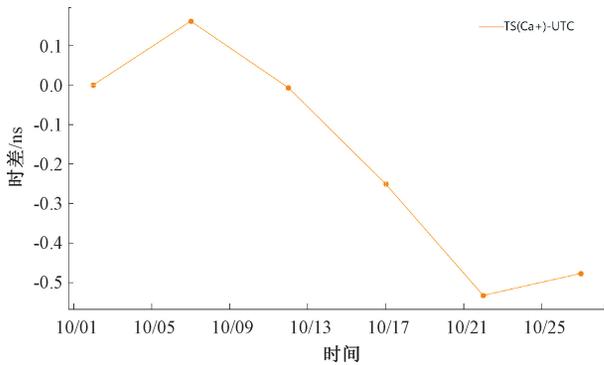


图 11 光时标 TS(Ca<sup>+</sup>)向 UTC 的溯源精度

Fig. 11 The optical time scale TS(Ca<sup>+</sup>) steering to UTC

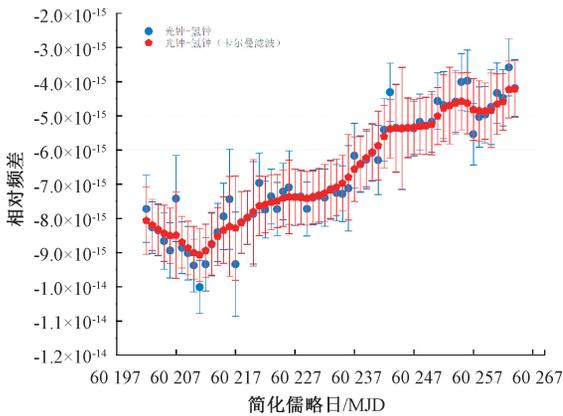


图 12 溯源驾取算法对比

Fig. 12 Algorithms comparison of steering

为进一步开展驾取控制算法的研究,将直接测量法与卡尔曼滤波法的预测频差值进行对比,如图 12 所示,

可以看到卡尔曼滤波法的频差值更加平滑。下一步实验将利用卡尔曼滤波法生成光时标,进一步评估其光时标的稳定性和溯源精度。

### 3 结 论

以一台小型化可搬运的钙离子光钟为基础,开展钙离子光时标 TS(Ca<sup>+</sup>)守时技术研究。钙离子光钟实现了自动化准连续运行,平均日运行率达 87%,自比对频率稳定度达  $8 \times 10^{-17}/\text{day}$ 。利用飞秒光学频率梳,分别采用微波频率锁定方案和光生超稳微波方案进行光钟与氢钟的信号比对测量,结果表明,微波频率锁定方案引入并放大了氢钟的噪声,而光生超稳微波方案实现了光钟对氢钟信号的准确测量。根据光钟对氢钟的频率测量结果,预测氢钟频差,生成钙离子光时标 TS(Ca<sup>+</sup>),独立运行的光时标 TS(Ca<sup>+</sup>)在一个月内在 UTC 偏差保持在 0.6 ns 以内。而采用卡尔曼滤波法预测氢钟频差更加平滑,下一步继续开展驾取算法研究下一步继续开展驾取算法研究,评估光时标性能。

### 参考文献

[ 1 ] SCHMITTBERGER B L, SCHERER D R. A review of contemporary atomic frequency standards [ J ]. Atomic Physics, 2020, DOI: 10. 48550/arXiv. 2004. 09987.

[ 2 ] 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.

[ 3 ] 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, LU X T, CHANG H. Research progress of the optical frequency standard [ J ]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(11): 44-55.

[ 4 ] Draft Resolution E-On the future redefinition of the second [ R/OL ]. [ 2022-06-14 ]. <https://www.bipm.org/en/cgpm-2022>.

[ 5 ] 黄焱, 王玉琢, 林弋戈, 等. 钙离子光频标钟跃迁绝对频率测量 [ J ]. 计测技术, 2022, 42(5): 86-96. HUANG Y, WANG Y Z, LIN Y G, et al. Absolute frequency measurement of Ca<sup>+</sup> optical frequency standard clock transition [ J ]. Metrology and Measurement Technology, 2022, 42(5): 86-96.

[ 6 ] Primary and secondary frequency standards [ EB/OL ]. [ 2023-11-15 ]. [https://webtai.bipm.org/database/show\\_psf.html](https://webtai.bipm.org/database/show_psf.html).

[ 7 ] HIDEKAZU H, FUMIMARU N, YUKO H. Months-long

- real-time generation of a time scale based on an optical clock[J]. *Scientific Reports*, 2018,8:4243.
- [ 8 ] JIAN Y, JEFF A S, TARA F, et al. Optical-clock-based time scale [J]. *Physics Review Applied* 12, 2019: 044069.
- [ 9 ] POLI N, OATES C W, GILL P, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of modern physics*, 2015, 87:637.
- [ 10 ] MCGREW W F, ZHANG X, LEOPARDI H, et al. Towards the optical second: Verifying optical clocks at the SI limit[J]. *Optica*, 2019,6 (4) :448.
- [ 11 ] HUIDONG K H, HEO M S, PARK CY, et al. Absolute frequency measurement of the  $^{171}\text{Yb}$  optical lattice clock at KRISS using TAI for over a year [J]. *Metrologia*, 2021, DOI:10.1088/1681-7575/ac1950.
- [ 12 ] 卢炳坤,林戈戈,方占军.我国基准光钟及其绝对频率测量[J]. *物理*, 2023,52(7) :456-466.  
LU B K, LIN Y G, FANG Z J. High precision optical clock and its absolute frequency measurement in China[J]. *Physics*, 2023,52(7) :456-466.
- [ 13 ] CAO J, YUAN J, WANG S, et al. A compact transportable optical clock with  $1 \times 10^{-17}$  uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Applied Physics Letters*, 2022,5:120.
- [ 14 ] 管桦,黄焱,高克林.钙离子光频标研究进展[J]. *物理*, 2023,52(7) :449-455.  
GUAN H, HUANG Y, GAO K L. The progress of  $^{40}\text{Ca}^+$  optical frequency standards[J]. *Physics*, 2023,52(7) :449-455.
- [ 15 ] 潘多,刘天宇,陈景标.可搬运光钟研究进展及展望[J]. *计测技术*, 2023,43(3) :43-52.  
PAN D, LIU T Y, CHEN J B. Research progress and prospect of transportable optical clocks[J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2023,43(3) :43-52.
- [ 16 ] 张颜艳.掺铒光纤飞秒光梳及其在光频测量中的应用[D].北京:中国科学院大学(中国科学院国家授时中心),2018.  
ZHANG Y Y. Er-doped-fiber-based optical frequency comb: Application to optical frequency measurement[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Time Service Center of Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [ 17 ] SUTYRIN D V, GRIBOV A Y, BALAEV R I, et al. Towards an optical time scale at VNIIFTRI[J]. *Quantum Electronics*, 2022,52(6) :498-504.
- [ 18 ] ZHU L, LIN Y, WANG Y ZH, et al. Preliminary study of generating a local time scale with NIM  $^{87}\text{Sr}$  optical lattice clock[J]. *Metrologia*, 2022,59: 055007.
- [ 19 ] 朱琳,王强,王玉琢,等.光钟在产生高性能原子时标方面的应用研究[C].2023年时间频率学术会议论文集,2023.  
ZHU L, WANG Q, WANG Y ZH, et al. Research on generating high performance atomic time scale with an optical clock [C]. *Time and Frequency Symposium*, 2023.
- [ 20 ] FANG P CH, SUN H Y, WANG Y, et al. A self-reference direct-measuring scheme for precision optical frequency ratio measurement [J]. *Applied Physics B*. 2022,128:73.
- [ 21 ] 方鹏程,本地及远程的自参考光钟比对关键技术研究[D].北京:中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,2022.  
FANG P CH. Research on the key techniques of the local and remote self-reference optical clock comparison [D] Beijing: Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Science, 2022.
- [ 22 ] 中国计量科学研究院.光钟性能表征及测量方法:GB/T 20214287-T-469[S]. 国家标准化管理委员会, 2023.  
National Institute of Metrology. Method to characterize and measure the performance of optical clocks: GB/T 20214287-T-469 [S]. Standardization Administration of China, 2023.
- [ 23 ] 卢晓同,常宏.光晶格原子钟研究进展[J]. *光学学报*, 2022,42(3) :60-75.  
LU X T, CHANG H. Progress of optical lattice atomic clocks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(3) :60-75.

## 作者简介



史丰丰,1998年于西安电子科技大学获得学士学位,现为北京卫星导航中心正高级工程师,主要研究方向为时间频率技术。

E-mail: fengfeng\_shi@163.com

**Shi Fengfeng** received his B.Sc. degree from Xi'an University of Electronic Technology in 1998. He is currently a senior engineer at Beijing Satellite Navigation Center. His main research interests include clocks, time, and frequency.



程梦飞(通信作者),2010年于北京航空航天大学获得学士学位,2012年于国防科技大学获得硕士学位,现为北京卫星导航中心工程师,主要研究方向为时间频率技术。

E-mail: cmf100@163.com

**Cheng Mengfei** (Corresponding author) received her B.Sc. degree from Beihang University in 2010, and received her M.Sc. degree from National University of Defense Technology in 2012. She is currently an engineer at Beijing Satellite Navigation Center. Her main research interests include clocks, time, and frequency.