国家授时中心冷原子光晶格钟 NTSC-Sr2 的研制和绝对频率测量

郭峰 [1)] 卢晓同 [1)2)] 常宏 [1) 2†)]

1)（中国科学院国家授时中心，西安 710600）

2)（中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049）

摘 要

本文系统介绍中国科学院国家授时中心冷原子锶光晶格钟（NTSC-Sr2）的研制、系统评估及新增绝对频率测量结果。针对黑体辐射频移、晶格光交流斯塔克频移、原子隧穿和直流斯塔克频移等限制中性原子光钟准确度的主要因素，研制了带主动温控的铜质黑体辐射屏蔽腔、可移动浅光晶格和真空内导电屏蔽结构等。激光冷却后的 ^{87}Sr 原子由移动光晶格输运约 17 mm 进入温度稳定在 273.15 K 附近的屏蔽腔，在 39.8 E_R 工作阱深下进行钟跃迁探测。通过交替自比对技术得到单钟稳定度为 3.6×10^{-16} $(\tau/s)^{-1/2}$。系统评估给出总频移不确定度 2.0×10^{-18}。在连续一年的光钟溯源国际原子时数据基础上，新增 Circular T 461、462 和 464 三个测量月，累计纳入 15 个月数据，平均运行率为 28.3%，测得 ^{87}Sr $^1S_0$-$^3P_0$ 跃迁绝对频率为 429 228 004 229 872.97(6) Hz，相对不确定度 1.5×10^{-16}。上述结果表明，NTSC-Sr2 已形成从装置运行、系统频移评估到 SI 秒溯源的完整测量能力，可为国际原子时校准和秒定义变更提供独立数据。

关键词：锶光晶格钟；系统频移；黑体辐射频移；绝对频率；国际原子时

基金：合肥国家实验室/科技创新 2030-“量子通信和量子计算机”项目（批准号：2021ZD0300902）；创新人才推进计划-陕西省青年科技新星（批准号：2025ZC-KJXX-112）和中国科学院重大科技基础设施运行维护项目（批准号：2024000014）资助的课题。

† 通信作者.E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

第一作者.E-mail: guofeng@ntsc.ac.cn

1 引言

原子钟通过将振荡器频率锁定到原子内部能级跃迁实现时间频率基准。光学跃迁频率较铯原子基态超精细跃迁高约 5 个数量级，配合窄线宽激光和量子态控制，光钟的稳定度与系统不确定度已进入 10^{-18} 甚至 10^{-19} 量级[1-6]。锶光晶格钟同时囚禁大量中性原子，并在魔术波长附近抑制晶格光对基态和激发态的交流斯塔克频移，因而兼具

较高信噪比和较低系统频移。其应用已由时间频率计量拓展至相对论测地学、基本常数变化检验和暗物质探测等方向[7-10]。

国际计量委员会 (BIPM) 提出的秒定义变更路线图要求候选光学频标具备可复现的低不确定度、不同实验室之间高一致性的频率比对结果，以及对国际原子时和秒长校准的持续贡献[11,12]。对于 ^{87}Sr 光晶格钟，黑体辐射频移和晶格交流斯塔克频移通常是系统不确定度的主要来源。降低前者需要精确测量原子周围的有效辐射温度并控制温度不均匀性；降低后者则需要在浅阱深下运行并准确确定魔术波长、高阶极化率和原子运动平均效应[13-16]。但浅晶格会增强晶格格点间隧穿和退相干效应，因此还需利用重力倾斜形成 Wannier-Stark 态，或采用其他手段破坏相邻格点的简并[15,17]。

国家授时中心已分别报道 NTSC-Sr2 的实验系统、系统频移评估以及基于 TAI 的一年期绝对频率测量[18-20]。本文在上述工作的基础上，统一给出装置、稳定度和系统频移评估方法，并新增 Circular T 461、462 和 464 三个测量月，将绝对频率测量数据扩展至 15 个月。

2 NTSC-Sr2 光晶格钟实验系统

2.1 真空物理系统与黑体辐射屏蔽腔

锶原子炉、二维光学准直腔、塞曼减速器和科学腔构成光晶格钟的真空系统。原子炉区域采用 20 L/s 离子泵以及由 100 L/s 吸气泵和 5 L/s 离子泵组成的组合泵进行抽气。在原子炉未加热的非工作状态下，由离子泵工作参数换算得到的泵端指示真空度约为 4×10^{-9} Pa。受测量位置和真空管路流导的影响，炉区实际真空度可能差于该指示值。原子炉加热至正常工作温度后，受锶原子束及附加气体影响，炉区真空度约为 2×10^{-7} Pa。科学腔采用吸气泵和离子泵组合抽气，在原子炉加热和原子装载过程中，其真空度仍维持在约 2×10^{-8} Pa，变化较小。原子炉区与科学腔之间设置差分管，以限制背景气体向科学腔传播，从而维持科学腔的超高真空环境。科学腔采用钛合金

主体，外部布置反亥姆霍兹线圈和三维亥姆霍兹线圈，分别提供磁光阱梯度磁场和量子化磁场。真空窗内表面镀氧化铟锡导电膜，与科学腔内表面、黑体屏蔽腔及接地腔体构成真空内法拉第屏蔽，以抑制绝缘表面积累电荷引起的直流斯塔克频移。

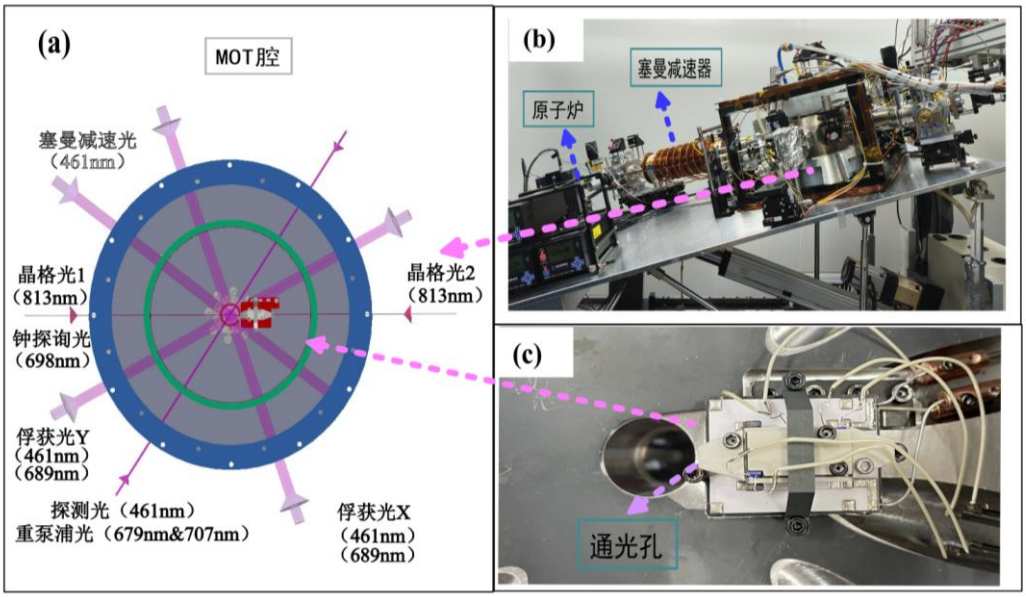


图 1 NTSC-Sr2 光晶格钟，(a)MOT 腔光路示意图；(b)真空物理系统；(c)黑体辐射屏蔽腔
Fig.1. NTSC-Sr2 optical lattice clock, (a) schematic diagram of the optical layout for the MOT chamber; (b) vacuum physical system; (c)blackbody radiation shielding chamber.

如图 1，铜质黑体辐射屏蔽腔位于磁光阱中心约 8 mm 处，通过四级帕尔贴主动控温。屏蔽腔内表面经高温氧化黑化，外侧设置隔热层。两个直径 1.00(3) mm 的通光孔用于晶格光和钟激光传输，并限制室温辐射进入。两只薄膜铂电阻监测靠近磁光阱侧和真空窗侧的温度；系统运行时屏蔽腔平均温度稳定在 273.15044(1) K，温度计校准不确定度为 10 mK，温控重复性约 2 mK，估算的腔内温度梯度小于 1 mK。原子在屏蔽腔内距近端通光孔约 10.5(2) mm 处接受钟跃迁探测。

2.2 激光冷却、态制备与钟跃迁探测

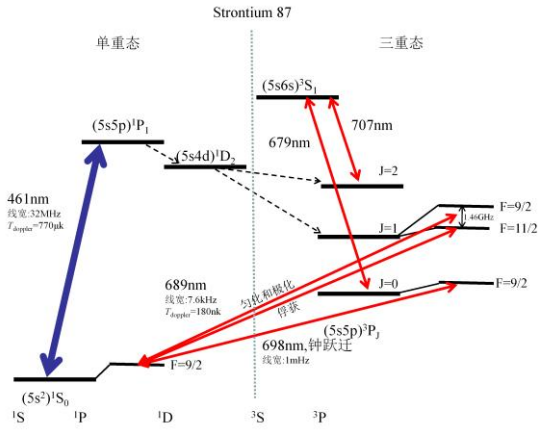


图 2 ^{87}Sr 原子冷却、态制备和钟跃迁对应的主要能级结构

Fig.2. ^{87}Sr atomic cooling, state preparation, and the corresponding energy structure of clock transitions.

如图 2，461 nm 激光对应 $5s^2\ {}^1S_0$-$5s5p\ {}^1P_1$ 跃迁，用于二维准直、塞曼减速、一级磁光阱冷却及归一化荧光探测；679 nm 和 707 nm 激光分别将布居从 $5s5p\ {}^3P_0$ 和 $5s5p\ {}^3P_2$ 亚稳态抽运至 $5s6s\ {}^3S_1$，使原子回到基态继续参与激光冷却。一级冷却持续约 220 ms，原子束经减速后以约 50 m/s 进入科学腔。随后使用 689 nm $5s^2\ {}^1S_0$-$5s5p\ {}^3P_1$ 窄线宽跃迁进行宽带频率冷却、磁场压缩和单频冷却，原子温度降至约 3 μK。

我们利用 689 nm 偏振光将原子制备到 m_F=±9/2 磁子能级上，具体采用量子化轴旋转方案：先沿横向施加偏置磁场并用 σ±光完成态制备，再线性减小横向磁场并增大纵向磁场，使量子化轴转至与晶格光及钟激光偏振平行。钟激光由 20 cm 超低膨胀玻璃腔稳频，腔精细度约 2×10^5，激光闪烁噪声极限对应频率稳定度约 4×10^{-16}。698 nm 钟激光经单模保偏光纤传输，利用光纤输出端反射光实施相位噪声补偿。对 m_F=+9/2 和 −9/2 两条 π 跃迁交替探测并取平均，从而消除一阶塞曼频移。

2.3 可移动浅光晶格

如图 3，一维光晶格由两束反向传播的 813 nm 激光形成。晶格激光经 0.2 nm 带通滤光片抑制放大器自发辐射，并锁定到光学频率梳。两束晶格光分别由声光调制器移频，共用同一信号源保证相干性。取晶格光 1 中约 4%的功率的激光与晶格光 2 光纤中

的参考光在相位探测参考面形成拍频信号，用于测量两束晶格光的相对光学相位，并反馈调节其中一路声光调制器，使两束光的残余相位差小于 4 mrad。晶格轴与重力方向夹角设为 75°，重力势能差打破相邻格点简并并形成 Wannier-Stark 态，使系统可在浅晶格条件下运行。整套装置安装在可转动不锈钢平台上，利用液压支撑调节晶格轴与重力方向的夹角。

原子最初装载于 124 E_R 深度的晶格中，随后在 5 ms 内降至 40 E_R 附近并保持 10 ms，以滤除温度较高的原子，再调节至工作阱深 39.8 E_R，晶格阱深通过轴向振动边带谱确定。移动晶格通过改变一路晶格光的频率实现：当两束反向传播光的频差为 Δf 时，晶格中的原子以速度 $v=\lambda\Delta f/2$ 运动。频率在 5 ms 内线性变化至 1 MHz，保持 40 ms 后再于 5 ms 内回到零，使原子输运约 17.29 mm 进入黑体屏蔽腔；优化加减速轨迹后约 50%的原子得以保留[21]。探测完成后，原子沿相反轨迹移出屏蔽腔，并以三次 461 nm 荧光脉冲测得归一化跃迁几率。

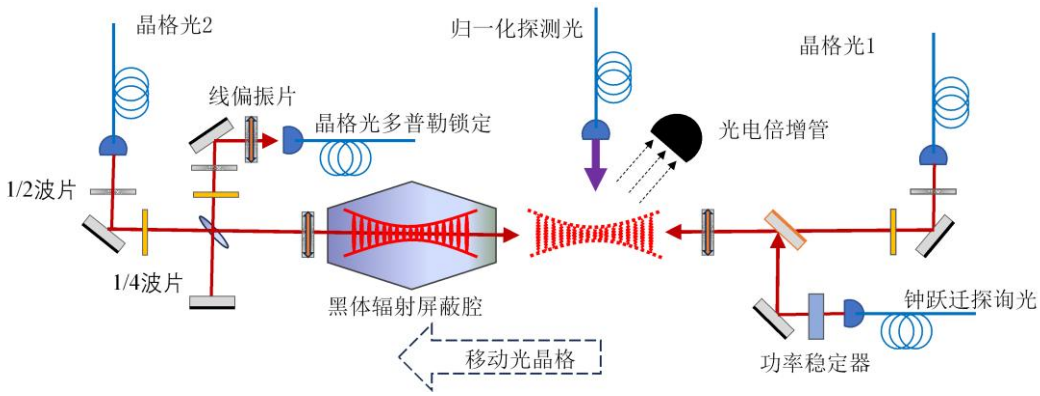


图 3 黑体辐射屏蔽腔中的光路与相位稳定

Fig.3. Optical path and phase locking in a blackbody radiation shielded chamber.

3 频率稳定度

在约 40 E_R 阱深、约 1000 个原子和 400 ms Rabi 探测时间下，钟跃迁载波线宽为 2.5 Hz，接近 2.2 Hz 的傅里叶极限。通过两套数字伺服交替锁定同一钟跃迁谱的半高点，对两路锁定频率之差进行 Allan 偏差分析。在假设两路伺服系统非共模噪声互不相关时，

等效单路锁定频率稳定度由差频 Allan 偏差除以 $\sqrt{2}$ 得到。由于两路伺服共用原子制备、囚禁与探测系统以及同一钟激光，该结果并非两台独立光钟的比对结果，不能独立表征共模钟激光噪声和长期系统频移漂移，而用于评估当前运行参数下伺服与探测过程的短期性能。如图 4，由交替自比对推得的单路锁定频率稳定度为 $3.6\times10^{-16}(\tau/\mathrm{s})^{-1/2}$，略高于由钟激光噪声和实验占空比估算的 Dick 极限 $2.8\times10^{-16}(\tau/\mathrm{s})^{-1/2}$ [22]。

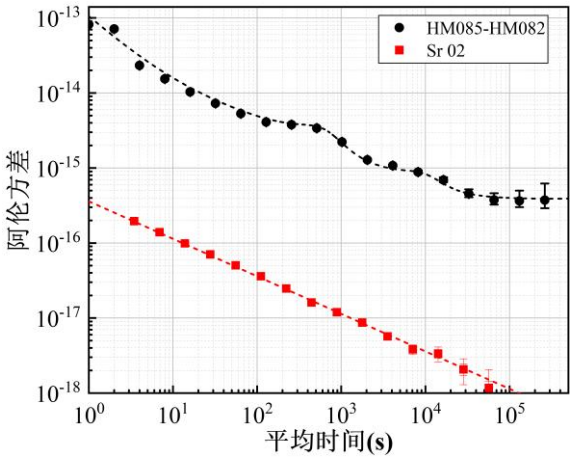


图 4 NTSC-Sr2 交替自比对推得的单路锁定频率稳定度，以及氢钟 HM085-HM082 的频率稳定度
Fig.4. Comparison between the single-servo fractional-frequency instability of NTSC-Sr2 optical lattice clock and the frequency instability of HM085-HM082 hydrogen clocks.

4 系统频移评估

4.1 黑体辐射频移

黑体辐射电场通过原子钟跃迁上下能级的差分动态极化率产生交流斯塔克频移。光晶格钟的黑体辐射频移分为静态项与动态项。黑体辐射引起的钟跃迁频移可表示为

$$\Delta\nu = \nu^{stat}\left(\frac{T}{T_0}\right)^4 + \nu^{dyn}(T) \tag{1}$$

以 T_0=300 K 为参考温度，静态频移系数为 ν^{stat}=−2.13023(6) Hz；动态项依据 $^3D_1$ 态寿命、813 nm 和 390 nm 魔术波长及静态极化率等实验数据进行自洽拟合，并通过 10000 次蒙特卡洛采样输入不确定度。300 K 处动态修正为−153.13(27) mHz，与已有高精度评估一致[23-26]。

在 273.15044 K 运行温度下，屏蔽腔自身贡献−3605.60(37)×10^{-18}。室温环境温度为 20.9(5) ℃，经两个小孔泄漏的有效立体角为 2.92(9)π msr，对应频移为−2.99(11)×10^{-18}。温度计校准、控温重复性和可能的温度梯度合计引入 0.56×10^{-18} 不确定度；内壁多次反射的蒙特卡洛光线追迹贡献 0.18×10^{-18}。总黑体辐射频移为−3608.59×10^{-18}，不确定度 0.70×10^{-18}。

4.2 密度频移与晶格交流斯塔克频移

自旋极化费米原子中的密度频移主要由 p 波相互作用产生。通过交替改变蓝磁光阱装载时间调制原子数，并保持谱线激发率、温度和阱深尽量不变，在两周内完成 9 组测量。工作阱深 39.8 E_R、平均原子数约 1000 时，得到密度频移−5.43(48)×10^{-18} [27-32]。

晶格交流斯塔克频移是采用热平均模型通过在 5 个晶格光频率下测量不同阱深相对于 39.8 E_R 参考阱深的差分频移评估，具体为

$$\frac{\Delta\nu_L}{\nu_{Sr}} = -\left(\frac{\partial\alpha^*}{\partial\nu_{Sr}}\right)(\nu_L - \nu_{zero})U - \beta^* U^2 \tag{2}$$

其中 U 为以反冲能量 E_R 表示的晶格阱深，ν_L 为晶格光频率，ν_{zero} 为实验条件下的魔术频率，$\partial\alpha^*/\partial\nu_L$ 和 β^* 分别表征有效差分极化率斜率与超极化率贡献，并利用按 $U^{5/4}$ 标度拟合的密度频移逐点修正。拟合得到魔术频率 ν_{zero}=368 554 468.2(11) MHz。晶格频率设为该值且阱深为 39.8(5) E_R 时，频移为−0.41×10^{-18}，不确定度 1.56×10^{-18} [33]。

4.3 其他系统频移

系统的晶格寿命为 4.7(1) s。按背景气体主要为氢分子估算，背景气体碰撞频移为 −6.38×10^{-18}。一阶塞曼频移通过平均 m_F=±9/2 跃迁消除，典型塞曼劈裂 ΔS =389.21 Hz 和二阶系数 β_{Z2}=−2.456(3)×10^{-7} Hz^{-1} 对应二阶塞曼频移 $\Delta\nu_{Z2}=\beta_{Z2}(\Delta S)^2$=−86.68×10^{-18}，不确定度 0.11×10^{-18}。

两束晶格光的相对相位主动稳定，但晶格光、钟激光及光纤相噪补偿参考面之间仍存在未补偿光程。按环境温度变化率 1 K/h 保守估计，一阶 Doppler 频移不确定度为

0.5×10^{-18}。真空窗 ITO 膜、黑体屏蔽腔氧化层和腔内黑化金属片均具有足够电导率，接地后将直流斯塔克频移限制在 0.1×10^{-18} 以下。75°倾斜晶格中相邻 Wannier-Stark 边带间隔约 226 Hz，由载波与一阶边带 Rabi 频率估算的隧穿频移为 0.011×10^{-18}。线牵引、伺服误差、探测光交流斯塔克频移和声光调制器相位啁啾均控制在 10^{-19} 量级或以下。

各个系统频移分量视为相互独立，总修正量为各项修正的代数和，总的不确定度按各项不确定度的方和跟合成，得到总的系统不确定度为 2.0×10^{-18}。

表 1 NTSC-Sr2 光晶格钟系统频移及不确定度[19]

Table 1. Frequency shift and uncertainty in the NTSC-Sr2 optical lattice clock system.

效应	修正量（10^{-18}）	不确定度（10^{-18}）
黑体辐射	−3608.6	0.7
晶格光交流斯塔克	−0.4	1.6
密度	−5.4	0.5
背景气体碰撞	−6.4	0.6
一阶塞曼	0	<0.1
二阶塞曼	−86.7	0.1
一阶 Doppler	0	0.5
直流斯塔克	0	<0.1
隧穿	0	<0.1
线牵引	0	<0.1
伺服误差	0	0.1
探测光交流斯塔克	0	<0.1
AOM 相位啁啾	0	<0.1
合计	**−3707.5**	**2.0**

5 基于 TAI 的长期绝对频率测量

5.1 频率溯源链

绝对频率测量链依次链接 NTSC-Sr2 光晶格钟、氢原子钟、UTC(NTSC)、TAI 及 SI 秒。如图 5，稳频于超低膨胀腔的 698 nm 钟激光经主动相噪补偿光纤传至飞秒光学频率梳，其与频率梳齿的拍频约 60 MHz 用于锁定约 200 MHz 的重复频率。氢钟 HM085 输出的 10 MHz 信号经微波频率传递链路送至光钟实验室，作为频率梳载波包络偏移频率、拍频、计数器及各声光调制器射频源的共同参考。氢钟与 UTC(NTSC)之

间的相位差由双混频时差系统（DMTD）连续测量；UTC(NTSC)与 TAI 的频差以及 TAI 标度间隔对 SI 秒的偏差取自国际计量局发布的时频公报 Circular T[34]。

将各测量区间标记为 $T1$、$T2$ 和 $T3$ 后，光钟相对 SI 秒的频差可写为：$\Delta f_{\mathrm{OLC-SI}}=\Delta f_{\mathrm{OLC},T1-\mathrm{HM},T1}+\Delta f_{\mathrm{HM},T1-\mathrm{HM},T2}+\Delta f_{\mathrm{HM},T2-\mathrm{UTC(NTSC)},T2}+\Delta f_{\mathrm{UTC(NTSC)},T2-\mathrm{TAI},T2}+\Delta f_{\mathrm{TAI},T2-\mathrm{TAI},T3}+\Delta f_{\mathrm{TAI},T3-\mathrm{SI},T3}$。其中 $T1$ 为光钟与频率梳实际运行区间，$T2$ 为覆盖 $T1$ 且端点落在 Circular T 五日节点上的最小区间，$T3$ 为一个月的 TAI 报告区间。本次测量中 $T2=T3$，因此无需另行评估自由原子时(EAL)在不重合五日区间上的外推不确定度。

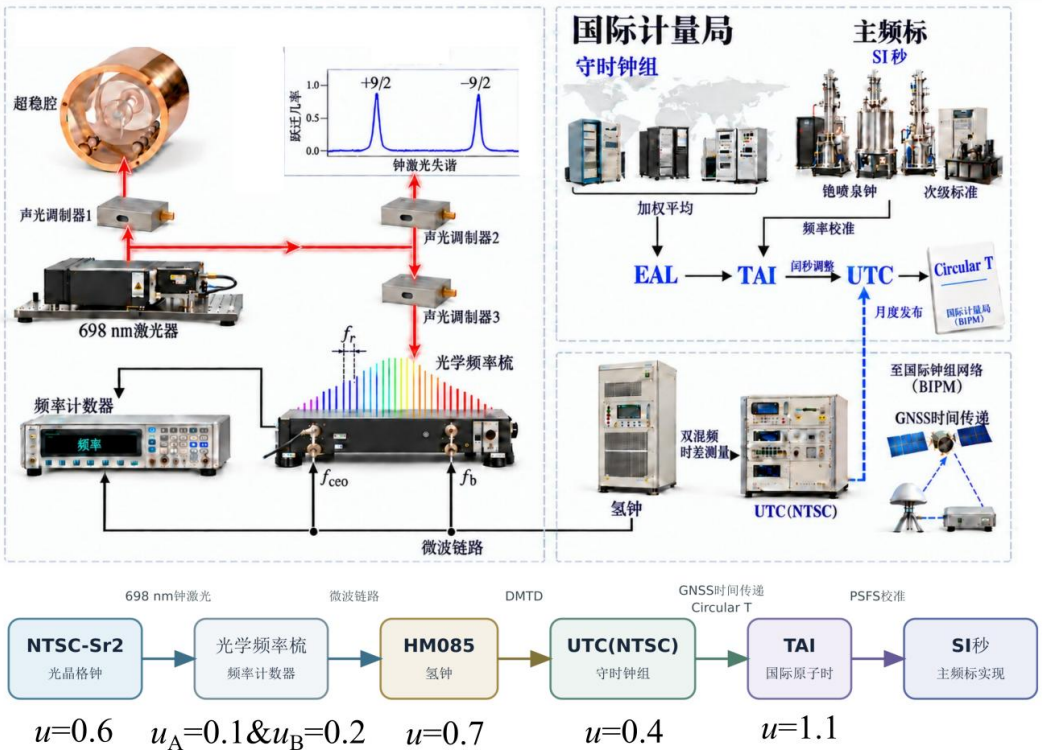


图 5 NTSC-Sr2 绝对频率测量的溯源链

Fig.5. Traceability link for NTSC-Sr2 absolute frequency measurements.

5.2 死时间、卫星链路、实验室链路和引力红移

光钟无法保证连续无间断运行，$T1$ 内存在的死时间使氢钟频率噪声映射为测量不确定度。如图 4，利用 HM085 与另一台氢钟的比对数据建立噪声模型，包括 $9.64\times10^{-14}(\tau/\mathrm{s})^{-1}$ 白相位噪声、$3.51\times10^{-14}(\tau/\mathrm{s})^{-1/2}$ 白频率噪声、$3.73\times10^{-16}(\tau/\mathrm{s})^{0}$ 闪烁频率噪声和 $1\times10^{-19}(\tau/\mathrm{s})^{1/2}$ 随机游走频率噪声，并加入与实验室温度周期相关的准周期成分。对

1000 组覆盖每月测量区间的时间序列进行蒙特卡洛模拟，15 个月加权平均后的氢钟死时间不确定度为 0.7×10^{-16} [34]。

UTC(NTSC)通过 GNSS 卫星链路与 TAI 比对，月度链路不确定度根据 Circular T 给出的五日时间链路不确定度按测量时长折算。TAI 对 SI 秒的频率偏差由参与 TAI 校准的初级和次级频率标准（PSFS）给出，15 个月测量后的平均不确定度为 1.1×10^{-16}。氢钟到光钟实验室线缆的相位波动经回环测量评估，统计不确定度为 0.1×10^{-16}；频率计数器和频率梳剩余噪声合成的实验室链路系统不确定度为 0.2×10^{-16}。

将光钟频率溯源至 TT/TAI 零参考势 W_0=62 636 856.00 m^2/s^2 时，需要修正实验室的引力势差。青岛验潮站平均海平面重力位取 W=62 636 852.95 m^2/s^2；光晶格相对 WGS84 参考椭球的大地高为 481.22(50) m，本地重力加速度沿铅垂线平均值为 9.7952(1) m/s^2。结合绝对重力仪测得的本地重力加速度和相对重力仪测得的梯度，得到相对频率引力红移修正 $524.80(55)\times10^{-16}$。潮汐引起的时变重力位按实际钟运行时段平均，其不确定度低于 1×10^{-17}。综合光钟系统不确定度，在绝对频率测量过程中光钟包含引力红移的系统不确定度为 0.6×10^{-16}。

如表 2，在 15 个月的测量周期内各项不确定度按时间链总结为光钟系统与引力红移 0.6×10^{-16}、实验室链路 0.2×10^{-16}、氢钟死时间 0.7×10^{-16}、GNSS 卫星链路 0.4×10^{-16}、PSFS 对 TAI 秒长校准 1.1×10^{-16}；按方和根合成为总的测量不确定度为 1.5×10^{-16}。

5.3 测量结果

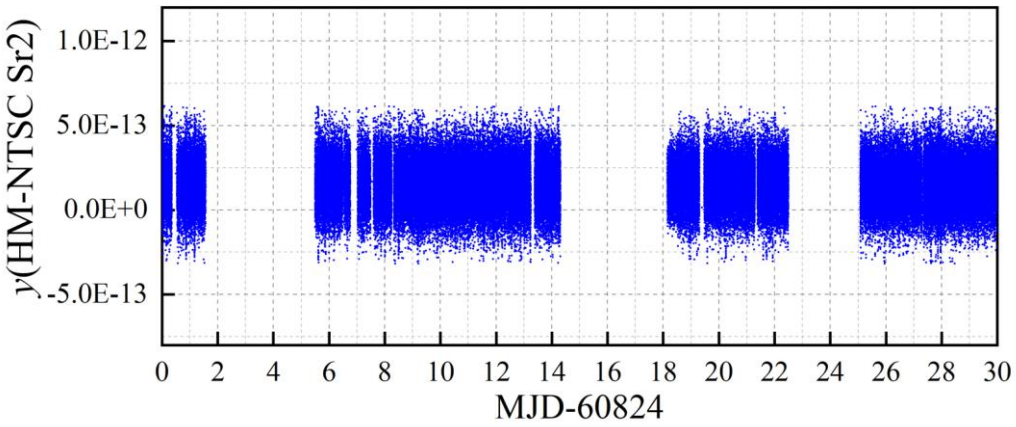


图 6 代表性测量月 Circular T 450 内 HM-NTSC Sr2 在积分时间 1s 的测量频率差，横坐标为相对于 MJD 60824 的天数

Fig.6. Representative measurements of the fractional frequency difference averaged over 1-second intervals between HM and NTSC Sr2 in Circular T 450, the x-axis represents the number of days relative to MJD 60824.

表 2 累计 15 个月的绝对频率测量数据与不确定度

Table 2. Absolute frequency measurement data and uncertainties accumulated over 15 months.

		统计不确定度			系统不确定度				
Circular T	**运行率**	**光钟/氢钟死时间**	**卫星链路**	**$u_{A/lab}$**	**光钟(含引力红移)**	**PSFS**	**$u_{B/lab}$**	**月度不确定度**	**频率尾数**
（月）	（%）	（10^{-16}）			（10^{-16}）			（10^{-16}）	（Hz）
447	33.7	3.1	1.3	0.5	0.6	1.2	0.2	3.7	873.02
448	42.0	2.4	1.3	0.5	0.6	1.1	0.2	3.1	873.08
449	34.8	3.0	1.3	0.5	0.6	1.4	0.2	3.6	872.87
450	62.1	1.6	1.3	0.5	0.6	1.1	0.2	2.5	872.83
451	17.2	3.7	2.6	0.5	0.6	1.4	0.2	4.8	872.83
452	36.1	2.6	2.6	0.5	0.6	1.1	0.2	3.9	873.13
453	46.9	2.3	1.3	0.5	0.6	1.2	0.2	3.0	872.84
454	24.7	3.2	1.1	0.5	0.6	1.0	0.2	3.6	872.96
455	12.2	4.1	1.3	0.5	0.6	1.1	0.2	4.5	873.00
456	16.5	3.9	1.3	0.5	0.6	1.3	0.2	4.4	873.09
457	32.2	2.8	2.6	0.5	0.6	1.0	0.2	4.0	872.95
458	17.4	3.8	1.3	0.5	0.6	1.0	0.2	4.2	873.05
461	18.0	3.5	1.3	0.5	0.6	0.9	0.2	3.9	873.01
462	14.0	3.9	1.3	0.5	0.6	0.9	0.2	4.4	873.12
464	17.4	3.7	1.3	0.5	0.6	0.8	0.2	4.1	872.96
平均值	**28.3**	**0.7**	**0.4**	**0.1**	**0.6**	**1.1**	**0.2**	**1.5**	**872.97**

本次测量数据包括 Circular T 447-458 以及 Circular T 461、462 和 464，共 15 个测量月，其中频率尾数为测量结果与 429 228 004 229 000 的差，平均运行率为 28.3%，累计有效运行时间约 3.1×10^{3} h。15 个月数据加权平均后，^{87}Sr $5s^2\ {}^1S_0$-$5s5p\ {}^3P_0$ 跃迁绝对频率为 429 228 004 229 872.97(6) Hz，相对测量不确定度为 1.5×10^{-16}。不确定度主要由初级/次级频标对 TAI 秒长的校准不确定度 1.1×10^{-16}、氢钟死时间不确定度 0.7×10^{-16} 以及光钟自身和实验室链路贡献构成，结果与 CIPM 推荐频率及国际其他实验室的测量结果相符。

6 讨论

NTSC Sr2 的设计将温度可控黑体屏蔽腔与浅晶格运行结合起来，前者将环境热辐射的不确定度压低至 7×10^{-19}，后者同时降低晶格光交流斯塔克频移和密度频移；倾斜光晶格形成的 Wannier-Stark 态有效抑制了浅晶格中的格点间隧穿。与通过控制整个科学腔温度的方案相比，移动光晶格将磁光阱和低温探测区分开，降低了对大体积真空系统均匀控温的要求，但需要额外控制输运效率、晶格光相位和原子位置。

目前 2.0×10^{-18} 系统不确定度主要由晶格光交流斯塔克项 1.6×10^{-18} 限制。该项的进一步降低依赖于提高魔术波长测量精度。背景气体碰撞和密度频移分别是第二、第三大贡献；改善科学腔真空度、延长光晶格寿命并降低原子密度，可在不显著降低稳定度的前提下缩小两项不确定度。一阶 Doppler 项可通过缩短未补偿光程、将晶格光与钟激光的相位参考面靠近原子以及直接监测相关温度变化进一步验证。

长期的绝对频率测量结果显示，绝对频率测量不确定度已不再由光钟本体决定，而主要受氢钟死时间及 TAI 对 SI 秒的校准限制。提高光钟长期运行率、减少频率梳失锁，并采用更稳定的本地飞轮振荡器，可直接减小比对死时间不确定度。若形成多台光钟交替运行或经光纤链路与其他光钟进行连续比对，还可同时检验系统频移复现性并增强对 TAI 的校准能力。

7 结论

国家授时中心 NTSC Sr2 锶光晶格钟已完成从实验装置建立到绝对频率测量的全链路验证。系统利用 273.15 K 主动控温黑体屏蔽腔、可移动浅光晶格、倾斜光晶格形成 Wannier-Stark 态、对向传播晶格光相位锁定和真空内导电屏蔽，通过交替自比对技术实现 $3.6\times10^{-16}(\tau/\mathrm{s})^{-1/2}$ 单钟稳定度。系统频移总的不确定度为 2.0×10^{-18}。经过 15 个月与 TAI 通过卫星链路比对，平均运行率 28.3%，累计有效运行时间约 3.1×10^{3} h。加权平均得到 ^{87}Sr 钟跃迁绝对频率 429 228 004 229 872.97(6) Hz，相对不确定度 1.5×10^{-16}。该结果与 CIPM 推荐值一致，为我国独立锶光晶格钟数据参与国际原子时校准和未来秒定义变更奠定了实验基础。

参考文献

[1] Ludlow A D, Boyd M M, Ye J, Peik E, Schmidt P O 2015 *Rev. Mod. Phys.* **87** 637

[2] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, Schäffer S A, Beloy K, Nicolodi D, Brown R C, Hinkley N, Milani G, Schioppo M, Yoon T H, Ludlow A D 2018 *Nature* **564** 87

[3] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, Sonderhouse L, Bothwell T, Goban A, Kedar D, Sanner C, Robinson J M, Marti G E, Matei D G, Legero T, Giunta M, Holzwarth R, Riehle F, Sterr U, Ye J 2019 *Nat. Photonics* **13** 714

[4] Brewer S M, Chen J S, Hankin A M, Clements E R, Chou C W, Wineland D J, Hume D B, Leibrandt D R 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 033201

[5] Aeppli A, Kim K, Warfield W, Safronova M S, Ye J 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 023401

[6] Bothwell T, Kennedy C J, Aeppli A, Kedar D, Robinson J M, Oelker E, Staron A, Ye J 2022 *Nature* **602** 420

[7] Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Yahagi T, Kokado K, Shinkai H, Katori H 2020 *Nat. Photonics* **14** 411

[8] Zheng X, Dolde J, Cambria M C, Lim H M, Kolkowitz S 2023 *Nat. Commun.* **14** 4886

[9] Filzinger M, Dörscher S, Lange R, Klose J, Steinel M, Benkler E, Peik E, Lisdat C, Huntemann N 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 253001

[10] Boulder Atomic Clock Optical Network Collaboration 2021 *Nature* **591** 564

[11] Riehle F, Gill P, Arias F, Robertsson L 2018 *Metrologia* **55** 188

[12] Dimarcq N, Gertsvolf M, Mileti G, Bize S, Oates C W, Peik E, Calonico D, Ido T, Tavella P, Meynadier F, Petit G, Panfilo G, Bartholomew J, Defraigne P, Donley E A, Hedekvist P O, Sesia I, Wouters M, Dubé P, Fang F, Levi F, Lodewyck J, Margolis H S, Newell D, Slyusarev S, Weyers S, Uzan J P, Yasuda M, Yu D H, Rieck C, Schnatz H, Hanado Y, Fujieda M, Pottie P E, Hanssen J, Malimon A, Ashby N 2024 *Metrologia* **61** 012001

[13] Ushijima I, Takamoto M, Das M, Ohkubo T, Katori H 2015 *Nat. Photonics* **9** 185

[14] Bothwell T, Kedar D, Oelker E, Robinson J M, Bromley S L, Tew W L, Ye J, Kennedy C J 2019 *Metrologia* **56** 065004

[15] Kim K, Aeppli A, Bothwell T, Ye J 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 113203

[16] Ushijima I, Takamoto M, Katori H 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 263202

[17] Lemonde P, Wolf P 2005 *Phys. Rev. A* **72** 033409

[18] Guo F, Li J A, Liu Y Y, Lu X T, Chang H 2026 *Chin. Phys. B* **35** 023702

[19] Lu X T, Guo F, Liu Y Y, Cao J, Li J A, Xia J J, Xu Q F, Lu B Q, Wang Y B, Chang H 2025 *Metrologia* **62** 035007

[20] Guo F, Liu Y Y, Xia J J, Xu Q F, Wang Y B, Lu X T, Wu W J, Chang H 2026 *Metrologia* **63** 045010

[21] Zheng X, Dolde J, Lochab V, Merriman B N, Li H, Kolkowitz S 2022 *Nature* **602** 425–430

[22] Santarelli G, Audoin C, Makdissi A, Laurent P, Dick G, Clairon A 1998 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **45** 887

[23] Beloy K, Zhang X, McGrew W F, Hinkley N, Yoon T H, Nicolodi D, Fasano R J, Schäffer S A, Brown R C, Ludlow A D 2018 *Phys. Rev. Lett.* **120** 183201

[24] Lisdat C, Dörscher S, Nosske I, Sterr U 2021 *Phys. Rev. Res.* **3** L042036

[25] Beloy K, Hinkley N, Phillips N B, Sherman J A, Schioppo M, Lehman J, Feldman A, Hanssen L M, Oates C W, Ludlow A D 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 260801

[26] Middelmann T, Falke S, Lisdat C, Sterr U 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 263004

[27] Blatt S, Thomsen J W, Campbell G K, Ludlow A D, Swallows M D, Martin M J, Boyd M M, Ye J 2009 *Phys. Rev. A* **80** 052703

[28] Cao J, Lu B Q, Lu X T and Chang H 2025 *Phys. Rev. Res.* **7** 033260

[29] Zhou Y H, Zhang X F, Wang T 2023 *Phys. Rev. A* **108** 033304

[30] Brown R C, Phillips N B, Beloy K, McGrew W F, Schioppo M, Fasano R J, Milani G, Zhang X, Hinkley N, Leopardi H, Yoon T H, Nicolodi D, Fortier T M, Ludlow A D 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 253001

[31] Campbell G K, Boyd M M, Thomsen J W, Martin M J, Blatt S, Swallows M D, Nicholson T L, Fortier T, Oates C W, Diddams S A, Lemke N D, Naidon P, Julienne P S, Ye J, Ludlow A D 2009 *Science* **324** 360

[32] Rey A M, Gorshkov A V, Kraus C V, Martin M J, Bishof M, Swallows M D, Zhang X, Benko C, Ye J, Lemke N D, Ludlow A D 2014 *Ann. Phys.* **340** 311

[33] Nicholson T L, Martin M J, Williams J R, Bloom B J, Bishof M, Swallows M D, Campbell S L, Ye J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 230801

[34] Hachisu H, Petit G, Nakagawa F, Hanado Y, Ido T 2017 Opt. Express **25** 8511

Development and absolute-frequency measurement of the NTSC-Sr2 cold-atom strontium optical lattice clock

Guo Feng[1)] Lu Xiao-Tong[1) 2)] Chang Hong[1) 2) †]

1) (National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

2) (School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100049, China)

Abstract

We report the development, systematic evaluation, and extended absolute-frequency measurement of the NTSC-Sr2 strontium optical lattice clock at the National Time Service Center. Laser-cooled ^{87}Sr atoms are transported by a movable one-dimensional optical lattice over 17.29 mm into a copper blackbody-radiation shield stabilized near 273.15 K. Clock spectroscopy is performed at a lattice depth of 39.8 E_R. A 400 ms Rabi interrogation produces a 2.5 Hz linewidth, close to the Fourier limit. Interleaved locking of two digital servos to the same atomic transition gives an equivalent single-servo fractional-frequency instability of $3.6 \times 10^{-16}(\tau/\mathrm{s})^{-1/2}$. Because the two servos share the atomic preparation, trapping and detection sequence, as well as the clock laser, this result characterizes the short-term servo and detection performance rather than an independent comparison between two clocks. The evaluated fractional systematic correction is -3707.5×10^{-18} with a total uncertainty of 2.0×10^{-18}; the dominant contribution is the lattice-light Stark shift, with an uncertainty of 1.6×10^{-18}, followed by the blackbody-radiation contribution of 0.7×10^{-18}. For the absolute-frequency measurement, NTSC-Sr2 is linked to the SI second through HM085, UTC(NTSC), and International Atomic Time. Three additional Circular T intervals (461, 462, and 464) extend the previously reported one-year campaign to 15 measurement months, with a mean uptime of 28.3% and approximately 3.1×10^3 hour of valid data. The weighted frequency of the ^{87}Sr $^1S_0$–$^3P_0$ transition is 429 228 004 229 872.97(6) Hz, corresponding to a relative uncertainty of 1.5×10^{-16}. These results establish an end-to-end capability encompassing clock operation, systematic-shift evaluation, and SI-traceable absolute-frequency measurement, and provide an independent data set for optical-clock contributions to international time-scale calibration and the future redefinition of the second.

Keywords: strontium optical lattice clock; systematic frequency shift; blackbody radiation shift; absolute frequency; International Atomic Time

---

* Project supported by the Quantum Science and Technology-National Science and Technology Major Project (Grant No. 2021ZD0300902), the Program for Promoting Innovative Talents-Shaanxi Provincial Rising Young Star in Science and Technology (Grant No.2025ZC-KJXX-112) and the Operation and Maintenance of Major Scientific and Technological Infrastructure of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. 2024000014).

† Corresponding author.E-mail:changhong@ntsc.ac.cn

The first author.E-mail:guofeng@ntsc.ac.cn