

基于原位探测的空间冷原子钟的性能分析

彭向凯^{1,2}, 任伟¹, 项静峰¹, 王新文^{1,2}, 刘亮^{1,2*}, 吕德胜^{1,2**}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室中国科学院冷原子物理中心, 上海 201800;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 在空间微重力环境下,应用激光冷却技术的空间冷原子钟有望获得更高精度的时间频率基准。提出了一种基于原位探测的新型空间冷原子钟方案,在开展冷原子俘获、冷却、选态、两次微波探寻与量子态探测等过程中,冷原子都保持在微波腔中,这种设计可以使单个原子钟的周期更短,微波探寻过程有更大的时间占比,也能使原子钟的整体结构更加紧凑。在使用 Boitier a Vieillessement Ameliore (BVA)晶振作为本振的条件下,从 Dick 效应与量子投影噪声两方面对原子钟的稳定度进行分析预估,然后分析了影响冷原子钟不确定的来源与估值,结果表明:基于原位探测的空间冷原子钟有望达到 $5.9 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 的稳定度以及 1×10^{-16} 的不确定度,该结果优于当前使用 BVA 晶振作为本振的其他冷原子微波钟的性能。

关键词 原子与分子物理学; 冷原子钟; 原位探测; 稳定度; 不确定度

中图分类号 TN24

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0802001

Performance Analysis of Space Cold Atomic Clock Based on *In-Situ* Atomic Detection

Peng Xiangkai^{1,2}, Ren Wei¹, Xiang Jingfeng¹, Wang Xinwen^{1,2},
Liu Liang^{1,2*}, Lü Desheng^{1,2**}

¹Key Laboratory for Quantum Optics and Center of Cold Atom Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²College of Materials Science and Opto-Electronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The cold atomic clock, which uses laser cooling techniques, is expected to obtain more accurate time-frequency reference in the space microgravity environment than on the earth. This paper proposes a scheme for a new type of space cold atomic clock based on *in-situ* atomic detection. This design realizes the capture, cooling, state selection, microwave interrogation, and quantum state detection of cold atoms in a microwave cavity. Further, this design allows for a shorter clock cycle, higher time duty cycle for microwave interrogation, and a more compact structure than our previous space cold atomic clocks. Using a Boitier a Vieillessement Ameliore (BVA) crystal oscillator as a local oscillator, we analyze and estimate the stability of the cold atomic clock due to the Dick effect and quantum projection noise. In addition, we estimate sources affecting the uncertainty of the cold atomic clock. The results indicate that the proposed space cold atomic clock is expected to reach a stability of $5.9 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ and uncertainty of 1×10^{-16} . These results are superior to those of existing cold atomic microwave clocks which use a BVA crystal oscillator as a local oscillator.

Key words atomic and molecular physics; cold atomic clock; *in-situ* atomic detection; stability; uncertainty

OCIS codes 020.3320; 130.3120; 020.1335

1 引 言

利用空间微重力环境与激光冷却技术研制的空

间冷原子钟,可以在空间轨道上实现高精度的时间频率基准,从而在更高的精度上实现全球导航定位与时间同步,为基本物理精密测量及未来深空探测

收稿日期: 2019-03-06; 修回日期: 2019-04-01; 录用日期: 2019-04-22

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ09094304)、国家自然科学基金(11704391)

* E-mail: liang.liu@siom.ac.cn; ** E-mail: dslv@siom.ac.cn

打下技术基础。欧空局在 2002 年左右就开始研制的铯原子空间冷原子钟^[1-5] PHARAO (Projet d'Horloge Atomique par Refroidissement d'Atomes en Orbite) 目前已完成地面测试, 计划于 2020 年左右发射到国际空间站。依托于中国载人航天工程的空间冷原子钟^[6-12] CACES (Cold Atom Clock Experiment in Space) 采用冷碰撞频移系数更小的铷 87 原子, CACES 在 2016 年随“天宫二号”发射升空, 在之后的在轨长期运行测试中, 开展了系列原子钟测试工作, 实验显示, 其在空间环境下的性能比地面上的性能提高了 4 倍左右^[12]。但同时, 实验结果也显示了空间环境的复杂性, 主要表现在: 1) 空间冷原子钟在轨绕地球运行时, 会经历周期性的地磁场变化, 原子数和冷原子温度会显示出与磁场变化相关的波动^[12], 这就要求对磁场进行更有效的屏蔽和补偿; 2) 慢速抛射原子时, 原子团的运动时间延长, 导致热膨胀及背景真空引起的原子数衰减增大; 3) 环形微波腔的物理单元设计使得单个钟周期中的死时间占比较大, Dick 效应^[13-15] 引入了更多的本征噪声。上述说明空间微重力环境下冷原子钟的设计方案仍有待进一步优化和讨论。

基于原位探测的积分球冷原子钟^[16-21] 在运行过程中不需要对冷原子进行抛射, 在微波腔内开展原子的激光冷却与探测, 能在很大程度上缩短钟周期中死时间的占比, 但是该方案中冷原子会弥漫在整个微波腔中, 不利于开展原子钟不确定度的评估。本课题组提出了一种新的基于原位探测的腔内冷却式空间冷原子钟方案, 这种原子钟不抛射原子, 原子的冷却、原子的选态、原子和微波相互作用、原子的探测均在圆柱形微波腔内完成。微波腔采用四端馈入, 以降低腔内的相位分布^[22], 同时微波馈入孔为四束冷却通光孔, 微波腔截止波导方向有一对通光孔, 用于垂直方向的冷却光和探测光在微波腔中心俘获与冷却铷原子。通过控制激光和微波的时序对原子进行操控和探测。采用这种方案, 一方面可以大幅缩短钟周期和死时间, 降低 Dick 效应和量子投影噪声^[23-24], 获得更高的稳定度; 另一方面, 得益于更加紧凑的结构, 可以通过增加磁屏蔽层数来获得更好的磁场屏蔽效果, 并且圆柱形微波腔也便于对腔相移进行评估。本文对这种腔内冷却式空间冷原子钟的性能进行了详细分析, 在轨运行稳定度有望达到 $5.9 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$, 同时可能获得优于 1×10^{-16} 的不确定度。

2 物理系统结构

腔内冷却空间冷原子钟的物理系统结构如图 1 所示, 微波谐振腔安装于被多层磁屏蔽包围的真空筒内部, 并通过真空管道与 2D-MOT (Two-dimensional Magneto-Optical Trap) 结构相连, 真空筒的真空度通过离子泵维持, 微波信号通过真空穿墙微波接头馈入微波腔。在近似圆柱形真空腔的周围, 磁场线圈绕制于真空腔体外层, 产生磁感应强度约为 100 nT、方向沿圆柱轴线的恒定磁场, 为冷原子提供选态、两次微波作用所需的量子化取向磁场。2D-MOT 产生慢速铷 87 冷原子束, 并将其推送至有对应开孔的圆柱形微波谐振腔中, 微波腔工作在 TE₀₁₁ 模式, 谐振频率约为 6.834 GHz, 为铷 87 原子基态超精细能级间隔的跃迁频率。微波腔侧壁及上下顶盖上开有通光孔, 可使多束激光从通光孔进入微波腔中心, 形成传统的三维正交的光学黏团激光冷却结构。在微波谐振腔壁上开孔会对微波腔的 Q 值产生一定影响, 但根据本课题组对腔内微波场分布的仿真分析可知, 当前的设计不会影响腔内整体微波场的分布。三维光学黏团俘获 2D-MOT 产生慢速原子后, 通过时序控制关闭 2D-MOT 冷却光, 利用三维光学黏团进一步开展偏振梯度冷却操作, 然后关闭三维冷却光。在微重力环境下, 冷原子团在微波腔中心以热运动速度自由膨胀。在原子团膨胀过程中, 通过控制激光和微波时序进行冷原子选态、Ramsey 微波作用和量子态布局数探测等原子钟时序操作, 检测馈入微波频率与铷原子钟跃迁频率之差, 并反馈调整微波频率。

图 2 显示了集成在微波腔上的冷却、选态、重泵

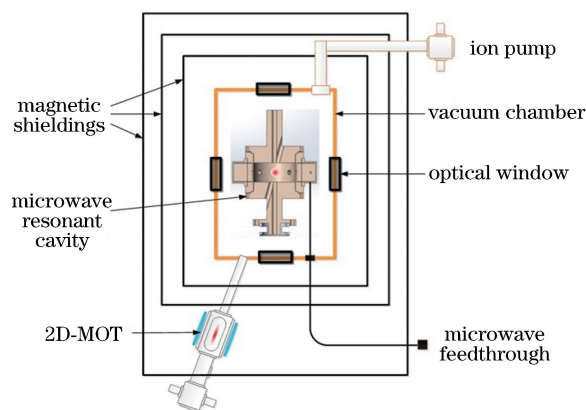


图 1 腔内冷却空间冷原子钟物理系统结构图
Fig. 1 Physical structure of space cold atomic clock based on intracavity cooling

和探测光的光学设计方案。在四束激光中,有两束利用零度反射镜形成对射,另外两束激光对射,激光束在微波腔中心相互正交构成三维光学黏团结构。两束独立对射的激光可以单独控制,以便于原子钟时序中的选态过程中利用激光辐射压力将多余的冷原子赶走。另外,在利用零度反射镜反射的激光束中,一路包含重抽运激光成分,另一路则可以通过时序与功率控制实现冷却光和探测光的复用。

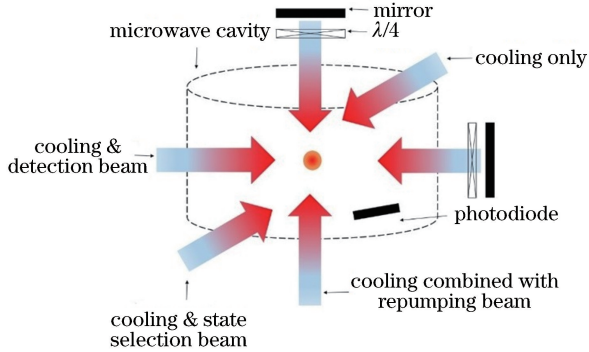


图2 集成在微波腔上的光学设计方案

Fig. 2 Optical design integrated in microwave cavity

3 空间冷原子钟的稳定度

冷原子钟的稳定度 $\sigma(\tau)$ 可以表示为^[24-26]

$$\sigma(\tau) = \left[T_c \left(\frac{\Delta\nu}{\pi\nu_0} \right)^2 \left(\frac{1}{N_{\text{Det}}} + \frac{1}{N_{\text{Det}} \eta_{\text{ph}}} + \frac{2\sigma_{\delta\text{N}}^2}{N_{\text{Det}}^2} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n^2}{g_0^2} S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \tau^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中: T_c 为钟周期; τ 为原子钟积分时间; $\Delta\nu$ 为 Ramsey 中心鉴频谱线宽度; ν_0 为原子钟跃迁频率, 对于铷 87 原子来说约为 6.834 GHz; N_{Det} 为探测到的原子数, $\frac{1}{N_{\text{Det}}}$ 为量子投影噪声的贡献; $\frac{1}{N_{\text{Det}} \eta_{\text{ph}}}$ 为光子散粒噪声的贡献, 其中 η_{ph} 为单个原子发出的荧光光子数; $\frac{2\sigma_{\delta\text{N}}^2}{N_{\text{Det}}^2}$ 为探测系统噪声, 其中 $\sigma_{\delta\text{N}}$ 为原子数起伏的方差; $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n^2}{g_0^2} S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 为由 Dick 效应引入的本地振荡器噪声, 其中 g_n 和 g_0 为傅里叶系数, n 为傅里叶展开级数, $S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 为本征振荡器的单边功率谱密度(对于不同的频率源有不同的表现形式)。一般情况下, 量子投影噪声和 Dick 效应是对稳定度影响最大的噪声成分, 远大于其他两项, 以下将对这两项噪声进行详细分析。

3.1 Dick 效应

冷原子钟作为间歇式周期运行的原子钟, 在每个钟周期中, 总有一段无法利用原子对本地振荡器进行鉴频的时间, 该段时间称为死时间。因此, 本地振荡器噪声会有一部分反映到原子钟的输出信号中, 该现象称为 Dick 效应。Dick 效应可以用敏感函数^[15] 计算得到, $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n^2}{g_0^2} S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 中的各项可以分别表示为

$$g_0 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} g(t) dt, \quad (2)$$

$$g_n^2 = \left[\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} g(t) \sin\left(\frac{2\pi n t}{T_c}\right) dt \right]^2 + \left[\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} g(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T_c}\right) dt \right]^2, \quad (3)$$

式中: $g(t)$ 为敏感函数; t 为时间。对于应用于空间冷原子钟的 Boitier a Vieillesse Ameliore (BVA) 晶振来说, $S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 可表示为

$$S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right) = 2.13 \times 10^{27} \times \left(\frac{n}{T_c} \right) + 4 \times 10^{-27} \times \left(\frac{n}{T_c} \right)^{-1}. \quad (4)$$

只要知道相互作用时间和钟周期, 就可以计算出 Dick 效应对稳定度的影响。

空间冷原子钟运行时序如图 3 所示, 图中给出了两种设计原子钟的时序。在冷原子俘获需要相同时间的情况下, CACES 的设计由于冷原子自由飞行过程占用的时间较多, 延长了整个钟周期, 并使死时间占比增大。而对于腔内冷却空间冷原子钟来说, 通过控制激光时序进行选态和探测, 这两部分的时间几乎可以忽略, 钟周期和死时间占比均大大降低。以线宽 1 Hz 为例, 采用环形腔的 CACES 钟周期约为 1820 ms^[8,10,12], 死时间占比大于 70%。而若采用腔内冷却结构, 钟周期约为 1415 ms, 死时间占比小于 50%, 线宽更窄。事实上, 对于腔内冷却方案来说, 由于采用了 2D MOT 方案, 冷原子俘获时间更短, 这样死时间的占比可能更小。

改变原子钟的运行参数, 将不同线宽对应的 T_c 代入计算就可以获得不同线宽下的 Dick 效应, 结果如图 4 所示。可见, 得益于更短的钟周期, 腔内冷却空间冷原子钟的 Dick 效应远小于采用环形腔的 CACES。

3.2 量子投影噪声

量子投影噪声是量子叠加态在探测过程中塌缩到某一个能级时概率的不确定性, 与被探测到的冷

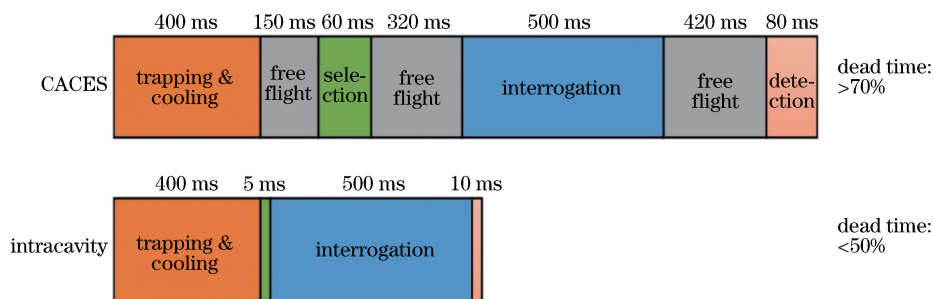


图 3 基于环形腔方案的 CACES 及基于腔内冷却方案的原位探测原子钟的时序图

Fig. 3 Sequence diagrams of CACES based on ring-cavity scheme and atomic clock based on intracavity cooling and *in-situ* atomic detection

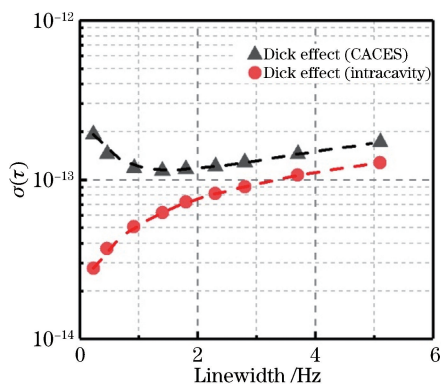


图 4 基于环形腔方案的 CACES 和基于腔内冷却方案的原位探测原子钟的 Dick 效应

Fig. 4 Dick effects of CACES based on ring-cavity scheme and atomic clock based on intracavity cooling and *in-situ* atomic detection

原子数的平方根成反比,所以在一个钟周期内,在俘获冷原子数目一定的情况下,主要关注探测之前原子数的损耗。对于采用环形腔结构的 CACES 来说,原子数的损失主要源于两方面:1)原子团在飞行过程中由于速度分布而膨胀,导致原子团直径超过路径法兰孔后,大量原子被法兰切掉;2)背景真空气体对冷原子碰撞原子数的损耗。综合这两方面,最终原子数可以表示为

$$N = \iint D(x, y, t) dx dy \times \exp(-C \times t), \quad (5)$$

式中: $D(x, y, t)$ 为 t 时刻原子团横截面上的原子数分布,在法兰尺寸上进行积分; C 为与真空度相关的常数^[27], C 越大,损耗越大,原子数越小。对于腔内冷原子钟来说,原子数损耗同样是由这两方面导致的,只不过法兰孔径的限制变成了探测光束半径的限制。由于两种冷原子损耗机制都与时间相关,腔内冷却方案在相同原子钟鉴频线宽下时钟周期更短,因此具有更小的原子数损耗。假设两种方案初始俘获的原子数均为 2×10^8 ,在相同的真空度 ($1 \times$

10^{-7} Pa)以及相同的冷原子温度 ($3 \mu\text{K}$)下,计算不同线宽下的量子投影噪声,可以得到如图 5 所示的结果。

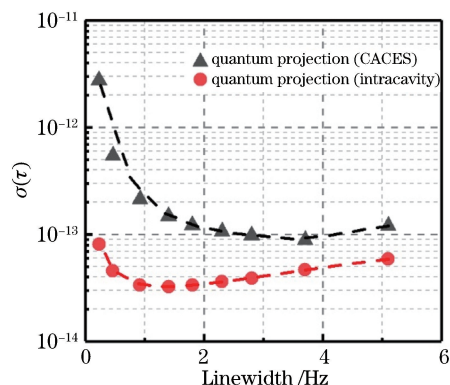


图 5 基于环形腔方案的 CACES 和基于腔内冷却方案的原位探测原子钟的量子投影噪声

Fig. 5 Quantum projection noises of CACES based on ring-cavity scheme and atomic clock based on intracavity cooling and *in-situ* atomic detection

将 Dick 效应和量子投影噪声合并起来,最终能得到如图 6 所示的腔内冷却方案在不同线宽下的稳定度结果。可见,在线宽为 0.5 Hz 时,稳定度有望达

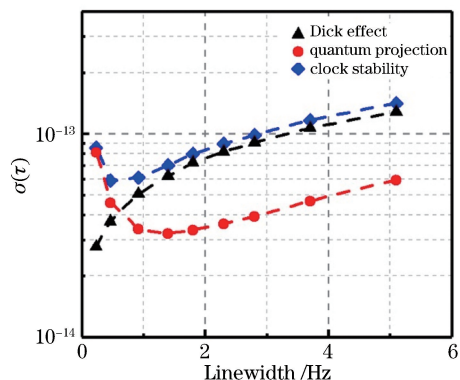


图 6 基于腔内冷却方案的原位探测原子钟的预期稳定度
Fig. 6 Expected stability of atomic clock based on intracavity cooling and *in-situ* atomic detection

到 $5.9 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。相比之下,采用环形腔结构的空
间冷原子钟稳定度极限在 $1.0 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ 左右。

4 不确定度分析

冷原子钟的不确定度主要包括 A 类统计相关
不确定度和 B 类有确定影响来源的不确定度。B 类
不确定度对于冷原子钟来说主要有二阶塞曼频移、
分布式腔相移、碰撞频移、黑体辐射频移、微波泄漏
频移、引力红移、腔牵引效应等^[28]。对于腔内冷却
空间冷原子钟来讲,以上大部分不确定度的预测分析
与喷泉原子钟或已有方案类似,比如二阶塞曼频移
与冷原子所处环境磁场相关,冷碰撞频移与冷原
子团密度相关,黑体辐射频移与冷原子所处环境温
度相关,引力红移与原子所处位置的引力势相关,腔
牵引与微波腔离共振程度以及原子数目相关。总
之,根据之前文献所述,上述几项都可以通过控制系
统参数使冷原子钟的不确定度小于 1×10^{-16} ^[29-30]。
本研究重点考虑腔内冷却设计与之前冷原子钟相比
具有新的作用机制的不确定度,主要有分布式腔相
移和微波泄漏频移这两项。

4.1 分布式腔相移

原子在两次 Ramsey 作用过程中若能感受到微
波场相位变化,就能发生频移。由于微波腔内微波
场在空间分布上具有相位不均匀性,故该效应在冷
原子钟各项频移中是较大的一项。在 Ramsey 作用
过程中,腔内冷却空间冷原子钟因原子团在微波腔
中心向四周扩散,与冷原子喷泉钟及 CACES 环形
腔引起的分布式腔相移有所不同。使用敏感函数是
计算腔相移的常用方法。由相位变化引起的跃迁概
率的变化可以表示为^[22,31]

$$\delta P = \frac{1}{2} \int_0^{T_0} g(t) \left[\frac{d\Phi(t)}{dt} \right] dt, \quad (6)$$

式中: T_0 为相互作用的总时间,计算时令其等于钟
周期 T_c ; $\Phi(t)$ 为转化到时间上的相位分布; $g(t)$ 为
与第 3 节中具有相同定义的敏感函数。可见,只要
知道不同路径原子感受到的相位变化 $\Phi(t)$,就能求
出相应的跃迁概率的变化,进而根据(7)式计算出
不确定度

$$\sigma' = \frac{\delta f}{f} \approx \frac{2\delta P \times \Delta\nu/\pi}{6.834 \times 10^9}. \quad (7)$$

使用有限元软件对腔内的相位分布进行仿真,图 7
展示了柱形腔内部的相位分布,图 7(c)中的黑点代
表有限元仿真结果中离散位置处的相位值,虚线为
拟合曲线。然后使用蒙特卡罗方法,离散地计算每

一条可能的原子路径对频移的贡献,并根据每条路
径的原子数占比进行加权,得到总的频移。在计算
中,假定原子团密度分布为高斯分布,速度分布为洛
伦兹分布,忽略原子间可能的碰撞,以 $3 \mu\text{K}$ 为例,
在 1 Hz 线宽条件下,采用腔内冷却方案,得到腔相
移贡献的不确定度约为 7×10^{-17} 。

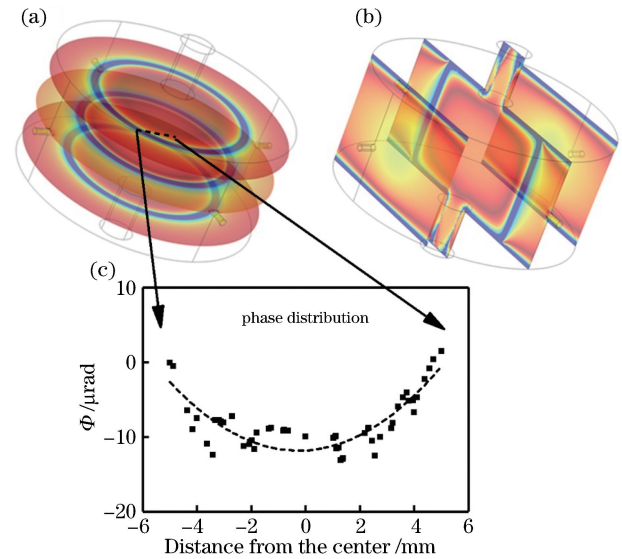


图 7 柱形腔内相位分布的仿真图。(a)横截面示意图;
(b)纵截面示意图;(c)横截面上一条路径上的相位
分布图

Fig. 7 Simulation diagrams of phase distribution in
cylindrical cavity. (a) Diagram of cross section;
(b) diagram of longitude section; (c) phase
distribution of one path on cross section

腔内冷却方案的腔相移较低,原因主要为:1)四
端馈入的圆柱形微波腔内相位变化较小,在光束孔
径范围内,相位变化在 $10 \mu\text{rad}$ 左右。而环形腔原
子团穿越整个微波腔,经历的相位变化可达
 $200 \mu\text{rad}$ 。2)得益于钟周期的降低,相同线宽下的
原子以及腔内冷却原子钟的原子的扩散范围更小,
经历的相位变化也更小。3)在采用环形腔的情况
下,原子经过截止波导时,会感受到相位突变,从而
大大增加了相移,而腔内冷却原子集中于光束孔径
内,不会受到拐角处相位突变的影响。

4.2 微波泄漏频移

在地面冷原子喷泉钟或环形腔空间冷原子钟运
行过程中,两次 Ramsey 微波作用中间的冷原子自
由飞行阶段,微波功率关闭得不彻底,导致出现频
移,频移的主要原因是原子在自由飞行阶段感受到
泄漏的杂散微波,并继续与微波相互作用,导致跃
迁概率改变^[32]。在腔内冷却空间冷原子钟运行过程

中,冷原子一直在微波腔内,两次 Ramsey 微波作用依靠干涉开关关断,关断比根据调节情况一般为 60~70 dB,所以也存在微波泄漏问题。微波泄漏频移与泄漏微波功率高度相关,可以根据二能级原子哈密顿矩阵元计算出微波泄漏频移不确定度与关断比的关系^[15],如图 8 所示。可见:若关断比为 40 dB,微波泄漏频的不确定度约为 6×10^{-17} ,这已是可以接受的程度;当关断比为 60 dB 以上时,微波泄漏频移的不确定度几乎为零。

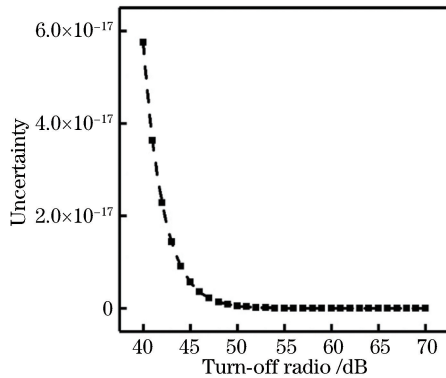


图 8 不同关断比下微波泄漏频移的不确定度

Fig. 8 Uncertainty of microwave leakage frequency shift at different turn-off ratios

综合考虑腔内冷却原子钟的腔相移和微波泄漏频移,其他不确定度参照一般喷泉钟进行估算,可以得到整体的不确定度小于 1×10^{-16} 量级。

5 结 论

在 CACES 取得的实验成果的基础上,提出了一种基于原位探测的腔内冷却空间冷原子钟方案。通过分析可知,与分立场微波作用的环形腔设计相比,这种设计具有更低的 Dick 效应噪声贡献和量子投影噪声贡献,预期稳定度可以达到 $5.9 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。如果采用更低噪声的本地振荡器以及更加快速的冷原子装载方式,则可以进一步提高原子钟的稳定度。该设计方案结构紧凑,有望获得更好的磁屏蔽效果以及温度控制效果,使冷原子钟具有更小的不确定度。对多项不确定度因素进行分析,特别是对分布式腔相移和微波泄漏的影响进行分析,可知综合不确定度低于 1×10^{-16} 。这种结构紧凑的高性能、高精度空间冷原子钟将会在基础物理研究、卫星导航定位、深空探测等领域发挥重要作用。

参 考 文 献

- [1] Laurent P, Lemonde P, Simon E, *et al.* A cold atom clock in absence of gravity [J]. The European Physical Journal D, 1998, 3(3): 201-204.
- [2] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, *et al.* Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. Applied Physics B, 2006, 84(4): 683-690.
- [3] Cacciapuoti L, Salomon C. Space clocks and fundamental tests: the ACES experiment [J]. The European Physical Journal Special Topics, 2009, 172(1): 57-68.
- [4] Laurent P, Massonnet D, Cacciapuoti L, *et al.* The ACES/PHARAO space mission [J]. Comptes Rendus Physique, 2015, 16(5): 540-552.
- [5] Peterman P, Gibble K, Laurent P, *et al.* Microwave lensing frequency shift of the PHARAO laser-cooled microgravity atomic clock[J]. Metrologia, 2016, 53(2): 899-907.
- [6] Lü D, Wang B, Li T, *et al.* Cold atom space clock with counter-propagating atoms [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(8): 735-737.
- [7] Qu Q Z, Wang B, Lü D S, *et al.* Integrated design of a compact magneto-optical trap for space applications [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(6): 061405.
- [8] Ren W, Xiang J F, Zhang Y T, *et al.* Development of an ultra-high vacuum system for space cold atom clock [J]. Vacuum, 2015, 116: 54-59.
- [9] Qu Q Z, Wang B, Lü D S, *et al.* Principle and progress of cold atom clock in space [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(9): 0902006. 屈求智, 汪斌, 吕德胜, 等. 空间冷原子钟原理样机地面测试结果 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902006.
- [10] Ren W, Gao Y C, Li T, *et al.* Microwave interrogation cavity for the rubidium space cold atom clock [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(6): 060601.
- [11] Li L, Ji J W, Ren W, *et al.* Automatic compensation of magnetic field for a rubidium space cold atom clock [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(7): 073201.
- [12] Liu L, Lü D S, Chen W B, *et al.* In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ⁸⁷Rb atoms [J]. Nature Communications, 2018, 9: 2760.
- [13] Dick G J. Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards [R]. [S. l.: s. n.], 1987: 133-147.
- [14] Dick G, Prestage J, Greenhall C, *et al.* Local oscillator induced degradation of medium-term stability in passive atomic frequency standards [C] // The 22nd Annual Precise Time and Time Interval Applications and Planning Meeting, December 4-6, 1990, Vienna, Virginia. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration,

- Office of Management, Scientific and Technical Information Division, 1990: 487-508.
- [15] Santarelli G, Audoin C, Makdissi A, *et al.* Frequency stability degradation of an oscillator slaved to a periodically interrogated atomic resonator [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 1998, 45(4): 887-894.
- [16] Cheng H D, Zhang W Z, Ma H Y, *et al.* Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light [J]. Physical Review A, 2009, 79(2): 023407.
- [17] Xiao L, Wang X C, Zhang W Z, *et al.* Loading of cold ^{87}Rb atom with diffuse light in an integrating sphere [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(3): 253-255.
- [18] Liu P, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity [J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 062101.
- [19] Li L, Liu P, Ji J W, *et al.* Probe laser power stabilization for integrated sphere cold atom clock [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0814004.
李琳, 刘鹏, 吉经纬, 等. 积分球冷原子钟探测光功率自动稳定实验研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814004.
- [20] Wang X M, Li L, Meng Y L, *et al.* New method for cold atom number stabilization in integrating sphere cold atom clock [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(8): 0802001.
王秀梅, 李琳, 孟艳玲, 等. 积分球冷原子钟冷原子数稳定的新方法 [J]. 光学学报, 2017, 37(8): 0802001.
- [21] Wang X M, Meng Y L, Li L, *et al.* Frequency and intensity noises of probe laser in integrating sphere cold atom clock [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0912001.
王秀梅, 孟艳玲, 李琳, 等. 积分球冷原子钟的探测光频率和强度噪声 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0912001.
- [22] Li R X, Gibble K. Phase variations in microwave cavities for atomic clocks [J]. Metrologia, 2004, 41(6): 376-386.
- [23] Itano W M, Bergquist J C, Bollinger J J, *et al.* Quantum projection noise: population fluctuations in two-level systems [J]. Physical Review A, 1993, 47(5): 3554-3570.
- [24] Santarelli G, Laurent P, Lemonde P, *et al.* Quantum projection noise in an atomic fountain: a high stability cesium frequency standard [J]. Physical Review Letters, 1999, 82(23): 4619-4622.
- [25] Dick G J, Wang R T, Tjoelker R L. Cryo-cooled sapphire oscillator with ultra-high stability [C] // Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium, May 29-29, 1998, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 1998: 528-533.
- [26] Riehle F. Frequency standards: basics and applications [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2006: 221-225.
- [27] Xiang J F, Cheng H N, Peng X K, *et al.* Loss of cold atoms due to collisions with residual gases in free flight and in a magneto-optical trap [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(7): 073701.
- [28] Zhang S G. Déplacement de fréquence dû au ayonnement du corps noir dans une fontaine atomique à césium et amélioration des performances de l'horloge [D]. Paris: Université Paris VI, 2004: 79-89.
- [29] Jefferts R, Shirley J, Parker E, *et al.* Accuracy evaluation of NIST-F1 [J]. Metrologia, 2002, 39(4): 321-336.
- [30] Heavner P, Jefferts R, Donley A, *et al.* NIST-F1: recent improvements and accuracy evaluations [J]. Metrologia, 2005, 42(5): 411-422.
- [31] Li R X, Gibble K. Evaluating and minimizing distributed cavity phase errors in atomic clocks [J]. Metrologia, 2010, 47(5): 534-551.
- [32] Boussett B, Theobald G, Cerez P, *et al.* Frequency shifts in cesium beam clocks induced by microwave leakages [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1998, 45(3): 728-738.