

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311838

基于腔内原位探测的空间冷原子微波钟*

吕德胜, 任 伟, 项静峰, 赵剑波, 邓思敏达

(中国科学院上海光学精密机械研究所空天激光技术与系统部 上海 201800)

摘 要:原子钟作为目前最精密的计时仪器,在国民经济和国家安全各领域发挥着重要作用。在地球轨道卫星上运行高精度原子钟,可以在地球大范围内开展高精度时间同步与比对。不同于以往通过抛射冷原子团两次经过微波腔实现 Ramsey 微波作用的空间冷原子钟,提出了一种新型的基于腔内原位探测的空间冷原子微波钟方案,在同一微波谐振腔内先后完成铷 87 原子的激光冷却、原子微波相互作用、冷原子探测等过程。该方案可以更好的利用微重力环境提高钟周期中原子与微波相互作用时间的占空比,从而有效减小 Dick 效应对原子钟性能的影响。介绍了冷原子微波钟系统设计与工作原理,给出了微重力环境下性能分析和预期指标,最后展示了冷原子微波钟地面测试中获得的大约为 $1.35 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 的频率稳定度,初步展示了新型空间冷原子钟方案的可行性。

关键词:原子钟;微重力;微波腔;空间站;频率稳定度

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 410.55

Space cold atoms microwave clock based on in-situ detection in the cavity

Lyu Desheng, Ren Wei, Xiang Jingfeng, Zhao Jianbo, Deng Siminda

(Research Center for Aerospace Laser and Systems, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract:The atomic clock, as the most precise timing instrument at present, is playing an important role in various fields of national economy and security. By operating atomic clocks on earth orbit satellites, many high-precision time synchronization and comparison-related applications can be implemented on a large scale on the earth. Unlike previous space cold atomic clocks that achieve microwave and atoms interaction by launching cold atoms cloud to traveling two microwave cavities, this article proposes a new space cold atomic microwave clock scheme based on in situ detection in the cavity. This scheme completes the laser cooling of rubidium 87 atoms, atoms and microwave interaction, cold atom detection, and other clock processes in the same microwave resonant cavity. It is possible to more fully utilize the microgravity environment to increase the duty cycle of the interaction time between atoms and microwaves in the clock cycle. Therefore, the impact of the Dick effect on the performance of atomic clocks is reduced. This article introduces the design and working principle of this kind of cold atoms microwave clock system, provides performance analysis and expected frequency stability in a microgravity environment, and finally shows that in the ground test results of the clock prototype. The tested $1.35 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ frequency stability of the cold atom microwave clock demonstrates the potential performance of the clock operating in microgravity environments.

Keywords:atomic clock; microgravity; microwave cavity; space station; frequency stability

0 引 言

利用激光冷却技术获得的冷原子为原子钟提供了稳定的频率参考介质,自从 20 世纪 90 年冷原子技术应用

到原子钟以来,已经将基准原子钟的频率准确度从 $\sim 10^{-14}$ 提高到 $1 \times 10^{-16} \sim 2 \times 10^{-16}$ 量级^[1-3]。基于光晶格、离子囚禁等技术的冷原子光钟也已经将频率稳定度推进到 $\sim 10^{-18}$ 量级。在冷原子钟出现的初期,法国、美国、与中国就提出在微重力环境下进一步运行高精度冷原子

收稿日期: 2023-08-27 Received Date: 2023-08-27

* 基金项目:国家自然科学基金(12304550,12004401)项目资助

钟,在更高精度上实现全球导航定位与时间同步,并开展基本物理相关的精密测量实验等相关设想。法国 1997 年首次提出 ACES 计划,将在微重力环境下运行冷原子钟与氢钟钟组,并且完成了原理样机的抛物线飞机测试^[4]。目前欧洲的 ACES 计划已完成地面技术验证,计划在 2025 年将冷原子钟发射到国际空间站。美国 1999 年提出在空间实现高精度一级频率基准的 PARCS,并且与美国的 RACE 计划、欧洲的 ACES 计划共同计划在轨高精度时频实验^[5]。后来由于美国航天计划方向的调整,PARCS 空间冷原子钟任务目前处于延期搁置状态。中国在 2000 年提出了基于移动微波腔的空间冷原子钟方案^[6-8]。2010 年上海光机所开始空间冷原子钟的工程化研制任务,并于 2016 年在国际上首次实现了空间冷原子钟,将空间冷原子钟发射到中国天宫二号空间实验室,该空间冷原子钟在轨运行测试近 3 年,展示了冷原子钟在空间运行的稳健性以及长期工作的可靠性,显示空间环境下比地面性能提高了 4 倍左右,并展示了微重力环境下激光冷却原子的优势^[9-10]。但天宫二号空间冷原子钟实验结果也显示微重力下慢速抛射原子时,渡越时间的大幅延长使热膨胀以及背景真空引起的原子数衰减迅速增大,同时,匀速直线飞行使得原子团飞跃选态区、环形微波腔、探测区等区域的时间比例不变,单个钟周期中死时间占比不能压缩,这说明空间微重力环境下基于环形微波腔的空间冷原子钟设计方案仍有进一步优化和讨论的必要。

2017 年, Lu 等^[11]提出了一种基于原位探测的腔内冷却式空间冷原子钟新方案,主要想法是微重力环境下运行原子钟,无初速度情况原子团相对真空腔基本保持不动,冷原子的俘获、冷却、选态、微波相互作用和探测均在圆柱形微波腔内完成,在单个时钟周期冷原子在同一空间位置完成所有原子钟过程,省去不同功能区之间的冷原子运动时间。具体方法是在传统喷泉原子钟使用的高 Q 值 TE011 模式柱形微波腔周围,在微波馈入孔之外,再增加 4 个原子冷却的激光通光孔,与喷泉钟柱型腔轴线上两个截止波导通道一起,形成 3D 激光冷却结构,微波腔截止波导方向复用为一对通光孔用于垂直方向冷却光和探测光,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,可以极大降低钟周期和死时间,降低 Dick 效应和量子投影噪声以获得更高的稳定度。另一方面,得益于更加紧凑的结构,可以增加磁屏蔽层数从而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的评估。本文首先对这种新型空间冷原子钟设计进行介绍,然后分析在轨性能,最后给出了地面研制情况和测试初步结果。

1 空间冷原子微波钟设计

1.1 系统设计

空间冷原子微波钟安装在中国天宫空间站梦天实验舱^[12],是高精度时频实验柜 3 台原子钟之一。高精度时频实验系统主要是通过不同特性原子钟组合,在空间站构建超高精度时间频率产生和运行的系统,开展基础物理理论检验,并支持通过微波和激光传递链路向地面提供超高精度时间频率信号。冷原子微波钟在微重力环境下激光冷却铷原子,利用铷冷原子钟具有更低碰撞频移、原子利用率高等优势,为高精度时频实验柜提供较好的中长期稳定度的时间频率信号,目标是实现 $5 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 的频率稳定度以及 2×10^{-16} 的频率不确定度。

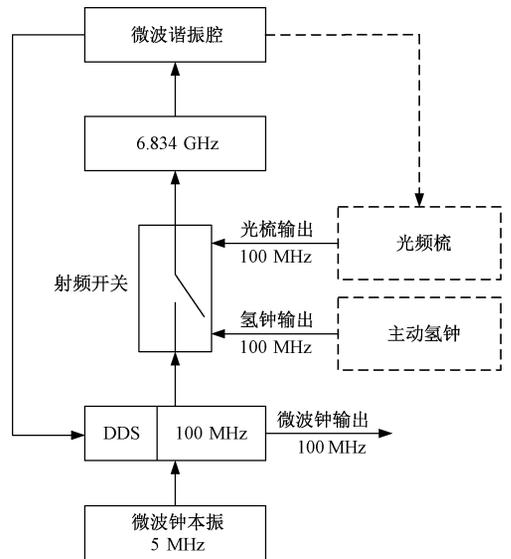


图 1 冷原子微波钟标准信号反馈环路框图

Fig. 1 Block diagram of clock signal feedback loop for cold atoms microwave clock

微波钟标准时钟信号反馈环路如图 1 所示,微波钟本地振荡器分别可以通过自带的 5 MHz 以及外参考 100 MHz 输入,本振的切换通过图中的射频开关来实现。当使用自带的 5 MHz 作为本振输入时,5 MHz 通过倍频与综合环路首先生成 100 MHz,再利用 100 MHz 倍频综合产生与铷原子钟共振的 6.834 GHz 微波信号,输入到微波腔,通过冷原子鉴频后,将微波频率误差信号反馈到 100 MHz 综合环路中的 DDS,经原子鉴频修正后的 100 MHz 标准信号作为原子钟信号输出。当使用 100 MHz 外参考作为本振输入时,有两种选择,一种是选择氢钟输出作为本振,该模式下微波钟开环运行,记录微波钟与氢钟的钟差,分析微波钟不同运行参数下与氢钟钟差的不同,评定微波钟受磁场、原子密度、原子数、微波

场、温度等参数影响下的频率不确定度;另一种是选择利用超稳激光锁定的光梳产生的 100 MHz 作为参考,光梳产生的超低相位噪声微波信号可以降低微波钟运行中 Dick 效应对频率稳定度的影响,获得更加稳定的时钟信号,该模式下频率误差反馈通过微波钟与超稳激光之间的通信环路实现。

天宫空间站实验舱有效载荷大都安装在标准实验机柜内,微波钟作为高精度时频实验柜的载荷之一,是一个非标准的可拆卸实验单元,样机模型如图 2 所示。微波钟在实验柜的安装定位主要依靠两侧的定位导轨与后背板的定位螺栓,与机柜之间的电接口包括后背板的电源与通信接口,前面板是时钟信号接口与水冷液体回路接口,其中时钟信号接口对应图 1 中 100 MHz 信号一路输出与两路输入,液体回路接口将冷却液接入微波钟内部散热冷板。整机尺寸大约 900 mm×600 mm×400 mm,重量约为 105 kg。图 2 中,冷原子微波钟模型左侧为物理单元与光学平台,右侧为微波、声光驱动、时序控制等电子学机箱。

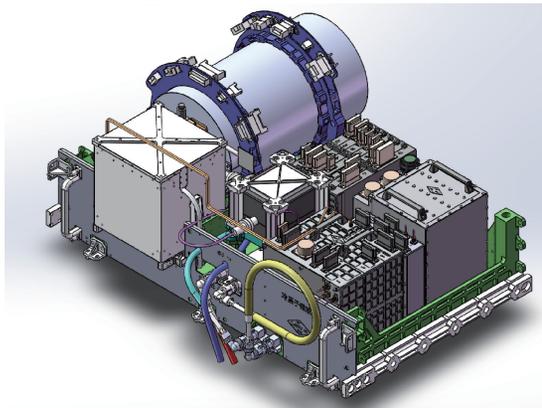


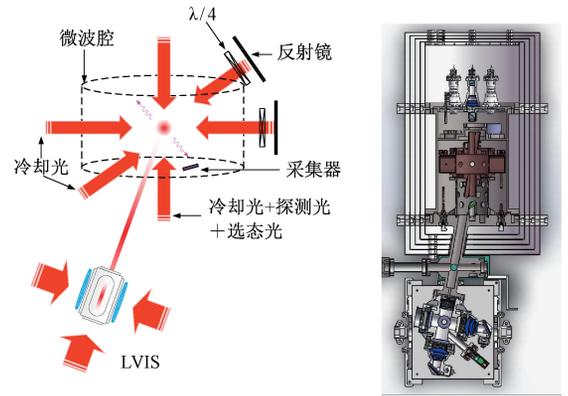
图 2 整机结构模型

Fig. 2 Diagram of the overall structure model

1.2 物理设计与工作原理

空间冷原子微波钟物理单元原理示意与结构模型如图 3 所示,主要目标是在微波腔内实现对冷原子的操纵。图 3 采用 3D Molasses 联合 2D 冷原子束流的方法实现冷原子俘获。其中 2D 冷原子束流采用 LVIS 的方法实现^[13],这种方法的优点是结构与 3D MOT 基本相同,可以利用较小的体积、重量资源来实现,同时输出的冷原子束流密度能够满足需求。本文 LVIS 方案中冷却光束直径为 25 mm,每束冷却光功率大于 20 mW,可以产生 $\sim 10^9/s$ 的冷原子束流。为了消除空间站在轨道运行中磁场变化对 LVIS 装置磁场线圈产生的磁场零点带来影响,在 LVIS 腔体外包围两层磁屏蔽。LVIS 产生慢速铷 87 冷原子束,推送至有对应开孔的圆柱形微波谐振腔,微波腔工作在 TE₀₁₁ 模式,谐振频率约 6.834 GHz,为铷

87 原子基态超精细能级间隔。微波腔侧壁及上下顶盖开有 10 mm 直径通光孔,可以使相应的激光从通光孔进入微波腔中心形成传统的三维正交的 3D Molasses 激光冷却结构,冷却光束直径为 9 mm,其中圆柱形微波腔侧壁两个正交方向的冷却光采用单方向入射加零度反射的方式形成驻波场,轴向的冷却光采用对射激光的方式,同时在对射激光通道叠加探测驻波场^[14]。微波谐振腔壁上开孔会对微波腔 Q 值产生一定影响,但根据对腔内微波场分布的仿真分析以及测试结果,当前设计不影响腔内整体微波场分布。微波腔安装在圆柱形真空筒内,真空筒外绕制磁场线圈,产生 100 nT 左右、方向沿圆柱轴线的恒定磁场,为冷原子大小提供选态、两次微波作用所需的量子化取向磁场。整个 3D 冷却的真空腔外包围 5 层磁屏蔽,使得环境磁场在 $\pm 40 \mu\text{T}$ 变化情况下,对微波腔中心磁场影响小于 $\pm 1 \text{ nT}$,该磁场变化对原子钟二阶塞曼频移影响在 1×10^{-16} 以下。



(a) 物理原理

(b) 物理结构模型

(a) Diagram of general principle

(b) Structure model of physical parts

图 3 物理原理与结构模型

Fig. 3 General principle and structure model of physical parts

冷原子微波钟运行时序图如图 4 所示,在冷原子俘获与冷却阶段,在 300 ms 的时间内,三维光学粘团俘获 LVIS 产生的慢速原子后,通过时序控制关闭 LVIS 冷却光。在后续 2 ms 时间内,三维光学粘团通过扫描激光功率与频率失谐量开展偏振梯度冷却,最后利用机械光开关关闭三维冷却光。冷原子团在微重力环境下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,在 10 ms 时间内通过控制激光和微波时序进行冷原子选态,将铷 87 原子全部制备到基态超精细能级 $|F=1, m_F=0\rangle$ 能级,然后利用两次微波脉冲的 Ramsey 方法将原子激励到 $|F=2, m_F=0\rangle$ 的能级。最后利用双能级探测的方法检测两次微波脉冲激励后,原子在两个能级之间跃迁几率,通过跃迁几率可以分析激励微波频率与原子钟跃迁频率之间的误差,从而给出对微波频率的调整量,根据

图1的反馈环路对输出标准信号频率进行适当调整。图4中500 ms代表两次微波脉冲间隔时间,与鉴频曲线 Ramsey 线宽成反比,间隔时间越长线宽越窄,鉴频能力更加准确,微波钟地面运行情况下,由于冷原子在重力作用下在微波腔内停留时间有限,该时间间隔最多维持在几十毫秒,但在微重力环境下,冷原子可以长时间保持在微波腔内,但是由于原子热运动扩散和热原子碰撞,冷原子数目随时间按指数衰减,使信噪比降低,因此两次微波作用时间间隔对鉴频线宽和原子数的影响应该综合考虑,选取最优的参数。

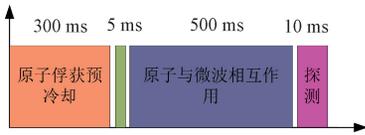


图4 冷原子钟运行时序图

Fig. 4 Sequence diagram of cold atoms clock

2 性能分析

对于周期性运行的冷原子钟说,频率稳定度可以用式(1)表示^[15-16]:

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

式中: T_c 是单个钟周期; τ 为积分时间; $\Delta\nu$ 是 Ramsey 中心鉴频谱线宽度; ν_0 为原子钟跃迁频率; 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; $\frac{2\sigma_{\delta N}^2}{N_{\text{Det}}^2}$ 为探测系统噪声; $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n^2}{g_0^2} S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 是由于 Dick 效应引入的本地振荡器噪声^[17]。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,远大于其他两项的影响,针对冷原子微波钟在微重力环境下的运行情况,我们分别对这两项噪声对频率稳定度的影响进行分析。

2.1 Dick 效应

在每个原子钟周期中,有一部分时间为原子俘获和探测阶段,这段时间不能利用原子对本地振荡器进行鉴频的时间称为死时间(dead time),这期间本地振荡器噪声会有一部分反映到原子钟输出信号中,影响原子钟稳定度,该现象称为 Dick 效应^[18],式(1)中 $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{g_n^2}{g_0^2} S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 中各项可以分别表示为:

$$g_0 = \frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} g(\xi) d\xi \quad (2)$$

$$g_n^2 = \left(\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} g(\xi) \sin \left(\frac{2\pi n \xi}{T_c} \right) d\xi \right)^2 + \left(\frac{1}{T_c} \int_0^{T_c} g(\xi) \cos \left(\frac{2\pi n \xi}{T_c} \right) d\xi \right)^2 \quad (3)$$

式中: $g(\xi)$ 是敏感函数; $S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right)$ 是本征振荡器的单边功率谱密度。该功率谱密度对于应用于空间冷原子钟的 BVA 晶振来说可以表示为:

$$S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right) = 2.13 \times 10^{-27} \times \left(\frac{n}{T_c} \right) + 5.6 \times 10^{-27} \times \left(\frac{n}{T_c} \right)^{-1} + 2 \times 10^{-29} \times \left(\frac{n}{T_c} \right)^{-2} \quad (4)$$

另外,微波钟还可以选择超稳激光产生的微波作为探寻信号,对于超稳激光产生的本振信号来说,可以达到如下指标:

$$S_y^{\text{LO}} \left(\frac{n}{T_c} \right) = 2.2 \times 10^{-28} \times \left(\frac{n}{T_c} \right) + 1 \times 10^{-28} \times \left(\frac{n}{T_c} \right)^{-1} \quad (5)$$

根据以上本振的相位噪声参数,通过微波钟相互作用时间和钟周期参数,可以分析 Dick 效应对稳定度带来的影响。

在微波钟如图3所示的运行时序,冷原子俘获与冷却为300 ms, Ramsey 相互作用时间500 ms,选态与探测时间20 ms,钟周期约为820 ms,死时间占比约为36%。微波钟在微重力环境下运行, Ramsey 作用时间可以进一步延长,这样死时间占比可能更小, Dick 效应对稳定度影响也更小。

2.2 量子投影噪声

量子投影噪声是量子叠加态在测量过程中塌缩到某一具体能级的概率不确定性,该不确定性与被探测的原子数平方根成反比^[19-20],对于原子钟运行过程中的每一次量子态的探测,主要关注被探测原子数。对于微波来说,探测原子数主要与俘获原子数和过程损耗相关,在俘获原子数一定的情况下,损耗主要有原子团自由释放过程中由于原子团膨胀导致原子飞出探测区、背景真空气体对冷原子碰撞。综合两种因素,探测原子数表示为:

$$N = \iint D(x, y, t) dx dy \times \exp(-C \times t) \quad (6)$$

式中: $D(x, y, t)$ 为 t 时刻探测光横截面上原子数分布; C 是和真空度相关的常数。假设微波钟初始俘获原子数均为 2×10^8 , 在真空度 1×10^7 Pa 以及冷原子温度 $3 \mu\text{K}$ 情况下,计算不同 Ramsey 相互作用时间下 Dick 效应和量子投影噪声对原子钟稳定度的影响,得到如图5所示结果。

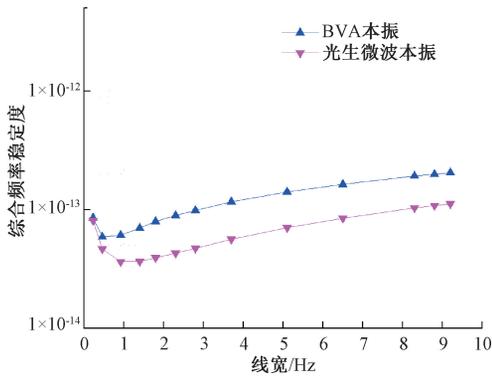


图 5 频率稳定度与运行参数关系

Fig. 5 Relationship between frequency stability and operating parameters

从图 5 可以看出,将 Dick 效应和量子投影噪声合并起来的综合频率稳定度。可见在利用 BVA 晶振作为本振时,原子钟频率稳定度最好的结果在线宽为 0.5 Hz 条件下,也就是 Ramsey 相互作用时间 1 s 时,微波钟频率稳定度有望达到 $6.0 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。在利用光生微波作为本振时,原子钟频率稳定度最好的结果在线宽为 1 Hz 条件下,也就是 Ramsey 相互作用时间 0.5 s 时,微波钟频率稳定度有望达到 $3.8 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 。

2.3 频率不确定度相关分析

关于冷原子钟频率不确定度的评估工作,地面多家喷泉钟实验室已做过很多工作,也形成了相对成熟的评估流程^[21-22]。空间冷原子微波钟运行时序、微波与原子作用机理与地面喷泉原子钟既有类似也有区别之处,因此可以部分借鉴喷泉原子钟对频率不确定度评估的方法。根据喷泉钟对频率不确定度的评估流程,微波钟在轨运行期间给出名义频率主要包括两类不确定度来源,一类是由于原子钟稳定度带来的统计误差,称为 A 类不确定度,另一类是由于原子的钟跃迁能级会受到系统环境的影响而发生移动,从而导致输出频率信号的频移,称为 B 类不确定度,引起铷 87 原子微波钟频移的主要物理效应包括二阶塞曼效应、分布腔相位误差、碰撞频移效应、黑体辐射效应、引力红移效应等几个重要项目。其中二阶塞曼效应与原子微波相互作用过程中原子感受到环境磁场变化相关;分布腔相位误差与原子微波两次相互作用过程中微波相位差相关;碰撞频移效应与冷原子密度以及密度随时间变化相关;黑体辐射效应与原子团所处环境温度水平以及温度波动相关;引力红移效应与原子团所处位置引力势相关。其他物理效应例如微波透镜效应频移、光频移、背景气体碰撞频移、微波泄漏频移等也对频率不确定度产生影响。频率不确定度评估是一项复杂精细的工作,特别是对于在轨冷原子钟来说,可以预期评估工作中将会有较多的挑战。

3 地面集成测试结果

冷原子微波钟按照图 1 的系统设计,将物理单元、光学单元、电子学以及外部接口集成后整机照片如图 6 所示,图 6 中微波钟竖直放置情况下,朝下的一面为在时频柜安装时,承力螺钉所在位置,朝上一面为安装在柜内时的前面板。微波钟整机集成后约 105 kg,功耗约 230 W。

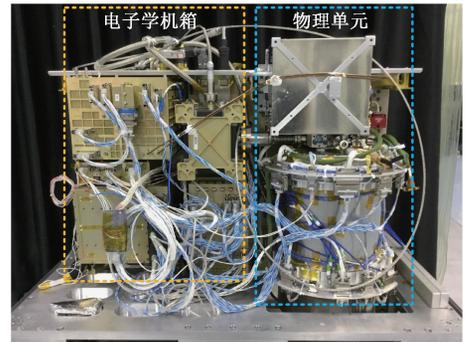


图 6 冷原子微波钟整机集成后照片

Fig. 6 Photo of the assembled cold atoms microwave clock

微波钟闭环运行过程中,每个钟周期大约为 500 ms,其中原子冷却时间 300 ms,俘获冷原子约 2×10^7 ,冷原子温度通过冷原子荧光 TOF 拟合的方法,测量大约为 3~5 μ K。在相邻的两个钟周期内微波频率在 Ramsey 条纹中心峰两侧左右跳频后,根据两个钟周期跃迁几率的差,计算本振频率误差并进行反馈,对微波钟输出的 100 MHz 频率信号与氢钟进行比对,得出稳定度阿兰方差如图 7 所示,微波钟稳定度随着积分时间 τ 按照大约 $1.35 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 曲线下降。

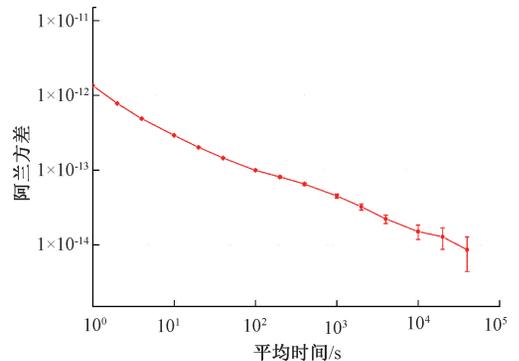


图 7 输出信号频率稳定度测试结果

Fig. 7 Test results of the output clock frequency stability

微波钟在轨运行阶段,可以通过延长微波与原子相互作用时间压窄 Ramsey 线宽,同时也会带来探测原子数的减少和钟周期的延长,但是与激光频率与功率稳定性、系统电子学噪声等相关的技术噪声基本不会改变。分析

图5可知,最优的参数是冷原子与微波相互作用时间增加到1 s,对应 Ramsey 线宽压窄到0.5 Hz,可以预测,冷原子微波钟在轨测试频率稳定度将会有大幅度优化空间。

4 结 论

本文提出一种微波腔内原位探测空间冷原子钟新方案,该方案具有物理结构紧凑、受 Dick 效应影响小等优点,在轨运行能够更加充分发挥冷原子钟在微重力下的优势,研制基于铷 87 原子的原位探测空间冷原子钟,有望获得在轨运行的高准确度与高稳定度时频基准。本文针对中国空间站高精度时频实验柜对微波钟的设计约束,给出了空间冷原子微波钟的系统总体设计、物理单元详细设计与在轨性能分析。另外根据以上设计给出了冷原子微波钟地面样机运行情况,地面测试中由于重力条件下的限制,冷原子微波钟获得了约 $1.35 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 频率稳定度,验证了新型空间冷原子钟方案的可行性以及在轨工作可获得的预期结果。

致谢

感谢载人航天工程空间应用系统、中国科学院青年创新促进会、国家自然科学基金(12004401,12304550)支持。感谢张首刚、王建宇、舒嵘、阮军等空间站时频系统总体同事对该项工作的支持与帮助;感谢中科院载人航天工程总体部同志的帮助与支持;感谢上海光机所指导与参与该项工作的陈卫标、李学春、刘亮、王礼佳、梁兆刚、徐斌、李琳、张迪、万金银、孟艳玲、蒋小军、李唐、刘元元、辛国锋、孙广伟、冯盼等同事在研制过程中给与的关心与付出的努力;感谢李天初、房芳等计量院多位同志长期以来的支持和帮助。

谨以此文纪念李天初研究员。

参考文献

[1] WEYERS S, GERGINOV V, KAZDA M, et al. Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks[J]. *Metrologia*, 2018, 55: 789-805.

[2] OVCHINNIKOV Y B, SZYMANIEC K, EDRIS S. Measurement of rubidium ground-state hyperfine transition frequency using atomic fountains[J]. *Metrologia*, 2015, 52: 595-599.

[3] ROVERA G D, BIZE S, CHUPIN B, et al. UTC(OP) based on LNE-SYRTE atomic fountain primary frequency standards[J]. *Metrologia*, 2016, 53: S81-S88.

[4] 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.

[5] HEAVNER T P, HOLLBERG L, JEFFERTS S R, et al. Characterization of a cold cesium source for PARCS: Primary atomic reference clock in space [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(2): 500-502.

[6] BIAN F G, WEI R, JIANG H F, et al. A movable-cavity cold atom space clock [J]. *Chinese Physics Letters*, 2005, 22(7): 1645-1648.

[7] 吕德胜, 刘亮, 王育竹. 空间冷原子钟及其科学应用[J]. *载人航天*, 2011, 17(1): 47-51.

LV D SH, LIU L, WANG Y ZH. Space cold atomic clock and the scientific applications [J]. *Manned Spaceflight*, 2011, 17(1): 47-51.

[8] 王新旗, 王育竹. 一种新型空间原子钟原型的原子频率移动分析[J]. *中国激光*, 2000, 27(5): 401-406.

WANG X Q, WANG Y ZH. Frequency shifts of a new prototype space atomic clock [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(5): 401-406.

[9] LIU L, LYU D S, CHEN W B, et al. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled 87 Rb atoms[J]. *Nature communications*, 2018, 9(1): 2760.

[10] LV D SH, REN W, SUN Y, et al. Characterization of laser cooling in microgravity via long-term operations in TianGong-2 space lab [J]. *National Science Review*, 2023, 10(4): 69-75.

[11] LU D, PENG X, REN W, et al. Design of a space atomic clock with intracavity cooling [C]. 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC), 2017: 623-624.

[12] 王翔, 王为. 天宫空间站关键技术特点综述[J]. *中国科学: 技术科学*, 2021, 51(11): 1287-1298.

WANG X, WANG W. Keytechnical characteristics of the Tiangong Space Station [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2021, 51(11): 1287-1298.

[13] LU Z T, CORWIN K L, RENN M J, et al. Low-velocity intense source of atoms from a magneto-optical trap[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(16): 3331-3334.

[14] 王新文, 高源慈, 赵剑波, 等. 空间冷原子钟原位探测微波腔设计[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 45-50.

WANG X W, GAO Y C, ZHAO J B, et al. Design of a microwave cavity with atoms detection in situ used in space cold atom clock [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 45-50.

[15] 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.

- [16] 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*. IEEE, 1998: 528-533.
- [17] 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.
- [18] DICK G J, PRESTAGE J D, GREENHALL C A, et al. Local oscillator induced degradation of medium-term stability in passive atomic frequency standards [R]. *California Inst of Technology Pasadena Jet Propulsion Lab*, 1990.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] FANG F, LI M, LIN P, et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation [J]. *Metrologia*, 2015, 52(4): 454-468.
- [22] ACHARYA A, BHARATH V, ARORA P, et al. Systematic uncertainty evaluation of the cesium fountain primary frequency standard at NPL India[J]. *MAPAN*, 2017, 32(1): 67-76.

作者简介



吕德胜(通信作者),2000年于北京师范大学获得学士学位,2003年于北京大学获得硕士学位,2011年于中科院研究生院获得博士学位,现为中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,主要研究方向为冷原子量子频标。

E-mail:dslv@siom.ac.cn

Lyu Desheng (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Beijing Normal University in 2000, M.Sc. degree from Peking University in 2003, and Ph.D. degree from Graduate University of CAS in 2011. He is currently a professor at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include

quantum frequency standard and cold atoms.



任伟,2010年于郑州大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员,主要研究方向为冷原子量子频标。

E-mail:renweimiao87@siom.ac.cn

Ren Wei received her B.Sc. degree from Zhengzhou University in 2010, and Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2016. She is currently an associate professor at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include quantum frequency standard and cold atoms.



项静峰,2011年于合肥工业大学获得学士学位,2018年于中国科学院大学获得博士学位,现为中国科学院上海光学精密机械研究所副研究员,主要研究方向为冷原子量子频标。

E-mail:xiangjf@siom.ac.cn

Xiang Jingfeng received his B.Sc. degree from Hefei University of Technology in 2011, and Ph.D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 2018. He is currently an associate professor at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include quantum frequency standard and cold atoms.



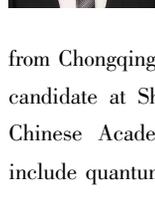
赵剑波,2008年于河北工业大学获得博士学位,现为中国科学院上海光学精密机械研究所高级工程师,主要研究方向为冷原子钟结构设计。

E-mail:zjb@siom.ac.cn

Zhao Jianbo received his Ph.D. degree from Hebei University of Technology in 2008. He is currently a senior engineer at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include cold atomic clock structure design.

邓思敏达,2019年于重庆大学获得学士学位,现为中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要研究方向为冷原子量子频标。

E-mail:smddeng@siom.ac.cn



Deng Siminda received his B.Sc. degree from Chongqing University in 2019. He is currently a Ph.D. candidate at Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include quantum frequency standard and cold atoms in space.