

文章编号 1004-924X(2018)10-2546-09

锶原子光钟闭环控制系统的设计与实现

任洁¹, 卢晓同^{1,2}, 王叶兵^{1,2}, 郭阳^{1,2}, 韩建新^{1,2}, 常宏^{1,2*}

(1. 中国科学院国家授时中心 时间频率基准重点实验室, 陕西 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: 为了实现⁸⁷Sr 原子光钟的闭环运行, 根据将超稳激光频率锁定在钟跃迁超精细能级自旋极化谱双峰中间的锁频原理, 设计和实现了锶原子光钟闭环控制系统。首先, 详细分析了⁸⁷Sr 原子光钟闭环运行的具体需求, 包括冷原子制备及钟跃迁探测、闭环锁定等阶段中所需要的控制信号及其时序; 然后, 根据该需求设计了时序控制和频率控制的物理系统; 最后, 利用 LabVIEW 虚拟仪器开发平台和 NI 硬件系统设计了⁸⁷Sr 原子光钟的闭环运行的自动化控制程序。实验结果显示, 采样时间为 3 000 s 的光钟频率稳定度为 5.7×10^{-17} , 拟合得到的环内稳定度为 $5 \times 10^{-15} / \tau^{1/2}$, 表明该控制系统的精度符合锶原子光钟的闭环运行要求。

关键词: 锶原子光钟; 闭环; 控制系统; 稳定度; 虚拟仪器。

中图分类号: 0433.1; TP399 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182610.2546

Design and realization of an auto-control system for the closed-loop operation of a strontium atomic clock

REN Jie¹, LU Xiao-tong^{1,2}, WANG Ye-bing^{1,2}, GUO Yang^{1,2},
HAN Jian-xin^{1,2}, CHANG Hong^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards of Chinese Academy of Sciences, National Time Service Center, Xi'an 710600, China;

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

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

Abstract: An auto-control system was designed and realized for the closed-loop operation of a strontium atomic clock. This closed-loop operation locked an ultra-stable laser to a frequency obtained by averaging two peaks of the spin-polarized spectrum of the hyperfine energy structure of an isotope of ⁸⁷Sr. Firstly, the requirements for automatic control of the closed-loop operation of the ⁸⁷Sr atomic clock were specified, including the controlling signals and their time sequences during laser cooling and trapping of the atoms, the detection of the clock transition spectrum, and the closed-loop operation. Secondly, these specified requirements lead to the design of the physical systems. Finally, the auto-control program was designed using LabVIEW, and data acquisition hardware from National In-

收稿日期: 2018-04-04; 修订日期: 2018-05-23.

基金项目: 中国科学院先导科技专项(B类)资助项目(No. XDB21030100); 中国科学院前沿科学重点研究资助项目(No. QYZDB-SSW-JSC004); 国家自然科学基金资助项目(No. 11474282; No. 61775220)

struments. The measurements of the frequency stability demonstrated that the in-loop frequency instability is approximately $5 \times 10^{-15} / \tau^{1/2}$, and the frequency instability for 3 000 seconds of sampling time is 5.7×10^{-17} . These results demonstrate that the designed auto-control system meets the requirements of a strontium atomic clock for closed-loop operation.

Key words: strontium optical clock; closed-loop auto-control system; frequency instability; virtual instrument

1 引 言

铯原子光钟作为目前国际范围内频率稳定性和准确度最高的原子钟^[1],其频率不确定度和稳定性均可达到 10^{-18} 量级^[2-5]。近年来,光钟的发展为基础科学研究提供了重要的平台,如基础物理常数测量^[6-8]、引力波探测^[9]、暗物质^[10]以及空间科学的研究与应用等^[11]。

铯原子光钟是一个周期性运行的复杂系统,从冷原子的制备到钟激光的闭环锁定,需要特定的电控系统对铯原子光钟系统中的光源、光路及磁场等关键部件进行自动控制,主要分为时序控制、钟跃迁谱线扫描与闭环控制。

铯原子光钟需要对多个光学元件、机械部件及电子学设备等进行时序控制,并且对这些时序控制同步精度的要求达到微秒量级。本文采用虚拟仪器平台来实现铯原子光钟的自动控制。虚拟仪器是一种通过软件将计算机硬件资源和仪器硬件资源结合起来,运用图形界面及图形化编程语言控制仪器运行的技术^[12]。由于虚拟仪器技术的灵活性和易操作性,越来越多的实验室选用该技术作为有效的电控与测试技术支撑,可快速和稳定地实现实验系统的自动控制。虚拟仪器可提供可视化的界面和便捷的参数输入与信号输出,这给需要几十个参数的铯原子光钟自动控制带来极大的便利。基于虚拟仪器的这些优点,本文选择它作为铯原子光钟控制系统的软件平台。

本文基于时序控制和钟激光频率扫描与钟跃迁信号采集处理系统^[13],采用 LabVIEW 设计数字回路锁定软件,结合 NI 数据采集卡的硬件平台,设计和实现了铯原子光钟闭环锁定软硬件系统。通过实验得到的数据体现了 LabVIEW 虚拟仪器在铯原子光钟自动化控制中的应用潜力。

2 铯光钟的工作模式与闭环锁定

铯原子光钟作为一种被动型原子钟,就是要将本地振荡器的频率锁定在原子跃迁线上。为了提高频率稳定性和减小频率不确定度,需要尽可能地克服光与原子相互作用过程中的频移。光钟的工作模式,主要分为冷原子的制备和闭环锁定两个部分。铯原子光钟采用激光冷却^[14]和“魔术波长”光晶格^[15]囚禁技术来制备冷原子,以克服钟跃迁的多普勒频移和光频移。在此基础上,将钟激光与原子相互作用,利用原子的荧光信号,便可获得原子的跃迁几率。跃迁几率是激光频率的函数,并且当跃迁几率最大时,激光与原子的振荡频率一致。根据原子的跃迁几率信号,对超窄线宽钟激光的频率漂移进行反馈和补偿。

2.1 冷原子制备

为降低原子热运动对钟跃迁频率的影响,需要对原子进行激光冷却,并将冷却到一定温度的原子装载到光晶格中,以进一步消除原子的运动效应,这个过程称为冷原子的制备。冷原子的制备需要合适的原子能级结构,以达到较高冷却效率和较低冷原子温度。铯原子能级结构如图 1 所示,对于⁸⁷Sr 光晶格原子钟,本文选用 $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) - $(5s5p)^3P_0$ ($F'=9/2$) 为钟频跃迁,其自然线宽约为 1 mHz^[16],钟跃迁绝对频率为 429 THz^[17]。

常温下固态的铯原子经原子炉加热及塞曼减速后进入 461 nm 磁光阱^[18] (Magneto-Optical Trap, MOT) 中,利用 $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) - $(5s5p)^1P_1$ ($F'=11/2$) 跃迁进行一级激光冷却,加入 679 nm 和 707 nm 重泵浦光提高 MOT 装载效率^[19-20]。二级冷却利用 $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) - $(5s5p)^3P_1$ ($F'=11/2$) 互组跃迁将原子温度冷却到 μ K 量级,加入一组匀化光^[21] (stirring laser, $(5s^2)^1S_0$ ($F=9/2$) \rightarrow $(5s5p)^3P_1$ ($F=9/2$)), 通过

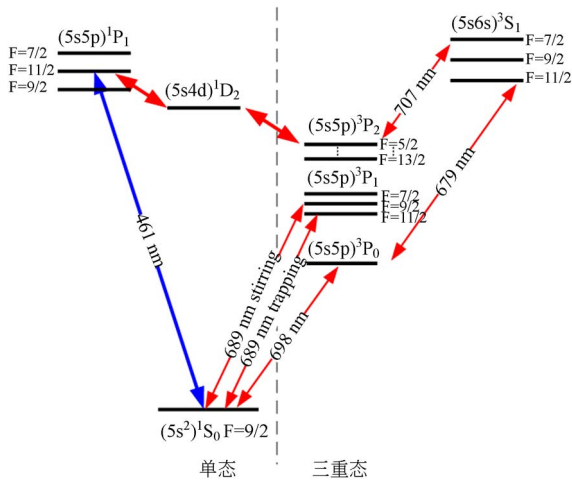


图 1 与锶原子光钟相关的锶原子能级结构图

Fig. 1 Relevant energy level with strontium optical clock

光抽运可以将处于不同磁子能级的原子快速混合,从而使原子均匀地分布在基态不同的磁子能级上,以提高原子俘获效率。

在进行两级激光冷却后,还需要利用 813 nm 激光作为晶格光形成驻波场^[22],消除多普勒频移和反冲频移将原子囚禁于 Lamb-Dick 区域。“魔术波长”(813 nm)使原子跃迁的上下能级光频移相同,从而消除钟跃迁的光频移^[23]。

2.2 钟跃迁谱线探测与闭环原理

锶光钟的闭环是利用短稳锁定在超稳腔上的窄线宽 698 nm 激光^[24]将原子从基态¹S₀ 激发到³P₀ 态,探测到原子的钟跃迁谱线后,将 698 nm 激光的频率锁定到以钟跃迁的共振频率为参考的频率上(长稳),锁定后的激光振荡频率即为锶原子光晶格钟的钟频信号。由于钟跃迁自然线宽仅为 1 mHz,其自发辐射速率极其微弱,钟跃迁的探测不可能采用直接探测该跃迁的吸收光谱或激发荧光的方法,而是采用探测其归一化的跃迁几率的方法。下面将简要介绍归一化探测原理和利用该原理探测钟跃迁谱线及闭环的方法。

2.2.1 归一化探测

归一化探测是对原子跃迁几率进行归一化。跃迁几率是指探测在钟激光脉冲的作用下,囚禁在光晶格的原子中跃迁到激发态的原子数占总原子数的比例。其具体探测方法是,当原子被钟激光脉冲激发到³P₀ 态之后,关闭钟激光,利用 461 nm 激光进行探测,该激光使布居在基态¹S₀ 的原

子在(5s²)¹S₀ (F = 9/2) - (5s5p)¹P₁ (F' = 11/2) 跃迁线上不断跃迁,并发出较强的荧光信号,且荧光信号与基态¹S₀ 的原子数 N₁ 成正比;同时,由于相互作用很强,处于基态的原子会被激光的辐射力“推出”光晶格而只剩下处于激发态³P₀ (亚稳态) 的原子;接着加入重泵浦脉冲光(679 nm、707 nm)将激发态原子泵浦回基态,再次用 461 nm 探测光进行探测,可得到与处于³P₀ 态的原子数目 N₂ 成正比的荧光信号;最后打入 461 nm 探测光进行背景噪声 N₃ 的探测,则钟跃迁¹S₀ - ³P₀ 原子跃迁几率为(N₂ - N₃)/(N₁ + N₂ - 2N₃),该过程时序可参见图 2,关于钟跃迁的探测还可参见文献[11]、[25]。

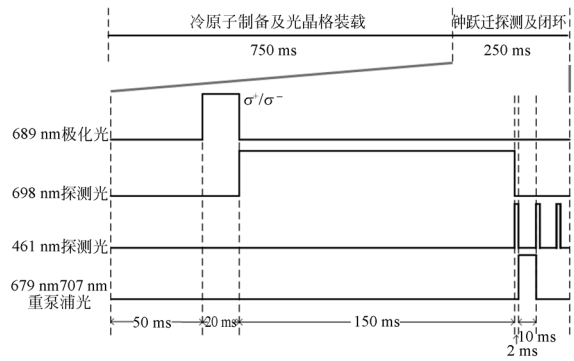


图 2 钟跃迁探测及闭环过程时序图

Fig. 2 Timing sequence of probing of clock transition and closing loop

2.2.2 钟跃迁探测中的原子谱线

⁸⁷Sr 的核自旋为 9/2,钟跃迁的基态和激发态各存在 10 个磁子能级,上下能级的磁子能级在外磁场作用下发生不同程度的移动,且激发态的能级移动明显大于基态^[26-27]。当外磁场为零时,所有磁子能级简并,首先可以得到由光晶格引起的边带可分辨的光谱;降低钟激光功率后可观察到窄线宽精细谱线(线宽 6.7 Hz);在竖直方向增加一个偏置磁场,且 698 nm 激光为竖直方向的线偏振光时,可得到塞曼分裂谱;引入 689 nm 极化光(实验中通过液晶波片改变其偏振,输出 σ⁺ 和 σ⁻ 光,以达到抽运的目的),将原子全部抽运到 ±9/2 磁子能级上,此时再进行钟跃迁的谱线探测,可得到钟跃迁自旋极化谱线^[28],如图 3 所示,当 698 nm 激光的作用时间为 150 ms 时,可得到自旋极化谱谱线线宽为 6.2 Hz 和 6.8 Hz。本文将利用自旋极化谱线来锁定钟激光的频率。

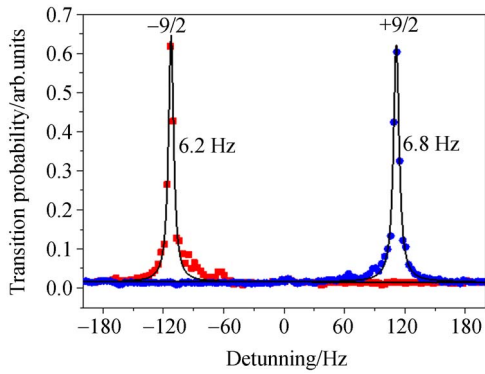


图 3 钟跃迁自旋极化谱

Fig. 3 Spin-polarized spectrum of clock transition

2.2.3 闭环锁定原理

为了克服外磁场对自旋极化谱频率的影响,本文采用双峰锁定的方法,将 698 nm 钟激光锁定在钟跃迁自旋极化谱上。图 4 为自旋极化谱示意图, f_0 为整个极化谱的中心频率, $m_F = \pm 9/2$ 的谱线线宽为 δ_1 和 δ_2 , $m_F = \pm 9/2$ 谱线的中心频率到 f_0 的频率差为 Δ 。实验将把钟激光的频率锁定在自旋极化谱双峰的中心频率 f_0 上。

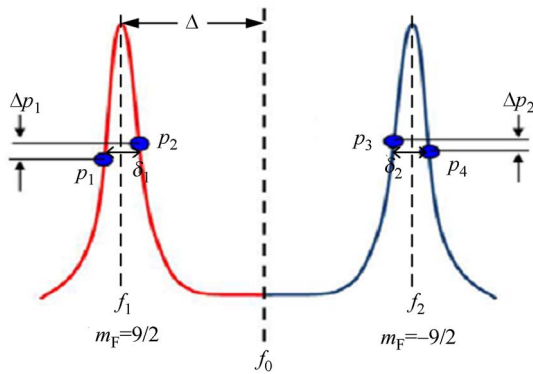


图 4 闭环原理图(双峰)

Fig. 4 Schematic diagram of closing loop(double peak)

为了得到每个峰的中心频率,实验需要 4 个光钟运行周期来进行谱线的探测:前 2 个周期对 $m_F = 9/2$ 谱线半高全宽处的原子跃迁几率进行归一化探测,后两个周期对 $m_F = -9/2$ 谱线半高全宽处的原子跃迁几率进行归一化探测,图中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 代表探测到的跃迁几率,在线性近似下,钟激光的频率与双峰的中心频率的频率差 Δf 可表示为:

$$\Delta f = \frac{1}{2} \left[\frac{p_1 - p_2}{p_1 + p_2} \times \frac{\delta_1}{2} + \frac{p_3 - p_4}{p_3 + p_4} \times \frac{\delta_2}{2} \right]. \quad (1)$$

对 Δf 进行比例积分微分 (Proportion Inte-

gration Differentiation, PID) 运算,并做为反馈信号反馈到钟激光频率上,则完成了一次中心频率的锁定。

结合 LabVIEW 软件编程和虚拟仪器数据采集卡,将频率差反馈到 698 nm 激光的 AOM 上,闭环过程的具体时序过程如图 2 所示,光钟的运行周期为 1 s,其中从一级冷却到光晶格的装载需要 750 ms,装载完成之后等待 50 ms(等待二级磁场关断后自感电流的消失),在 698 nm 探测之前打开 689 nm 极化光(20 ms),698 nm 钟跃迁探测需要 150 ms,再进行原子跃迁几率的探测,每次 461 nm 激光的探测时间为 2 ms,重泵浦光的作用时间为 10 ms。用一个 TTL 电平控制 689 nm 极化光光路上的液晶波片以控制激光的偏振,在 4 个运行周期的前 2 个周期控制其为 σ^+ ,后 2 个周期控制其为 σ^- ,即可实现极化光偏振的周期性切换。

3 算法设计及系统装置

3.1 控制系统装置

如图 5 所示,整个闭环控制系统可由 4 部分组成,分别是工控机 (Industrial Personal Computer, IPC)、数据采集卡 (PCI6713、PCI6723、USB6341)、泰克信号源 (AFG3253C) 以及物理与光学实验系统。其中,物理真空装置和光学系统(包括光源和光路)在图中不详细给出,具体可参见文献[29]。

工控机做为整个闭环控制系统的控制中枢,发送控制信号并接收采集数据,经过软件控制对钟激光的频率做出改变。其中主要包括:控制 NI PCI6713、PCI6723 输出时序信号;控制 USB6341 接收时序触发信号并进行模拟输入数据采集;通过 GPIB 总线连接泰克信号源并使用软件编程对其进行远程控制。

NI PCI6713 和 PCI6723 为 PCI 总线型模拟输出卡,可产生模拟输出电压及计数器信号,做为整个光钟系统所需时序信号^[11];USB6341 为多功能采集卡,主要利用其模拟数据采集功能,实验利用 PMT (Photomultiplier Tube, 滨松 H11526-20-NF) 对荧光信号进行探测,将 PMT 与模拟输入通道连接,将荧光信号传输至工控机进行进一步的运算,由于整个光钟系统的周期性运行,将数据

采集设置为有限采集模式,即使用 USB6341 完成周期性的归一化探测信号的采集。

如图 5 所示,泰克信号源作为 698 nm 钟激光移频和闭环用 AOM 的微波信号源,通过 GPIB 总线接收工控机的控制信号以控制 AOM 的输出

频率。在 NI 公司官网可下载泰克信号源相关型号的程序控制包,也可自行通过 VISA 语句对其进行编程。最好使用 GPIB 总线做为控制传输总线,其稳定性和传输速率都高于泰克信号源支持的 USB 型和 LAN 型总线。

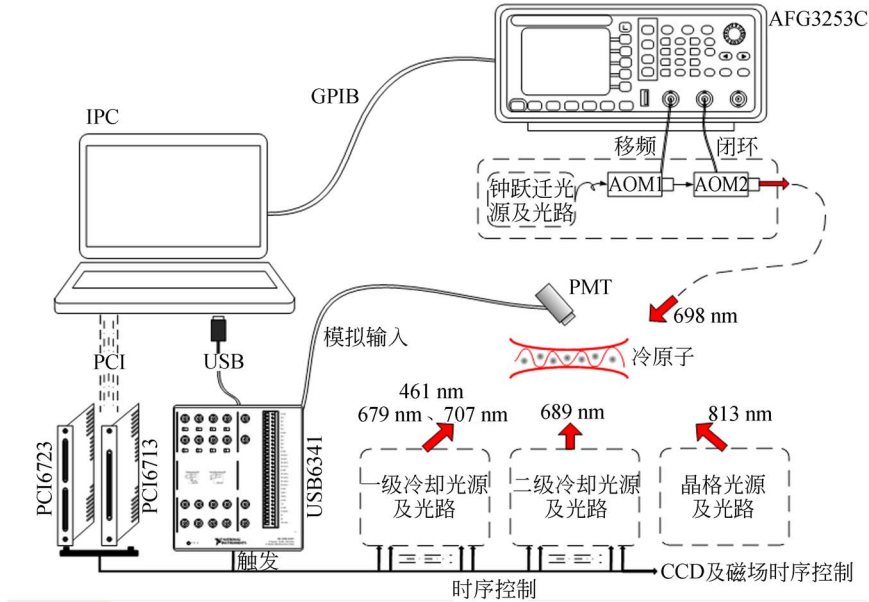


图 5 控制系统装置原理图

Fig. 5 Schematic diagram of controlling system

光钟的闭环程序控制关键在于根据误差信号对钟激光的频率进行负反馈控制。如图 5 所示,在钟激光 698 nm 激光器输出光路上加上 AOM,用以通过控制 AOM 的移频量来进行频率的长期稳定。其中,AOM1 用于将 698 nm 激光移频到钟跃迁线附近,并且起到光开关的作用,在每个周期中都输出固定值频率值。AOM2 被用于 698 nm 钟激光频率的锁定,需对其进行编程控制。结合图 2 时序图和图 4 闭环原理图,以 4 个光钟周期为例,软件通过极化谱中心频率 f_0 和谱线线宽 δ 可以计算出 $m_F = \pm 9/2$ 谱线半高全宽处的 4 个频率值,记为 f_1, f_2, f_3, f_4 ,在第 1 个光钟周期,信号源发送频率值 f_1 给 AOM2 令其输出,USB6341 接收到触发信号之后进行有限数据采集,软件根据采集到的数据进行归一化运算得到图 3 中的 p_1 ,以此类推,第 4 个周期结束时,可根据 p_1, p_2, p_3, p_4 的值得到第 1 个频率误差值 Δf ,对其进行 PID 运算,再由软件计算出新的中心频率值记为 $f_{0\text{new}}$,继而再由 $f_{0\text{new}}$ 得到新的 4 个点频值记为 f_1', f_2', f_3', f_4' 输出给 AOM2,程序

循环运行,便实现了将 698 nm 激光频率锁定在原子谱线上,即实现了铯原子光钟的闭环锁定。具体实现过程参见算法设计。

3.2 算法设计

具体软件设计流程如图 6 所示。

f_0, Δ, δ 的初始值通过扫描完整的跃迁极化谱得到,即对于闭环锁定软件, f_0, Δ, δ 的初始值为常量,根据图 3 中 f_1, f_2, f_3, f_4 与 f_0, Δ, δ 的关系,可知:

$$\begin{cases} f_1 = f_0 - \Delta - \frac{\delta}{2} \\ f_2 = f_0 - \Delta + \frac{\delta}{2} \\ f_3 = f_0 + \Delta - \frac{\delta}{2} \\ f_4 = f_0 + \Delta + \frac{\delta}{2} \end{cases} \quad (2)$$

程序根据计算得到的 f_1, f_2, f_3, f_4 的初始值进行第 1 次的闭环运算。其中对于 p 值的计算,可参见图 7。图 7 为 1 个周期内 PMT 采集到的荧光信号示意图,经过 3 次探测光探测,可对 3 次

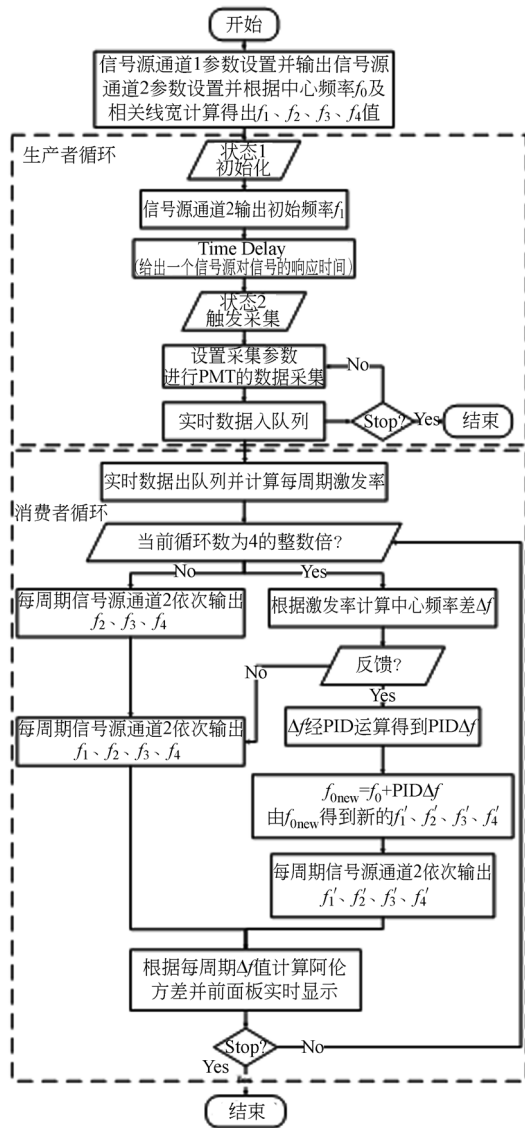


图 6 算法设计框图

Fig. 6 Algorithm design block diagram

跃迁几率进行归一化运算,取相等的采样点数区间 $[m_1, m_2]$ 、 $[m_3, m_4]$ 、 $[m_5, m_6]$,分别对其采样值求取积分,即可得到相应的原子数 N_1 、 N_2 ,和背景噪声 N_3 ,再由归一化定义可得到单个周期的 p 值。

软件算法的核心之一,是在每一个光钟运行周期中,信号源的频率 $(f_1、f_2、f_3、f_4)$ 与采集的跃迁几率值 $(p_1、p_2、p_3、p_4)$ 值都需要一一对应。针对这一要求,设置初始标记点对激光频率进行改变。通过 LabVIEW 软件中的生产者-消费者结构来实现这一功能,并在生产者循环中嵌套状态机,以保证程序的有序运行;设置两个状态机,分别实现初始化和数据采集功能,消费者循环仅将生产者循环采集到的信号进行运算并输出 $f_1、$

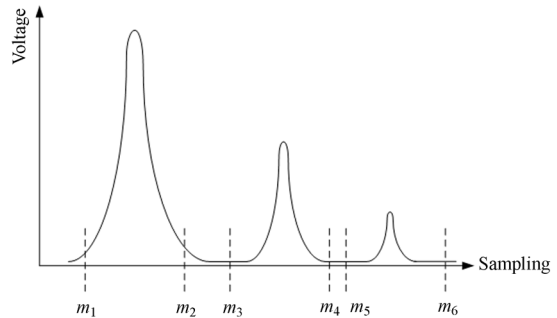


图 7 归一化探测原子跃迁几率的计算原理

Fig. 7 Principle of normalized probing of atom's transition probability

$f_2、f_3、f_4$ 频率值。在循环外部就设置好 AOM1 的频率、幅度等参数使其输出,第一次运行程序时,即进入“初始化”状态,将设置好的信号源频率值 f_1 发送给远程控制的信号源,然后通过软件设置让数据采集板卡等待一段时间(远程控制信号源的反应时间为 30 ms 左右),再进入“触发采集”状态,启动板卡模拟通道的有限数据采集功能(每周周期采集同样的点数,循环采集),进行第一次的采集,这就保证了第一次的信号源频率值与跃迁几率采集值的对应。对于生产者循环的程序设计具体可参见图 8。

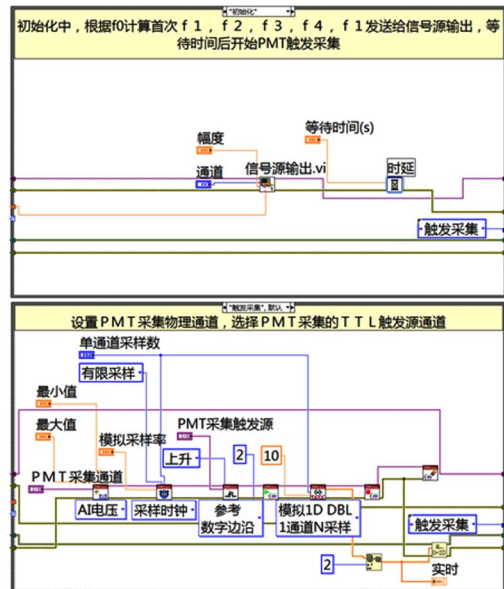


图 8 生产者循环中的状态机

Fig. 8 State machine in producer loop

通过队列将生产者采集到的数据传递给消费者。在消费者循环中,首先进行循环次数的判断,

前 3 次循环依次给 AOM2 输出 f_2 、 f_3 、 f_4 的频率值,每个循环内根据采集到的归一化荧光信号计算得出相应的 p 值,至此完成了 4 个光钟运行周期,可以得到初次的 Δf 值,若此时点击程序界面的“反馈”按钮,则对 Δf 进行 PID 运算,得到新的中心频率值标记为 $f_{0\text{new}}$,根据 $f_{0\text{new}} = f_0 + \text{PID}(\Delta f)$ 及其与 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 的关系(PID 运算使用 LabVIEW 自带的运算控件即可),程序在接下来的四个运行周期则依次输出 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 f_4' 。如此循环运行,便实现了 ^{87}Sr 原子光钟的闭环。

另外设置一个单独的循环计算阿伦方差:通过局部变量数组将所有 Δf 值传递到该循环,计算 2^n 处阿伦方差,并将每次计算出的结果除以钟跃迁绝对频率值,即可得到铯原子光钟系统的环内频率稳定度。

4 实验结果

图 9 为 ^{87}Sr 原子光钟闭环锁定软件界面图,在运行软件前,首先输入 f_0 、 Δ 、 δ 的初始值,以及硬件相关的配置信息(信号源地址、通道、幅值、AOM1 频率、PMT 采样率),以及计算 p 值时对于归一化运算所需采样点数的设置。运行程序后,可在软件界面直观的观察每个光钟运行周期探测到的原子跃迁几率波形图、 Δf 、PID(Δf)和 $f_{0\text{new}}$ 的数值及波形图,闭环运行阿伦方差计算结果,程序运行过程中可对重要数据进行实时保存。如果在运行过程中出现失锁的情况,软件界面的失锁提示布尔控件会亮起,并自动停止反馈,待调整系统后可重新开始运行。

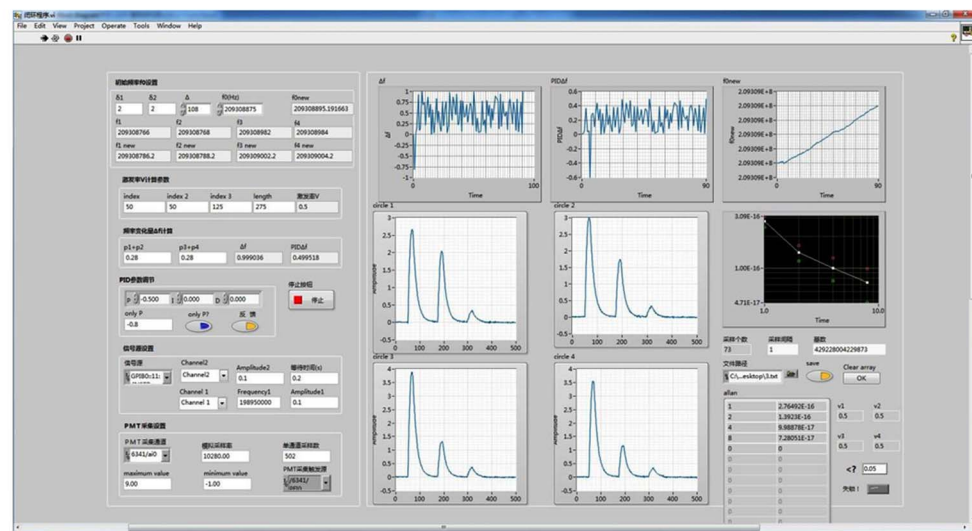


图 9 软件界面图

Fig. 9 Software interface of the closing loop

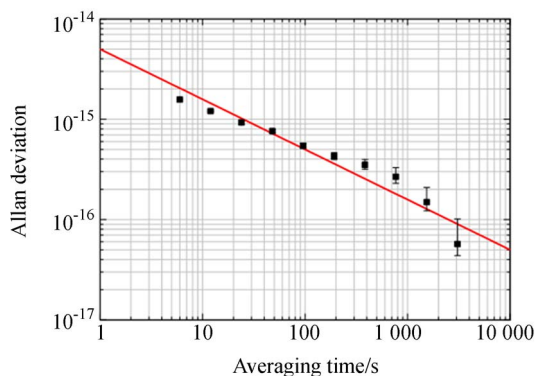


图 10 频率稳定度结果图(Allen 方差)

Fig. 10 In-loop fractional frequency instability of the ^{87}Sr optical lattice clock (Allan variance)

5 结论

本文在对铯原子光钟运行机制的分析上,明确了铯原子光钟自动化控制的要求,并根据物理系统的特点,设计和实现了铯光钟闭环程序控制。该自动化程序控制基于图形化程序语言的 Lab-

目前光钟的运行周期为 1 s,闭环锁定反馈周期为 4 s,光钟可持续运行 5 h 以上,得到 3 000 s 处光钟频率稳定度为 5.7×10^{-17} ,拟合得到的环内稳定度为 $5 \times 10^{-15} / \tau^{1/2}$ 。

VIEW 虚拟仪器开发平台,结合 NI 的硬件系统,能够实现便捷的参数输入,能对相关信号和结果进行图形化的实时显示。实验测试了持续运行 5 h 的闭环控制系统,得到 3 000 s 处光钟频率稳定度

为 5.7×10^{-17} ,拟合得到的环内稳定度为 $5 \times 10^{-15}/\tau^{1/2}$,表明该闭环程序控制的软硬件系统符合铯原子光钟持续可靠运行的要求,为光学原子钟的全自动化控制提供了重要的参考。

参考文献:

- [1] KOLKOWITZ S, BROMLEY S L, BOTHWELL T, *et al.*. Spin-orbit-coupled fermions in an optical lattice clock [J]. *Nature*, 2017, 542(7639): 66-70.
- [2] BLOOM B J, NICHOLSON T L, WILLIAMS J R, *et al.*. An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level [J]. *Nature*, 2014, 506(7486): 71-75.
- [3] HINKLEY N, SHERMAN J A, PHILLIPS N B, *et al.*. An atomic clock with 10^{-18} instability [J]. *Science*, 2013, 341(6151): 1215-1218.
- [4] NICHOLSON T L, CAMPBELL S L, HUTSON R B, *et al.*. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty [J]. *Nature Communication*, 2015, 6: 6896.
- [5] USHIJIMA I, TAKAMOTO M, DAS M, *et al.*. Cryogenic optical lattice clocks [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 185-189.
- [6] BLATT S, LUDLOW A D, CAMPBELL G K, *et al.*. New Limits on Coupling of Fundamental Constants to Gravity Using 87Sr Optical Lattice Clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100(14): 140801.
- [7] GODUN R M, NISBET-JONES P B R, JONES J M, *et al.*. Frequency Ratio of Two Optical Clock Transitions in 171Yb^+ and Constraints on the Time Variation of Fundamental Constants [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(21): 210801.
- [8] HUNTEMANN N, LIPPHARDT B, TAMM C, *et al.*. Improved Limit on a Temporal Variation of m_p/m_e from Comparisons Yb^+ and Cs Atomic Clocks [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(21): 210802.
- [9] KOLKOWITZ S, PIKOVSKI I, LANGELLIER N, *et al.*. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks [J]. *Physical Review D*, 2016, 94(12): 124043.
- [10] DEREVIANKO A, POSPELOV M. Hunting for topological dark matter with atomic clocks [J]. *Nature Physics*, 2014, 10(12): 933-936.
- [11] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, *et al.*. Optical atomic clocks [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637-701.
- [12] 杰弗里特拉维斯,吉姆克林. LabVIEW 大学实用教程[M]. 第三版,乔瑞萍译. 北京:电子工业出版社,2011,111-310.
- TRAVIS J, KRINF J. *LabVIEW for Everyone* [M]. 3rd edition. QIAO R P Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry Press, 2011, 111-310. (in Chinese)
- [13] 任洁,刘辉,卢本全,等. 铯原子光钟钟跃迁谱线探测中的程序控制 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 50-58.
- REN J, LIU H LU B Q, *et al.*. Program control in transition observation of strontium optical lattice clock [J]. *Editorial Office of Optics and Precision Engineer*, 2016, 24(1): 50-58. (in Chinese)
- [14] METCALF H J, VAN DER STRATEN P. Laser cooling and trapping of neutral atoms [J]. *The Optics Encyclopedia*, 2007.
- [15] OVSIANNIKOV V D, PAL' CHIKOV V G, TAICHENACHEV A V, *et al.*. Magic-wave-induced $1S_0-3P_0$ transition in even isotopes of alkaline-earth-metal-like atoms [J]. *Physical Review A*, 2007 75(2): 020501.
- [16] YU D, CHEN J. Optical Clock with Millihertz Linewidth Based on a Phase-Matching Effect [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(5): 050801.
- [17] CAMPBELL G K, LUDLOW A D, BLATT S, *et al.*. The absolute frequency of the 87Sr optical clock transition [J]. *Metrologia*, 2008, 45(5): 539-548.
- [18] RAAB E L, PRENTISS M, CABLE A, *et al.*. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 59(23): 2631-2634.
- [19] 任洁,田晓,刘辉,等. 铯原子光钟中 repumping 光频率锁定系统的研制 [J]. 量子光学学报, 2013, 19(2): 106-115.
- REN J, TIAN X, LIU H, *et al.*. The system of

- the repumping lasers' frequency stabilization in strontium optical clock[J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2013, 19(2):106-115. (in Chinese)
- [20] 高峰,常宏,王心亮,等. 铯原子 Doppler 冷却中再抽运光对原子俘获影响的理论和实验研究 [J]. 物理学报, 2011, 60(5):133-139.
GAO F, CHANG H, WANG X L, *et al.*. The theoretical and experimental investigation of repumping laser impact on cooling and trapping of strontium atoms[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5):133-139. (in Chinese)
- [21] MUKAIYAMA T, KATORI H, IDO T, *et al.*. Recoil-limited laser cooling of ^{87}Sr atoms near the Fermi temperature[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(11):113002.
- [22] 田晓,王叶兵,卢本全,等. 铯玻色子的“魔术”波长光晶格装载实验研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(13):40-47.
TIAN X, WANG Y B, LU B Q, *et al.*. Experimental research on loading strontium bosons into the optical lattice operating at the “magic” wavelength [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(13): 40-47. (in Chinese)
- [23] AKATSUKA T, TAKAMOTO M, KATORI H. Optical lattice clocks with non-interacting bosons and fermions [J]. *Nature Physics*, 2008, 4(12): 954-959.
- [24] LUDLOW A D, HUANG X, NOTCUTT M, *et al.*. Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at 1×10^{-15} [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6):641-3.
- [25] XU Q, LIU H, LU B Q, *et al.*. Observation of $1S_0$ - $3P_0$ transition of bosonic strontium in the Lamb-Dicke regime [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(10):100201-100205.
- [26] LU B Q, WANG Y B, HAN J X, *et al.*. Exploration of the magnetic-field-induced $5s5p\ ^3P_0$ - $5s2\ 1S_0$ forbidden transition in bosonic Sr atom [J]. *Journal of Physics Communications*, 2017, 1(5): 055017.
- [27] BOYD M M, ZELEVINSKY T, LUDLOW A D, *et al.*. Nuclear spin effects in optical lattice clocks [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(2): 022510.
- [28] 郭阳,尹默娟,徐琴芳,等. 铯原子光晶格钟自旋极化谱线的探测 [J]. 物理学报, 2018, 67(7): 070601.
GUO Y, YIN M, XU Q F, *et al.*. Interrogation of spin polarized clock transition in strontium optical lattice clock [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(7): 070601. (in Chinese)
- [29] WANG Y B, YIN M J, REN J, *et al.*. Strontium optical lattice clock at the National Time Service Center [J]. *Chin Phys B*, 2018, 27(2): 023701.

作者简介:



任 洁(1986—),女,陕西西安人,硕士,工程师,2008年于西安邮电学院获得学士学位,2013年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事铯原子光频标方面的研究。E-mail: raphael_pp@126.com



常 宏(1977—),男,山西太原人,研究员,博士生导师,2000年、2005年于山西大学分别获得学士、博士学位。2005年至2007年在法国国家科研中心进行博士后研究,助理研究员,主要从事铯原子光频标方面的研究。E-mail: changhong@ntsc.ac.cn