

引用格式：赵春勃, 张荣彦, 张强, 等. 被动型微波原子钟钟跃迁谱线测量技术研究[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 34-43.

被动型微波原子钟钟跃迁谱线测量技术研究

赵春勃^{1,2}, 张荣彦¹, 张强¹, 杜二旺¹, 贺玉玲^{1,2}, 蒙艳松^{1,2}

(1. 中国空间技术研究院 西安分院, 西安 710100;

2. 空间微波技术重点实验室, 西安 710100)

摘要: 以原子超精细能级跃迁谱线为频率参考, 被动型原子钟通过伺服控制技术实现对本地压控振荡器控制。因此, 原子跃迁谱线的特性直接决定了原子钟的频率稳定度。基于被动型原子钟的基本工作原理与微弱信号提取方法, 本文建立了原子钟谱线测量与闭环研究系统。基于该系统不仅成功实现了连续型原子钟, 如铷原子钟、单频调制被动型氢原子钟钟跃迁谱线的精密测量, 还将其扩展到时序型汞离子钟钟跃迁谱线的提取与测量。该系统为快速测量评估钟跃迁谱线提供了可能, 也为后续产品研制奠定了坚实基础。

关键词: 被动型微波原子钟; 钟跃迁谱线; 物理部分; 测量技术; 测量系统

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-01-0034-10

Study on the measurement technology of clock transition spectrum line of passive microwave atomic clock

ZHAO Chun-bo^{1,2}, ZHANG Rong-yan¹, ZHANG Qiang¹, DU Er-wang¹,
HE Yu-ling^{1,2}, MENG Yan-song^{1,2}

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an 710100, China)

Abstract: Based on the frequency reference of atomic hyperfine level transition lines, the local voltage controlled crystal oscillator is controlled by the servo control technology in the passive atomic clock. Therefore, the performance of atomic transition lines directly determines the frequency stability of the atomic clock. In this paper, based on the basic principle of passive atomic clock and the method of weak signal extraction, the measurement and closed-loop research of atomic clock spectral lines are successfully established. Based on this system, not only the precise measurement of the transition spectrum of continuous atomic clock such as rubidium atomic clock and single frequency modulation passive hydrogen atomic clock is successfully realized, but also it is extended to the extraction and measurement of the transition spectrum of sequential mercury ion clock. The system not only provides the possibility for rapid measurement and evaluation of clock transition spectrum, but also lays a solid foundation for subsequent product development.

Key words: microwave atomic clock; clock transition spectrum; physical package; measurement technology;

measurement system

0 引言

被动型微波原子钟包括铷原子钟、铯原子钟、被动型氢原子钟、离子微波钟等，其具有稳定度好、可靠性高、体积小以及重量轻等特点，作为时间频率标准被广泛应用到卫星导航、编队飞行卫星、地面授时、计量守时以及关系到国计民生的诸多重要部门和领域，成为我国科技、经济、军事和社会进步的重要支撑。

根据量子力学基本原理可知^[1]，理想的原子、离子或者分子具有只依赖于基本物理常数的离散量子态，不同量子态之间的跃迁会伴随着辐射或者吸收相应能量的电磁信号，该跃迁信号在频域表现为极其稳定的频率，线宽窄且具有特定线型的跃迁曲线，因此可以被用作频率参考标准。被动型微波原子钟是以通过处于微波电磁波段的原子超精细能级跃迁谱线作为频率参考，利用伺服电路系统使本地晶振频率锁定在钟跃迁频率附近的一种精密仪器。因此，对于被动型微波原子钟研制来说，一个核心任务就是如何高效精确地提取、测量原子钟跃迁谱线，从而为进一步优化物理环境参数奠定基础。

本文以通用高性能仪器为基础成功建立了扩展型强的原子钟谱线测量系统，该系统能够实现对铷原子钟、铯原子钟、被动型氢原子钟以及汞离子钟跃迁谱线的精密测量，为新型微波原子钟的快速开发提供技术支撑。

1 测量原理与实验系统

1.1 原子钟跃迁谱线提取原理

从量子力学原理可知，原子跃迁谱线的曲线线型一般为洛伦兹函数^[2]：

$$g(f) = \frac{\Delta f_0}{(f - f_0)^2 + \frac{1}{4} \Delta f_0^2}, \quad (1)$$

式(1)中， Δf_0 为吸收线宽， f 为探寻微波频率， $g(f)$ 为原子跃迁信号。一般情况下原子跃迁信号都非常微弱，淹没在噪声中，需要通过调制-解调方法实现信号的提取。在调制过程中分为两种情况：

当探寻微波被小信号调幅时，跃迁谱线曲线变为 $g(f) \sin(\omega t + \varphi)$ ，其中 ω 为调幅调制圆频率， φ 为调制信号相位。为了获得 $g(f)$ 信号，一般通过同步鉴相来提取，假设同步参考信号为 $g_r \sin(\omega t + \varphi_0)$ ，其中 g_r 为参考信号的幅度值，鉴相过程等效于模拟乘法器，通过三角函数积化和差公式得：

$$g = g(f) \sin(\omega t + \varphi) \cdot g_r \sin(\omega t + \varphi_0) = -\frac{1}{2} g(f) g_r [\cos(2\omega + \varphi + \varphi_0) - \cos(\varphi - \varphi_0)], \quad (2)$$

通过低通滤波器变为

$$I(f) = \frac{1}{2} g(f) g_r \cos(\varphi - \varphi_0). \quad (3)$$

该信号与原子跃迁信号成比例，易知通过扫描微波频率即可获得原子跃迁曲线。

当探寻微波被小信号调频时，微波频率在 f_0 的附近作正弦变化，即

$$f = f_0 + f_m \sin(\omega t), \quad (4)$$

式(4)中， f_m 为调制深度， ω 为调制圆频率。光强信号在 f_0 附近用泰勒展开可得：

$$g(f) = g(f_0) + f_m \sin(\omega t) g^{(1)}(f_0) + \frac{1}{2} [f_m \sin(\omega t)]^2 g^{(2)}(f_0) + \dots, \quad (5)$$

式(5)中, $g^{(1)}(f_0)$, $g^{(2)}(f_0)$ 为一、二阶导数。按倍角公式整理得:

$$g(f) = g(f_0) + g_1 \sin(\omega t) + \dots, \quad (6)$$

式(6)中, $g_1 = f_m g^{(1)}(f_0) + \frac{1}{8} [f_m]^3 g^{(3)}(f_0) + \dots$ 。

由上述推导可知, 当微波激励信号在钟跃迁谱线中心附近变化时, 物理部分输出信号由调制信号的各次谐波组成, 且各次谐波分量的系数与跃迁谱线函数的相应阶数导数成正比。当调制信号远小于共振带宽时, 即 $f_m \ll \Delta f_0$, 高阶项可以忽略, 即可认为原子钟物理部分输出信号与调制信号的基波成正比, 基波对于谱线中心频率成反对称分布, 被动型原子钟正是利用基波的这种特性来判断微波信号偏离中心频率的方向和程度的。同样假设参考频率为 $g_r \sin(\omega t + \varphi_0)$, 则钟跃迁谱线信号滤除直流后近似为 $f_m g^{(1)}(f_0) \sin(\omega t)$ 。利用三角函数积化和差公式后变为

$$f_m g^{(1)}(f_0) \sin(\omega t) \cdot g_r \sin(\omega t + \varphi_0) = -\frac{1}{2} f_m g^{(1)}(f_0) g_r [\cos(2\omega + \varphi) - \cos \varphi], \quad (7)$$

然后进一步通过低通滤波后变为

$$S(f) = -\frac{1}{2} f_m g^{(1)}(f_0) g_r \cos \varphi. \quad (8)$$

易知通过逐点扫描微波中心频率, 就可以获得钟跃迁谱线的导数曲线, 也即 S 鉴频曲线。

以上就是原子钟钟跃迁谱线提取的基本原理, 虽然这里介绍的调制解调信号都是以连续正弦信号形式为例来进行阐述的, 但是同步鉴相提取微弱信号的基本思想具有普遍性, 很容易推广到方波或者脉冲信号形式的调制与解调。

对于本文中讨论的铷原子钟、被动型氢原子钟的钟跃迁信号的测量, 微波探寻信号的调制信号采用幅度较小的连续信号, 而对于汞离子钟时序型系统, 需采用脉冲调制与解调方式来实现。铷原子钟钟跃迁谱线提取过程较为简单, 这是由于铷原子钟物理部分的输出信号为频率等于调制频率的光检测信号(一般为 100 Hz 左右), 该低频光检信号可以直接通过锁相放大器同步解调从而获得钟跃迁谱线; 但对于被动型氢原子钟钟跃迁谱线的测量, 氢原子钟物理部分输出信号具有与探寻微波信号一致的载波频率, 因此无法直接实现解调。一般情况下, 首先要通过微波接收机实现氢原子钟物理部分输出的高频信号(约 1.4 GHz)的超外差接收, 使其转变为低频的信号(约 12.5 kHz)后再利用调制解调原理才能实现色散误差曲线的提取; 对于汞离子钟微波探寻信号的调制信号为脉冲信号, 物理部分经过微波探寻后通过荧光进行收集, 所以输出为与调制信号同周期的荧光脉冲, 然后通过光子计数器同步解调实现荧光信号的测量, 在此基础上再进行方波调频和解调才能实现鉴频曲线的测量。下面将分别对铷原子钟、被动型氢原子钟以及汞离子钟三种比较有代表性的微波原子钟钟跃迁谱线的测量技术进行介绍。

1.2 实验系统介绍

被动型微波原子钟钟跃迁谱线测量及闭环系统的基本构成示意图如图 1 所示^[3], 微波信号源 E8267D 功能是产生接近于物理部分原子跃迁频率的微波探测信号, 该信号源覆盖 44 GHz 的微波频率, 并且具备调频、调相、脉冲调制等功能, 能够覆盖铷原子钟、铯原子钟、被动型氢原子钟以及汞离子钟的原子谱线微波探寻频率的需求, 并且具有外部压控实现频率微调的功能, 从而为原子钟闭环锁定奠定了基础; 频谱分析仪 N9030B 的功能是实现物理部分响应信号的下变频及幅度检波作用(被动型氢原子钟适用),

通过外差式接收机原理实现对氢原子钟物理部分 1.4 GHz 微波调幅信号的变频作用,对于铷原子钟、铯原子钟物理部分,由于通过光电转换使输出信号已经变为频率为调制频率信号的情况下不需要此仪器;锁相放大器 SR830 的功能主要是实现微弱信号的提取功能,通过与微波信号源共同的频率调制信号实现上文原理中的同步鉴相作用,提取到原子钟钟跃迁谱线信号或误差 S 曲线信号;PID 控制器的主要功能是实现锁相输出误差信号的放大、比例等处理,最终达到环路的闭环锁定与原子钟整机性能验证的目的。

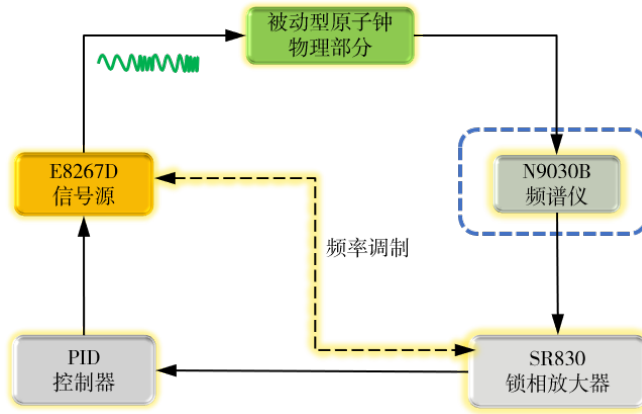


图 1 被动型微波原子钟实验系统示意图

2 铷原子钟钟跃迁谱线测量

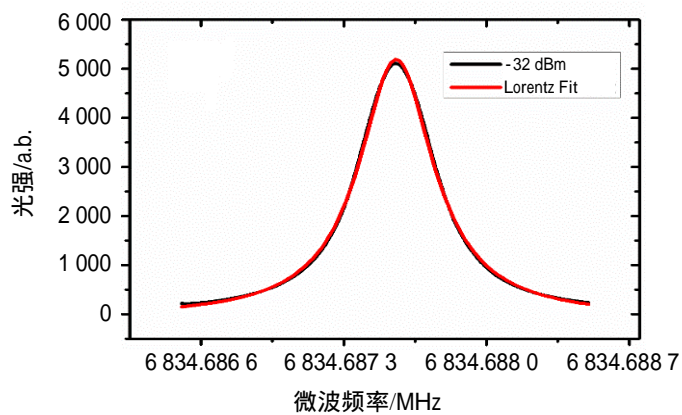
高精度铷原子钟被广泛地应用到卫星导航以及高速通信、计量守时等领域,是应用最广泛的原子钟之一。因此,本文首先以铷原子钟物理部分为测试对象,进行了铷原子钟钟跃迁谱线的测量技术研究,搭建的实物如图 2 所示。图 2 左边为正在测试中的 S 曲线,右边为闭环锁定后的实物图,图中金色部分为铷原子钟物理部分,安捷伦 N6705B 为铷原子钟物理部分供电。为了精确测量铷原子谱线的特性,实验中采用主动型氢原子钟作为微波信号源的频率参考,通过软件控制信号源中心频率在铷原子钟跃迁谱线附近进行扫描,在功率为 -32 dBm 时,通过小信号调幅获得了铷原子钟跃迁谱线,如图 3 (a) 所示。其中黑色曲线为原始数据,红色为洛伦兹拟合曲线。从拟合结果容易看出,线型与洛伦兹线型高度一致,从拟合数据得到中心频率为 6 834.687 520 MHz,线宽为 400 Hz,清晰地证明了该方法的有效性。图 3 (b) 为通过 82 Hz 调频和锁相放大器解调后的钟跃迁鉴频曲线,红色曲线为洛伦兹函数的一阶微分拟合曲线,从图中可以看到过零点,因此该信号可以被用于后续闭环锁定。

为了进一步利用信号源多种调制功能的优势,本文还研究了鉴频曲线与微波功率、调制频率、调制深度的变化规律,测试结果如图 4 所示。图 4 (a) 是采用方波调频,调制频率 42 Hz,调制深度 110 Hz,当微波功率分别为 -25、-29 和 -32 dBm 时的鉴频曲线图。可以看出当微波功率较弱时,鉴频曲线的鉴频斜率随微波功率增加而增大;当微波功率超过一定值时,将会产生饱和和增宽,鉴频斜率随微波功率增加而下降。采用方波调频,微波功率 -32 dBm,调制深度 220 Hz,当调制频率分别为 42 Hz、82 Hz 和 127 Hz 时,测得鉴频曲线如图 4 (b) 所示。从图上可以看出,在中心频率附近处,鉴频斜率变化不大,所以鉴频斜率对调制频率不太敏感,实际使用时选择的范围较大。总之,本文所述的方法可以作为研究铷原子钟的研究平台,为物理部分的精细快速调试提供了很好的技术手段,并且容易推广到铯原子谱线的测

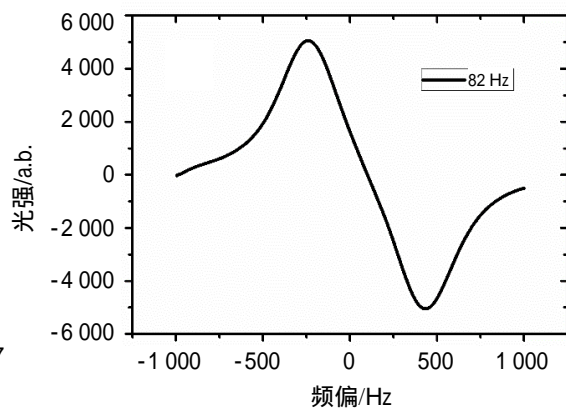
量与优化中。最后，通过 PID 控制器容易实现频率环路的闭环锁定。



图 2 铷原子钟钟跃迁谱线测量及闭环实物图

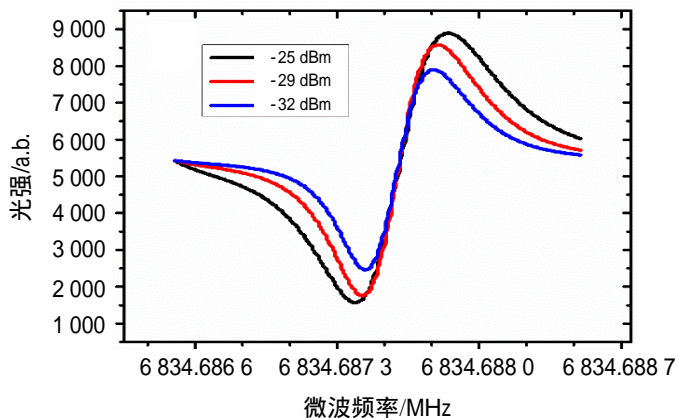


(a) 物理部分吸收曲线图

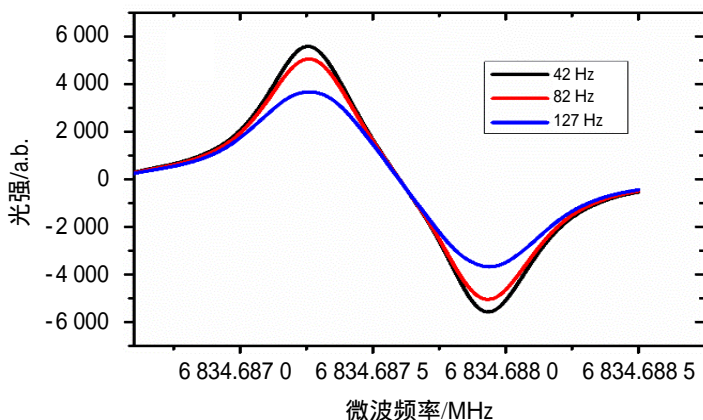


(b) 铷原子钟的鉴频曲线图

图 3 铷原子钟典型测试结果



(a) 鉴频曲线随微波功率的变化规律图



(b) 鉴频曲线随调制频率的变化规律图

图 4 铷原子钟鉴频曲线影响规律

3 被动型氢原子钟钟跃迁谱线测量

被动型氢原子钟由于具有较高的频率稳定度、极低的频率漂移率，也被广泛地应用到卫星导航、地面守时、计量测试、高速通信等领域，因此本文也对基于单频调制的被动型氢原子钟钟跃迁曲线的测量技术进行了探索。单频调制被动型氢原子钟仅采用一个高速调制信号（约 12.5 kHz）即可同时提取和分离出原子频率色散误差信号和谐振腔误差信号，解决了双调制方案中的环路匹配问题，因此被广泛地研究和应用^[4-7]。虽然其微波探寻信号为调相信号，形式并不复杂，但其钟跃迁谱线的提取与测量还是具有挑战性的^[7]。

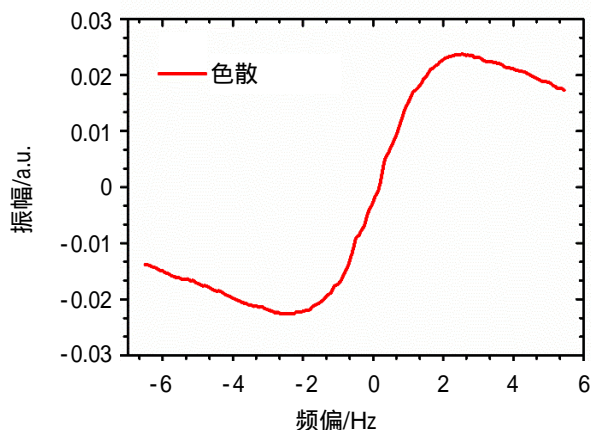
目前对于被动型氢原子钟色散曲线的提取、分离都是基于定制电路进行实现的，该过程需要根据物理部分参数进行仔细设计，一般需要经过很长时间的调试并且不具有通用性，很难满足不同被动型氢原子钟的快速测量与多参数研究。本文在铷原子钟钟跃迁谱线测量研究的基础上，通过对单频调制被动型氢原子钟原理的仔细分析，按照如图 1 所示巧妙利用频谱分析仪的超外差接收原理和视频输出功能，创新地实现了被动型氢原子钟输出的 1.4 GHz 调幅信号的低噪声放大、下变频和检波三种功能，获得了 12.5 kHz 的误差信号的高效提取。然后，通过锁相放大器同步解调实现了色散曲线和腔频误差信号的分离和测量，搭建的装置如图 5 所示。实验中氢原子钟物理部分采用 VCH-1008 作为测试对象，频谱仪采用安捷伦 N9030B 频谱分析仪，频谱仪的带宽设置为 0 Hz，中心频率设置为氢原子钟物理部分输出信号

的载波频率 1 420.405 751 5 MHz, 滤波器类型可使用 Flattop 滤波器(避免接收机引入调相噪声到幅度噪声的转换, 产生假的误差信号)。该方法充分挖掘现有高性能仪器的功能, 快速解决了被动型氢原子钟色散误差曲线以及腔频误差曲线分离、提取测量等难题, 与传统方法相比, 该测量系统具有测量精度高、功能灵活、扩展性强, 能够实现钟跃迁谱线的快速测量。

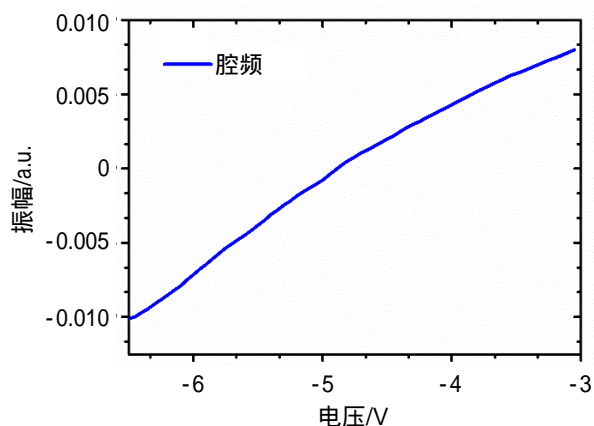
利用此平台, 在谐振腔调谐电压保持恒定时通过扫描微波探寻信号频率获得了氢原子色散曲线, 在探寻微波信号频率保持固定时通过扫描腔调谐电压获得了腔频误差曲线, 典型的测试结果如图 6 所示。从图 6 (a) 可以看出, 原子色散曲线斜率非常陡峭, 并呈现为 S 曲线形状, 在中心频率处误差信号接近于 0, 而腔频误差信号在电压调节范围内近似为线性关系(图 6 (a)), 同样过零点的特征表明该信号能够用于实现腔频环路的锁定。由于色散曲线与腔频误差信号的相位差在理论上接近 90° ^[5], 故本实验中仅利用一台锁相放大器 SR830 的两个通道分别解调出色散曲线和腔频误差曲线, 减少了测量系统的复杂性。



图 5 被动型氢原子钟原子鉴频曲线测试实物图



(a) 原子色散曲线测试图



(b) 谐振腔腔频误差曲线典型测试图

图 6 被动型氢原子钟典型测试结果

本文提出的系统可以方便快速地对原子钟色散曲线与信噪比的影响因素进行快速研究, 下面仅以视频带宽和调相指数对色散曲线的影响规律作以说明。如图 7 (a) 所示, 随着测试系统视频带宽从 1 MHz 逐渐变小为 50 kHz 的过程中, 色散曲线的斜率在 50 kHz 以上基本不变, 50 kHz 时突然变小, 但信噪比

较好。这说明了接收机设计时的低通滤波器在过滤掉高频噪声的同时可能会影响误差曲线的斜率,从而对原子钟稳定度造成影响。另外,微波探寻信号的调相指数也会对色散曲线造成影响。如图 7 (b) 所示,随着微波调相指数的不断增大 (0.2~1.8),色散曲线的斜率不断增大。在调相指数较小时,斜率较小但色散曲线的信噪比很好。因此,在闭环试验中需要综合考虑色散曲线斜率的大小以及信噪比来选择合适的参数。

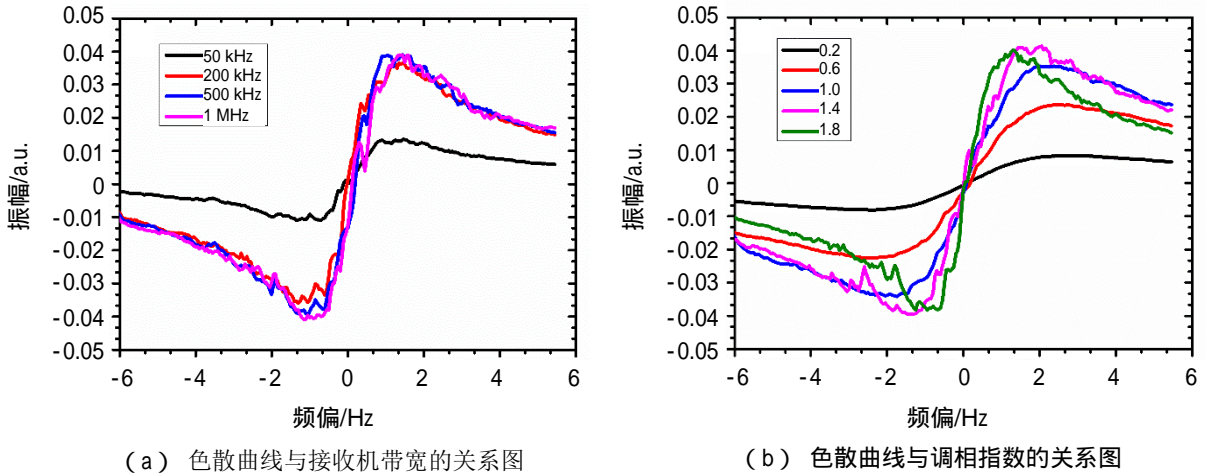


图 7 被动型氢原子钟色散曲线影响规律

最后,对被动型氢原子钟闭环锁定情况进行了验证。原子色散和腔频误差信号分别从锁相放大器的两个通道输出,再经过 PID 控制器处理后分别反馈至信号源压控端口和腔频调整端口,实现了被动型氢原子钟频率环路和腔频环路的双环路锁定。系统闭环后,利用频率稳定度测试仪对钟输出频率进行了测试,最终结果如图 8 所示。可以看出,频率稳定度在 10 000 s 时进入 6×10^{-15} 量级,20 000 s 进入约 4×10^{-15} 量级。该结果不仅证明了本方案的可行性,同时也说明该系统具有非常高的闭环控制精度,能够满足高性能的原子钟研究的要求。

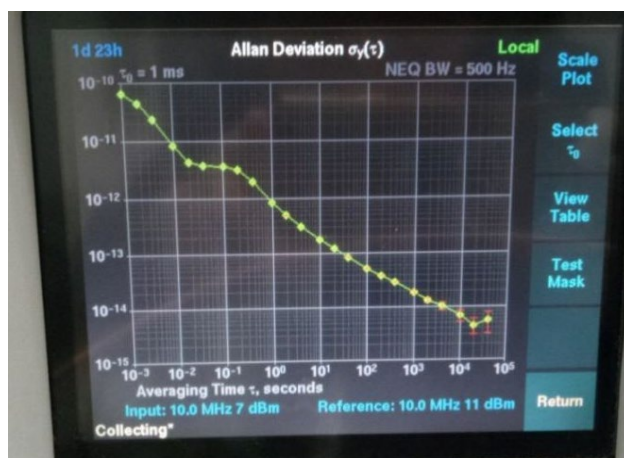


图 8 被动型氢原子钟闭环锁定测试曲线

4 汞离子钟跃迁谱线测量

汞离子钟采用离子囚禁与缓冲气体冷却新技术,被认为是下一代卫星导航的候选钟之一^[8-10]。前文

介绍的铷原子钟和被动型氢原子钟都是基于连续微波与原子体系相互作用,而汞离子钟采用微波脉冲与原子体系分时相互作用,钟跃迁谱线的提取需要严格时序控制系统。因此,在图 1 所示基本框架的基础上需要增加脉冲延迟发生模块,实现离子钟系统中不同类型信号的同步触发或调制。

本文提议的方案通过时序控制板卡或者脉冲延迟发生器 DG645 产生如图 9 (a) 所示的多路脉冲同步信号,其中 Lamp, E-gun, Counter 分别为灯开关控制器、电子枪继电器、光子计数器相应的触发脉冲, μ Rabi 为钟跃迁 Rabi 谱线测量的微波脉冲时序, μ Ramsey 为 Ramsey 钟谱线测量时的微波脉冲时序, μ Frequency 表示微波探寻信号的中心频率变化时序。如图 9 (b) 所示,把各路时序信号接入相应的仪器触发接口,微波探寻信号经过脉冲调制和方波调频输入汞离子钟物理部分,钟跃迁信号经过光电倍增管 PMT 转换为微弱的荧光信号,再由光子计数器实现对离子跃迁曲线微弱信号的触发测量,然后通过光子计数器模拟输出并利用锁相放大器实现误差信号的同步解调,最后使用 PID 处理后反馈至信号源压控端口实现系统的闭环锁定。

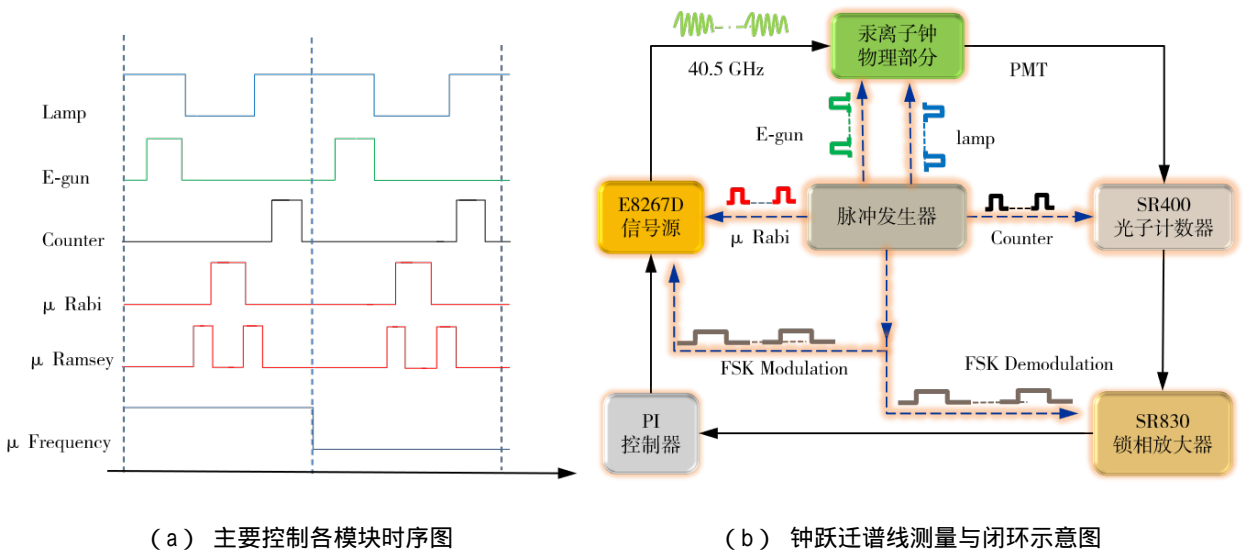


图 9 汞离子钟时序及系统图

由于实验室暂时没有汞离子钟物理部分供测量技术研究,本文仅通过虚拟化物理部分对该方案进行了验证。为了简单起见,本文主要讨论 Rabi 脉冲钟跃迁谱线的测量。首先,利用计算机产生一组中心频率在 40.5 GHz 附近的微波频率序列,然后依据洛伦兹线型函数将其转换成一一对应的低频率脉冲序列,接着通过函数发生器 DG3101A 产生相应的物理电压脉冲,从而实现原子荧光光强的模拟。其次,利用 SR400 光子计数器按照图 9 (a) 中 Counter 的门控时序对该模拟电脉冲序列测量,并将测量值返回计算机或者从模拟端口输出。最后,依据 μ Rabi 时序实现 E8267D 输出微波的脉冲调制,中心频率扫描时按照图 9 (a) 中 μ Frequency 时序在脉冲上升沿和下降沿改变频率值,从而实现钟跃迁谱线半物理仿真,结果如图 10 (a) 所示。

对于汞离子钟鉴频曲线的模拟仿真,还需增加微波频率的方波调频和解调过程。方波调频和 μ Frequency 时序一样,高低电平分别在中心频率基础上加减偏置频率,但微波中心频率扫描只在 μ Frequency 脉冲的上升沿时改变频率。最后,通过锁相放大器或者软件方法实现方波调制的同步解调,结果如图 10 (b) 所示。从仿真曲线中可以看出,该方法成功实现了汞离子钟钟跃迁谱线测量的仿真验证。

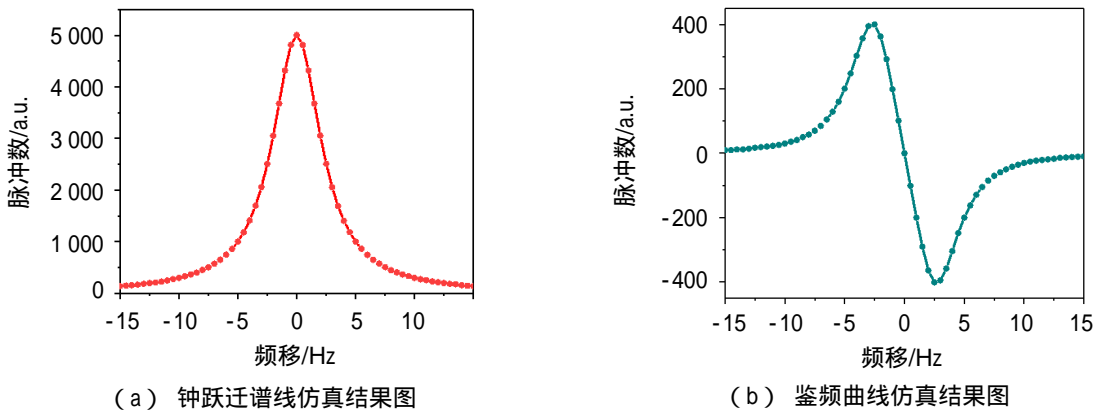


图 10 汞离子钟半物理仿真结果

5 结语

在充分挖掘实验室高性能通用仪器功能的基础上,本文成功建立了被动型微波原子钟钟跃迁谱线精密测量及闭环验证研究系统,该系统具有扩展性强、功能丰富、测量精度高等优点,特别适用于原子钟钟跃迁谱线的快速测量评估和闭环频率稳定度性能的参数迭代优化。针对不同原理,不同微波探寻信号体制的被动型微波原子钟,本文试图从钟跃迁谱线微弱信号提取的统一角度和框架下进行阐述。按照铷原子钟、被动型氢原子钟到汞离子钟的顺序,从简单到复杂,由连续型体制到时序型体制的逻辑,对三种不同类型的原子钟钟跃迁谱线测量系统与方法进行了介绍,研究结果表明该系统不仅具备高信噪比钟跃迁谱线的快速获取能力,同时还具有高性能的频率环路闭环稳定度验证潜力(优于 4×10^{-15})。因此,本文提出的基于通用仪器的微波原子钟钟跃迁谱线测量系统具有广泛的实际应用前景,可以为新型高性能原子钟的快速开发以及性能优化提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 王义道. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [2] 赵春勃, 屈勇晟, 杜二旺, 等. 星载原子钟物理部分通用研究方法[J]. 空间电子技术, 2016(5): 58-64.
- [3] 赵春勃, 张荣彦, 杨涛, 等. 一种被动型原子钟物理部分快速测试评估系统与方法: 中国, 110554262A[P]. 2019.
- [4] 李玉莹, 刘铁新. 利用数字伺服实现被动型氢原子钟单频锁定[J]. 宇航计测技术, 2011, 31(2): 31-33.
- [5] 王勇. 被动型氢原子钟若干关键技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [6] 王楠. 被动型氢原子钟单频调制原理分析[J]. 信息通信, 2017(5): 28-29.
- [7] 郑贺斐, 李晶, 冯克明, 等. 被动型氢原子钟单频调制的鉴频特性研究[J]. 中国激光, 2018, 45(3): 316-323.
- [8] 赵春勃, 张荣彦, 屈勇晟, 等. 汞离子钟的研究现状及星载的发展建议[C] // 第六届中国卫星导航学术年会, 西安: 中国卫星导航学术年会组委会, 2015: 1-7.
- [9] TJOELKER RL, PRESTAGE JD, BURT EA, et al. Mercury ion clock for a NASA technology demonstration mission[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency control, 2016, 63(7): 1034-1043.
- [10] 柳浩. 采用密封真空系统的小型化汞离子微波钟[C] // 第十届中国卫星导航年会, 北京: 中国卫星导航学术年会组委会, 2019.