2015年8月

文章编号: 2095-4980(2015)04-0649-04

基于⁸⁵Rb 的微型化 CPT 原子钟的设计和实现

段 巍,邢 城,赵建业

(北京大学 电子学系, 北京 100871)

要:介绍基于⁸⁵Rb 原子相干布居囚禁(CPT)现象的微型原子钟的设计与实现,系统以 摘 MSP430单片机作为主控芯片,实现电流源、TCXO和射频等功能模块,并与CPT原子钟物理部分 实现联调与整机封装,实现了高稳定度、低功耗的小型 CPT 原子钟。整机体积只有 31 cm3,功耗 为 660 mW, 测得 10 MHz 输出信号稳定度约为 2×10⁻¹⁰ s⁻¹,4×10⁻¹¹/1 000 s。系统采用全宽调制在 ⁸⁵Rb 的 D1 线实现 CPT 原子钟方案,可提升 CPT 共振谱线对比度,提高原子钟稳定度。

关键词:原子钟;相干布局囚禁;⁸⁵Rb;微型

中图分类号: TN874+.2 doi: 10.11805/TKYDA201504.0649 文献标识码:A

A design and implementation of miniature CPT atomic clock based on ⁸⁵Rb

DUAN Wei, XING Cheng, ZHAO Jianye

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: A Coherent Population Trapping(CPT) atomic clock servo control circuit is designed based on the CPT phenomenon of ⁸⁵Rb. Taking MSP430 chip as a platform, combining with the physical device made up of Vecsel laser, photoelectric detector, and small ⁸⁵Rb vapor cell, a miniature atomic clock with the high-performance, high stability, low power consumption and small size is implemented. The volume is 31 cm³ and the power consumption is 660 mW. The frequency stability of 10 MHz measured is 2×10^{-10} /s, $4 \times 10^{-11}/1000$ s. Full-hyperfine-splitting frequency modulation is used to improve the frequency stability.

Key words: atomic clock; Coherent Population Trapping; ⁸⁵Rb; miniature

时间标准是人类探测和研究物质的运动和变化的标尺。随着科技的进步,人们对时间计量的稳定度和准确 度的要求也越来越高,现代科学实验中发现原子内部有非常稳定的能级结构,并且受外部环境的影响很小,由 此人们利用原子的跃迁频率作为时间标准——原子频标或原子钟^[1]。原子钟在现代通信和导航系统中发挥着重 要的作用,随着科技的发展,对小型化低功耗的原子钟的需求越来越多。

相干布居囚禁(CPT)原子钟的出现使得小型化低功耗的原子钟成为可能, CPT 原子钟和其他原子钟相比, 节 省微波腔、原子灯等部件,可以使用毫米级的原子气室,是非常理想的微型化原子钟方案^[2-3]。目前国际上对 CPT 原子钟的研究较为领先,较著名的如 Microsemi 公司,其最新芯片级原子钟(Chip Scale Atomic Clock, CSAC)^[4]体积 16 cm³, 秒稳定度达到 3×10⁻¹⁰、功耗 120 mW。近些年来,国内微型化原子钟也得到了较大的发 展,如中科院物理与数学研究所研制了基于⁸⁷Rb的微型原子钟;北京大学实现了基于⁸⁵Rb的原子钟系统^[5],伺 服电路体积 7 cm×2 cm×1 cm, 微波源体积为 3 cm×3 cm×1 cm, 在大光路物理平台测试, 秒稳可达到 3×10⁻¹⁰。

本文介绍了基于⁸⁵Rb 的相干布居囚禁(CPT)的微型原子钟的设计与实现。与采用⁸⁷Rb 或者 Cs 的微型化原 子钟不同,本文以⁸⁵Rb 作为工作物质,采用全宽调制的方法激发 CPT 共振。通过设计硬件伺服电路,结合实 验室自制物理小光路实现了微型原子钟系统。系统采用 MSP430 作为主控芯片,通过控制输出电流和 3G 射频 信号,激发锁定 CPT 现象,得到稳定的 10 MHz 输出信号。系统体积只有 31 cm³,功耗 660 mW,测得 10 MHz 信号稳定度约为 2×10⁻¹⁰ s⁻¹, 4×10⁻¹¹/1 000 s。

与 Cs 原子的 CPT 钟相比,本文实现了基于⁸⁵Rb 的微型 CPT 原子钟,铷原子钟虽然其准确度较差,长期稳 定度也没有铯原子频标好,但其量子部分的结构非常简单,便于电路实现和批量生产,价格低廉,因此被广泛 使用。并且铷原子低的光频工作频率可作为面向光纤通信的小型化频标^[6]。同时本文采用全宽调制的方式激发 CPT 共振,相比于以⁸⁷Rb 为工作物质的半宽调制方式^[7],可提高 CPT 共振谱线的对比度,减小谱线线宽,且减 小光频移,提高原子钟稳定度。硬件设计上,以往的方案使用同轴介质谐振器(Dielectric Resonator Oscillator, DRO)作为微波源^[5],具有带宽窄、不能自启动的缺点,且含有直接数字式合成器(Direct Digital Synthesizer, DDS)分频模块,增加了系统功耗。本系统直接使用低功耗 LMX2531 射频芯片提供射频信号,调制信号直接控 制射频芯片,这种设计降低了系统功耗,减小了系统体积。在此基础上实现了与小型化物理光路部分的联调与 集成。完成了微型化、低功耗的 CPT 原子钟系统,且系统稳定度与以往 CPT 原子钟方案^[5]在同一量级。

1 CPT 原理和系统结构

1.1 相干布居囚禁

在原子物理当中,当原子接收到的激光频率正好等于该原子能级的频率差值时,该光子就会被原子吸收, 而原子本身会被激发到上能级,发生能级跃迁,透射光的功率会相应降低而出现一个极低值,形成一个吸收 峰。由于原子的上能级并不稳定,受到碰撞和自发辐射等因素的影响,原子会自动跃迁回基态,同时产生荧 光。进行荧光光谱测量就可以发现光谱上出现一条亮线。后来有科学家发现,用两束相干激光作用 Na 原子, 当激光之间频率差值和 Na 原子基态能级里的 2 个超精细能级的 2 个基态能级频率差相等时, Na 原子不会跃迁 到上能级,这种条件下,在荧光光谱上会出现一条暗线。这种原子不会跃迁而被囚禁在基态 2 个超精细能级中 的现象叫做 CPT。3 种原子能级结构(Λ型, V型和 Ξ型)都可以产生 CPT 现象。

图 1 为 ⁸⁵Rb 的 D1 线能级结构,是一个典型的 A 型三能级系统。 如图 1 所示,该三能级系统的 2 个基态能级为 ⁸⁵Rb 原子 $5S_{1/2}$ F=2,F=3 的 2 个超精细能级,分别用 $|\mu>$ 和 $|\mu'>$ 表示。其上能级为 $5P_{1/2}$ 的一条超精细能级,用|m>表示。图中虚线代表相当于 795 nm 激光波 长的拉曼跃迁频率,2 个超精细能级分裂的频率为 3.035 737 GHz,这 也正是 CPT 原子钟的参考频率。

对于以⁸⁷Rb 为工作物质的微型化原子钟,其基态能级分裂差为 6.8 GHz,普遍采用半宽调制的方法^[7],即射频调制频率 3.4 GHz 为基 态能级差的一半,使 2 个边带频率之差刚好等于基态超精细能级分裂 差,以此来激发 CPT 共振。但是采用半宽调制方法会带来较大的光频 移,如果改用全宽调制方式,6.8 GHz 的射频调制频率会增大功耗。本



图 1⁸⁵Rb 原子A型三能级系统(D1 线)

文采用的⁸⁵Rb 全宽调制方式,射频调制频率为 3.0 GHz,可以在不增加功耗的情况下提升 CPT 共振谱线的对比 度,减小谱线线宽,且减小光频移,提高系统稳定度。

1.2 原子钟系统结构

本 CPT 原子钟系统最终目的是使用 TCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator)输出稳定的 10 MHz 频率信号。通过设计完成硬件伺服电路,对由 Vecsel 激光器、⁸⁵Rb 气室和光电探测器(Photo-Diode, PD)组成的 物理光路部分进行控制,激发 CPT 共振,得到稳定的输出信号。在设计方案里,将 TCXO 的 10 MHz 信号进行 倍频到 3.035 737 GHz,并通过调制和误差鉴相使得该射频信号锁定到激发 ⁸⁵Rb 的 CPT 现象所产生的原子基态 2 个超精细能级的频率差上,进而输出稳定的 10 MHz 信号。本系统设计实现的硬件电路除了必须的 MSP430 芯片、TCXO、LMX2531 射频芯片、MAX1979 控温芯片,其余电路只有 AD,DA 和运放芯片,都采用最小封装, 且都为低功耗芯片,电阻电容采用 0402 和 0603 封装,并结合 6 层板设计,实现了系统的小型化。实验室自制的小型化物理光路,可以直接集成到电路板上,使得整机体积只有 31 cm³,功耗 660 mW。

如图 2 所示,本系统以 MSP430 作为主控芯片,控制 2 个环路(电流源环路和射频环路)实现 CPT 的锁定。 电流源环路,通过外部 DA(AD5060—外部 16 位 DA,提高锁定稳定度)控制电流源输出电流,经过 BIAS-T(T 型 偏置器)作用物理部分的激光器产生 795 nm 激光,用于锁定吸收峰。这样保证了后续 CPT 现象的背景暗线的最 大化,能使 CPT 的亮线更稳定和明显。另一路同样通过外部 DA 控制 TCXO 输出 10 MHz 信号,经倍频芯片后 产生 3G 信号,对应 ⁸⁵Rb 原子基态超精细能级频差,以此激发 CPT 共振。物理光路部分通过硬件电路进行控 温,使 ⁸⁵Rb 产生稳定 CPT 现象,并且通过单片机加入电流源和射频两路不同频率小调制信号,经过物理光路 后由光电探测器(PD)接收,并经放大滤波后采样进入单片机,根据采样信号的相位控制 DA 输出,得到稳定的 10 MHz 信号。

1.3 CPT 的锁定

吸收峰的小调制信号由单片机控制的 AD5060产生。DA芯片AD5060的控制字在回 归吸收峰阶段结束时的 DA控制字上产生频率 为 10 Hz 的峰峰值为 6LSB 的幅度切换的小调 制信号,经过物理部分产生同频率的反馈信 号,经过高Q值带通滤波器放大后,在通过单 片机内部AD(12位足够满足精度需求,同时减 小体积和功耗)采样,由于在吸收峰的两侧, 反馈信号的相位相差 180°,单片机通过对比反 馈信号和初始小调制信号的相位的异同对 DA 的控制字进行增加或减少,使得激光器输出激 光位于 795 nm 位置。调整之前需要对准初始 小调制信号和反馈信号的相位,这样调整更精 确,并且能减小噪声干扰。



图 2⁸⁵Rb CPT 原子钟系统框图

如图 3 所示, CPT 峰调制锁定方式与吸收峰类似。CPT 峰的小调制信号通过单片机产生 690 Hz 方波, 经过

积分电路转化为同频率三角波,最后经过电压 转电流电路和电流泵的充电电流对 VCO 的压控 端进行充电。这种通过直接控制 LMX2531 射 频芯片的调制方式可简化电路,降低功耗。由 此,可以得到中心频率附近以一定固定频率 (MCU 产生的方波的频率)和一定调制深度(和三 角波斜率成正比,实验中使用 1.2 kHz 的调制 深度)的 FSK 调制信号^[8-9]。同样小调制信号经 过物理气室、带通滤波及单片机采样后,与初



始小调制信号比较相位异同,以此来调整 TCXO 压控端电压,进而锁定 CPT。

实验中采用单次采样法对误差信号进行判断,即对小调制信号单周期内采样。根据采样信号正负进行相位 判断。这种方法简单,易于调试,降低了系统复杂度,可实现快速锁定。

2 CPT 原子钟稳定度测试结果

锁定 CPT 峰后,通过测试 TCXO 输出的 10 MHz 信号 频率变化,稳定度曲线由阿仑方差计算给出,实验中采用 的计数器型号为 Agilent 53230A,计数器计数参考时钟源 由外部高精度 Rb 原子钟提供。稳定度曲线如图 4 所示。

从稳定度曲线可以看到 TCXO 稳定度约为 2×10⁻¹⁰ s⁻¹, 4×10⁻¹¹/1 000 s,之后趋于平缓。稳定度与以往基于 ⁸⁵Rb 的原子钟系统方案在同一量级^[5],验证了基于 ⁸⁵Rb 微型化 CPT 原子钟方案的可行性。集成小型化物理光路后,系统 整体体积为 31 cm³,功耗 660 mW,实现了小体积、低功 耗的设计。由于外界环境对物理气室周围的磁场及温度影 响较大,这就对气室的控温以及周围的磁场控制有很高的 要求。实验所用小型化物理气室由实验室自制完成,由于



图 4 TCXO 10 MHz 信号稳定度曲线

技术和工艺的限制,气室性能上会有差异,因此稳定度有所限制。同时采样的误差信号易受噪声干扰,这也会 对稳定度有影响,可增加数字滤波进一步减小噪声或提升算法的抗噪声性能。提升物理气室的磁场屏蔽^[10]和控 温性能,减小物理气室体积,以及优化锁定算法,来实现系统稳定度的提高,这是下一步的工作重点。

第4期

3 结论

本文提出了基于 MSP430 单片机的 ⁸⁵Rb CPT 原子钟的设计方案,采取全宽调制的方式激发 CPT 共振,实现了低功耗硬件伺服控制电路的设计以及小型化物理光路的集成,该微型化 CPT 原子钟能够输出稳定 10 MHz 频率信号,信号稳定度约为 2×10⁻¹⁰ s⁻¹, 4×10⁻¹¹/1 000 s,体积大约 31 cm³,功耗大约为 660 mW,实现了低功耗、微型化的 CPT 原子钟设计。

参考文献:

- [1] 翟造成,张为群,蔡勇,等. 原子钟基本原理与时频测量技术[M]. 上海:上海科学技术文献出版社, 2008. (DI Zaocheng, ZHANG Weiqun, CAI Yong, et al. The basic principles of atomic clocks and time-frequency measurement techniques[M]. Shanghai, China: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2008.)
- [2] Knappe S,Wynands R,Kitching J,et al. Characterization of coherent population-trapping resonances as atomic frequency references[J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2001,18(11):1445-1553.
- [3] Liew L,Knappe S,Moreland J,et al. Microfabricated alkali atom vapor cells[J]. Applied Physics Letters, 2004,84(14): 2694-2696.
- [4] Symmetricom. Better undersea sensing with the quantum[™] SA.45s chip scale atomic clock(CSAC)[R]. San Jose,California: Symmetricom, Inc., 2012.
- [5] 郭涛. 小型化 CPT 原子钟电路系统设计及新型 CPT 原子钟提案[D]. 北京:北京大学, 2009. (GUO Tao. Design of miniaturized CPT atomic clock circuit system and proposal of new CPT atomic clock system[D]. Beijing:Beijing University, 2009.)
- [6] WU J,HOU D,WANG Z. Long-term atomic resonator-based stabilization system of ultrafast laser with a small physics package[J]. Electronics Letters, 2013,49(23):1468-1470.
- [7] LIU Lu ,GUO Tao,DENG Ke,et al. Frequency stability of atomic clocks based on coherent population trapping resonance in ⁸⁵Rb[J]. CHIN.PHYS.LETT, 2007,24(7):1883-1885.
- [8] Kratyuk V, Hanumolu P K, Moon U K. A design procedure for all-digital phase-locked loops based on a charge-pump phase-locked-loop analogy[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2007,54(3):247-251.
- [9] Choi K H,Shin J B,Sim J Y. An interpolating digitally controlled oscillator for a wide-range all-digital PLL[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, 2009,56(9):2055-2063.
- [10] 郭东义,石立华,郭曜华,等. 基于频响函数测量脉冲磁场屏蔽效能的新方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2010, 8(1):49-52. (GUO Dongyi,SHI Lihua,GUO Yaohua, et al. Measurement for shielding effectiveness of pulsed magnetic field based on frequency response function[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2010,8(1): 49-52.

作者简介:



段 巍(1989-),男,四川省简阳市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为电路与系统的 分析、设计.email:duanwei_pku@163.com. **邢** 城(1990-),男,重庆市人,在读硕士 研究生,射频工程师,主要研究方向为电路与 系统的分析、设计.

赵建业(1972-),男,江苏省徐州市人,博 士生导师,教授,主要研究方向为特定物理系 统的高频电路设计、时频传输.