

文章编号: 0258-7025(2009)06-1411-05

数字伺服实现相干布居囚禁原子频标的激光稳频

吕利强^{1,2} 杜润昌^{1,2} 刘朝阳¹ 顾思洪¹

(¹ 中国科学院武汉物理与数学研究所, 湖北 武汉 430071)

² 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘要 介绍了为实现小型化相干布居囚禁(CPT)原子频标的激光频率锁定,用以现场可编程门阵列(FPGA)为核心的数字控制电路将激光频率锁定在多普勒吸收峰的工作。以同样的控制方法将微波频率锁定在电磁感应透明(EIT)峰上之后,实现了 CPT 原子频标样机整机锁定。基于 FPGA 用 Verilog 语言实现的 CPT 原子频标数字伺服系统具有电路结构清晰紧凑、参数设置更改方便、程序查错容易、功耗低、温度系数小等优点。受益于语言编写及数字电路的特点,系统具有移植性和一致性好的优点。所研制出的 CPT 频标样机功耗 4 W, 稳定度达到 $6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$, 表明该数字伺服电路方案是可行的。

关键词 激光物理; 原子频标; 激光稳频; 数字伺服; 相干布居囚禁

中图分类号 TP273; TH714.1⁺4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1411

Laser Frequency Stabilization of Coherent Population Trapping Atomic Frequency Standard Realized with Digital Servo

Lü Liqiang^{1,2} Du Runchang^{1,2} Liu Chaoyang¹ Gu Sihong¹

(¹ Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract We present the locking laser frequency on a Doppler absorption peak for the small size coherent population trapping (CPT) atomic frequency standard by using digital control circuit with a field-programmable gate array (FPGA) core. With the similar scheme to lock microwave frequency, it is realized of the close loop locking of the CPT frequency standard. There are many advantages of the digital servo system based on FPGA using Verilog language, such as compact structure, flexible parameter adjustment, easy debug, low power consumption, and small temperature coefficient, etc. Benefited from the characteristics of programming and digital circuit, the system is good in transplanted and consistency. With this digital servo scheme, the realized CPT frequency standard achieves 4-W power consumption and $6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ frequency stability, which proves to be a feasible scheme.

Key words laser physics; atomic frequency standard; laser frequency stabilization; digital servo system; coherent population trapping

1 引 言

原子频标作为准确的时间标准源,在现代社会已获得广泛应用。在传统的原子频标中,气泡型谱灯抽运铷原子频标(铷频标)因其体积小、低功耗而成为使用量最大的原子频标。然而,仍然有大量需要原子频标的用户不能承受铷频标的功耗和体积。

实现进一步小型化、低功耗是原子频标发展的一个重要方向。

利用激光良好相干特性在原子体系中制备相干布居囚禁(CPT)态而实现的原子频标是近年来发展出的一种新原理原子频标,其中被动型 CPT 原子频标的体积、功耗都大幅度小于铷频标,具有良好的应用前景,因此成为小型化、低功耗原子频标发展的热

收稿日期: 2008-10-15; 收到修改稿日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(10574141, 10675163)资助课题。

作者简介: 吕利强(1982-),男,硕士研究生,主要从事 CPT 原子频标方面的研究。E-mail: elan328@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 顾思洪(1955-),博士,研究员,目前主要从事 CPT 原子频标方面的研究。E-mail: shgu@wipm.ac.cn

点^[1~3]。

利用激光实现原子频标,激光稳频是关键环节之一。本文介绍通过数字伺服开展的小体积、低功耗激光稳频的工作。利用现场可编程门阵列(FPGA)作数字伺服实现激光稳频,并用相似方法实现微波频率稳频,研制出小体积、低功耗的CPT频标样机。

2 CPT 频标工作原理

研制的CPT频标以⁸⁷Rb作为工作原子,基态 $M_F=0$ 的两态与激发态 $F=1, M_F=+1$ 态构成制备CPT态的 Δ 型结构,通过D1线实现CPT共振。光源选用垂直腔面发射激光器^[4~7](VCSEL)提供图1所示的双色相干光。为了获得频率差约为6.8 GHz的双色相干光,用频率约为3.4 GHz的微波对VCSEL的直流工作电流做幅度调制,这样VCSEL输出受3.4 GHz调制的调频多色相干光。选满足如图1所示的共振的正负一级边带作为相干双色光,在原子体系中制备出CPT态。CPT谱线以及伴随它的电磁感应透明(EIT)谱线能达到100 Hz甚至更窄的线宽,CPT频标就是用EIT信号作为鉴频信号实现的^[1~3]。

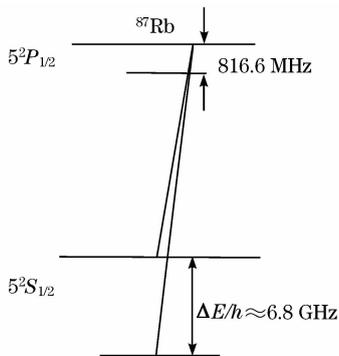


图1 制备CPT态的 Δ 结构

Fig. 1 Δ scheme for preparing CPT state

图2是实现CPT原子频标方案的工作原理框图,激光功率约为 $37 \mu\text{W}$,光斑直径约为4 mm,激光线宽约为100 MHz,吸收泡长度为10 mm,泡温控温约 70°C ,控温能力达到1%(被控温度变化量/环境温度变化量),其中PD为光电探测器,B由螺旋管产生,Optics包括中性衰减片1/4波片等,光电探测器探测与原子作用后的激光束。因为用以调制激光的3.4 GHz微波是由CPT频标的晶体振荡器(晶振)的10 MHz工作频率经过微波链产生的,一旦晶振频率出现波动,激光的正负一级边带的频率差与原子基态超精细能级裂距将出现偏离,窄线宽

EIT谱线就会敏感地探测出频率波动。利用EIT谱线产生负反馈信号对晶振工作频率纠偏实现晶振工作频率锁定,这就是CPT频标的基本工作原理。除了微波频率波动,自由运行的激光器输出的激光频率也会出现波动和漂移,为了保证CPT频标长期稳定工作,还需要锁定激光频率。图2中的2个反馈环路分别通过电流负反馈和电压负反馈锁定激光和微波频率。

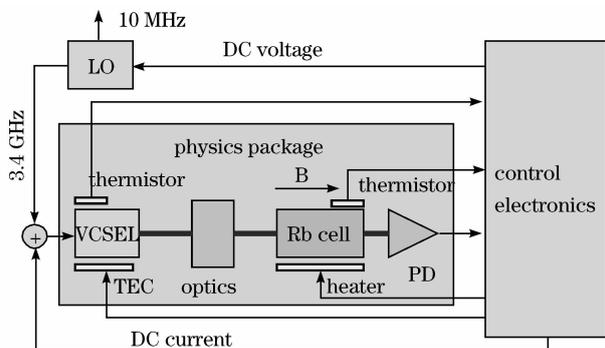


图2 CPT原子频标原理框图

Fig. 2 Block scheme of CPT frequency standard

3 数字伺服的FPGA实现

激光与原子相互作用实验中,通常有一只样品泡单独用于激光稳频。但出于小型化考虑CPT频标只用一只样品泡,除了锁定微波频率的EIT信号,锁定激光频率所用的原子对激光的多普勒吸收谱线也源于此泡^[1]。因为只用一只泡,又不需要微波腔,因此该CPT频标物理系统能够通过微机电加工工艺(MEMS)集成为微型系统,例如已实现的 10 mm^3 大小的微型物理系统^[8]。对于这套小型化的锁定方案前期已开展了理论研究^[9]和实验原理验证,借助商用电子学设备,已经按图2方案实现了短期稳定度小系数 $10^{-11} \tau^{-1/2}$ 的实验室桌面原理性CPT频标^[10,11]。本文介绍用以FPGA为核心的电子学系统,通过电流负反馈实现激光频率锁定的工作。

在研制的CPT频标样机中,激光频率是通过FPGA控制数模转换器(DAC)向VCSEL精确提供电流值而确定的。具体激光频率锁定步骤为:通过FPGA控制DAC改变VCSEL工作电流的直流部分实现激光频率扫描,VCSEL输出受到3.4 GHz频率调制的多色光,与原子作用后获得如图3所示的吸收谱。图3中间幅度最大的吸收峰为由 ± 1 级边带产生的对应图1所示跃迁,相邻2个峰为由基频和 ± 2 级边带产生的跃迁,次相邻的峰为 $+1$,

+3级以及-1, -3级边带产生的跃迁,依次类推。样机的样品泡控温在约 70 °C,相应的多普勒展宽使得 5 $P_{1/2}$ 态裂距 816 MHz 的两超精细能级不能从图 3 吸收谱线充分分辨,但可辨认出它所对应的台阶状结构。为了将激光频率锁定在最大吸收峰的极小值点,VCSEL 供电电流的直流部分还叠加了一个低频小幅度调制,该调制同样由 FPGA 控制 DAC 实现。经物理系统后在光检信号由 ADC 采集后送入 FPGA,由相敏解调获得图 3 吸收谱的微分曲线,作为锁定激光频率的纠偏曲线^[12,13]。

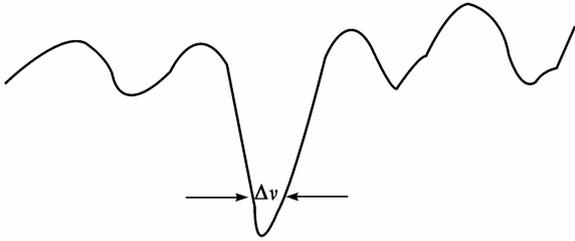


图 3 实验记录铷原子对相干多色光的吸收谱

Fig. 3 Experimental recorded ^{87}Rb absorption spectrum of coherent multi-chromatic light

3.1 同步解调和激光频率锁定方法

原理上调制深度越浅,纠偏曲线的斜率则越大,然而实际确定调制深度还要考虑到吸收谱的信噪比、中心频率的稳定性等因素。实验调试表明,如果调制深度太浅,调制信号将会被 VCSEL 本身的噪声严重干扰甚至被淹没,致使激光频率不能正常锁定。反之,调制过深将人为地造成激光频率波动过大,增加噪声,也会影响锁定效果。对于所获如图 3 所示水平的吸收谱,系统的实验研究表明调制深度 ν_m 与图 3 所示 $\Delta\nu$ 在同一数量级, $\nu_m < \Delta\nu$ 范围获得的纠偏曲线质量较好。

实现激光频率锁定的全过程通过 FPGA 自动控制,如图 4 所示。其步骤为,1)通过 DAC 驱动 VCSEL 工作电流实现激光频率扫描,并同步处理解调出纠偏信号,记录下整个扫描过程纠偏信号的最小值 N 和最大值 P (N, P 必定位于最大吸收峰的极小值对应频率的左右两侧);2)确定 N, P 对应的电流值 x_1, x_2 (为 DAC 控制字),并且得到迭代的初值 A 点对应的 DAC 控制字 $(x_1 + x_2)/2$;3)根据 $(x_1 + x_2)/2$ 点处的纠偏信号值对 VCSEL 工作电流做调整。为正值则以一合适步长减小 VCSEL 工作电流,即减小 DAC 控制字,减小纠偏信号值使之向零点 O 逼近(O 点对应于图 3 中最大吸收峰的极小值)。如解调值为负,则以合适步长增大 VCSEL 工作电流,将增加纠偏信号值向 O 点调整。这样,激

光频率始终在对应 O 点的频率附近调整。每次调整的步长都是根据纠偏信号的绝对值来选取的,因此当系统稳定工作时,激光频率被稳定在吸收峰极小值附近的小范围内,实验的典型值小于 100 MHz。

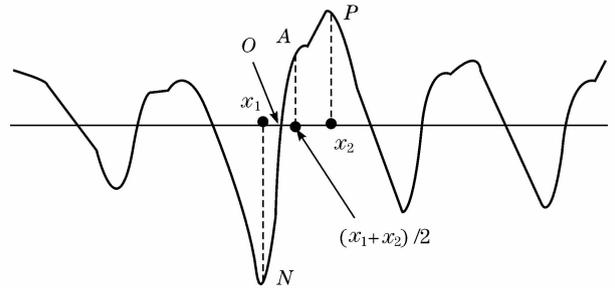


图 4 解调出的微分曲线

Fig. 4 Demodulated differential curve

3.2 伺服系统的基本结构

伺服系统的主体框图如图 5 所示,控制核心为 FPGA,负责数字器件的控制(DAC,ADC 等芯片的初始化配置)、相敏检波,实现对激光频率和微波频率自动扫描、锁定控制。

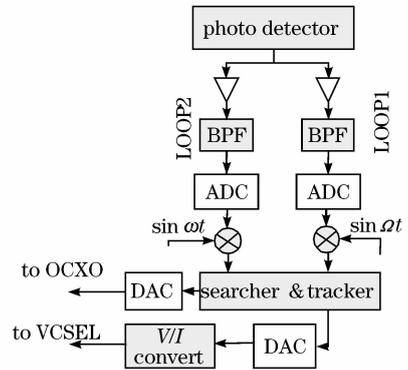


图 5 CPT 频标数字伺服系统框图

Fig. 5 Block scheme of the digital servo of CPT frequency standard

物理系统输出的光检测信号先经过放大电路使信号幅度达到合适范围,再经过带通滤波取出需要的基波信号,处理后由 ADC 采样,采样序列送入 FPGA 进行相敏解调。开机后 FPGA 控制系统进行自动扫描,根据扫描过程中记录的微分曲线得到迭代初值进入锁定状态,并最终使整个系统闭环锁定。图 5 中 LOOP1 为激光频率锁定环路,通过控制 VCSEL 的供电电流来实现激光稳频;LOOP2 则为用基本相同方法通过控制晶振的压控电压实现微波环路的频率锁定。

3.3 解调和自动扫描的 Verilog 实现

在 FPGA 内进行同步相敏检波和自动扫描锁定控制是该数字伺服控制的核心内容。其具体处理

过程为,在光检信号的一个周期 T 内对信号采样 $2n$ 次。在 FPGA 解调程序中,保持基波信号前半周期的 n 个采样输入系列不变而对后半周期的 n 个采样输入系列求补再经累加得到解调结果。求补相加相当于一个减法过程,所以该过程相当于一个基波信号与一个同频方波相乘再累加的过程,即一个用方波相敏解调的过程,其程序流程图如图 6 所示。 $2n$ 为基波一周期内进行 ADC 采样的次数, i 计数器进行模 $2n$ 计数($0 \sim (2n-1)$)。 j 为累加的总点数,要求为整数个周期,取模 $2nm$ 计数。调整 m 可以调整每次得到解调结果所用的基波周期数,相当于调整积分时间。

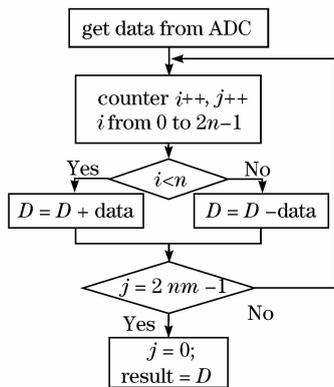


图 6 解调程序流程图

Fig. 6 Flow chart of the demodulation program

自动扫描、锁定和反馈控制的程序流程图如图 7 所示,系统上电后自动复位, FPGA 及外围芯片进

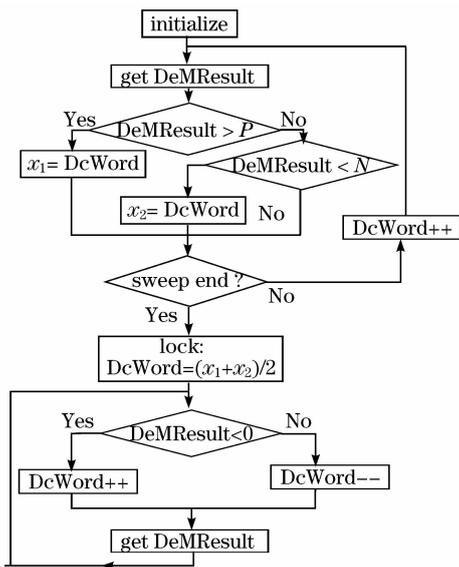


图 7 自动扫描和反馈控制程序流程图

Fig. 7 Flow chart of the auto-search and feedback control program

行初始化,由上述解调程序获得解调结果,即图 7 中

的 DeMResult。在扫描过程中将解调结果与前面获得的最大值 P 和最小值 N 进行比较,满足条件时更新 P, N 点对应的 DAC 控制字 x_1, x_2 。在扫描结束后取初值 $(x_1 + x_2) / 2$,开始迭代,同时根据解调结果给出正确反馈,使 DAC 的控制字 DcWord 收敛到需要的值,进入闭环锁定状态,从而实现激光稳频。微波环路的解调和自动扫描锁定程序和上述方案十分相似,这里不做具体介绍。

4 结果和讨论

利用该方案设计的数字伺服系统,与温控电路、微波电路和物理系统连接实现了频标的激光频率及微波频率的自动扫描、闭环锁定,实现 CPT 频标功能。成功实现闭环锁定并经过对 FPGA 所设置的相关参数做了优化后对频标的频率稳定度做了测量,图 8 为与氢钟做连续 12 h 频率比对测量所获结果。由图 8 可知,该样机频率稳定度达到国外现有 CPT 频标商品的指标^[14,15]。

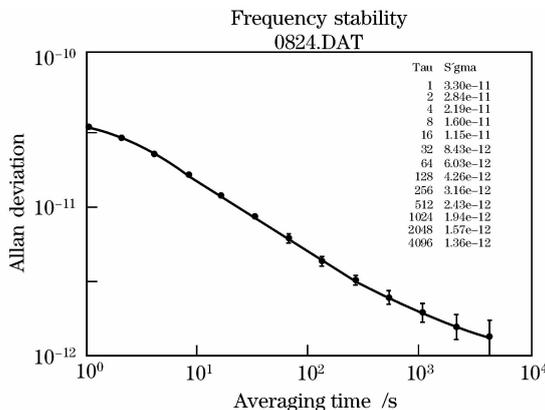


图 8 采用该伺服电路的被动型 CPT 频标的稳定度实测结果

Fig. 8 Frequency stability of the passive CPT frequency standard with the servo circuit

5 结 论

用以 FPGA 为核心的数字控制电路将激光频率锁定在多普勒吸收峰上,实现了小型化 CPT 原子频标的激光频率锁定。再以类似的控制方法将微波频率锁定在 EIT 峰上,从而实现了 CPT 原子频标的整机锁定。基于 FPGA 用 Verilog 语言实现的 CPT 原子频标数字伺服系统电路具有结构清晰紧凑、参数设置更改方便、调试简单及功耗低、温度系数小等优点。受益于语言编写和数字电路的特点,系统具有移植性和一致性好的优点。而且基于

FPGA 用 Verilog 实现的数字伺服系统方案特别适合于转向专用集成电路(ASIC)设计,实现芯片级电子学系统。如配合 MEMS 实现的微型物理系统,就可以实现微型原子钟。与用模拟电路开展的工作相对照,所用数字电路的抗干扰能力也有所提高。应用该方案已经研制出了功耗 4 W,稳定度达到 $6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ 的 CPT 频标样机,表明该数字伺服电路方案是可行的。

参 考 文 献

- 1 J. Vanier. Atomic clocks based on coherent population trapping: a Review[J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**: 421~442
- 2 J. Vanier, A. Godone, F. Levi *et al.*. Atomic clocks based on coherent population trapping: basic theoretical models and frequency stability [C]. *Proceedings of the 2003 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum*, 2003: 2~15
- 3 Fan Qi, Guo Wenge, Zhang Shougang *et al.*. Atomic frequency standard using coherent population trapping[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2006, **29**(2): 107~115
范琦, 郭文阁, 张首刚等. 相干布居囚禁现象用于原子频标[J]. *时间频率学报*, 2006, **29**(2): 107~115
- 4 Hao Yongqin, Liu Wenli, Zhong Jingchang *et al.*. A new process in fabrication of vertical-cavity surface emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 443~446
郝永芹, 刘文莉, 钟景昌等. 垂直腔面发射激光器制作新工艺[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 443~446
- 5 Zhao Lumin, Wang Qing, Yan Changling *et al.*. 980 nm high power vertical cavity surface emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2): 142~144
赵路民, 王青, 晏长岭等. 980 nm 高功率垂直腔面发射激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(2): 142~144
- 6 Liu Lei, Zhao Zhimin, Zhang Cunshan *et al.*. Research on characteristic testing system of VCSEL and its application[J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(5): 390~392
刘磊, 赵志敏, 张存善等. 垂直腔面发射激光器特性测试系统与应用研究[J]. *应用激光*, 2007, **27**(5): 390~392
- 7 Yang Yi, Ruan Yu, Li Zhengjia *et al.*. Rate-equation-based VCSEL thermal model and simulation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3): 194~198
杨宜, 阮玉, 李正佳等. 基于速率方程的垂直腔表面发射半导体激光器温度模型与仿真[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3): 194~198
- 8 J. Kitching, S. Knappe, Li-Anne Liew *et al.*. Chip-scale atomic frequency references [C]. *ION GNSS 18th International Technical Meeting of the Satellite Division*, 2005. 1662~1669
- 9 Li Qiang, Yun Enxue, Gu Sihong. Study of coherent population trapping state with a four-level system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 351~355
李强, 云恩学, 顾思洪. 用四能级系统研究相干布居囚禁态[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 351~355
- 10 Du Runchang, Liu Guobing, Chen Jiehua *et al.*. Realization and investigation of relative experimental parameter of coherent population trapping frequency standard [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1697~1700
杜润昌, 刘国宾, 陈杰华等. 相干布居数囚禁原子频标的实现及相关实验参数研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(8): 1697~1700
- 11 Liu Guobin, Du Runchang, Liu Chaoyang *et al.*. CPT magnetometer with atomic energy level modulation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(2): 472~474
- 12 Cao Yuanhong, Zhang Xianyi, Kang Songbai *et al.*. A digital servo system for rubidium frequency standards [J]. *Chinese Journal of Magnetic Resonance*, 2007, **24**(4): 494~500
曹远洪, 张贤谊, 康松柏等. 铷原子频标数字伺服系统[J]. *波谱学杂志*, 2007, **24**(4): 494~500
- 13 Wang Yidao, Wang Qinji, Fu Jishi *et al.*. Principle of Quantum Frequency Standards[M]. Beijing: Science Press, 1986. 160~165, 235~245
王义遒, 王庆吉, 傅济时等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 160~165, 235~245
- 14 <http://www.kernco.com/pdfs/CPT-C01DataSheet060704D.pdf>
- 15 <http://www.gpstime.com.cn/downloads/SA.31m%20SA.33M.pdf>