

CPT 原子频标数字温控系统优化设计与实现

邓 威¹, 张 奕², 陈杰华¹, 田 原², 吴红卫¹, 顾思洪^{1,2}

(1. 中国科学院原子频标重点实验室, 湖北武汉 430071; 2. 武汉光电国家实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 相干布局囚禁 (Coherent Population Trapping, CPT) 原子频标是一种功耗低、体积小、启动快的新型原子频标, 温控系统是影响 CPT 原子频标稳定度指标的重要环节. 本文介绍了通过优化设计实现 CPT 原子频标的高性能温控系统的方案. 通过仪表放大器的应用提高了前端温度采集电路的温度分辨能力; 通过小波分析算法对温度信号进行降噪处理; 通过 Δ - Σ 算法实现脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM), 提高温控输出调节精度并减小谐波干扰. 基于该方案实现了体积小、功耗低的温控电路, 获得了较好的控温效果, 改善了 CPT 原子频标频率稳定度指标.

关键词: 数字温控; 小波分析去噪; Δ - Σ 算法; 脉冲宽度调制; 原子频标

中图分类号: TP273; O455 + .1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)09-1889-04

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.09.30

Optimization and Realization of Digital Temperature Control System for CPT Atomic Frequency Standard

DENG Wei¹, ZHANG Yi², CHEN Jie-hua¹, TIAN Yuan², WU Hong-wei¹, GU Si-hong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, CAS, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Coherent population trapping (CPT) atomic frequency standards are small-size and low-power consumption atomic frequency standards emerged in recent years. The frequency stability of a CPT atomic frequency heavily depends on the performance of its temperature control system. This article presents our optimization design scheme of the digital temperature control system. In the system the instrumentation amplifier is used to increase the resolution of the temperature measurement, the wavelet analysis de-noise method is used for signal de-noise process, the pulse width modulation (PWM) square wave is precisely modulated through Δ - Σ algorithm, the output resolution is increased, and the harmonic interference is reduced. The realized temperature control system is a small size low power consumption circuit with good performance. With the improved circuit the frequency stability of the CPT atomic frequency standard is improved. This developed temperature control system specially suits for applications in small-size and low-power consumption CPT atomic frequency standards.

Key words: digital temperature control system; wavelet analysis de-noise; Δ - Σ algorithm; pulse width modulation; atomic frequency standard

1 引言

相干布局囚禁 (Coherent Population Trapping, CPT) 现象是相干双色光与原子相互作用所产生的一种量子干涉现象^[1]. 利用 CPT 现象实现的被动型 CPT 原子频标具有功耗低、体积小和启动快的优点, 近年来得到了迅速发展^[2]. 用于控制物理系统温度的温控系统是 CPT 原子频标的关键部件, 将温度长期起伏控制在尽量小的范围是获得 CPT 原子频标优秀中、长期稳定度指标的重要环节^[3]. 我们研制的 CPT 原子频标^[4]的物理系统中原子

蒸汽泡和纵腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, VCSEL) 工作于不同温度, 需要分别进行控温.

已有多种温控系统方案被应用于原子频标^[5,6], 传统的模拟温控不易调节且功耗和体积较大, 脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 温控方式性能受限于时钟频率且易对伺服电路产生干扰. 为了改进温控方案的性能, 我们提出了如图 1 所示的温控方案, 利用仪表放大器提高对温度的分辨能力, 采用微控制器实现多样的温控算法, 最后通过 Δ - Σ 调制 PWM 实现高精度的输出功率控制.

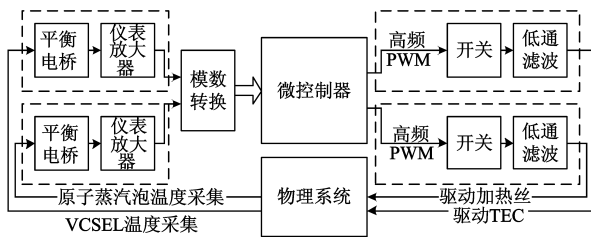


图1 用于CPT原子频标的数字温控系统结构图

2 基于仪表放大器的高精度温度采集电路

温控系统的控温精度受限于测温电路能达到的精度. 为达到预定的控温精度, 需要测温电路需具有较高的温度分辨能力, 并保持较低的噪声水平.

温度采集部分为基于仪表放大器和高精度 AD 的前端温度采集电路. 分别位于原子蒸汽泡处和 VCSEL 处的负温度系数 (Negative Temperature Coefficient, NTC) 热敏电阻用于测温, 热敏电阻接入平衡电桥的其中一臂, 温度变化通过热敏电阻和平衡电桥引起输出电压的改变, 再通过仪表放大器进行差分放大并由 AD 转换为数字信号.

根据热敏电阻的特性:

$$R_T = R_N \cdot \exp\left(B_T \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_N}\right)\right) \quad (1)$$

$$B_T = C \cdot T^2 + D \cdot T + E \quad (2)$$

其中 R_T 为在温度 T 时 NTC 热敏电阻的阻值, R_N 为额定温度 T_N 时热敏电阻的阻值, B_T 为 NTC 热敏电阻的热敏指数, 其本身也是温度 T 的函数, 在温度变化范围较小时, 可忽略 B_T 值随温度的影响, 即 $B_T = B$. 实际用于原子蒸汽泡和 VCSEL 的热敏电阻为 meas-spec 公司的 44000 系列高精度热敏电阻, 其额定阻值 $R_N @ T_N$ 分别为 $100\text{k}\Omega @ 25^\circ\text{C}$ 与 $10\text{k}\Omega @ 25^\circ\text{C}$, B 值分别为 4143K 与 3892K .

前端温度采集电路的输出电压 V 与热敏电阻阻值 R_T 之间的关系为:

$$V = \frac{V_0}{2} \left(\frac{R_0 - R_T}{R_0 + R_T} \right) \cdot G_{\text{INA}} \quad (3)$$

实际控温时, 原子蒸汽泡温度控制在 338K (65°C) 附近, VCSEL 温度控制在 313K (40°C) 附近. 两路温控接入的电桥固定电阻阻值 R_0 分别为 $20\text{k}\Omega$ 与 $5\text{k}\Omega$, 参考电压 V_0 为 2.5V , 设定增益 G_{INA} 为 1000 . 计算可得电桥输出变化与温度变化:

$$\Delta V_{\text{VCSEL}} = 24.73\text{mV/K} \cdot \Delta T_{\text{VCSEL}} \quad (T_{\text{VCSEL}} \approx 313\text{K}) \quad (4)$$

$$\Delta V_{\text{CELL}} = 23.47\text{mV/K} \cdot \Delta T_{\text{CELL}} \quad (T_{\text{CELL}} \approx 338\text{K}) \quad (5)$$

根据原子蒸汽泡中原子密度及 VCSEL 输出激光频率稳定性的要求, 可得原子蒸汽泡和 VCSEL 的控温能力分别要优于 0.05K 及 0.003K .

我们测量了该电路在稳定输入时的输出. 实测信号经过仪表放大器的增益为 G 为 1015 , 增益误差优于 1.5% . 电桥输出的噪声保持在 0.03943mV , 经过仪表放大器放大之后输出信号的噪声为 7.27mV . 由公式 (4)、(5) 可知该温度采集电路可分辨的原子蒸汽泡的温度变化约为 0.31mK , 可分辨的 VCSEL 温度变化约为 0.29mK . 结果表明该电路具有较高的信号增益, 同时保持了较低的噪声水平, 符合所需的测温能力要求.

3 小波算法实现温度信号的降噪处理

如何从滤除噪声提取有用信号是实现高性能温控系统的一个重要环节. 采用常规的滤波方法^[7]由于其只对频域进行分析, 在滤波的同时会造成反映温度瞬变信息的高频信号的损失. 运用小波分析进行信号的降噪处理^[8]能够同时在时频域中对信号进行分析, 实现在滤除噪声的同时有选择地提取各个所需频率信号. 本文采用 Mallat 算法来分解信号与噪声, 对温度信号 $T(n)$ 进行多分辨率分析. 通过 AD 采集得到的包含噪声的温度信号为 $T(n)$, 通过设定取样窗口以及信号延拓得到当前时间段的温度信号:

$$T(k) = t(k) + e(k), \quad k = t - N, t - N + 1, \dots, t, t + 1, \dots, t + N \quad (6)$$

其中, $t(k)$ 为温度信号, $e(k)$ 为噪声信号. 对该信号进行小波分解, 每次分解得到一个低频的平滑部分 $d(k, j)$ 和一个高频的细节部分 $a(k, j)$, 低频部分可以重复分解下去:

$$d(k, j+1) = \sum_n d(n, j) \cdot h(n - k, j) \quad (7)$$

$$a(k, j+1) = \sum_n d(n, j) \cdot g(n - k, j) \quad (8)$$

其中 $h(j)$ 和 $g(j)$ 分别为用于分解低频和高频的小波基, $d(j)$ 和 $a(j)$ 分别为第 j 级的低频和高频分解结果. 根据噪声的特征, 对各个分解尺度下的高频系数选择一个阈值进行软阈值量化处理^[9]. 最后根据小波分解的最底层低频系数和各层高频系数进行小波重构, 得到降噪处理后的温度信号:

$$d(k, j) = \sum_n d(k, j+1) \cdot h^*(n - k, j) + \sum_n a(k, j+1) \cdot g^*(n - k, j) \quad (9)$$

其中 $h^*(j)$ 和 $g^*(j)$ 分别为用于重构低频和高频的小波基, 经过阈值处理后重构的信号, 噪声部分被抑制, 有效信号被保留, 实现了噪声中信号的提取.

图 2 为采用小波分析方法得到的降噪结果. 其中图 2(a) 为原始温度信号, 图 2(b) 为经过小波分析降噪之后的温度信号. 由结果可得, 通过小波分析方法对温度信号进行处理, 使得温度信号的信噪比得到了提高.

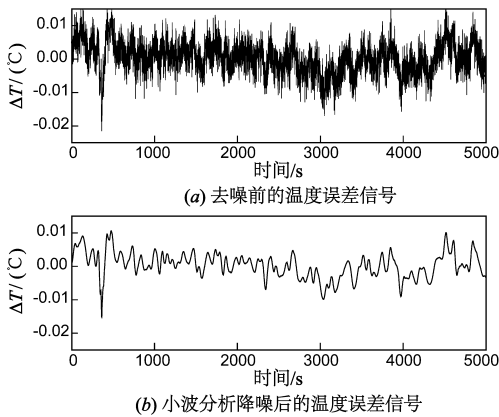
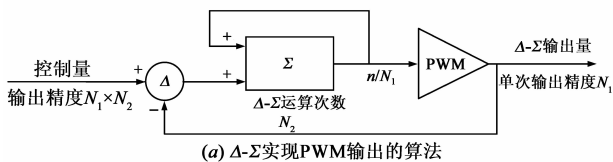


图2 利用小波分析方法对温度误差信号降噪的结果

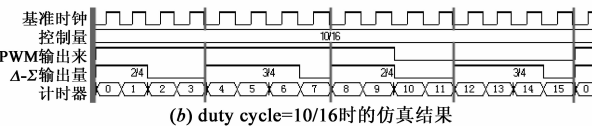
4 Δ-Σ 调制提高 PWM 输出精度

功率输出的实现可以通过 DA 将输出转换为模拟信号,然后通过输出网络实现功率输出.此种方式需要高精度的 DA,且输出效率较低,线性度较差.另一种方式为用微控制器输出 PWM 的信号来进行温度控制.此种方式具有线性度好、效率高、体积小等优点,但其调节精度与输出方波频率成反比,高频 PWM 输出导致调节精度降低,低频 PWM 输出易对伺服电路产生谐波干扰.

我们将 Δ-Σ 技术和 PWM 技术相结合,实现高分辨率,高效率的温控可控功率输出网络. Δ-Σ 算法包括 Δ 和 Σ 两部分.对于一个给定的某一输出量,计算其与上一次的输出量的差值 Δ,然后对 Δ 值进行累加得到 Σ 后量化输出,就完成了 Δ-Σ 调制运算,算法如图 3(a)所示. Σ 值量化输出产生的误差累加至下一次运算,通过多次运算使得该误差减小乃至消除.



(a) Δ-Σ 实现 PWM 输出的算法



(b) duty cycle=10/16 时的仿真结果

图3 Δ-Σ 实现 PWM 输出的算法与仿真结果

以 PWM 调节精度 $N_1 = 4$ 举例,当对 PWM 方波占空比调节次数为 $N_2 = 4$ 时,总的输出精度为 $N = N_1 \times N_2 = 16$. 图 3(b) 为对控制量为最大输出幅度的 10/16 时进行模拟的结果.

实际应用中我们采用 Δ-Σ 方式实现的 PWM 输出频率为 39.0625kHz,周期为 25.6μs, PWM 可调节的步长为 0.1μs,即每次可调节的点数为 256,每次反馈对 PWM 调节的次数为 2048 次,因此得到的 PWM 方波总的输出

可调节的点数为 524288.与原先的频率为 2kHz、输出输出可调节点数为 5000 的 PWM 温控方法相比较, Δ-Σ 方法同时提高了 PWM 方波的输出精度与输出频率,同时减小了对伺服电路的谐波噪声影响.

5 温控与频率稳定度测量结果

利用该方案我们对物理系统的原子蒸汽泡和 VCSEL 进行控温,取原子蒸汽泡的控温点为 65°C, VCSEL 的控温点为 40°C,在室温环境中测试了温控效果,具体结果如图 4 所示.

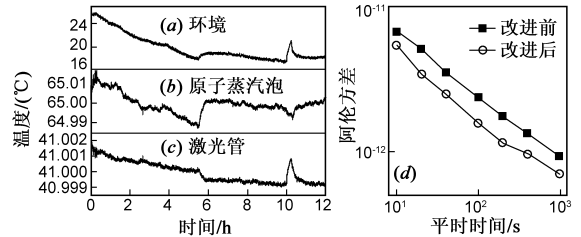


图4 CPT物理系统处于室温环境的控温结果;(a).物理系统所处环境温度变化;(b).原子蒸汽泡温度变化;(c).VCSEL温度变化;(d).温控改进前后CPT原子频标频率稳定度对比

在 12 小时内环境温度变化约为 8°C,在此期间原子蒸汽泡温度变化量在 0.03°C 以内, VCSEL 温度变化量在 0.002°C 以内,利用改进后的温控系统对 CPT 原子频标物理系统进行控温,在其他参数保持不变的情况下测量 CPT 原子频标输出频率稳定度,得到的最佳频率稳定度与温控改进前最佳频率稳定度对比,改进后的温控系统有效地改善了 CPT 原子频标的中长期频率稳定度,其中 1000s 处的稳定度由 9.27e-13 提高至 7.01e-13,根据已发表的文献,该值为小型化 CPT 原子频标已经达到的最好指标之一.

6 结论

本文介绍了 CPT 原子频标温度控制系统性能的优化设计方法.通过仪表放大器的应用实现了高性能的温度采集前端;通过小波算法对信号进行了降噪处理;通过 Δ-Σ 方法调制 PWM 方波的输出,提高了输出功率的调节精度,减小了谐波干扰.

实验结果表明,基于该方法实现的温控系统占用的体积小,输出效率高,特别适合 CPT 原子频标的要求.该温控系统方案达到了较好的控温精度,应用于 CPT 原子频标有效地改善了频标的性能,其中长期频率稳定度达到同类频标的先进水平.

参考文献

[1] E Arimondo. Coherent population trapping in laser spectroscopy [J]. Progress in Optics, 1996, 35: 257 - 354.
 [2] J Vanier. Atomic clocks based on coherent population trapping:

- A review[J]. Applied Physics B, 2005, 81(4): 421 – 442.
- [3] V Gerginov, S Knappe, V Shah, Peter D D Schwindt, L Hollberg, J Kitching. Long-term frequency instability of atomic frequency references based on coherent population trapping and microfabricated vapor cells[J]. JOSA B, 2006, 23(4): 593 – 597.
- [4] 陈杰华, 杜润昌, 赵 ■ 成, 等. 一种低功耗被动型 CPT 原子钟[J]. 计量学报, 2010, 31(5): 417 – 420.
CHEN Jie-hua, DU Run-chang, ZHAO Ji-cheng, et al. A low power consumption passive CPT atomic clock [J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 31(5): 417 – 420. (in Chinese)
- [5] 何昌明, 张贤谊, 闫世栋, 等. 铷原子频标数字温控电路的设计[J]. 波谱学杂志, 2009, 26(3): 375 – 384.
HE Chang-ming, ZHANG Xian-yi, YAN Shi-dong, et al. Design of a digital temperature control circuit for rubidium atomic frequency standard [J]. Chinese Journal of Magnetic Resonance, 2009, 26(3): 375 – 384. (in Chinese)
- [6] 陈杰华, 郑金州, 刘朝阳. 一种基于电源芯片的温控器 [P]. 中国专利: 200810047426.7, 2010-04-07.
- [7] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 280 – 291.
- [8] 刘英霞, 王欣. 最佳软门限去噪[J]. 电子学报, 2006, 34(1): 167 – 169.
LIU Ying-xia, WANG Xin. Optimal soft thresholding for signal denoising [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(1): 167 – 169 (in Chinese)

- [9] 张磊, 潘泉, 张洪才, 等. 小波域滤波阈值参数 C 的选取 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 400 – 402.
ZHANG Lei, PAN Quan, ZHANG Hong-cai, et al. On the determination of threshold in threshold-based de-noising by wavelet transform [J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(3): 400 – 402. (in Chinese)

作者简介



邓 威 男, 1986 年 10 月出生于湖北省宜昌市. 中国科学院武汉物理与数学研究所博士. 主要研究方向为相干布局囚禁原子频标及嵌入式系统.

E-mail: dengwei@mail.ustc.edu.cn



张 奕 男, 1984 年 1 月生于湖北省蕲春县. 华中科技大学博士. 主要从事相干布局囚禁原子频标相关研究.

E-mail: endrymionzy@smail.hust.edu.cn

顾思洪(通信作者) 男, 博士, 中国科学院武汉物理与数学研究所研究员. 研究方向: 原子频标.

E-mail: shgu@wipm.ac.cn