

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-02-0128-07

脉冲光抽运铷原子钟 C 场电流源分析设计^{*}

薛文祥^{1,2,3}, 王柯穆^{2,3}, 杜志静^{1,2}, 郝强^{1,2}, 王鑫^{1,2}, 张首刚^{1,2}

(1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院 时间频率基准重点实验室, 西安 710600;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:脉冲光抽运铷原子钟的稳定度会受到多种因素的影响, 其中磁场就是重要的影响因素之一。分析了 C 场电流对脉冲光抽运铷原子钟稳定度的影响, 利用差动放大器为核心设计研制了新型 C 场电流源。测试表明, 电流源 1 Hz 和 10 Hz 处的噪声分别为 $3 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.5 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$, 电流相对起伏为 2×10^{-5} , 温度漂移为 $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ 。它产生的 C 场对脉冲光抽运铷原子钟 1 s 处稳定度的影响小于 7×10^{-16} , 1 ks 处的影响小于 1×10^{-16} , 10 ks 处的影响小于 5.3×10^{-17} 。结果表明, 该电流源的噪声、相对起伏和温度漂移等性能满足脉冲光抽运铷原子钟要求。

关键词:脉冲光抽运铷原子钟; 稳定度; C 场电流源; 差动放大器

Analysis and design of current source of C-field for the pulsed optically pumped rubidium clock

XUE Wen-xiang^{1,2,3}, WANG Ke-mu^{2,3}, DU Zhi-jing^{1,2}, HAO Qiang^{1,2},
WANG Xin^{1,2}, ZHANG Shou-gang^{1,2}

(1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The stability of the pulsed optically pumped Rb clock is influenced by several effects, the magnetic field fluctuation is one of the most important one. In this paper, the influence of C-field on the stability of the pulsed optically pumped Rb clock was analyzed, and a new current source of C-field was designed by utilizing differential amplifier. The test results show that the noise is $3 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ and $1.5 \text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 Hz and 10 Hz Fourier frequencies, respectively, the relative current fluctuation is 2×10^{-5} and the temperature coefficient is $5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$. The impact on stability performance of the pulsed optically pumped Rb clock is less than 7×10^{-16} at 1 s, 1×10^{-16} at 1 ks, and 5.3×10^{-17} at 10 ks. The results show that the designed C-field current source can meet the requirements of the pulsed optically pumped Rb clock.

Key words: pulsed optically pumped Rb clock; frequency stability; current source of C-field; difference amplifier

^{*} 收稿日期: 2018-10-19; 接受日期: 2018-11-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11603031)

作者简介: 薛文祥, 男, 助理研究员, 主要从事脉冲光抽运(POP)铷原子钟研究。

0 引言

脉冲光抽运(pulsed optically pumped,POP)铷原子钟的光抽运、微波激励和钟跃迁信号检测在时间上完全分开,即原子与微波相互作用时,不存在抽运光场。因此,POP 铷原子钟避免了光与微波的相干耦合,理论上可以消除光频移^[1-2],相比于传统铷原子钟具有更好的稳定度。

近年来意大利国家计量科学研究院(INRIM)在欧洲空间局(ESA)的资助下,开展了 POP 铷原子钟的研制工作^[1-4]。2012 年,他们将物理部分置于真空罐中,利用光检测方式,获得 $\sigma_y(\tau)=1.7\times10^{-13}\tau^{-1/2}$ ($\tau=1\sim2$ ks)的稳定度,频率漂移为 $7\times10^{-15}/\text{d}$ ^[4]。中科院国家授时中心和上海光学精密机械研究所也开展了 POP 铷原子钟的研究工作。国家授时中心主动型 POP 铷原子钟的短期稳定度为 $1.2\times10^{-12}\tau^{-1/2}$ ^[5],与 INRIM研制的主动型 POP 铷原子钟相当。上海光学精密机械研究所基于正交偏振光探测的 POP 铷原子钟,信号对比度高达 97%,短期稳定度为 $2.1\times10^{-13}\tau^{-1/2}$ ^[6-7]。目前,国内两家单位均在进行工程化样机研制。

POP 铷原子钟的共振吸收泡需要放置于均匀、恒定的弱磁场(简称 C 场)中,利用塞曼效应分离铷原子的 0-0 和非 0-0 跃迁^[8]。C 场通常是由通电螺线管产生,它的起伏及漂移会影响原子钟的频率稳定度,而 C 场强度的性能又由 C 场电流决定。因此,C 场电流的稳定性直接影响原子钟的稳定度。本文主要研究 C 场电流对 POP 铷原子钟的影响,以集成差动放大器为核心设计研制了精密 C 场电流源,大幅降低了 C 场电流对原子钟的影响。

1 C 场电流对 POP 铷原子钟的影响

POP 铷原子钟参考频率是 $|^2S_{1/2};F=1,m_F=0\rangle$ 和 $|^2S_{1/2};F=2,m_F=0\rangle$ 能级间的跃迁频率,即 0-0 跃迁,相应的频率值为 6 834.682 610 MHz(外磁场 $B=0$)。在磁场中,根据塞曼效应,0-0 跃迁频率 ν_0 可表示为^[9]

$$\nu_0 = \nu_{\text{hfs}} + K_0 |B \cdot e_z|^2,$$

(1)

式(1)中, ν_{hfs} 是外磁场 $B=0$ 时 0-0 跃迁的频率。 $\nu_z = K_0 |B \cdot e_z|^2$ 为二级塞曼频移, $K_0 = 575.14 \text{ Hz/G}^2$, e_z 为量子化轴方向。

对于原子钟,外磁场 B 一般由三部分组成,可表示为^[9]

$$B = B_0 + B_r + B_s,$$

(2)

式(2)中, B_0 是由通电螺线管产生,即 C 场,它的稳定性直接由 C 场电流决定。 B_r 为剩余地磁场, B_s 是磁屏蔽材料自身的剩磁。在工程化研制中,采用特殊设计和材料, B_r 和 B_s 对 POP 铷原子钟稳定度的影响在 10^{-16} 量级。因此,本文只考虑 C 场对 POP 铷原子钟的影响。图 1 为 POP 铷原子钟的腔泡系统及 C 场,C 场线圈外有 3 层磁屏蔽,图中未画出。

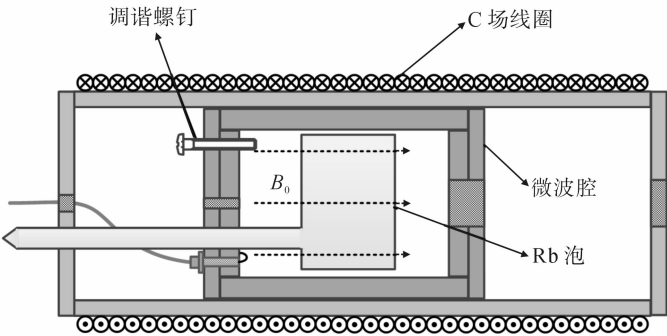


图 1 POP 铷原子钟的腔泡系统及 C 场

如图 1 所示, C 场由通电螺线管(C 场线圈)产生, 铷泡所处的区域可以认为 C 场强度 B_0 与 C 场电流 I 成正比, 即:

$$B_0 = kI, \quad (3)$$

式(3)中, k 为螺线管的磁场电流系数。由式(1)和(3)可得, C 场电流起伏 ΔI 导致原子钟参考频率的起伏 $\Delta\nu_c$ 可表示为

$$\Delta\nu_c = 2K_0 k^2 I_0 \Delta I, \quad (4)$$

式(4)中, I_0 为 C 场电流 I 对时间的平均值。C 场电流起伏对原子钟稳定度的影响, 用 Allan 方差表示为

$$\sigma_y(\tau) = \frac{2K_0 k^2 I_0}{\nu_0} \sigma_I(\tau), \quad (5)$$

式(5)中, $\sigma_I(\tau)$ 为 C 场电流的稳定度。

根据 Allan 方差的频域表达式, 利用 C 场电流的噪声谱密度也可以计算得到它对原子钟稳定度的影响。由 Wiener - Khintchine 公式可知频率噪声谱密度为^[10]

$$S_{\Delta\nu}(f) = 2 \int_0^\infty R_{\Delta\nu}(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau, \quad (6)$$

式(6)中, f 为傅里叶频率, $R_{\Delta\nu}(\tau)$ 为频率起伏 $\Delta\nu(t)$ 的自相关函数, 其表达式为

$$R_{\Delta\nu}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \Delta\nu(t+\tau) \Delta\nu(t) dt. \quad (7)$$

用 Allan 方差表征的频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$ 可以由相对频率噪声谱 $S_y(f)$ 的积分来确定, 即^[11]:

$$\sigma_y^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_y(f) \frac{\sin^4(\pi f\tau)}{(\pi f\tau)^2} df, \quad (8)$$

式(8)中, $S_y(f) = \frac{1}{\nu_0^2} S_{\Delta\nu}(f)$ 。

实际中, 通过测量可以得到 C 场电流源输出电流噪声谱密度 $S_{\Delta I}(f)$, 由式(4), (6), (7) 可得:

$$S_{\Delta\nu}(f) = (2K_0 k^2 I_0)^2 S_{\Delta I}(f). \quad (9)$$

可以由 C 场电流的噪声谱密度, 根据式(8)和(9)可计算得到 C 场电流对原子钟稳定度的影响。

2 POP 铷原子钟 C 场电流源设计

传统精密电流源一般由运算放大器、电阻、电容和其他分立器件构成^[12-13], 而分立元件, 特别是电阻的匹配精度和漂移很难得到保证。因此, 传统电流源不仅体积和功耗大, 成本高, 而且在噪声、温度漂移和精度等方面也存在不足, 难以满足 POP 铷原子钟对 C 场电流源的要求。

随着高精度、低漂移、低功耗和低成本的集成差动放大器出现, 使得性能更高、尺寸更小、成本更低的电流源变成现实^[14]。为了获得更低噪声和漂移, 以及更小体积的电流源, 我们以集成差动放大器 AD8276 为核心设计了 POP 铷原子钟的 C 场电流源。相比于用分立元件构建的电流源, 有效减小了输出电流的温度漂移和误差。并且利用分辨率为 16 位的高精度数模转换器(DAC8830), 设计了精密可调参考电压源, 可以准确灵活的调节电流大小。该电流源的核心电路原理如图 2 所示, 图 3 为其实物照片。

如图 2 所示, DAC8830 输出的电压 V_{ref} 经 AD8607-A 跟随后, 输出到 AD8276 的同相输入端, 控制输出电流 I_0 的大小, AD8276 的反相输入端则直接接地。AD8276 内置 4 个匹配精度非常高的 40 k Ω 激光调整电阻, 分别与输入(2 和 3)引脚、1 引脚和 5 引脚相连^[15]。它的输出驱动晶体管 2N3904 输出电流。反馈网络选用低失调电流(最大值为 1 pA)、低偏置电压(小于 50 μ V)和低温漂(最大值为 4.5 μ V/ $^{\circ}$ C)运算放大器 AD8607^[16], 避免了负载为高阻抗时引入明显的失调误差, 而且可以在较宽的温度范围内工作。除电阻 R_i 外, 该电流源不需要其他分立电阻。因此, 以低功耗差动放大器 AD8276 和运算放大器 AD8607 构建的电流源, 不仅噪声、温度漂移和功耗等性能都非常出色, 而且结构简单、体积小、成本低。如图 3 所示, 电路板的长

和宽分别为 6.34 cm 和 3.86 cm,左侧的 DB9 接口是上位机用来设定电流值的大小。

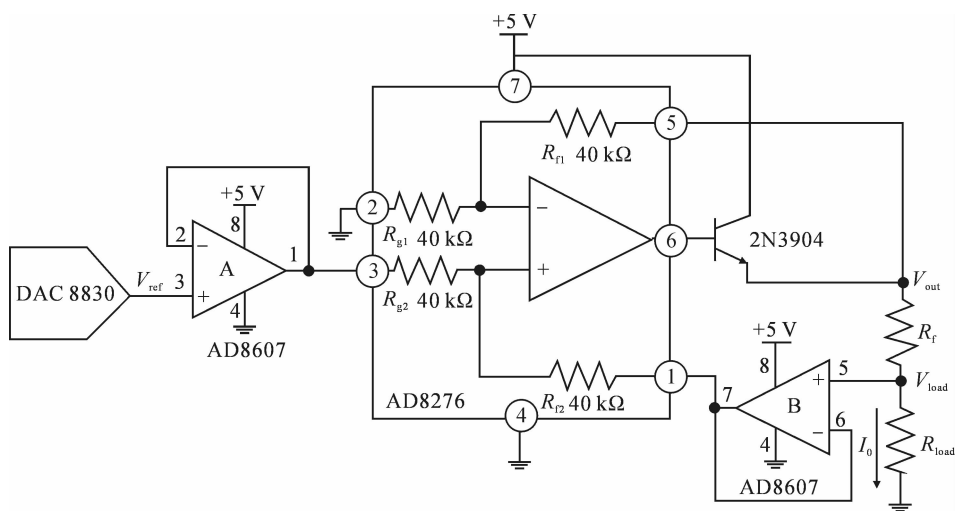


图 2 以差动放大器为核心的电流源

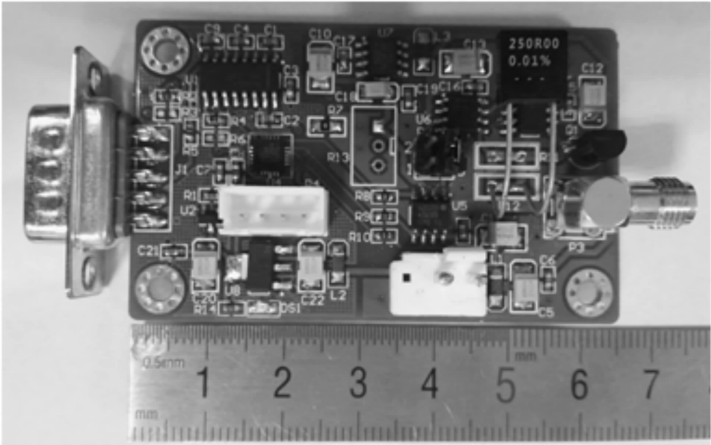


图 3 C 场电流源实物照片

理论上,图 2 所示电路输出电流 I_0 可表示为

$$I_0 = \frac{V_{\text{ref}}(R_{f2}/R_{g2} + R_{f1}/R_{g1} \cdot R_{f2}/R_{g2})}{R_f(1 + R_{f2}/R_{g2}) + R_{\text{load}}(R_{f2}/R_{g2} - R_{f1}/R_{g1})}, \tag{10}$$

式(10)表明,该电流源的主要误差和漂移源于电阻 R_{f1} , R_{f2} , R_{g1} 和 R_{g2} 的匹配精度与漂移,以及参考电阻 R_f 和负载电阻 R_{load} 的公差与漂移。而 AD8276 的片内电阻具有非常严格的匹配精度(典型增益误差为 0.005%, B 级)和近乎一致的温度特性(最大增益漂移为 1 ppm/°C, B 级)^[15],即 $R_{f1}/R_{g1} = R_{f2}/R_{g2} = 1$ 。因此,公式(10)可简化为

$$I_0 = \frac{V_{\text{ref}}}{R_f}. \tag{11}$$

式(11)表明,只要 V_{ref} 和 R_f 的温度特性和精度得到保证,就可以保证 C 场电流源输出电流 I_0 的性能。实际设计中,DAC 的参考电压由 ADI 公司的 REF192ES 提供,其精度为 0.08%,温度漂移为 2 ppm/°C。 R_f 选用 Vishay 公司型号为 S102J 的 250 Ω 电阻,其精度为 0.01%,温度漂移为 2 ppm/°C。

3 实验测试分析

实验中,POP 铷原子钟所需的 C 场强度 B_0 约为 $2\text{ }\mu\text{T}$,C 场线圈的磁场电流系数约为 $2\text{ }\mu\text{T}/\text{mA}$,因此以下测试均将 C 场电流源的输出电流大小设为 1 mA ,这样 C 场对原子钟稳定度的影响系数($2K_0k^2I_0/v_0$)约为 6.73×10^{-11} 。

用动态信号分析仪(SR785,Stanford Research Systems)测量电流源输出电流噪声谱,测试原理框图如图 4 所示。实际上,SR785 直接测量的是取样电阻两端的电压噪声谱密度,然后换算出电流的噪声谱。其结果如图 5 所示, 1 Hz 与 10 Hz 处的噪声分别为 $3\text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 和 $1.5\text{ nA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

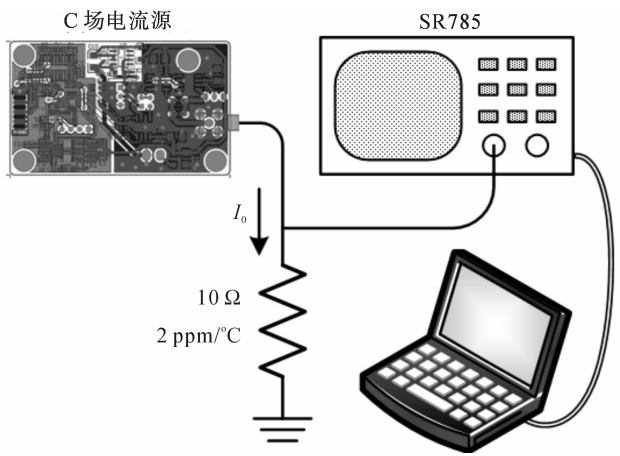


图 4 电流噪声谱测试原理框图

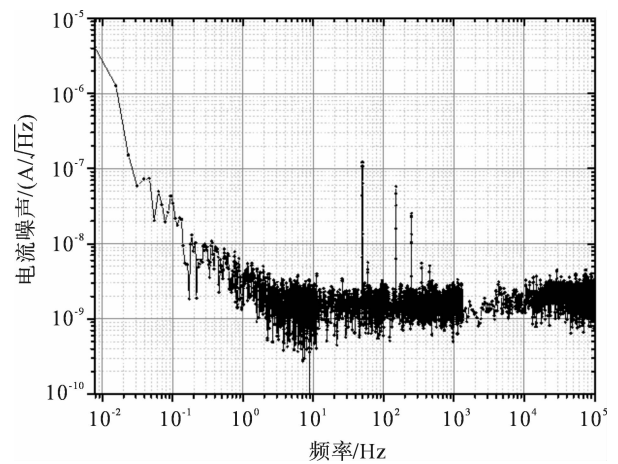


图 5 C 场电流源输出电流噪声谱($I_0=1\text{ mA}$)

将 C 场电流源输出电流设为 1 mA ,用八位半数字万用表(3458A,Keysight)实时测量电流值。同时用温度传感器(PT100,A 级)和六位半数字万用表(34410A,Keysight)监测实验室环境温度,温度传感器放置于电流源附近。采样间隔都为 10 s ,测试结果如图 6 所示,其中图 6(b)为图 6(a)中虚线框内的放大图。结果表明,电流源输出电流精度为 0.02% ,相对起伏为 2×10^{-5} 。

图 6(a)中电流曲线与温度曲线的总体走势和局部放大图 6(b)表明,电流与实验室温度的波动几乎同周期,且呈正相关。这主要是由于电阻 R_t 、参考电压 V_{ref} 以及电源电压受环境温度的影响引起的。

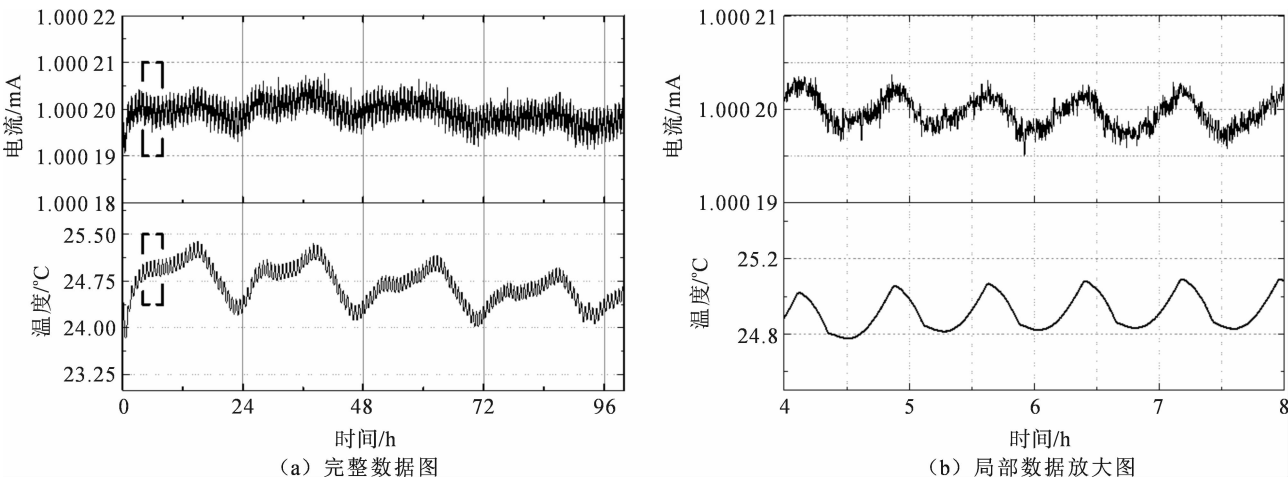


图 6 C 场电流与室温的起伏

以图 6(a)中 15.8~22.2 h 的温度数据为横轴,电流数据为纵轴绘图,结果如图 7 所示,经线性拟合得到电流测量数据的温度漂移为 5 ppm/°C。而在量程为 1 mA 的直流电流测量条件下,3458A 自身的温度系数为 3 ppm/°C^[17]。

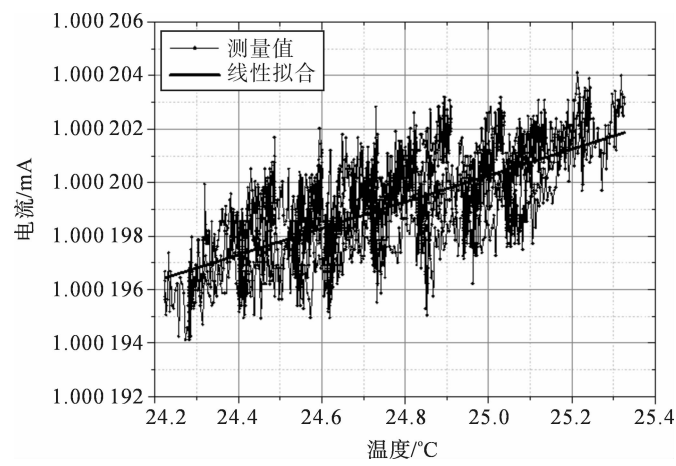
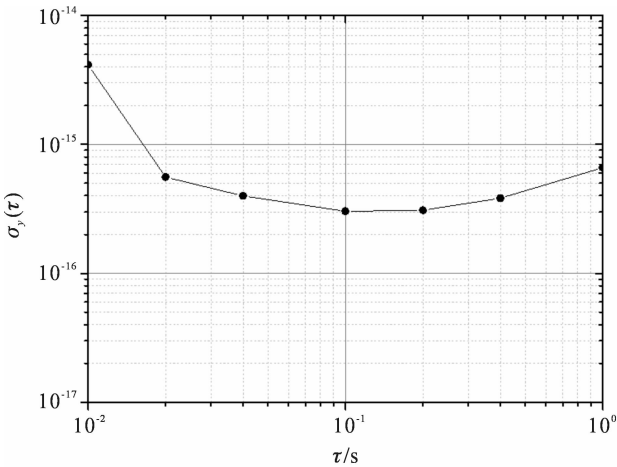
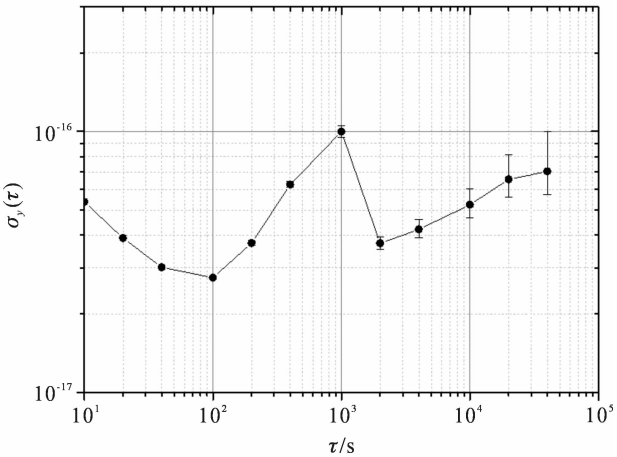


图 7 C 场电流温度漂移

根据式(9),利用 C 场电流噪声谱,计算得到 C 场电流对 POP 铷原子钟稳定度的影响如图 8(a)所示。其中对 0.1 s 处稳定度的影响小于 3.1×10^{-16} ,1 s 处的影响小于 7×10^{-16} 。根据式(5),利用电流起伏计算得到的结果如图 8(b)所示,其中对 10 s 处稳定度的影响小于 5.4×10^{-17} ,1 ks 处的影响小于 1×10^{-16} ,10 ks 处的影响小于 5.3×10^{-17} 。图 8 中 C 场电流对原子钟稳定度的影响在 1~10 s 存在明显的跳跃,这主要是电流噪声谱在 1 Hz 以下的采样点比较少,导致 1 s 处的稳定度存在较大误差,以及图 8(a)和图 8(b)分别是由两台不同仪器测量计算得到,而测量设备本身也存在一些差别。由图 8(b)可知,C 场电流源对原子钟稳定度的影响在 1 ks 处为最大。这是由于随着室温的变化,C 场电流本身存在周期性变化,如图 6(b)所示,其周期 $T_m \approx 2\,700\text{ s}$ 。根据 Allan 方差的频域表达式,对于周期性数据的 Allan 方差,在 $\tau \approx T_m/2.7$ 处为最大值^[11]。



(a) 由电流噪声谱计算的结果



(b) 由电流起伏计算的结果

图 8 C 场电流对 POP 铷原子钟稳定度的影响

4 结语

本文分析了 C 场电流起伏及噪声对 POP 铷原子钟稳定度的影响,根据研制任务要求,选用差动放大器 AD8276 设计研制了新型 C 场电流源。测试分析了输出电流噪声、精度、起伏和温度漂移;利用实测数据,结合理论计算,得到了该电流源对 POP 铷原子钟稳定度的影响小于 1×10^{-16} ($\tau = 10 \text{ s} \sim 10 \text{ ks}$)。本文的设计和分析方法也可用于其他原子钟的 C 场电流源研制,如铯原子喷泉钟、铯束原子钟和传统铷原子钟等。

参考文献:

- [1] GODONE A, MICALIZIO S, LEVI F. Pulsed optically pumped frequency standard[J]. Phys. Rev. A, 2004, 70(2): 409-419.
- [2] GODONE A, MICALIZIO S, LEVI F, et al. Physics characterization and frequency stability of the pulsed rubidium maser[J]. Phys. Rev. A, 2006, 74: 401-420.
- [3] MICALIZIO S, GODONE A, LEVI F, et al. Pulsed optically pumped ^{87}Rb vapor cell frequency standard: A multilevel approach[J]. Phys. Rev. A, 2009, 79(1): 403-421.
- [4] MICALIZIO S, CALOSSO C E, GODONE A, et al. Metrological characterization of the pulsed Rb clock with optical detection[J]. Metrologia, 2012, 49(4): 425-436.
- [5] 杜志静, 赵文字, 刘杰, 等. 脉冲激光抽运铷原子钟研究[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2011, 36(10): 1236-1240.
- [6] DONF G, DENG J, LIN J, et al. The progress of pulsed optically pumped rubidium clock at SIOM[C]//2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). Shanghai: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2016: 3716-3719.
- [7] DONF G, DENG J, LIN J, et al. Recent improvements on the pulsed optically pumped rubidium clock at SIOM[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(4): 201-203.
- [8] 吴长江, 管勇, 陈江, 等. 铯原子喷泉钟均匀 C 场的实现[J]. 时间频率学报, 2011, 34(2): 82-86.
- [9] MICALIZIO S, GODONE A, LEVI F, et al. Medium-long term frequency stability of pulsed vapor cell clocks[J]. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq, 2010, 57(7): 1524-1534.
- [10] RIEHLE F. Frequency Standards: Basics and Applications[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [11] RUTMAN J, WALLS F L. Characterization of frequency stability in precision frequency sources[J]. Proc. IEEE, 1991, 79(7): 952-960.
- [12] 王亚, 李鹏, 徐立军. 一种单极性输入双极性输出压控恒流源[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(3): 366-369.
- [13] 杨宇祥, 王珏, 牛飞龙, 等. 一种正弦扫频式恒流源设计[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 162-164.
- [14] ZHAO N, MALIK R, LIAO W. Difference amplifier forms heart of precision current source[J]. Analog Dialogue, 2009 43(9): 1-3.
- [15] Analog Devices Inc. AD8276/8277 Datasheet[EB/OL]. (2011-11-10) [2018-04-12] http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8276_8277.pdf.
- [16] Analog Devices Inc. AD8603/8607/8609 Datasheet[EB/OL]. (2008-06-22) [2018-04-16] http://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/AD8603_8607_8609_cn.pdf.
- [17] Keysight 3458A Multimeter Calibration Manual Edition 7[K]. Keysight Technologies, 2014: 85.