

引用格式:肖娅聪,刘昆,刘洪康,等.喷泉钟驾驭恒温晶振方法研究[J].时间频率学报,2022,45(2):110-114.

喷泉钟驾驭恒温晶振方法研究

肖娅聪¹, 刘昆^{1,*}, 刘洪康², 房芳¹, 陈伟亮¹,
戴少阳¹, 郑发松¹, 李天初¹

(1. 中国计量科学研究院,北京 100029;
2. 北京理工大学,北京 100081)

摘要:喷泉钟驾驭氢钟、晶振等频率源,能够输出标准频率。为了实现上述目标,本文使用自由运转的恒温晶振 5 MHz 频率输出作为喷泉钟的本振信号,尝试利用喷泉钟锁定恒温晶振。5 MHz 本振信号经过倍频和频率综合生成铯原子喷泉钟激励微波源所使用的 9.192 GHz 的频率信号。喷泉钟使用 PI 锁定方法,得到此激励微波源的频率信号与铯原子超精细能级跃迁频率信号的差值。为了驾驭恒温晶振,将恒温晶振 5 MHz 信号经过相位微跃器的调整,锁定至喷泉钟的超精细能级跃迁频率信号。喷泉钟运行周期约为 1.5 s,产生一个频率差值。我们使用每 5 个频率差值计算一个平均频率差值,多个平均频率差值经过局部加权线性回归算法,预估下一个平均频率差值。预估的频率差值经过计算,得到相对频率调整量。计算模拟表明,存在一组合适的计算参数,使得调整后的纸面频率差值数据稳定度大幅提高。使用这种驾驭方法,将得到的相对频率调整量反馈至相位微跃器。实验表明,参考恒温晶振的相位微跃器 5 MHz 信号频率漂移消失,中长期频率稳定度有极大的改善。

关键词:喷泉钟;恒温晶振;驾驭

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-02-0110-05

Research on the steering OCXO by the fountain clock

XIAO Ya-cong¹, LIU Kun^{1,*}, LIU Hong-kang², FANG Fang¹, CHEN Wei-liang¹,
DAI Shao-yang¹, ZHENG Fa-song¹, LI Tian-chu¹

(1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China;
2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The standard frequency signal can be output if the fountain clock steers hydrogen maser or crystal oscillators. In this paper, 5 MHz signal of free running oven controlled crystal oscillator (OCXO) is used as the local oscillator (LO) of the fountain clock. The 9.192 GHz signal, generated by frequency synthesizer which references to LO, is used as the interrogation microwave source of cesium fountain clock. With the software close-loop PI controller, the interrogation microwave signal follows the frequency of the superfine energy level transition of cesium 133 atom (clock transition frequency), and the difference between them is obtained. To steer the OCXO, its frequency needs to be offset by an auxiliary output generator (AOG) and then locked to the clock transition frequency. In one fountain clock cycle, about 1.5

收稿日期:2021-10-16;接受日期:2021-12-17; * 通讯作者

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2016YFF0200202);中国计量科学研究院基本科研业务费重点领域资助项目(AKYZD2009)

second, the frequency difference between the LO and clock transition frequency is measured. An average frequency difference is calculated by every five measured data. With the local weighted linear regression (LWLR) algorithm, the following average frequency difference is predicted well by the previous ones. And then, the relative frequency offset value can be calculated by the predicted frequency difference. The calculation simulation shows that there is a set of suitable parameters greatly improving the stability of the adjusted frequency difference data in the paper. Using this steering method, the relative frequency offset is fed back to the AOG. Experiment result shows, the mid-term and long-term stability of the 5 MHz frequency output of AOG references to the OCXO has improved a lot.

Key words: fountain clock; oven controlled crystal oscillator(OCXO); steer

0 引言

冷原子喷泉钟^[1]是一种基于激光冷却原子技术建立起来的频率基准装置。包含铯和铷两种工作介质。铯原子喷泉钟^[2-4]是目前复现秒定义的频率基准装置,准确度和不确定度比使用热原子的前一代基准钟——铯束钟有了极大的提高。铷原子喷泉钟^[5-8]有着碰撞频移小等优势,也被多家研究机构研制和应用。但另一方面,铯束钟^[9]系统结构相对简单,能够连续不间断运行,独立输出标准频率,目前作为守时钟发挥着重大作用。作为基准钟使用的喷泉钟一般需要氢钟作为参考源,喷泉钟输出的是与该氢钟的相对频率偏差值,并驾驭氢钟形成标准时间^[10],但不输出标准频率。为了能够更好地利用原子喷泉钟,需要实现喷泉钟驾驭氢钟或者晶振,输出标准频率作为守时钟信号使用。这种驾驭的驾驭周期为几秒或者几十秒。美国海军天文台(USNO)实现了铷喷泉钟驾驭氢钟输出标准频率作为守时钟使用^[11],使得时标稳定度有了极大的提高。

1 算法原理

喷泉钟驾驭氢钟或者晶振等频率源的核心是根据历史数据预测下一个驾驭周期的频率平均值,并对频率源的频率进行调整。对于氢钟,频率调整需要通过相位微跃器^[12-13]实现。对于恒温晶振,可以通过调整电压或者微跃器实现。喷泉钟数据是一种时间序列数据,关于时间序列的预测算法有很多种,包括移动平均法,简单指数平滑法,自回归平均移动模型(ARIMA)等。本文使用局部加权线性回归方法(locally weighted linear regression, LWLR)进行预测^[14],其他方法后续工作中再进行应用比较。

回归的目的是预测数值型的目标值,其中最简单的方法是线性回归。但是线性回归因为求的是具有最小均方误差的无偏估计,因此会出现欠拟合,并不能取得最好的预测效果。LWLR给预测点附近每个点赋予一定的权重,其他则与标准回归一致。回归系数为向量 \mathbf{W} ,对于每次预测前事先选取出的数据子集,利用式(1)计算出回归系数的最佳估计值 $\hat{\mathbf{W}}$ 。

$$\hat{\mathbf{W}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{W}' \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{W}' \mathbf{Y}, \quad (1)$$

式(1)中, \mathbf{X} 为选出的自变量数据子集, \mathbf{Y} 为选出的因变量数据子集。 \mathbf{W}' 为权重。LWLR使用“核”对附近的点赋予更高的权重。经常使用的核就是高斯核,高斯核对应的权重如下:

$$\mathbf{W}'(i, i) = \exp\left(-\frac{(x - x(i))^2}{2k^2}\right), \quad (2)$$

式(2)中, x 为待预测自变量值, $x(i)$ 为选出的自变量数据子集中的值。由此构建一个只包含对角元素的权重矩阵 \mathbf{W}' ,并且点 x 与 $x(i)$ 距离越近, $\mathbf{W}'(x, i)$ 值越大。式(2)中包含了一个用户指定的参数 k , k 控制权值变化的速率, k 越大,离 x 越远权值下降越快。

根据式(1)得到的回归系数最佳估计值 $\hat{\mathbf{W}}$,由式(3)得到待预测的因变量的值 y :

$$y = \hat{\mathbf{W}}x. \quad (3)$$

本实验室使用的喷泉钟^[2]运行周期一般为1.5 s左右,每个周期获得一个与氢钟的差值。根据实验获得的喷泉钟稳定度和超稳晶振稳定度,在7.5 s附近数值相当,所以初步实验选择7.5 s为驾驭周期。即每5个喷泉钟运行周期的数据取平均值,为因变量 \mathbf{Y} 的值 $y(i)$,自变量 \mathbf{X} 的值 $x(i)$ 取 $[1, i]$,如当前自变量和因变量

中数据长度为 l , 则根据式(1) 计算得到的 \hat{W} , 由自变量 $[1, l+1]$ 通过式(3) 计算得到下一个驾驭周期的频率预测值 $y(l+1)$ 。随着时间增加, X 和 Y 中数值越来越多, 计算时间会不断增加, 为了减少计算量, 截取最新的长度为 N 的数据参与计算。

2 数据模拟及比较

我们使用铯原子喷泉钟的真实数据进行模拟计算, 先把每 5 个数值求个平均值, 作为一个数据点, 得到一个约为 13 000 个点的数据集, 每个点代表 7.5 s 的相对频率偏差的平均值。计算时为了方便处理, 舍弃时间信息, 仅以点序号作为 x 轴。第 2 节所述计算中有两个可以自行设置的参数, 式(2) 中的 k 和参与计算数据长度 N , 计算结果表明当 $N > 3k$ 时, N 增大几乎不影响预测结果。因此, 固定 N 为 100, k 取 1, 3, 10 三个值, 将预测结果比较, 为了便于观察, 我们选择 i 从 1 000 到 1 100 这段数据。图 1 为不同 k 值下预测值与实际值的比较, 图中, 黑色方点为喷泉钟实验数据, 红色实线为 $k=1$ 的预测值, 蓝色虚线为 $k=3$ 的预测值, 绿色点划线为 $k=10$ 的预测值。每个预测值都是由该预测值之前的 100 个点的数据计算出来的(序号在 100 点以内的预测值是由前面的所有数据计算得到), 通过比较发现, $k=3$ 时拟合适中。

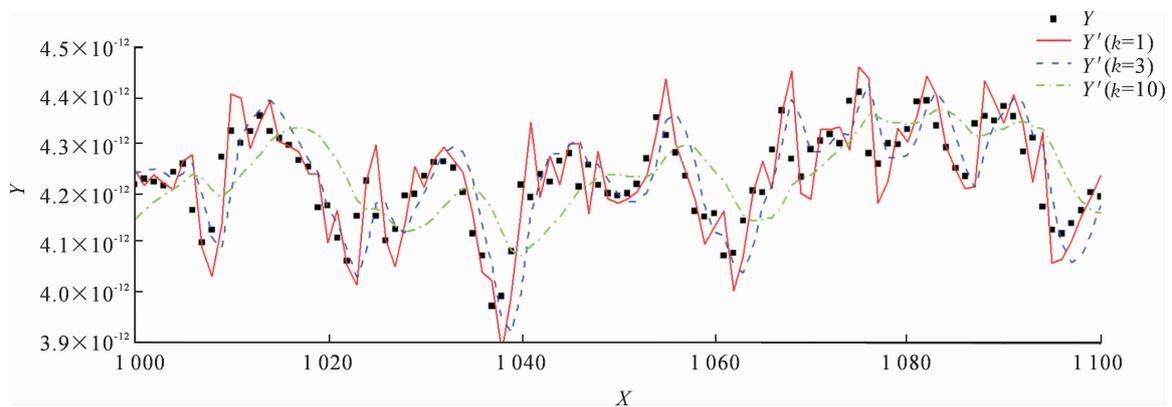


图 1 不同 k 值下的预测结果与实际数据比较

计算得到的预测值如果参与下一个驾驭周期的频率调整, 理论上被驾驭的频率源就能跟喷泉钟实现锁频。衡量锁频效果的依据可以是预测值与实际值残差的 Allan 标准偏差。图 2 所示是不同 k 值下这个差值的 Allan 标准偏差值, 图中黑色方点线为 $k=1$ 的残差值的 Allan 标准偏差, 红色圆点为 $k=3$ 的残差值的 Allan 标准偏差, 蓝色三角形点线为 $k=10$ 的残差值的 Allan 标准偏差。从图 2 中我们可以看到 k 值越小, Allan 标准偏差随时间增加下降得越快, 也就说明被驾驭频率源能更好地和喷泉钟锁频。

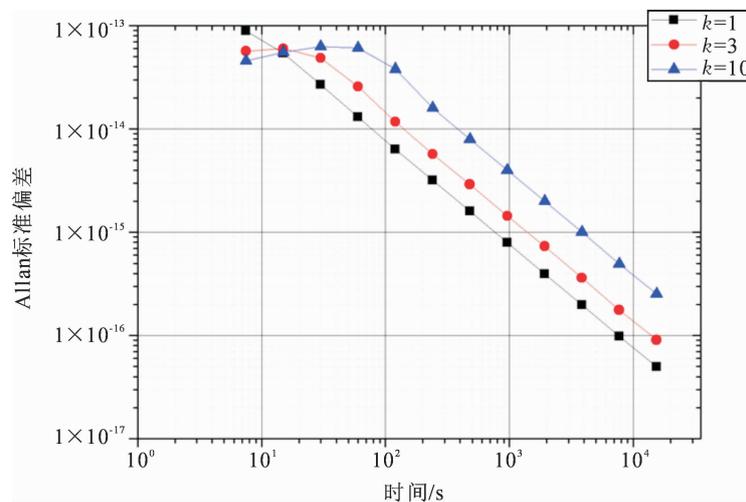


图 2 不同 k 值下的预测值和实际值残差的 Allan 标准偏差

3 实验平台及结果

使用前文所述方法,选择 $k=3, N=100$,将驾驭算法写进喷泉钟控制软件^[15-16]中,驾驭周期选择每 5 个喷泉钟周期 7.5 s,利用计算得到的预测值调整一次微跃器的输出频率。当喷泉钟的参考源是氢钟时,因为氢钟稳定度很好,驾驭效果要在天稳以上才能显现出来,并且测量时需要另外一台氢钟作参考,测量结果还受参考氢钟的影响。

为了能快速验证上述算法驾驭频率源的效果,我们搭建了如图 3 所示的实验平台。喷泉钟使用 RAKON 公司的 HSO 14 超稳恒温晶振作为参考源。我们先用计数器找到 HSO 14 输出 5 MHz 频率时的控制电压,并将该控制电压固定。5 MHz 输出一路接到喷泉钟的频率综合器,生成 9.192 GHz 的激励微波信号,另一路接到 SDI 公司 HROG-5RM 微跃器的参考端。喷泉钟控制软件通过串口调整微跃器的频率输出,该频率输出即为驾驭后的频率。晶振的 5 MHz 输出为驾驭前的频率输出。

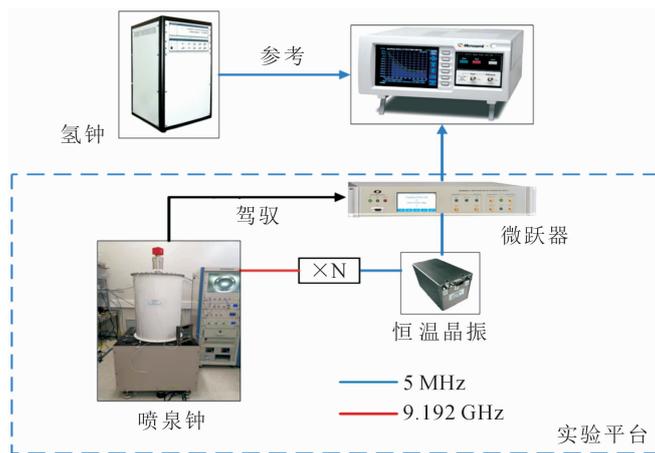
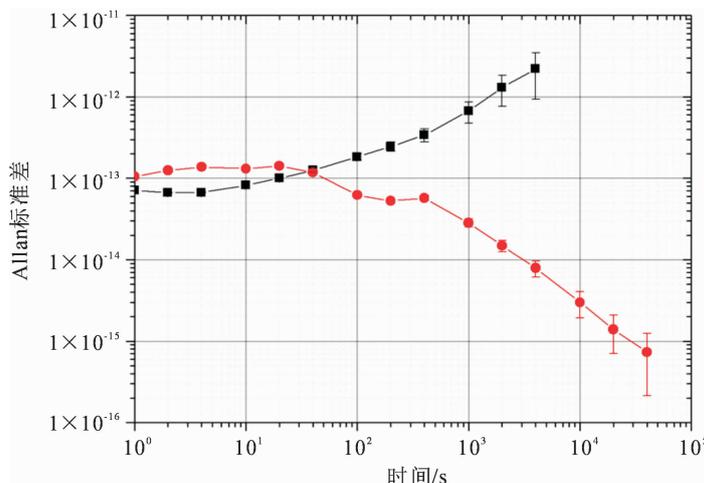


图 3 实验平台

我们使用 5125A 测量系统测量这两个频率的稳定度,参考源用一台氢钟的标准频率输出,参考源氢钟的秒稳为 5.4×10^{-14} ,百秒稳为 3.5×10^{-15} ,万秒稳为 3.2×10^{-16} 。测量结果如图 4 所示。从图中我们可以看出,驾驭前超稳恒温晶振因为存在频率漂移,秒稳虽然很好,为 7.15×10^{-14} ,但中长期稳定度逐渐恶化。驾驭后频率漂移消失,中长期频率稳定度有极大的改善。实验结果表明该驾驭方法有效。



注:黑色方形对应自由运行的结果,红色圆形对应被喷泉钟驾驭后的结果

图 4 超稳恒温晶振自由运行与被喷泉钟驾驭两种状态下稳定度测量结果

4 结语

本文引入局部加权线性回归为喷泉钟驾取氢钟、恒温晶振等频率源的算法。先在理论上比较了不同参数下驾取效果,然后搭建实验平台,改写喷泉钟控制程序,进行实验验证。结果表明,该驾取算法有效,能够极大改善超稳恒温晶振的中长期稳定度。下一步将选择不同的驾取方法进行实验验证,另外也将会把频率调整直接转移到改变超稳恒温晶振的控制电压上而不使用微跃器进行实验。

参考文献:

- [1] DAI S Y,ZHENG F S,LIU K,et al. Cold atom clocks and their applications in precision measurements[J]. Chinese Physics B,2021,30(1):30-45.
- [2] FANG F,LI M S,LIN P W,et al. NIM5 Cs fountain clock and its evaluation[J]. Metrologia,2015,52(4):454-468.
- [3] 阮军,王心亮,刘丹丹,等. 铯原子喷泉钟 NTSC-F1 研制进展[J]. 时间频率学报,2016,39(3):138-149.
- [4] 陈伟亮,房芳,袁小迪,等. NIM6 铯喷泉钟背景气体碰撞频移的评估[J]. 计量技术,2020(5):11-13.
- [5] 史春艳,魏荣,李唐,等. 高精度(10^{-15})可搬运铷原子喷泉钟的研制[J]. 中国科学(物理学 力学 天文学),2011,41(5):611-619.
- [6] CHENG H N,ZHANG Z,DENG S,et al. Design and operation of a transportable ^{87}Rb atomic fountain clock[J]. Review of Scientific Instruments,2021,92(5):054702.
- [7] OVCHINNIKOV Y B. Development of NPL Rb fountain frequency standard[C]//European Frequency and Time Forum Proceeding,Gothenburg:IEEE,2012:96-100.
- [8] KUPALOV D S,BARYSHEV V N,BLINOV,I Y,et al. First results on Rb fountain Rb304 frequency standard developed at VNIIFTRI[C]//Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium Proceeding,Besancon:IEEE,2017:633-635.
- [9] ESSEN L,PARRY J V L. An atomic standard of frequency and time interval;a cesium resonator[J]. Nature,1955(176):280-282.
- [10] 朱江森,郑鹏飞,高源,等. 铯原子喷泉钟驾取氢钟的预估算法研究[J]. 计量技术,2017(4):3-7.
- [11] PEIL S,HANSSEN J,SWANSON T B,et al. The USNO rubidium fountains[J]. Journal of Physics:Conference Series,2016(723):012004.
- [12] 张明,仲崇霞,张升康,等. 标准秒脉冲信号高精度相位微跃技术研究[J]. 宇航计测技术,2011,31(5):15-19.
- [13] 肖波,樊多盛,王文利,等. 一种高精度相位微跃 1 PPS 信号发生器的研制[J]. 时间频率学报,2019,42(4):275-283.
- [14] 机器学习实战之预测数值型数据:回归[EB/OL]. (2019-09-08)[2021-09-16]. https://blog.csdn.net/weixin_44575152/article/details/100640051.
- [15] 刘浩,刘丹丹,阮军,等. 基于 Labwindows/CVI 的铯原子喷泉钟时序控制系统研制[J]. 时间频率学报,2019,42(2):135-141.
- [16] 刘昆,陈伟亮,宋文霞,等. 基于 LabVIEW 冷原子喷泉钟控制系统的研制[J]. 计量科学与技术,2020(8):3-7.