

基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统研究

刘铁强^{1,2,3,4}, 柳林涛^{3,4}, 左兆辉², 魏海涛², 孙同川²

(1. 深圳市远东华强导航定位有限公司, 石家庄 050081;

2. 中国电子科技集团公司 第五十四研究所, 石家庄 050081;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071)

摘要: 针对传统铷原子钟驯服算法相位控制精度不足的问题, 研究提出一种基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统; 通过构建双极积分控制架构, 采用一阶积分实现晶振频率的快速锁定, 结合二阶积分抑制相位累积误差, 使输出相位与铷原子钟跃迁谱线的频率积分保持同步, 显著提高铷原子钟输出信号的稳定性及守时精度; 经仿真分析计算及实验验证, 结果表明采用基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统可有效降低铷原子钟驯服入锁时间, 在 GNSS 控制驯服状态下, 铷原子钟定时相位精度、守时相位精度、频率稳定度等关键性能指标均得到显著提升, 可有力支撑铷原子钟在一些需要快速部署、快速响应系统中的拓展应用。

关键词: 数字伺服系统; 二阶积分; 铷钟驯服; 高稳定性; 高精度守时

Study of Rubidium Atomic Clock Digital Servo System Based on the Second-order Integration

LIU Tieqiang^{1,2,3,4}, LIU Lintao^{3,4}, ZUO Zhaohui², WEI Haitao², SUN Tongchuan²

(1. Shenzhen Far-East Huaqiang Navigation and Position Co. Ltd., Shijiazhuang 050081, China;

2. The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China;

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

4. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: A digital servo system for rubidium atomic clocks based on second-order integration is proposed to address insufficient phase control accuracy in traditional rubidium atomic clock taming algorithms. By constructing a bipolar integral control architecture and using first-order integration, the fast locking of crystal oscillator frequency is achieved. By combined with the second-order integration to suppress a phase accumulation error, the output phase is synchronized with the frequency integration of rubidium atomic clock transition spectral lines, significantly improving the stability and timing accuracy of rubidium atomic clock output signals. Through simulation analysis, calculation, and experimental verification, the results show that the rubidium atomic clock digital servo system based on the second-order integration can effectively reduce the taming and locking time of rubidium atomic clocks. Under GNSS controlled taming state, key performance indicators such as timing phase accuracy, timekeeping phase accuracy, and frequency stability of rubidium atomic clocks are significantly improved, which can effectively support the expansion and application of rubidium atomic clocks in some rapid deployment and response systems.

Keywords: digital servo system; second-order integration; rubidium atomic clock taming; high stability; high-precision time-keeping

收稿日期: 2025-04-10; 修回日期: 2025-05-31。

作者简介: 刘铁强(1984-), 男, 硕士, 高级工程师。

引用格式: 刘铁强, 柳林涛, 左兆辉, 等. 基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统研究[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(10): 273-279.

0 引言

铷原子钟因其体积小、重量轻、功耗低、稳定性优良、价格适中、寿命长、温度适应性强等特点^[1-2], 广泛应用于导航、通信等领域^[3], 适用于各类地面固定、车载、舰载的授时、守时终端中。但其准确度差、频率漂移比较大^[4], 仅能用作二级标准。

在铷原子钟使用时, 当前常规做法是采用 GPS 对铷原子钟进行驯服和外秒同步, 以克服其本身的漂移, 获得较高精度的频率基准信号。目前, 国内外对频标驯服技术的研究很多, 频标驯服算法也在不断改进。文献 [5] 对频标驯服算法进行了研究, 基于初值选取和自适应滤波的方法对卡尔曼滤波算法进行了改进, 提高了卡尔曼滤波在实际平台上的驯服速度; 文献 [6] 对基于北斗授时系统的恒温晶振驯服守时技术进行了研究, 基于动态环路技术、增量式 PID 控制算法、卡尔曼预测算法, 实现了较高精度的恒温晶振授时与守时; 文献 [7] 基于最小二乘法估计的 Kalman 滤波钟差模型参数确定方法及高精度时间间隔测量, 设计实现了一种铷原子频标驯服系统, 改善了铷原子钟的长期稳定度; 何文彦等在文献 [8] 中提出了一种基于 FPGA 的北斗守时设备铷钟驯服技术, 基于时间间隔测量、Vondrak 滤波、Kalman 滤波以及 PID 控制算法实现铷钟驯服, 结果表明滤波算法对时间同步精度及守时精度的提高具有关键作用; 文献 [9] 利用拉伊达法则和滑动均值滤波法实现高稳晶振驯服, 采用 Kalman 滤波对基准失锁时进行频率补偿, 获得了较稳定的频率信号输出; 文献 [10] 基于非整数压控晶振实现了铷原子钟驯服, 获得了较好的频率稳定性; 文献 [11] 提出了一种本地 OCXO 与 GPS 的秒脉冲参考时钟信号同步的算法和系统, 在 Labview 环境中进行设计验证, 获得了 $5\text{E}-11$ 以内的同步误差; 文献 [12] 对授时终端原子钟的性能评估方法进行了研究; 文献 [13] 对 GNSS 接收机时频驯服算法进行了研究, 基于线性二次型高斯控制、Kalman 滤波技术, 有效提高了授时精度; 文献 [14] 基于改进的灰色模型及 PID 算法对铷原子钟进行驯服, 驯服精度可达 2 ns ; 文献 [15] 对北斗/GPS 接收机输出的 PPS 随机误差以及晶振老化带来的非线性频率漂移等问题进行了研究, 建立了接收机 PPS 信号与晶振输出信号频率差的数学模型, 基于自适应无迹粒子滤波算法提高了输出频率准确度; 同样文献 [16] 对 GPS 接收机输出的 PPS 随机误差以及晶振老化和温度带来的非线性频率漂移等问题进行了研究, 建立了接收机 PPS 信号与晶振输出信号频率差的数学模型, 基于序列加权自适应无迹粒子滤波算法提高了频率标准的输出信号的稳定性和精度; 文献 [17] 基于高精度时差测量、Kal-

man 滤波算法、PID 控制算法等技术实现了 OCXO 的高精度驯服; 文献 [18] 对芯片级原子钟进行了研究, 设计了一种轻量化伺服控制电路, 降低了芯片级原子钟功耗, 扩展了芯片级原子钟应用领域。

受限于铷原子钟的加热控温过程, 以往铷原子钟驯服算法需要较长时间的驯服过程才能达到预期指标, 为保证整个系统达到最佳性能, 往往需要驯服数小时以上, 严重制约了铷原子钟在一些需要快速部署、快速响应系统中的应用。

本文采用基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统, 充分利用一阶积分、二阶积分的特性, 可有效降低 GPS 驯服入锁时间, 提高铷原子钟输出信号的稳定性及守时精度。

1 传统铷原子钟驯服原理

传统驯服系统是一种通过外部高精度时间频率基准 (如 GPS 或北斗的 PPS 信号) 对本地时钟源进行动态校准的技术体系, 其核心目标是通过闭环控制实现本地时钟长期稳定性和短期相位同步能力的统一。系统主要由晶振、时间数字转换器 (TDC)、秒脉冲 (PPS)、伺服系统、频率综合系统、驯服守时环路及物理支撑部分构成, 各模块通过精密协同工作完成对本地时钟的精准控制。传统的铷原子钟驯服原理如图 1 所示。晶振输出频率 (通常是 10 MHz) 通过频率综合系统倍频至 6.835 GHz , 在物理部分的作用下, 得到光检测信号, 通过伺服系统得到频率误差信号, 并进行反馈控制, 使晶振频率与铷原子钟跃迁谱线锁定。驯服守时环路利用 TDC (时间数字转换器) 测量铷原子钟的输出相位与参考 PPS (多项式相位信号) 相位之差, 通过驯服系统反馈微调铷原子钟的输出频率^[20]。

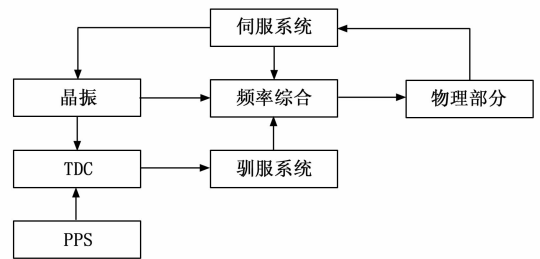


图 1 传统铷原子钟驯服原理框图

晶振作为系统的本地时钟源, 通常采用恒温晶振 (OCXO) 或压控晶振 (VCXO), 其短期稳定性较好但长期易受温度漂移和老化影响。TDC 模块负责量化外部参考信号 (如 GPS 的 PPS) 与本地晶振生成 PPS 之间的时间差, 其分辨率可达皮秒级, 是实现相位对齐的关键测量单元。PPS 信号作为时间同步的基准载体, 通过脉冲沿的严格对齐建立系统的时间坐标系。伺服系统

则根据 TDC 输出的误差数据, 采用 PID 控制算法生成电压调节信号, 动态调整晶振的频率输出, 形成闭环反馈机制。

频率综合系统位于晶振与输出接口之间, 通过锁相环 (PLL) 或直接数字频率合成 (DDS) 技术将晶振基频扩展至系统所需的多路频率信号, 同时通过相位噪声优化确保信号质量。驯服守时环路是整个系统的控制中枢, 包含状态监测、算法运算和模式切换功能: 在锁定状态下持续跟踪外部参考信号, 而在参考信号丢失时则切换至守时模式, 依靠历史驯服数据预测晶振漂移趋势并维持时间精度。物理部分涵盖供电、电磁屏蔽、热管理等硬件支撑, 通过降低环境干扰保障系统稳定性。

各模块的协作流程表现为: 外部 PPS 与本地 PPS 经 TDC 比对生成时间误差, 伺服系统将此误差转化为晶振控制电压, 频率综合系统将校正后的基频转换为目标频率输出。驯服守时环路实时评估系统状态, 动态调整控制参数并管理参考源切换。这种闭环架构使系统兼具短期相位同步能力 (依赖外部参考) 和长期频率保持能力 (依赖本地晶振特性), 在电力同步网、通信基站等场景中实现了纳秒级时间同步精度与自主守时能力的平衡。

然而, 该系统存在以下关键瓶颈:

1) 驯服时间与动态响应不足。传统模拟 PID 控制器由于积分时间常数受限 (通常设置为 $10^3 \sim 10^4$ 秒以抑制晶振白噪声相位调制), 导致系统收敛缓慢。实测表明, 在初始频率偏差 1×10^{-9} 时, 传统 PID 需 120 ± 15 分钟才能达到 1×10^{-11} 的频率稳定度, 而基于卡尔曼滤波的数字控制系统仅需 25 分钟。这种滞后性源于 PID 的固定带宽设计: 当晶振受温度冲击 (如 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 变化率) 时, 系统响应带宽被限制在 0.1 Hz 以下, 无法跟踪晶振的快速频率漂移 (可达 $5 \times 10^{-10}/\text{s}$)。

2) 温度敏感性与频率稳定度劣化。虽然铷原子跃迁谱线温度系数优于 $1 \times 10^{-12}/^\circ\text{C}$, 但是铷原子钟的实际输出是采用晶振作为本地振荡器^[20], 实验表明, 当环境温度以 $1^\circ\text{C}/\text{h}$ 波动时, 传统 PID 控制的系统在 $\tau = 1\text{ s}$ 的短稳指标恶化至 2.3×10^{-11} (理论极限为 3×10^{-12}), 且在 $\tau = 1\ 000\text{ s}$ 时阿伦方差仅达 5×10^{-12} , 比自适应控制系统低 1 个数量级。其根源在于 PID 参数固化: 比例系数 K_p 需折中处理晶振的 $1/f_3$ 相位噪声 (主导长稳) 和温度阶跃扰动 (影响短稳), 导致两者均无法最优抑制。

3) 相位累积误差与守时精度缺陷。TDC 的有限分辨率 (典型值 100 ps) 结合 PID 的离散调整机制, 会在守时过程中产生不可忽略的相位累积误差。当参考 PPS 存在 $0.1\ \mu\text{s}$ 阶跃相位跳变时, 传统系统需 $8 \sim 10$ 次调整周期 (约 80 s) 才能收敛, 期间最大相位偏差达

$1.5\ \mu\text{s}$; 而采用全数字相位预测算法可将收敛时间缩短至 5 s 内, 相位偏差小于 $0.2\ \mu\text{s}$ 。更严重的是, 传统架构缺乏高阶相位补偿能力 (如对晶振老化率 $d^2 f/dt^2$ 的补偿), 导致 72 小时守时测试中相位漂移可达 $2.8\ \mu\text{s}$ (实测标准差 $\sigma = 0.9\ \mu\text{s}$)。

2 基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统

2.1 工作原理

基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统原理如图 2 所示, 主要由单片机、晶振、频率综合、物理部分和 AD、DA 组成。其中, 单片机主要实现方波信号生成、同步检波、低通滤波、积分等功能, 是铷原子钟的控制核心, 单片机工作原理如图 3 所示, 对二阶积分的铷原子钟数字伺服系统工作原理详细描述如下:

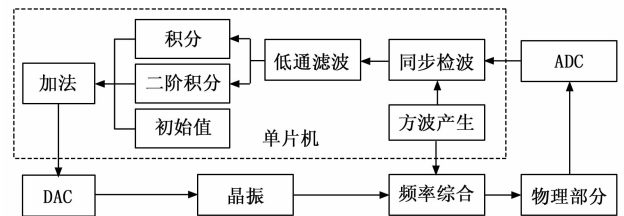


图 2 基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统原理框图

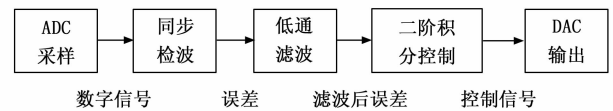


图 3 单片机工作原理框图

将晶振压控初始值设置为接近共振的状态, 此时, 单片机以 $f_s = 3.6\text{ kHz}$ 的采样频率产生并输出频率 $f_m = 90\text{ Hz}$ 的方波信号 S_n , 送至频率综合单元, 对其输出的微波频率进行方波调制; 铷原子钟的物理部分实现光检功能, 在微波频率被调制后, 产生一个相同频率幅度调制的光检信号 $D(t)$; 光检信号 $D(t)$ 通过 $f_s = 3.6\text{ kHz}$ 采样频率的 ADC 进行采样得到光检信号序列 D_n , 然后利用单片机与调制信号进行数字同步检波得到误差信号输出 $I_n = D_n S_{n-d}$ (d 为时间延迟, 可以通过开环状态下调整 d 使得误差信号最大, 获得 d 的最佳值); 同步检波输出在经过抽取因子 3 600、微分环节延迟个数 1、积分器个数 1 的数字低通滤波 (CIC 滤波) 后获得频率误差信号序列 E_m ; 通过一阶积分模块和二阶积分模块分别对频率误差信号 E_m 进行一阶积分和二阶积分, 并将一阶积分和二阶积分结果求和得到控制电压序列, 其中, 一阶积分传递函数为: $G(z) = \frac{K_i}{z-1}$ (K_i 为系统增益), 二阶积分传递函数为: $G(z) = \frac{K_{ii} z}{z^2 - 2z + 1}$ (K_{ii} 为系统增益), 将一阶积分结果和二阶

积分求和得到控制电压序列 C_m ，通过 DAC 数模转换后输出至晶振，达到控制晶振输出相位与铷原子钟跃迁谱线相位偏差的目的。

其中，一阶积分主要对频率误差积分，生成相位补偿，并消除静态频率偏移。二阶积分，完成对频率误差的双重积分，生产频率变化率补偿，消除相位累积误差（长期漂移）。一阶积分和二阶积分传递流程如图 4 所示。

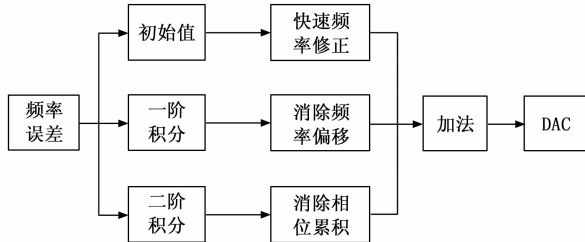


图 4 一阶积分和二阶积分传递流程

可以事先测量得到铷原子钟的鉴频效率（误差信号与相对频率偏差之比） $K_d = \frac{\delta E}{\delta y}$ 和晶振的压控电调率（晶振相对频率偏差与压控电压之比） $K_c = \frac{\delta y}{\delta C}$ ，则 K_i 可以设置为 $K_i = \frac{B}{K_d K_c}$ ， K_{ii} 可以设置为 $K_{ii} = \frac{B^2}{K_d K_c}$ ，其中 B 为环路带宽，设置为 $B = 0.1$ Hz。可见一阶积分的系数较大，提供晶振频率的快速控制；二阶积分可以降低晶振频率快速变化导致的附加相位差，使晶振的输出相位与铷原子钟跃迁谱线的频率积分基本一致。

2.2 与传统铷钟伺服系统闭环幅频特性对比

传统铷钟伺服系统和基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统的闭环幅频特性分别如图 5、图 6 所示。其中，虚线为闭环噪声传递函数，实线为闭环传递函数。由图中可以看出，基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统在低频端的增益特性为 40 dB/dec，相对于传统铷原子钟驯服系统的 20 dB/dec 有大幅提高，可以将晶振在温度影响下的随机游走频率噪声（频率功率谱密度 $S_y \propto f^{-2}$ ）降低为白相位噪声（频率功率谱密度 $S_y \propto f^2$ ），保证晶振的输出相位与铷原子谱线频率的积分一致。

3 系统仿真及验证

3.1 系统仿真

3.1.1 GPS 驯服铷钟环路分析

1) 系统模型：

GPS 驯服是数字鉴相控频系统。对于数字鉴相控频系统， $c(t)$ 和 $r(t)$ 为相位信号，DAC 输出为频率控制信号，因此 $G_p(s) = \frac{1}{s}$ ，零阶保持器 $\frac{1-e^{-Ts}}{s}$ ，此时，

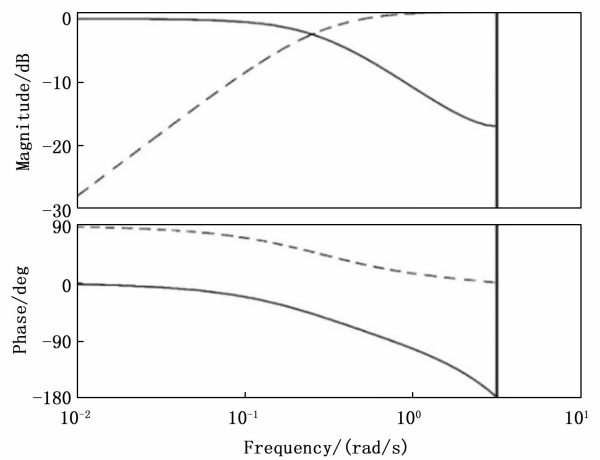


图 5 传统铷原子钟伺服系统闭环幅频特性图

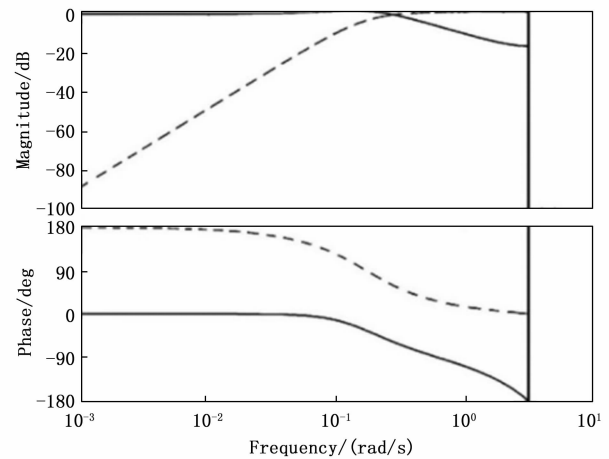


图 6 本文方法闭环幅频特性图

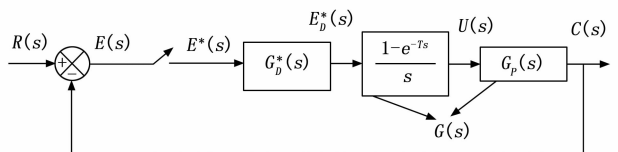


图 7 GPS 驯服铷钟环路模型

$G(S) = \frac{1-e^{-T_s}}{s^2}$ ， $G(z) = \left(1 - \frac{1}{z}\right)Z\left(\frac{1}{s^2}\right) = \frac{T_c}{z-1}$ 。假设数字处理器的速度极快，则频率控制 $c'(kT + \Delta T)$ 仅略微延迟于 $r(kT)$ 。在数字采样时，采集的瞬时相位信号 $e(kT)$ 近似是对 $r(kT) - \int_{(k-1)T}^{kT} c'(kT + \Delta T) dt$ 的响应，近似为理想的模拟积分器，无需等效于在正向环路中额外的一个延时 $\delta(t - T_c)$ 。以下不妨假设 $T_c = 1$ ，则 $G(z) = \frac{1}{z-1}$ ：

$$\varphi(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{G_D(z)G(z)}{1 + G_D(z)G(z)} \quad (1)$$

如果用理论传递函数表示 $G_D(z)$ ，则：

$$\varphi(z) = \frac{C(z)}{R(z)} = \frac{\frac{G_{D,thr}(z)}{(z-1)}}{1 + \frac{G_{D,thr}(z)}{(z-1)}} \quad (2)$$

令 $G_{D,act}(z) = \frac{G_{D,thr}(z)}{(z-1)}$, 以下不再区分理论和实际。

2) 环路设计说明:

(1) 关于 Kalman 滤波。对相位的 Kalman 滤波可以比较好的还原真实相位, 但是对频率的 Kalman 滤波却和真实频率有较大偏差。用相位 Kalman 滤波的逐点作差比用频率 Kalman 滤波效果要好 (尽管短期噪声更大)。另外, 相位的 Kalman 滤波包含了过去相位测量的平均信息, 二阶积分项采用对相位 Kalman 滤波进行积分, 与对相位进行积分相比可以降低首末点相位噪声的影响。所以, 结合之前的方法, 可以用相位的 Kalman 滤波作为全部流程的输入数据。

(2) 关于频率准确度。频率准确度与二阶积分的起始时间有关。由于实际应用中不会在开机时进行频率测试, 所以可以人为指定或自动计算起始时间。从起始时刻将相位按照相位 Kalman 滤波结果进行重置 (仅输出重置, 与环路无关), 并且同时开始执行二阶积分, 可以保证从起始时间开始计算的频率准确度最小。

(3) 关于环路稳定性。环路稳定性需要重新设计。在数字比例放大 K_i 并联数字积分 K_{ii} 后串联低通滤波 T 的情况下, 系统为有条件稳定, 在最大裕度线上, 两个增益 K_i 和 K_{ii} 是按等比例变化的, 因此实际应用中可以固定二者的比例, 调整总增益以保证环路的稳定性。 $T=250$ s 时环路稳定性仿真结果如图 8 所示, 可见最大裕度点与仅一阶积分滤波、二阶积分不滤波情况下一致。

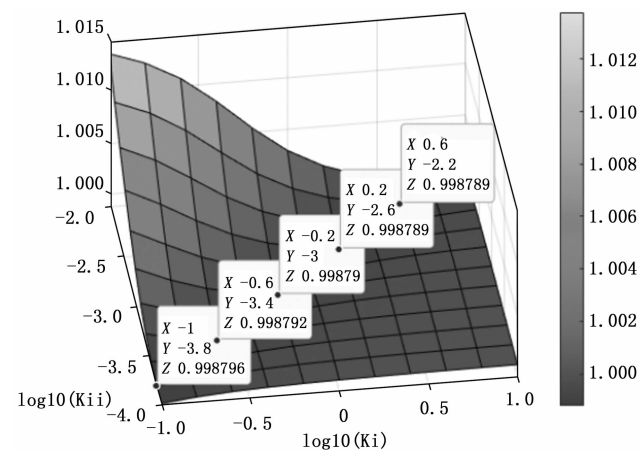


图 8 环路稳定性仿真图

3.1.2 系统仿真

1) 仿真说明:

(1) 总体原则。在晶振入锁前, 用相位的 Kalman 滤波反馈调整频率 (控制压控值); 在晶振入锁时刻,

外部修正当时的相位 Kalman 滤波结果; 在晶振入锁后, 用相位的 Kalman 滤波和相位的 Kalman 滤波的积分反馈调整频率 (控制压控值)。

(2) 参数说明。系统仿真参数设置中较为关键的参数有初始晶振频偏、原子谱线频偏。针对初始晶振频偏设置, 取值过大, 将导致伺服系统无法锁定, 仿真中环路失锁; 取值过小, 将存在无法充分验证环路的捕获和跟踪能力。针对原子谱线频偏设置, 直接决定原子钟输出频率的长期准确度, 是系统的主要固有误差。

因此根据硬件工艺仿真参数设置为: GPS 参考信号, 定时不确定度 5 ns, 白相位噪声随机产生; 普通铷钟, 初始晶振频偏 10×10^{-11} , 原子谱线频偏 5×10^{-11} , 初始相偏忽略不计; 测量误差忽略不计。

err_x(cnt): 测量到的 x 误差信号序列;

Vc_lock(cnt): 未经 GPS 驯服的晶振压控序列 (在仿真中量纲是对应到 y 的, 实际上还需要乘以中心频率除以电调率才是压控);

基数采用 $(-1, -3.8)$;

overall_gain: 总体增益, 预设 0.15;

lock_on: 入锁时间, 预设 180;

Tc: 驯服时间间隔, 预设 1 s;

Kalman 滤波参数 ($T=250$ s): $Q_x_0=(20 \times 10^{-12}).^2, R_x=5 \times 10^{-9}.^2, P_x_0=1000 * 0.5 \times 10^{-8}.^2$;

Vc(cnt): 驯服附加晶振压控序列 (在仿真中量纲是对应到 y 的, 实际上还需要乘以中心频率除以电调率才是压控);

err_x_Kalman(cnt): x 的 Kalman 滤波序列;

err_x_Kalman(lock_on): 入锁时刻 x 的 Kalman 滤波;

err_x_Kalman(cnt) - err_x_Kalman(lock_on): 表征每一时刻的相位偏差估计, 建议作差时间在 250 s 以上。

(3) 计算说明。参数计算:

$k_i_final=overall_gain * 10-1$;

$k_ii_final=overall_gain * 10-3.8$ 。

对 err_x(cnt) 进行 Kalman 滤波, 得到 err_x_Kalman(cnt)。

滤波时需要考虑 Vc_lock(cnt) 和 Vc(cnt) 的修正, 不能用历史 Kalman 滤波结果做频率修正, 否则会导致滤波器振荡。

主函数:

$[K_x(cnt), err_x_Kalman(cnt), P_x(cnt)] = Kalman_f_lc(err_x_Kalman(cnt-1),$

$((+Vc(cnt-1)-Vc(cnt-2))+Vc_lock(cnt-1)-Vc_lock(cnt-2)) * sample_period + 0 * (err_x_Kalman(cnt-1)-err_x_Kalman(cnt-2))),$

$P_x(cnt-1),$

$Q_x(cnt),$

$R_x,$

err_x(cnt)

);

Kalman 滤波函数:

```
function[K,x,P]=Kalman_f_lc(x,u,P_,Q,R,y)
x_predict=x_+u;
P_predict=P_+Q;
K=P_predict./(P_predict+R);
x=x_predict+K.*(y-x_predict);
P=(1-K).*(P_predict);
end
```

在 $\text{cnt} \leq \text{lock_on}$ 时不进行二阶积分,即 $\text{sum_err_x_Kalman}(\text{cnt})=0$,仅用 $\text{osc_i}(\text{cnt})=-\text{err_x_Kalman}(\text{cnt}) * \text{k_i_final}$ 进行附加反馈,即 $V(\text{cnt})=V_{\text{c_lock}}(\text{cnt})+V_{\text{c}}(\text{cnt})=V_{\text{c_lock}}(\text{cnt})-\text{err_x_Kalman}(\text{cnt}) * \text{k_i_final}$ 。

在 $\text{cnt}=\text{lock_on}$ 时,记录 $\text{err_x_Kalman}(\text{lock_on})$,作为系统的初始相位估计。此时,不对驯服做任何处理,仅将输出 pps (如果有的话)移相 $-\text{err_x_Kalman}(\text{lock_on})$ 。

在 $\text{cnt} > \text{lock_on}$ 时,开始二阶积分, $\text{sum_err_x_Kalman}(\text{cnt})=\text{sum_err_x_Kalman}(\text{cnt}-1)+\text{err_x_Kalman}(\text{cnt})-\text{err_x_Kalman}(\text{lock_on})$ 。用 $\text{osc_i}(\text{cnt})+\text{osc_ii}(\text{cnt})$ 进行反馈,即 $V(\text{cnt})=V_{\text{c_lock}}(\text{cnt})+V_{\text{c}}(\text{cnt})=V_{\text{c_lock}}(\text{cnt})-\text{err_x_Kalman}(\text{cnt}) * \text{k_i_final}-\text{sum_err_x_Kalman}(\text{cnt}) * \text{k_ii_final}$ 。其中 $\text{osc_i}(\text{cnt})=-\text{err_x_Kalman}(\text{cnt}) * \text{k_i_final}$ 。 $\text{osc_ii}(\text{cnt})=-\text{sum_err_x_Kalman}(\text{cnt}) * \text{k_ii_final}$ 。

2) 仿真结果:

GPS 驯服长期相位输出仿真如图 9 所示,其中黑色是实际输出 x ,灰色是 err_x 的 Kalman 滤波。注:图中没有对入锁时刻输出相位进行修正,实际上修正后中心应在 0 附近。

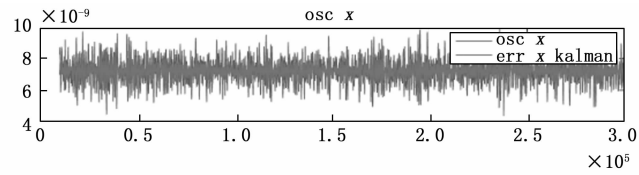


图 9 GPS 驯服长期相位输出仿真

GPS 驯服长期频率稳定度仿真如图 10 所示。

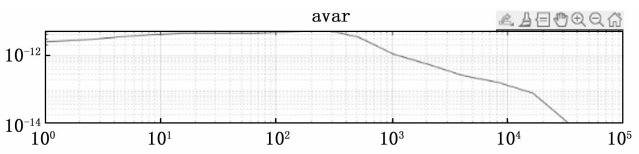


图 10 GPS 驯服长期频率稳定度仿真

GPS 驯服关键指标仿真结果如表 1 所示。

表 1 GPS 仿真结果

序号	指标	仿真结果
1	最大频率偏差	4.0×10^{-11}
2	平均频率偏差	3.9×10^{-13}
3	全范围频率稳定度	6.3×10^{-12}
4	长期相位标准差	8.1×10^{-10}

3.2 系统验证

将上述伺服系统置入铷原子钟进行实验验证。图 11 为驯服 24 h 然后守时 24 h 的相位测量结果,其中,实线为传统的 PID 伺服系统,虚线为本文所提供的基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统,PPS 参考输入由 UT4B0 接收机提供。验证结果表明:在 GNSS 控制驯服状态下,铷原子钟定时相位精度(即相位标准差)由 1.9 ns 提高到 0.4 ns,24 h 守时相位精度由 127 ns 提高到 42 ns。

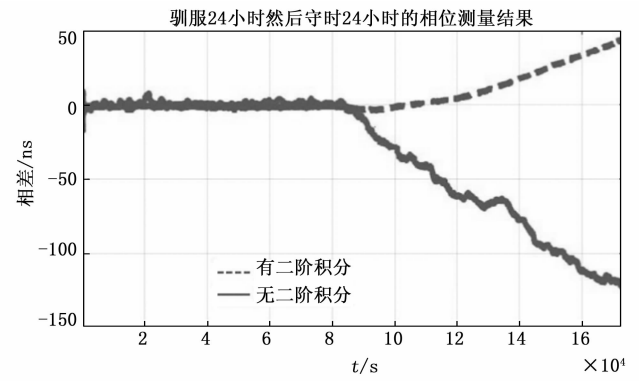


图 11 相位测量结果图

图 12、图 13 分别给出了传统铷钟伺服系统和本文所提供的基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统的频率稳定度结果图。结果表明:采用基于二阶积分的铷原子钟数字伺服系统后,铷原子钟输出频率基准的 100 s 和 1 000 s 频率稳定度均得到提高。

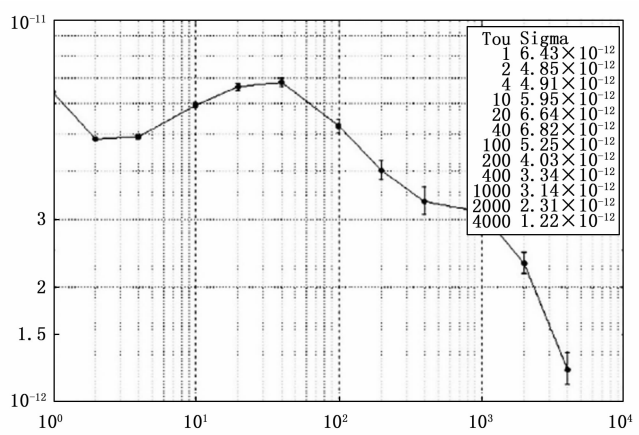


图 12 传统铷钟伺服系统频率稳定度结果图

4 结束语

本文首先对研究背景进行了简介,对铷原子钟驯服的国内外研究现状进行了梳理。针对传统铷原子钟驯服方法下,晶振的快速频率变化会使晶振的输出相位与铷原子钟跃迁谱线的相位(跃迁频率的积分)出现偏差,从而影响铷原子钟的频率稳定度和在定时、守时过程中

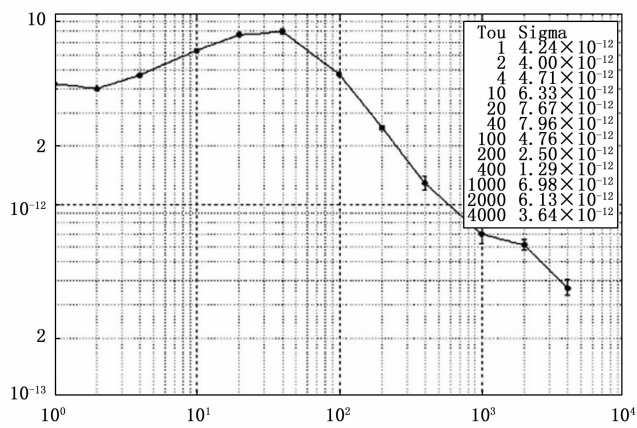


图 13 本文方法频率稳定度结果图

的相位精度的问题，提出基于二阶积分的铷原子钟数字驯服系统，对其工作原理进行了深入分析，并通过仿真计算及实验验证对其效能进行了评估。评估结果表明：采用基于二阶积分的铷原子钟数字驯服系统，可以加快铷原子钟驯服效率，提高铷原子钟输出信号的稳定性及守时精度。同时，本方案采用模块化设计，可拼装构成适用于各种情况的复杂算法，显著改善铷原子钟的可靠性，降低成本，有效拓展铷原子钟在快速部署、快速响应系统中的应用场景。

参考文献：

[1] 张俊，王世伟，郭永刚，等. 铷频标温度系数影响因素分析与改进方法研究 [J]. 宇航计测技术，2019，39 (5): 12-18.

[2] 王亚军，张磊，谷扬，等. 基于 FPGA 的北斗驯服铷原子频标装置的研制 [J]. 计量学报，2020，41 (3): 259-262.

[3] 徐俊秋，李俊瑶，赵峰，等. 高性能铷原子钟的高精度频率漂移补偿研究 [J]. 波谱学杂志，2024，41 (2): 184-190.

[4] JADUSZLIWER B, CAMPARO J. Past, present and future of atomic clocks for GNSS [J]. GPS Solut, 2021, 25 (27): 1-13.

[5] 李俊瑶，周华伟，黄亮. 频标驯服算法的改进研究 [J]. 光学与光电技术，2019，17 (2): 59-63.

[6] 孙雪淋. 基于北斗授时系统的恒温晶振驯服守时技术研究 [D]. 绵阳：西南科技大学，2021.

[7] 刘科伟. 铷原子频标驯服系统设计与实现 [D]. 西安：中国科学院大学（中国科学院国家授时中心），2022.

[8] 何文彦，雷正伟，甄红涛，等. 基于 FPGA 的北斗时统设备铷钟驯服技术实现 [J]. 价值工程，2023，42 (2): 59-61.

[9] 李贺. 基于 GPS 授时秒脉冲的高稳晶振驯服与保持系

统研究 [D]. 西安：西安理工大学，2023.

[10] CHEN Y T, XU D H, SHEN Y X, et al. Analysis and design of an improved servo system for rubidium atomic frequency standard [J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences, 2013, 18 (1): 67-72.

[11] PAWLOWSKI E, WARDA P. Method and system for disciplining a local reference oscillator by GPS 1PPS signal [J]. Przegląd Elektrotechniczny, 2018, 94 (7): 38-41.

[12] LI X, CAI C L, ZHANG S G. Research and performance evaluation of atomic clock in GPS timing terminal [C] //2019 2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), Dalian, 2019: 333-336.

[13] LING J, JIAO D, LI L, et al. Research on GNSS receiver time and frequency steering algorithm based on linear quadratic Gaussian control [C] //2019 IEEE 2nd International Conference on Electronics Technology (ICET), Chengdu, 2019: 99-103.

[14] ZHAO J, MIAO X, QIAO Y. A rubidium clock taming algorithm based on modified grey model and PID control [C] //China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2020 Proceedings, vol. 2; 11th China Satellite Navigation Conference (CSNC 2020), Chengdu, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020: 510-519.

[15] LI H, ZHANG X, LI Z, et al. A novel high-precision method based on adaptive unscented particle filter for BeiDou/GPS disciplined crystal oscillator [C] //2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (ISPEC), Chengdu, 2020: 1587-1592.

[16] LI H, ZHANG X, LI Z, et al. A novel high-precision method based on sequence weighted adaptive unscented Kalman filter for GPS disciplined crystal oscillator [C] //2020 12th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Nanjing, 2020: 1-5.

[17] YAN M, ZHANG S, YIN F, et al. Development of a crystal oscillator taming module based on PID control algorithm [C] //Proc. SPIE 11930, International Conference on Mechanical Engineering, Measurement Control, and Instrumentation, 2021: 1193011.

[18] YANG H, XUE X, LV Y, et al. Research on servo control chip of CPT atomic clock [C] //2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), Harbin, China, 2023: 162-165.

[19] 贾杨洁. 恒温晶振驯服和保持技术的研究 [D]. 西安：西安电子科技大学，2021.

[20] 万文杰. 用于铷原子钟的低噪声晶体振荡器及锁相环电路的设计 [D]. 北京：中国科学院大学，2022.