

# 基于铷钟稳健性驯服方法的时间同步研究

程林<sup>1</sup> 郑鑫<sup>2\*</sup>

CHENG Lin ZHENG Xin

## 摘要

针对高精度、高稳定性时间同步的需求, 文章研究了一种基于全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的铷钟稳健性驯服方法。首先基于 GNSS 的铷钟高精度驯服模型, 将 GNSS 接收机、铷钟和时钟控制进行有效融合。在驯服铷钟时, 利用抗差卡尔曼滤波对钟差进行预处理, 滤除钟差中的噪声和异常值, 估计出铷钟的相位和频率调整量。后采用比例-积分-微分控制算法, 以避免调频引起铷钟频标振荡。实验证明, 可以将铷钟产生的秒脉冲信号与协调世界时同步。在连续 15 天的静态短基线时间同步测试中, 研究方法的单天时间同步精度均优于 0.5 ns。

## 关键词

时间同步; 全球导航卫星系统; 铷钟驯服; 抗差卡尔曼滤波; 比例积分微分控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.012

## 0 引言

高精度、高稳定性的时间基准是现代经济社会运行与国家安全体系建设中不可或缺的重要战略资源, 支撑着卫星导航、无线通信、航空航天、金融等各行各业的发展<sup>[1-3]</sup>。随着全球导航卫星系统 (global navigation satellite system, GNSS) 不断建设与完善, 基于 GNSS 获取时间基准成为一种常用的授时技术<sup>[4-6]</sup>。该技术通过对 GNSS 信号进行接收和处理, 获取接收机与卫星的钟差, 然后驯服输出与协调世界时 (universal time coordinated, UTC) 同步的秒脉冲 (pulse per second, PPS) 信号。用户可以利用 GNSS 接收机的 PPS 驯服本地时钟的时标与频标, 从而获取准确、稳定且连续的时间基准<sup>[7]</sup>。

由于 GNSS 接收机内置晶体钟稳定性较差, 其输出 PPS 的精度损失较大。对于普通型 GNSS 接收机, 其 PPS 输出精度通常为 20 ns<sup>[8]</sup>。而授时型专用 GNSS 接收机的 PPS 输出精度虽然能够达到 5 ns, 但依旧无法满足精密测控、精密时钟计量检测和国防军事等领域亚纳秒级时间基准的应用需求<sup>[9-10]</sup>。因此, 常规时间同步系统的精度主要受接收机内部晶体钟的稳定性制约。

高精度的时间同步系统, 需将铷原子钟与 GNSS 接收机进行融合。基于铷钟的频率基准获取 GNSS 观测数据并解算出钟差数据, 然后直接对铷钟的频率和相位进行控制, 从而提升整个系统的时间输出精度。但是 GNSS 观测数据受电离层延迟、对流层延迟和多路径效应等多种误差影响, 解算得

到的钟差数据中含有噪声和异常值, 对铷钟驯服过程造成严重的影响, 进而影响时间同步精度。针对上述问题, 本文提出了基于 GNSS 参考源的铷钟高精度驯服模型, 并重点研究了基于 GNSS 的铷钟稳健性驯服方法。

## 1 基于 GNSS 参考源的铷钟高精度驯服模型

通常时间同步系统的 GNSS 接收机和时钟驯服是两个独立的模块或者设备, GNSS 接收机根据解算的钟差对接收机内部的晶体钟进行频率和相位控制, 输出 PPS 给后端模块或设备使用。该方法受 GNSS 接收机内部晶体钟的稳定性影响, 仅能实现几十纳秒到几纳秒的时间同步精度。

如想实现亚纳秒级精度的时间同步, 则需将铷原子钟与 GNSS 接收机进行融合, 如图 1 所示。

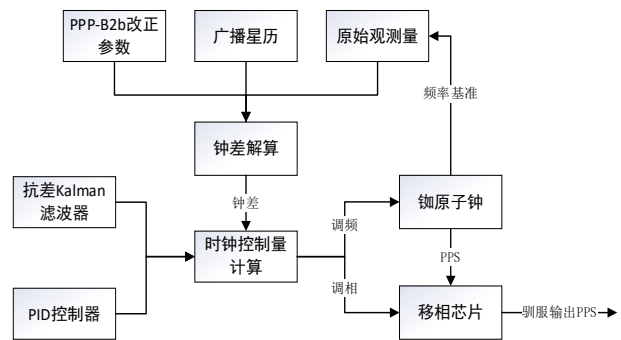


图 1 基于 GNSS 参考源的铷钟高精度驯服模型

基于铷钟的频率基准产生载波相位和伪距等原始观测值, 并结合广播星历和 PPP-B2b 改正参数进行钟差解算, 得到铷钟与 UTC 的时间差。后结合抗差 Kalman 滤波和 PID 控制器计算时钟控制量, 对铷钟的频率和相位进行调整, 即可得到与 UTC 同步的高精度 PPS 信号。

1. 电信科学技术第五研究所有限公司 四川成都 610021

2. 中国电子科技集团公司第三十六研究所 浙江嘉兴 314033

## 2 铷钟稳健性驯服方法

从图 1 可以看出, 时钟控制量主要由接收机钟差计算得到。而接收机钟差受观测值中的电离层延迟、对流层延迟, 多路径延迟等多种误差影响, 解算得到的接收机钟差中含有大量噪声。在观测值质量较差时, 甚至会计算出异常的钟差值, 严重影响铷钟的调频和调相。由此可见, 降低钟差中的噪声并滤除异常值可以提高时钟控制量的计算精度, 从而保证铷钟驯服的稳健性。

### 2.1 基于抗差 Kalman 滤波的接收机钟差处理方法

与已有文献一致, 本文采用二次多项式对接收机钟差进行建模<sup>[11]</sup>, Kalman 滤波的模型可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{A}_{k|k-1}\mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{w}_{k-1} \\ \mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k\mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $k$  表示钟差的输出时间;  $\mathbf{x}_k = [a_k \ b_k \ c_k]^T$  表示待估计的状态向量, 包括钟差  $a_k$ 、频差  $b_k$  和老化率  $c_k$ ;  $\mathbf{y}_k$  表示接收机输出的钟差;  $\mathbf{A}_{k|k-1}$  和  $\mathbf{C}_k$  分别表示状态转移矩阵和测量矩阵;  $\mathbf{w}_{k-1} \sim N(0, \mathbf{Q})$  和  $\mathbf{v}_k \sim N(0, \mathbf{R})$  分别表示不相关的过程噪声向量和测量噪声向量;  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  分别表示过程噪声协方差矩阵和测量噪声协方差矩阵。  $\mathbf{A}_{k|k-1}$ 、 $\mathbf{C}_k$ 、 $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  的具体形式表示为:

$$\mathbf{A}_{k|k-1} = \begin{bmatrix} 1 & \tau & \tau^2/2 \\ 0 & 1 & \tau \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_k = [1 \ 0 \ 0] \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1\tau + q_2\tau^3/3 + q_3\tau^5/20 & q_2\tau^2/2 + q_3\tau^4/8 & q_3\tau^3/6 \\ q_2\tau^2/2 + q_3\tau^4/8 & q_2\tau + q_3\tau^3/3 & q_3\tau^2/2 \\ q_3\tau^3/6 & q_3\tau^2/2 & q_3\tau \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = [q_0] \quad (5)$$

式中:  $\tau$  表示钟差输出的时间间隔;  $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  分别表示测量噪声, 调相白噪声, 调频白噪声和调频游走噪声的方差。  $q_0$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$  可通过不同平滑时间的 Hadamard 方差拟合得到<sup>[12-13]</sup>。

为抑制异常钟差对铷钟驯服过程的影响, 本文采用基于信息马氏距离的抗差 Kalman 滤波对钟差进行处理。抗差 Kalman 滤波的递归过程可以表示为:

$$\mathbf{x}_{k|k-1} = \mathbf{A}_{k|k-1}\mathbf{x}_{k-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{A}_{k|k-1}\mathbf{P}_{k-1}\mathbf{A}_{k|k-1}^T + \mathbf{Q} \quad (7)$$

$$\mathbf{L}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T (\mathbf{C}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T + \lambda_k\mathbf{R})^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{x}_{k-1} + \mathbf{L}_k(\mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k\mathbf{x}_{k-1}) \quad (9)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{L}_k\mathbf{C}_k)\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{x}_{k|k-1}$  和  $\mathbf{P}_{k|k-1}$  分别为状态预测值和预测协方差矩阵;  $\mathbf{L}_k$  为增益矩阵;  $\mathbf{P}_k$  为状态协方差矩阵;  $\lambda_k$  为方差膨胀因子。

在没有异常观测值时, 信息  $\mathbf{Y}_k = \mathbf{y}_k - \mathbf{C}_k\mathbf{x}_{k|k-1}$  为零均值高

斯分布, 即信息马氏距离的平方服从卡方分布<sup>[14-15]</sup>:

$$\gamma_k = \mathbf{Y}_k^T (\mathbf{C}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{Y}_k \sim \chi_{m,\alpha}^2 \quad (11)$$

根据假设检验理论, 对于给定的自由度  $m$  和显著水平  $\alpha$ ,  $\gamma_k$  满足:

$$\Pr(\gamma_k < \chi_{m,\alpha}^2) = 1 - \alpha \quad (12)$$

式中:  $\Pr(\cdot)$  代表随机事件发生的概率。当接收机输出的钟差  $\mathbf{y}_k$  出现异常时, 信息  $\mathbf{Y}_k$  也会出现异常, 使得式 (12) 不再成立。为削弱异常钟差对状态结果的影响, 通过方差膨胀因子  $\lambda_k$  对  $\mathbf{R}$  进行调节,  $\lambda_k$  满足:

$$f(\lambda_k) = \mathbf{Y}_k^T (\mathbf{C}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T + \lambda_k\mathbf{R})^{-1} \mathbf{Y}_k - \chi_{m,\alpha}^2 = 0 \quad (13)$$

式 (13) 为非线性等式, 可采用牛顿法进行迭代求解, 迭代过程为:

$$\begin{aligned} \lambda_k(i+1) &= \lambda_k(i) + \\ & \frac{\mathbf{Y}_k^T (\mathbf{C}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T + \lambda_k\mathbf{R})^{-1} \mathbf{Y}_k - \chi_{m,\alpha}^2}{\mathbf{Y}_k^T (\mathbf{C}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T + \lambda_k\mathbf{R})^{-1} \mathbf{R} (\mathbf{C}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{C}_k^T + \lambda_k\mathbf{R})^{-1} \mathbf{Y}_k} \end{aligned} \quad (14)$$

方差膨胀因子  $\lambda_k$  能够自适应地对测量噪声协方差矩阵进行调节, 当信息通过卡方检验时, 说明钟差没有异常,  $\lambda_k$  取初值 1; 否则, 说明钟差含有异常, 通过式求解  $\lambda_k$ 。  $\lambda_k$  能够对  $\mathbf{R}$  进行调节, 降低观测方程的贡献, 提高状态预测值的权重, 从而保证钟差  $a_k$ 、频差  $b_k$  和老化率  $c_k$  估计结果的稳健性。

### 2.2 基于 PID 的铷钟频标驯服方法

2.1 节得到的钟差即代表铷钟产生的 PPS 与 UTC 的相位差, 通过移相芯片可以调整到与 UTC 对齐, 实现时标的驯服。铷钟频标的驯服则是通过调节铷钟的压控电压实现的, 由于电压调节后需要较长的时间频标才能稳定, 因此直接利用频差不断地对铷钟频标驯服会造成频标的震荡。而 PID 是一种具有反馈回路的控制方法, 通过比较系统的输入和输出来计算控制量, 能够有效提高系统控制的稳定性。

针对铷钟的频标驯服过程, PID 的离散模型表示为<sup>[16-17]</sup>:

$$u(k) = K_p b(k) + K_i \sum_{j=0}^k b(j) + K_d [b(k) - b(k-1)] \quad (15)$$

式中:  $u(k)$  为第  $k$  次调频时 PID 计算的频率调整值;  $b(k)$  为第  $k$  次调频时抗差 Kalman 滤波计算的频差;  $K_p$  为比例系数, 增大  $K_p$  可以加快控制系统达到期望值的速度, 但会加大系统的振荡;  $K_i$  为积分系数, 用于对系统的累计误差进行调节, 可以削弱系统的振荡;  $K_d$  为微分系数, 能够阻止频差的变化趋势, 降低系统的超调。

## 3 静态短基线时间同步性能分析

为了验证本文所提方法的有效性, 按照图 1 所示模型与第 2 节的铷钟驯服方法研制了两台时统设备, 其中核心控制板硬件设计基于 CPU+FPGA 为核心的 SOC 框架, 配套自研 GNSS 射频与基带处理模块, 以及 XHTF1020M 型原子钟,

频率准确度优于  $\pm 5 \times 10^{-11}$ ，短期稳定度优于  $3 \times 10^{-11}$  (1 s)，长期稳定度优于  $5 \times 10^{-11}$ /天。利用多通道时间间隔测量仪对两台时统设备的 PPS 相位差进行测量与统计，测试框图如图 2 所示。

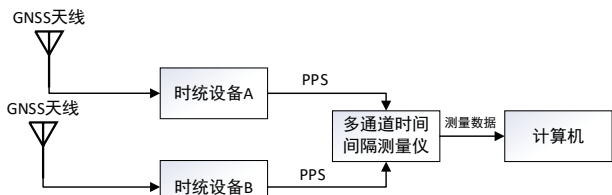


图 2 时间同步性能测试框图

时统设备 A 和 B 接入的 GNSS 天线位于电信科学技术第五研究所有限公司楼顶，相距约 2 m，观测环境较为空旷，平均接收 GPS 和 BDS-3 卫星约 12~16 颗。短基线测试能够有效避免观测值和环境差异对时间同步结果的影响，更有利于验证本文铷钟驯服方法的有效性。本实验的 GNSS 解算策略如表 1 所示。

表 1 GNSS 解算策略

项目	策略
解算模式	精密单点定位（静态）
卫星系统	GPS、BDS-3
采样间隔	1 s
截止高度角	10°
模糊度	浮点解
电离层	无电离层组合
对流层	Saastamoinen 校正干延迟， 估计剩余湿延迟
卫星轨道、钟差	广播星历 + PPP-B2b 校正
码间偏差	PPP-B2b 校正
钟差模型	二次多项式
参数估计	扩展 Kalman 滤波

### 3.1 基于抗差 Kalman 滤波的接收机钟差处理分析

接收机钟差的解算结果受观测值中的误差影响，原始钟差中含有大量的噪声，甚至还有异常的突跳，将影响频率和相位调整值的计算。图 3 为抗差 Kalman 滤波处理后的钟差结果，与原始钟差对比，抗差 Kalman 滤波的结果更为平稳，且能够抑制原始钟差中的异常值。

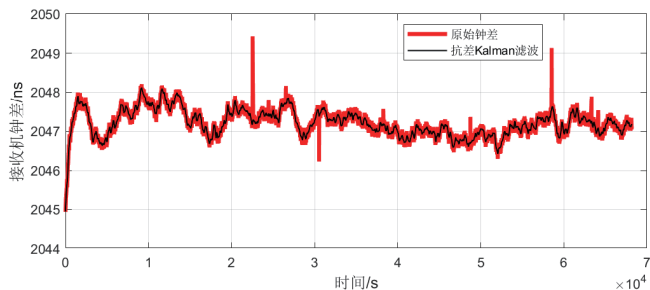


图 3 抗差 Kalman 滤波处理后的接收机钟差

接收机接入铷钟后，真实的接收机钟差仅受铷钟调频的影响，理论上钟差是随时间缓慢抖动的，因此相邻历元间的钟差变化量较小。图 4 为接收机钟差历元间差分结果，可以看出原始钟差的一次差抖动十分严重，说明原始钟差中含有大量噪声，而抗差 Kalman 滤波处理后噪声水平明显降低，且钟差中的异常值也被抑制。可以说明，抗差 Kalman 滤波能够降低钟差中的噪声并滤除异常值，从而降低原始钟差中的噪声和异常值对铷钟驯服的影响。

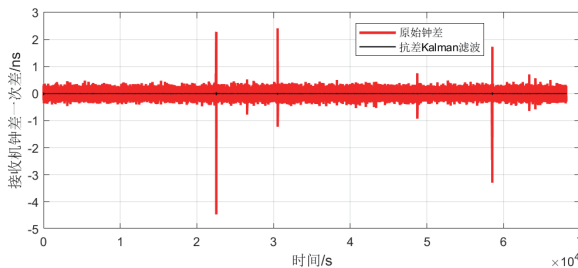


图 4 接收机钟差历元间差分结果

### 3.2 PPS 测量结果分析

时统设备根据钟差对铷钟的时标和频标进行驯服，并输出高精度的 PPS 信号。由于天线、馈线、硬件环境以及 PPS 输出线缆等均会对 PPS 造成固定的时延，因此本实验选用固定的线缆和硬件，并提前对线缆和硬件延迟标定和补偿。在剔除收敛阶段的数据后，两台系统设备的 PPS 相位差测量结果如图 5 所示。PPS 相位差整体较为平稳、抖动较小，RMS 为 0.30 ns，峰峰值为 1.58 ns，达到了亚纳秒级的时间同步精度。

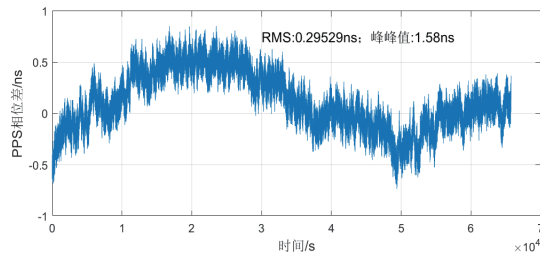


图 5 PPS 相位差测量结果

RMS 主要用于评估时间同步的精度，而时间偏差则用于评估时间稳定度的指标，图 6 为两台时统设备 PPS 相位差的时间稳定度。

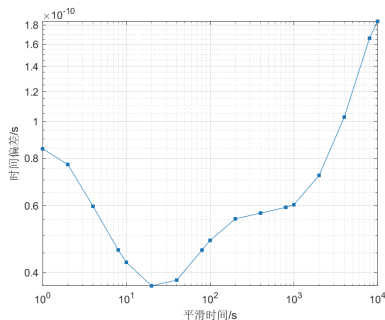


图 6 PPS 的时间稳定度

可以看出,在不同的平滑时间下,时间偏差基本在100 ps 以内,最小为36 ps,最大不超过200 ps,说明本文方法的时间同步稳定度较高。

为避免实验的偶然性,在2024年6月26日至7月10日进行了15天的测试,测试结果统计如表2所示。其中,6月27日测试结果最差,RMS为0.47 ns,峰峰值为2.25 ns;7月1日测试结果最好,RMS为0.18 ns,峰峰值为1.14 ns。15天测试结果的RMS均在0.5 ns 以内,均值为0.33 ns,峰峰值均值为1.88 ns,时间偏差整体较低。可以得出,本文方法具有较高的时间同步精度和稳定度。

表2 15天时间同步结果

日期	RMS/ns	峰值 /ns	时间偏差 /s				
			10 <sup>0</sup> s	10 <sup>1</sup> s	10 <sup>2</sup> s	10 <sup>3</sup> s	10 <sup>4</sup> s
6.26	0.30	1.58	8.47×10 <sup>-11</sup>	4.25×10 <sup>-11</sup>	4.85×10 <sup>-11</sup>	6.03×10 <sup>-11</sup>	1.84×10 <sup>-10</sup>
6.27	0.47	2.25	8.54×10 <sup>-11</sup>	4.01×10 <sup>-11</sup>	5.08×10 <sup>-11</sup>	1.09×10 <sup>-10</sup>	2.97×10 <sup>-10</sup>
6.28	0.28	1.84	8.42×10 <sup>-11</sup>	4.07×10 <sup>-11</sup>	4.84×10 <sup>-11</sup>	6.38×10 <sup>-11</sup>	1.71×10 <sup>-10</sup>
6.29	0.32	1.91	8.22×10 <sup>-11</sup>	4.35×10 <sup>-11</sup>	5.04×10 <sup>-11</sup>	8.81×10 <sup>-11</sup>	1.91×10 <sup>-10</sup>
6.30	0.31	1.83	8.52×10 <sup>-11</sup>	4.21×10 <sup>-11</sup>	5.55×10 <sup>-11</sup>	7.13×10 <sup>-11</sup>	1.83×10 <sup>-10</sup>
7.01	0.18	1.14	8.79×10 <sup>-11</sup>	4.05×10 <sup>-11</sup>	5.18×10 <sup>-11</sup>	8.01×10 <sup>-11</sup>	1.21×10 <sup>-10</sup>
7.02	0.37	2.05	8.49×10 <sup>-11</sup>	4.32×10 <sup>-11</sup>	5.14×10 <sup>-11</sup>	7.47×10 <sup>-11</sup>	2.01×10 <sup>-10</sup>
7.03	0.42	2.25	8.68×10 <sup>-11</sup>	4.19×10 <sup>-11</sup>	5.13×10 <sup>-11</sup>	6.38×10 <sup>-11</sup>	2.49×10 <sup>-10</sup>
7.04	0.29	1.73	8.64×10 <sup>-11</sup>	4.24×10 <sup>-11</sup>	4.54×10 <sup>-11</sup>	5.28×10 <sup>-11</sup>	1.64×10 <sup>-10</sup>
7.05	0.33	1.88	8.31×10 <sup>-11</sup>	4.19×10 <sup>-11</sup>	5.25×10 <sup>-11</sup>	6.17×10 <sup>-11</sup>	1.73×10 <sup>-10</sup>
7.06	0.28	1.66	8.12×10 <sup>-11</sup>	4.21×10 <sup>-11</sup>	4.68×10 <sup>-11</sup>	5.14×10 <sup>-11</sup>	1.51×10 <sup>-10</sup>
7.07	0.41	2.22	8.51×10 <sup>-11</sup>	4.14×10 <sup>-11</sup>	5.66×10 <sup>-11</sup>	8.41×10 <sup>-11</sup>	1.93×10 <sup>-10</sup>
7.08	0.33	1.92	8.32×10 <sup>-11</sup>	4.25×10 <sup>-11</sup>	5.42×10 <sup>-11</sup>	6.87×10 <sup>-11</sup>	1.89×10 <sup>-10</sup>
7.09	0.26	1.59	8.07×10 <sup>-11</sup>	4.41×10 <sup>-11</sup>	4.58×10 <sup>-11</sup>	5.65×10 <sup>-11</sup>	1.46×10 <sup>-10</sup>
7.10	0.44	2.31	8.61×10 <sup>-11</sup>	4.32×10 <sup>-11</sup>	5.16×10 <sup>-11</sup>	8.87×10 <sup>-11</sup>	2.25×10 <sup>-10</sup>
均值	<b>0.33</b>	<b>1.88</b>	<b>8.45×10<sup>-11</sup></b>	<b>4.21×10<sup>-11</sup></b>	<b>5.07×10<sup>-11</sup></b>	<b>7.17×10<sup>-11</sup></b>	<b>2.02×10<sup>-10</sup></b>

#### 4 结语

本文以GNSS为参考源,给出了铷钟的高精度驯服模型,重点研究了基于抗差Kalman滤波和PID控制器的铷钟稳健性驯服方法,得到如下结论:

(1) 传统时间同步系统以GNSS接收机PPS为基准驯服本地时钟,易受接收机内部晶振稳定性的影响。而本文给出的铷钟高精度驯服模型将接收机、铷原子钟和时钟控制融合,基于铷钟频率产生观测数据并直接对铷钟进行驯服,能够有效提升整个系统的时间输出精度。

(2) 接收机钟差的解算结果易受观测值中的误差影响,利用基于信息马氏距离的抗差Kalman滤波处理能够有效降低钟差中的噪声和异常值的影响,从而保障PID控制器的稳健性。

为验证所提方法的有效性和稳定性,进行了连续15天

的静态短基线实验测试,实验结果表明,本文方法的单天时间同步精度均优于0.5 ns,能够满足亚纳秒级精度的时间同步需求。下一步工作将重点研究长基线和动态环境下的时间同步方法,为更多的高精度时间同步应用场景提供理论基础和方法参考。

#### 参考文献:

[1] 吕大千. 基于精密单点定位的GNSS时间同步方法研究[D]. 长沙:国防科技大学,2020.

[2] 刘根友,高铭,尹翔飞,等. 基于GNSS精密单点定位的高精度云平台授时[J]. 测绘学报, 2022, 51(8): 1736-1743.

[3] 施闯,郑福,楼益栋,等. 北斗高精度时频服务理论方法与应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(7): 1010-1018.

[4] 杨旭海,李孝辉,华宇,等. 卫星授时与时间传递技术进展[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(4): 1-10.

[5] GAO Y J, LI G Y. Three time spoofing algorithms for GNSS timing receivers and performance evaluation[J]. GPS solutions, 2022, 26(3):1-13.

[6] GUO W F, ZHU M M, GU S F, et al. Linear quadratic gaussian-based clock steering system for GNSS real-time precise point positioning timing receiver[J/OL].GPS solutions, 2024[2024-12-22].<https://link.springer.com/article/10.1007/s10291-023-01592-5>.

[7] 樊多盛,施韶华,李孝辉. Kalman滤波的铷原子钟控制算法[J]. 宇航学报, 2015,36(1):90-95.

[8] 周志行,夏文龙,宋剑鹏,等. 北斗三号实时精密定位授时系统设计与实现[J]. 信息技术与信息化, 2024(1):184-187.

[9] 施闯,宋伟,郑福,等. 北斗实时百皮秒级单差时频同步方法[J]. 测绘学报, 2024,53(5):869-878.

[10] WU M F, SUN B Q, WANG Y X, et al. Sub-nanosecond one-way real-time time service system based on UTC[J]. GPS solutions, 2021, 25:1-9.

[11] GU S F, MAO F Y, GONG X P, et al. Improved short-term stability for real-time GNSS satellite clock estimation with clock model[J/OL].Journal of seodesy, 2023[2024-02-23].<https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-023-01747-9>.

[12] 樊多盛,刘娅,李孝辉. 基于Kalman滤波器对晶体振荡器的控制研究[J]. 时间频率学报, 2019,42(3):224-232.

# 基于树集成模型规则抽取的机器学习可解释性研究

雍 华<sup>1</sup>

YONG Hua

## 摘要

随着机器学习模型在金融、医疗等高敏感领域的广泛应用，模型可解释性成为确保决策透明性和用户信任的关键。树集成模型因其高精度与内在可解释性潜力，成为平衡性能与可解释性的重要工具。文章系统综述了从树集成模型中抽取规则以增强模型可解释性的研究进展，重点介绍了树集成模型的基本情况和从树集成模型中抽取规则以增强机器学习模型可解释性的各类技术，旨在为可解释人工智能的研究提供理论参考，推动规则驱动决策在高风险领域的可靠落地。

## 关键词

树集成模型；规则抽取；可解释性

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.06.013

## 0 引言

在机器学习的研究和应用中，学术界和工业界的研究人员越来越关注模型的透明性和可解释性，特别是在受到实质性监管和法律约束的领域，如医疗诊断、金融风控、自动驾驶等高敏感领域，需要更深入地理解模型输出结论背后的决策机制，以便评估模型所做选择的合理性。作为平衡模型性能与可解释性的重要工具，树集成模型（如随机森林、XGBoost、LightGBM、CatBoost）凭借其高预测精度和内在可解释性潜力脱颖而出。然而，树集成模型的多树叠加结构仍可能导致全局解释的复杂性，而规则抽取技术（Rule

Extraction）通过将模型转化为人类可理解的逻辑规则（如“if-then”形式），为破解这一难题提供了关键路径。近年来，规则抽取技术的研究逐步深入，其核心目标是从树集成模型中提取简洁、高覆盖率的规则集，以透明化模型决策逻辑。例如，在金融领域，规则抽取可将风险评估模型转化为“资产负债率>70%→高风险”的直观规则，帮助金融机构验证模型合规性；在医疗领域，规则集可揭示疾病预测的关键特征组合，辅助医生制定诊疗方案。

本文聚焦于树集成模型的规则抽取技术，旨在系统梳理其研究进展、技术方法与评价方法，并探讨其与可解释性需求的深度关联。具体而言，本文将从以下维度展开：

1. 宁夏大学前沿交叉学院 宁夏中卫 755000

[13] 樊礼谦, 焦文海, 孟轶男. 基于 Kalman 滤波的导航星座集中式守时算法研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(1): 21-31.

[14] CHANG G B. Robust kalman filtering based on mahalanobis distance as outlier judging criterion[J]. Journal of geodesy, 2014, 88: 391-401.

[15] LI W, LIN X, LI S D, et al. 2022. Robust autocovariance least-squares noise covariance estimation algorithm[J]. Measurement, 2022, 187: 110331.

[16] IRSHAD M, VEMULA N K, DEVARAPALLI R, et al. An optimized integral performance criterion based commercial PID controller design for boost converter[J]. Journal of electrical engineering, 2024, 75(4): 258-267.

[17] YANGA C, BANB L. Vibration control of piezoelectric flexible manipulator based on machine vision and

improved PID[C/OL]// 2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications(ICPECA). Piscataway: IEEE, 2021[2024-05-25]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9362620>. DOI: 10.1109/ICPECA51329.2021.9362620.

## 【作者简介】

程林（1997—），男，四川成都人，硕士，工程师，研究方向：GNSS 时间同步和自适应卡尔曼滤波研究，email: chenglin971226@163.com。

郑鑫（1990—），通信作者（email: 18123315728@163.com），男，黑龙江齐齐哈尔人，硕士，工程师，研究方向：信号处理研究。

（收稿日期：2025-02-18 修回日期：2025-06-11）