

面向工业互联网的PTP多源融合时钟同步与守时补偿算法

段君凡, 赵 伟

山东交通学院轨道交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2026年7月5日; 录用日期: 2026年8月6日; 发布日期: 2026年8月12日

摘 要

在工业互联网、分布式采样和同步触发系统中, IEEE 1588精密时间协议(Precision Time Protocol, PTP)能够为多节点设备提供统一时间基准, 但网络传输时延抖动(Packet Delay Variation, PDV)、链路不对称、报文间歇丢失以及本地晶振温漂会显著降低同步精度和触发一致性。针对上述问题, 本文提出一种面向工业现场的PTP多源融合时钟同步与守时补偿算法。该算法以相位偏差和频率漂移为状态量, 构建自适应卡尔曼时钟伺服模型; 在观测更新前引入幸运包过滤机制, 利用滑动窗口内最小时延报文抑制交换机排队噪声; 同时结合片载温度采样与三阶多项式拟合, 并在同步稳定阶段在线学习温度-频率关系, 实现PTP中断阶段的置信度融合守时补偿。算法在同步触发端加入固定硬件延迟预补偿, 使时间同步结果能够直接服务于脉冲输出和分布式采样。基于可复现仿真平台的对比实验表明, 在轻载、中载和重载网络条件下, 本文方法的稳态均方根同步误差分别为6.2 ns、8.4 ns和12.5 ns; 在重载快速温变场景中, 60 s、180 s和300 s断链守时的最大时间误差分别为18.7 ns、895.8 ns和1901.9 ns, 与传统PI伺服相比, 最大误差分别降低约97.4%、67.7%和60.7%。实验结果验证了该方法在复杂网络和硬件漂移共同作用下的同步精度、鲁棒性和工程适用性。

关键词

PTP, 时钟同步, 卡尔曼滤波, 幸运包过滤, 温漂补偿, 守时算法, 工业互联网

Multi-Source Fusion Clock Synchronization and Holdover Compensation Algorithm for PTP in Industrial Internet

Junfan Duan, Wei Zhao

School of Rail Transportation, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

Received: July 5, 2026; accepted: August 6, 2026; published: August 12, 2026

Abstract

In industrial Internet, distributed sampling and synchronous triggering systems, the IEEE 1588 Precision Time Protocol (PTP) provides a common time base for multiple nodes. However, packet delay variation, link asymmetry, intermittent message loss and oscillator temperature drift still degrade synchronization accuracy. This paper proposes a multi-source fusion clock synchronization and holdover compensation algorithm for PTP. The phase offset and frequency drift are modeled as clock states in an adaptive Kalman servo. Before measurement update, a lucky packet filter selects low-delay packets in a sliding window to suppress switch queuing noise. A temperature-frequency polynomial model is learned during normal synchronization, validated by a confidence estimator, and then used for holdover compensation when PTP packets are unavailable. In addition, a deterministic delay pre-compensation module is introduced for synchronous trigger outputs. Reproducible simulation experiments show that the proposed method achieves RMS offset errors of 6.2 ns, 8.4 ns and 12.5 ns under light, medium and heavy network loads, respectively. Under heavy load with a fast temperature transient, the maximum holdover errors during 60 s, 180 s and 300 s PTP outages are limited to 18.7 ns, 895.8 ns and 1901.9 ns, respectively. Compared with PI, these values are reduced by approximately 97.4%, 67.7% and 60.7%. The results demonstrate the accuracy, robustness and practical value of the proposed method under combined network jitter and hardware drift.

Keywords

PTP, Clock Synchronization, Kalman Filtering, Lucky Packet Filtering, Temperature Drift Compensation, Holdover Algorithm, Industrial Internet

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业互联网、时间敏感网络(Time Sensitive Networking, TSN)、分布式测控和多机器人协同系统的发展,现场设备不再仅依赖单一控制器完成采样、控制和触发,而是由多个边缘节点在统一时间基准下协作运行[1]。对于同步采样、运动控制、故障录波、脉冲触发和高频数据融合等应用,节点之间的时间误差会直接转化为相位偏差、采样错位或控制回路抖动,相关时钟同步问题已在传感器网络和分组交换网络中得到广泛研究[2][3]。因此,如何在普通以太网或工业以太网环境中获得稳定、可保持且可用于执行端触发的纳秒级时间基准,是当前智能装备和工业现场系统设计中的重要问题。

IEEE 1588 精密时间协议通过主从时钟之间的周期性交互估计链路时延与本地时钟偏差,并利用时钟伺服算法调节从时钟的相位和频率[4]。与传统网络时间协议相比[5],PTP 可结合硬件时间戳显著降低协议栈和操作系统调度带来的不确定性;相关研究进一步讨论了软件实现条件下的时钟伺服设计[6]和基于卡尔曼滤波的 PTP 同步性能[7]。然而,PTP 的最终同步精度并不只取决于协议本身。网络拥塞导致的报文排队、上下行链路不对称、交换芯片转发路径变化、PTP 报文丢失以及本地晶振随温度变化产生的频率漂移,都会在实际系统中造成明显的同步误差。

在开源 PTP 协议栈和多数工程实现中,时钟伺服通常采用比例-积分(PI)控制器[8]。PI 伺服结构简单、计算量低,适合稳定链路下的连续同步,但当 PDV 呈现尖峰噪声或长尾分布时,PI 控制器容易把突

发排队延迟误认为真实时钟偏差, 进而造成调频过冲和锁定状态下的微小振荡。线性回归或最小二乘法能够在窗口内估计频率斜率, 对部分随机抖动具有抑制作用, 但其窗口长度与响应速度之间存在矛盾。卡尔曼滤波为时钟相位和频率的联合估计提供了更完整的状态空间表达[9], 并已用于 IEEE 1588 网络时钟同步性能分析[7]和分组网络时间保持估计[10]; 但若观测噪声模型固定, 仍难以适应工业网络中负载快速变化的场景。

除网络因素外, 硬件晶振本身也会限制 PTP 同步效果。普通晶振和温补晶振(TCXO)的频率均会随温度、供电和老化产生变化, 环境因素对 IEEE 1588 时钟源同步精度的影响已有相关研究[11], 晶体振荡器的温度特性也在频率控制领域被系统讨论[12]。当 PTP 报文因链路切换、主时钟维护或网络拥堵而短时不可用时, 从时钟进入守时状态, 频率误差会被持续积分为时间误差。若没有针对温漂的补偿模型, 即便同步中断时间只有几十秒, 也可能导致分布式节点之间出现数百纳秒甚至微秒级偏差。对于同步触发系统而言, 即使时钟 offset 已经接近零, GPIO 翻转、FPGA 比较器、隔离器、驱动器和传感器前端仍存在固定执行延迟, 若不在触发计划中提前补偿, 也会造成物理波形层面的偏差。

相关工作与技术定位

近年来, PTP 优化研究逐步从固定参数伺服和经验型 PDV 滤波扩展到数据驱动与鲁棒状态估计。Alhashmi 等采用卷积去噪自编码器从 PTP 报文特征中重构路径非对称量, 可刻画传统对称时延模型难以表达的非线性关系[13]; Zhang 和 Hou 提出改进强跟踪自适应卡尔曼滤波, 通过模糊逻辑、假设检验和改进 Sage-Husa 噪声估计抑制网络抖动与异常值[14]; Liu 和 Wang 进一步面向非对称分组时延设计鲁棒三步递归卡尔曼跟踪器, 在最小方差框架下联合估计时钟频偏与相位偏差[15]。此外, 快速无迹卡尔曼方法通过随机奇异值分解降低非线性、多节点同步中的矩阵计算开销, 为复杂状态模型提供了新的实现路径[16]。

上述方法在持续非对称、非高斯噪声或多跳非线性场景中具有更强的表达能力, 但也带来训练样本依赖、模型迁移风险、协方差自适应参数增多或高维矩阵运算等代价。本文并不试图替代这些面向特定误差源的高复杂度估计器, 而是定位于资源受限工业边缘节点: 采用二状态卡尔曼模型和基于时延统计的显式加权, 不需要离线标签或神经网络训练, 并进一步覆盖 PTP 中断守时、晶振温漂和执行端固定延迟。其贡献在于以较低在线复杂度形成网络侧、时钟侧和执行侧的一体化补偿链路; 代价是对长期固定路径非对称和超出训练分布的复杂晶振特性缺乏直接辨识能力。

针对上述问题, 本文在 PTP 基础上提出一种多源融合时钟同步与守时补偿算法。算法选取卡尔曼滤波作为核心伺服框架, 将相位偏差和频率漂移联合建模; 利用幸运包过滤思想, 在滑动窗口内识别接近最小路径时延的 PTP 报文, 并对排队延迟较大的观测进行降权; 在正常同步阶段持续学习温度-频率关系, 在 PTP 中断后依据温度预测频率漂移; 最后在同步触发端加入硬件延迟预补偿。

本文主要工作如下:

- 1) 构建了适用于 PTP 报文长尾抖动场景的自适应观测噪声模型;
- 2) 将幸运包加权机制引入卡尔曼时钟伺服过程, 在保留连续观测更新的同时降低排队报文对状态估计的影响;
- 3) 设计了同步阶段在线学习、守时阶段置信度融合及模型失配降级流程, 并从误差预算和最小均方意义解释融合权重;
- 4) 基于可复现仿真实验, 对不同网络负载、断链守时和同步触发补偿条件下的算法性能进行了定量分析。

2. PTP 同步误差来源与系统模型

2.1. PTP 时间戳交换模型

典型 PTP 两步模式中, 主时钟在发送 Sync 报文时记录发送时间戳 t_1 , 从时钟接收该报文时记录 t_2 ; 随后主时钟通过 Follow_Up 报文发送精确 t_1 。从时钟再发送 Delay_Req 并记录 t_3 , 主时钟接收后记录 t_4 并通过 Delay_Resp 返回。若假设上下行链路时延相等, 则从时钟相对主时钟的偏差 offset 和平均路径时延 delay 可由四个时间戳估计。

$$\text{offset} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (1)$$

$$\text{delay} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (2)$$

式(1)和式(2)建立在链路对称和时间戳准确的前提上。实际网络中, 交换机排队使某些 PTP 报文经历额外等待时间, 导致测得的 delay 偏大; 若上下行排队程度不同, 则 offset 估计也会产生偏置。由于排队延迟通常非负且具有长尾分布, 窗口内最小时延报文更接近无排队或低排队状态, 这正是幸运包过滤和 PDV 过滤方法的基本依据[17]。

2.2. 本地时钟状态模型

本地从时钟可表示为主时钟时间叠加相位偏差和频率偏差。设 $x_k = [\theta_k, f_k]^T$, 其中 θ_k 为第 k 个同步周期的相位偏差, 单位为 ns; f_k 为频率偏差, 单位为 ns/s 或等价 ppb; 采样周期为 Δt 。忽略高阶扰动时, 时钟状态转移可写为

$$x_k = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x_{k-1} + w_k \quad (3)$$

$$z_k = [1 \quad 0] x_k + v_k + b_k \quad (4)$$

其中 z_k 为 PTP 测得的 offset, w_k 为晶振随机游走和调频残差, v_k 为时间戳测量噪声, b_k 为链路不对称和排队引起的偏置项。当网络负载升高时, v_k 和 b_k 并非固定高斯噪声, 而表现为方差增大、尖峰增多和正偏分布。因此, 本文不采用固定测量噪声方差, 而根据报文时延与窗口最小时延的差值动态调整观测可信度。

2.3. 温漂与触发执行误差

晶振频率随温度变化通常具有非线性特征。对于工程实现, 可在同步稳定阶段将卡尔曼滤波估计得到的频率偏差作为标签, 将片载温度传感器输出作为输入, 拟合温度 - 频率曲线; 已有研究也将环境温度引入卡尔曼同步模型以动态补偿频偏[18]。三阶多项式适合作为低成本局部近似, 但其有效性依赖于晶振切型、补偿结构、标定温区和热动态; 因此本文仅在训练样本覆盖的温区内使用式(5), 不进行无约束外推。

$$f_T(T) = a_0 + a_1(T - T_0) + a_2(T - T_0)^2 + a_3(T - T_0)^3 \quad (5)$$

具体而言, AT-cut XO 或 VCXO 在拐点附近通常具有平滑的三次型频温曲线, 适合在连续、有限温区内用三阶模型描述; 32.768 kHz 音叉晶振的主导特性更接近抛物线, 二阶模型往往已足够; TCXO 内部已包含模拟或数字补偿, 其残余误差可能呈分段或局部非单调; OCXO 的晶体温度受恒温环控制, 外壳温度与晶体温度之间还存在热滞后和迟滞, 此时仅以瞬时环境温度为自变量可能发生模型失配。若工

作温区较宽、升温与降温轨迹明显不同或温度变化速率较高, 应改用分段多项式、样条模型, 或把温度变化率作为附加输入[12]。

此外, 在同步触发系统中, 比较寄存器命中目标时间后, 信号从数字比较器传播到外部接口并驱动传感器或执行电路, 仍会经历固定延迟 Δt_{delay} 。若目标物理动作时间为 T_{target} , 则比较寄存器应设置为 $T_{\text{target}} - \Delta t_{\text{delay}}$, 以使实际输出沿与系统时间基准对齐。

$$T_{\text{compare}} = T_{\text{target}} - \Delta t_{\text{delay}} \quad (6)$$

3. 多源融合时钟同步与守时补偿算法

3.1. 总体框架

本文算法由观测采集、幸运包过滤、自适应卡尔曼伺服、温漂建模与触发补偿五个模块组成。观测采集模块从 PTP 协议栈或硬件时间戳单元获得 offset 和 delay; 幸运包过滤模块根据滑动窗口内的路径时延分布估计报文是否受到明显排队影响; 卡尔曼伺服模块融合当前观测和本地时钟状态预测, 输出频率调节量; 温漂建模模块在同步正常时学习温度和频率之间的关系, 在 PTP 不可用时接管频率预测; 触发补偿模块将同步后的时间基准转换为可执行的硬件触发时间。各模块的处理内容与作用见表 1。

Table 1. Functional modules of the proposed algorithm

表 1. 本文算法功能模块

模块	处理内容	作用
观测采集	读取 Sync/Follow_Up/Delay_Resp 时间戳, 计算原始 offset 与路径 delay	提供含 PDV 噪声的测量值
幸运包过滤	在 32 个采样周期滑动窗口内估计最小时延并抬高异常排队报文测量方差	削弱交换机队列对伺服环的污染
卡尔曼伺服	以相位偏差和频率漂移为状态, 依据残差动态调整观测噪声	平滑调频并提高锁定稳定性
温漂建模	用同步稳定阶段的频率估计和温度采样拟合三阶多项式	为断链守时提供频率先验
触发补偿	将目标触发时间提前固定硬件延迟 Δt_{delay}	降低同步触发端执行偏差

3.2. 幸运包加权观测模型

设 D_k 为第 k 个 PTP 周期估计得到的平均路径时延, 窗口 W_k 包含最近 N 个有效周期的时延观测。若 $D_{\min}$ 为窗口内低分位时延, 则 $D_k - D_{\min}$ 可近似反映该报文受到的额外排队程度。传统幸运包或 PDV 过滤算法通常只选择窗口内最小时延报文用于校时, 但在采样频率较低或网络重载时, 过于严格的选择会降低观测更新频率。本文采用加权而非硬删除策略: 当报文接近幸运包时给予较小测量方差, 当报文显著偏离最小时延时增大测量方差, 使卡尔曼滤波器自动降低其影响。

$$R_k = R_0 \left[1 + \beta \left(\frac{D_k - D_{\min}}{\max(D_{\min}, \varepsilon)} \right)^2 \right] \quad (7)$$

式(7)中 R_0 为基础测量噪声方差, β 为排队惩罚系数, ε 用于避免分母过小。该设计保留了卡尔曼滤波连续更新的优点, 同时吸收了幸运包过滤对低排队路径的偏好。对于超过窗口高分位阈值的极端报文, 算法可直接跳过观测更新, 仅执行状态预测。

3.3. 自适应卡尔曼时钟伺服

在每个同步周期, 滤波器首先依据式(3)对当前时钟状态进行一步预测, 得到预测状态 $\mathbf{x}_k^-$ 和预测协方

差 P_k^- 。其中, x_k^- 表示在尚未使用当前 PTP 观测前, 仅根据上一周期状态和本地振荡器模型得到的相位与频率估计; P_k^- 则表示该预测结果的不确定性。随后, 滤波器将当前 PTP 时间戳计算得到的 offset 作为观测值 z_k , 并通过观测矩阵 $H = [1 \ 0]$ 从状态向量中提取相位偏差预测值 Hx_k^- 。因此, 当前观测与模型预测之间的差值可写为

$$r_k = z_k - Hx_k^- \quad (8)$$

其中, r_k 为观测残差。当网络轻载、报文排队较小时, 式(8)得到的动态测量噪声方差 R_k 较小, 说明当前观测可信度较高, 滤波器应更多利用 z_k 修正状态; 当网络重载或出现排队尖峰时, R_k 增大, 说明当前观测可能受到 PDV 污染, 滤波器应更多依赖模型预测。基于最小均方误差准则, 卡尔曼增益可表示为

$$K_k = P_k^- H^T (HP_k^- H^T + R_k)^{-1} \quad (9)$$

然后利用观测残差修正预测状态:

$$x_k = x_k^- + K_k (z_k - Hx_k^-) \quad (10)$$

并同步更新状态误差协方差:

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (11)$$

式(9)~式(11)中, K_k 为第 k 个同步周期的卡尔曼增益, 用于权衡模型预测与 PTP 观测之间的可信度; P_k^- 和 P_k 分别为观测更新前后的状态误差协方差矩阵; $H = [1 \ 0]$ 为观测矩阵, 表示 PTP 时间戳交换直接得到的是相位偏差观测, 而频率漂移需要通过状态递推间接估计; R_k 为式(7)计算得到的动态测量噪声方差; z_k 为当前同步周期的 offset 观测值; I 为单位矩阵。

从控制角度看, 卡尔曼状态中的频率分量可直接映射为本地时钟调频量, 状态中的相位分量可用于判断是否需要微小相位校正。与固定 PI 参数相比, 该方法能够根据网络状态自动改变等效环路带宽: 观测可信时提高响应速度, 观测不可信时降低对报文噪声的敏感性。

3.4. 温漂学习与断链守时

在 PTP 同步稳定且卡尔曼残差低于阈值时, 算法记录温度 T_k 和估计频率 f_k , 采用滑动最小二乘法拟合式(5)中的系数。为了避免短时网络扰动污染温漂模型, 只有当连续 M 个周期残差处于正常范围内、且当前路径时延不高于滑动窗口中位数时, 样本才被写入温漂训练缓存。滑动窗口使旧样本自然退出, 等价于对缓慢老化进行有限记忆的在线更新; 工程实现还可采用带遗忘因子的递归最小二乘, 使系数随晶振长期漂移缓慢变化。

为防止模型失配, 系统同时记录训练温区 $[T_{\min}, T_{\max}]$ 及温漂残差方差。当当前温度越界, 或同步阶段归一化温漂残差连续 L 次超过卡方门限时, 判定为外推、晶振异常或老化突变: 冻结多项式系数、降低温漂置信度, 并退化为 Lucky-KF 频率外推; 待 PTP 恢复且重新积累足够可信样本后再更新模型。对于可观测的长期老化, 可在多项式输出上叠加缓慢变化的频率偏置项, 并仅在低 PDV 同步片段中更新该偏置, 从而避免把网络误差吸收到晶振模型中。

温漂模型并不在断链后无条件接管频率预测。设模型在训练缓存上的拟合均方根误差为 e_T , 本文定义模型置信度 c_T 用于表征温漂模型当前是否可信:

$$c_T = \text{clip} \left(1 - \frac{e_T}{e_{\max}}, 0, 1 \right) \quad (12)$$

其中 $e_{\max}$ 为允许的最大频率拟合误差阈值。若系统规定最长守时 $H_{\max}$ 内允许的温漂模型相位误差为 E_{allow} ,

在频率误差短时近似常值时, 可按 $e_{\max} = E_{\text{allow}} / H_{\max}$ 给出工程取值。因而 c_T 表示剩余误差预算的归一化分数, 而不是经过概率校准的置信概率。若 c_T 低于阈值, 算法自动退化为 Lucky-KF 守时; 若 c_T 较高, 则根据断链持续时间逐渐提高温漂模型权重。

$$f_k^- = (1 - \lambda_k) f_{k-1} + \lambda_k f_T(T_k), \quad \lambda_k = c_T \cdot \min\left(\lambda_{\max}, \frac{\tau_{\text{out}}}{\tau_0}\right) \quad (13)$$

式(13)中 λ_k 为动态融合系数, τ_{out} 为 PTP 已中断时长, τ_0 为权重增长时间常数。当 PTP 刚刚中断时, 上一时刻卡尔曼频率估计仍具有较高可信度, λ_k 较小; 随着中断时间延长, 温度变化引起的频率漂移逐渐成为主要误差来源, λ_k 随置信度和断链时长增大。PTP 恢复后, 算法先以较大的 R_k 重新评估网络观测, 待残差稳定后再恢复正常带宽, 避免重连瞬间的报文尖峰导致相位跳变。

式(13)还可由最小均方误差线性融合得到理论解释。设断链前卡尔曼频率外推与温漂模型预测均近似无偏、误差相互独立, 方差分别为 $\Sigma_K^2(\tau_{\text{out}})$ 和 Σ_T^2 。对融合估计 $f = (1 - \lambda)f_k + \lambda f_T$, 均方误差最小时有 $\lambda_{\text{opt}} = \Sigma_K^2 / (\Sigma_K^2 + \Sigma_T^2)$ 。随着断链时长增加, 卡尔曼频率状态的预测方差由过程噪声持续累积, λ_{opt} 应逐渐增大; 温漂拟合误差越大, Σ_T^2 越大, λ_{opt} 则越小。式(13)用 τ_{out} 近似前者的单调增长、用 c_T 近似后者的逆不确定度, 并通过 $\lambda_{\max}$ 限幅, 因此可视为适合嵌入式实现的有界近似。

若系统对同步恢复过渡的平滑性要求更高, 可先按上述方差关系计算目标权重, 再采用一阶递推 $\lambda_s(k) = \rho \lambda_s(k-1) + (1 - \rho) \text{clip}(\lambda_{\text{opt}}, 0, \lambda_{\max})$, 并以 $\lambda_s(k)$ 完成频率融合; 另一种方案是在“卡尔曼外推”和“温漂预测”两个模型之间采用交互多模型滤波, 根据创新似然动态更新模型概率。前者计算量较低且可保证权重连续, 后者对模型切换更灵活但需要维护多组状态与协方差。为确保本文实验结果具有良好可复现性, 现有仿真仍采用式(13)的低复杂度权重, 方差融合与交互多模型方案留待真实晶振数据验证。

3.5. 同步触发预补偿

对于分布式采样或 PWM 相位对齐任务, 仅获得一致的软件时间并不足够。本文将固定硬件执行延迟建模为可标定参数 Δt_{delay} , 标定方法为: 以 PTP 同步时钟触发本地比较事件, 同时用高带宽示波器测量比较器命中时刻与外部输出沿之间的时间差, 重复多次取均值作为预补偿量, 标准差作为触发动抖指标。算法在设置定时触发时提前写入比较寄存器, 如式(6)所示。若系统支持相位连续调节, 还可根据当前频率调节量对比较寄存器进行微调, 避免长周期脉冲因频率校正产生相位积累误差。

4. 实验设计与结果分析

4.1. 实验平台与数据来源

为验证算法在不同网络负载和守时条件下的性能, 本文构建了可复现的离散时间仿真实验平台。实验以 0.125 s 为同步周期, 总时长 1200 s, 随机种子固定为 260,328。主从时钟真实偏差由温度相关频率漂移积分产生, 环境温度由慢周期正弦变化和小幅扰动叠加构成; 在断链守时实验中, PTP 中断后额外叠加快速温变过程, 以检验温漂模型在非平稳环境下的补偿能力。网络 PDV 由指数分布背景抖动和突发排队分量组成, 以模拟交换机队列在不同负载下的长尾时延。实验数据为基于上述模型的仿真数据, 用于评价算法机理和相对性能。

4.2. 对比算法与评价指标

实验对比五类算法: 传统 PI 伺服、滑动窗口线性最小二乘(LLS)、固定噪声卡尔曼滤波(KF)、幸运包加权卡尔曼滤波(Lucky-KF)以及本文提出的融合算法(Proposed)。评价指标包括稳态均方根误差(RMS)、

95%绝对误差(P95)和最大绝对误差(Max)。稳态指标统计 160 s 后的锁定区间；断链指标分别统计 600 s 后 60 s、180 s 和 300 s 的 PTP 不可用区间。具体实验配置与对比算法分别见表 2 和表 3。

Table 2. Experimental configuration
表 2. 实验配置

项目	取值	说明
同步周期 Δt	0.125 s	PTP 报文与伺服更新周期
仿真总时长	1200 s	稳态实验统计 160 s 后的锁定区间
温度范围	约 20℃~34℃	断链实验包含快速温变过程
轻载 PDV	背景均值 25 ns，突发概率 0.02	模拟空闲工业交换网络
中载 PDV	背景均值 90 ns，突发概率 0.07	模拟周期业务与普通流量共存
重载 PDV	背景均值 260 ns，突发概率 0.16	模拟拥塞和长尾排队
断链守时	600 s 后分别中断 60/180/300 s	评价在线温漂学习与置信度融合

Table 3. Compared algorithms
表 3. 对比算法

算法	核心策略	特点
PI	比例 - 积分低通伺服	结构简单，但易受 PDV 尖峰影响
LLS	64 点窗口线性回归	可估计频率斜率，但窗口选择影响响应
KF	相位 - 频率二状态卡尔曼滤波	能联合估计时钟状态，测量噪声固定
Lucky-KF	幸运包加权卡尔曼滤波	根据路径时延调节测量可信度
Proposed	Lucky-KF + 在线温漂学习 + 置信度融合 + 触发预补偿 连续同步不劣化，断链温变时提升守时精度	

与前沿方法的定性对比

基于深度学习的路径非对称重构方法[13]以多层卷积编码器学习 PTP 报文特征与真实非对称量之间的非线性映射，推理复杂度随网络层数、通道数和卷积核规模增长。其优势是能够直接补偿固定与随机非对称并利用复杂流量特征；不足是需要具有代表性的训练数据和参考标签，网络拓扑、交换机或业务分布改变后可能发生域偏移。该类方法更适合可集中训练、具备算力且能够持续采集标定数据的 5G 承载网或数据中心。

强跟踪自适应卡尔曼和鲁棒三步递归卡尔曼方法[14][15]通过创新检验、协方差在线估计或非对称时延统计模型增强异常值与模型失配下的稳定性，理论表达更完整，也能直接估计本文偏置项中未展开的持续非对称。其代价是状态维数、矩阵分解和自适应参数增多，门限与先验延迟分布需要针对网络整定。快速无迹卡尔曼方法[16]利用随机矩阵近似降低高维非线性滤波开销，适合协同多跳和复杂观测模型，但协议结构与本文的端到端 PTP 伺服并不相同。

本文 Lucky-KF 每周期仅更新 2 维状态和 2×2 协方差，窗口时延统计的直接实现为 $O(N)$ ，采用单调队列后可降为均摊 $O(1)$ ，且无需离线训练。与上述前沿方法相比，其优势是计算与存储开销可控、可解释性强，并把连续同步、断链温漂守时和触发预补偿纳入同一流程；不足是不能像数据驱动方法那样学习高维 PDV 模式，也未显式辨识长期路径非对称。

4.3. 不同网络负载下的同步精度

Table 4. Synchronization accuracy under different network loads
表 4. 不同网络负载下的同步精度

负载	算法	RMS/ns	P95/ns	Max/ns
轻载	PI	11.6	20.7	55.2
轻载	LLS	6.7	13.1	40.1
轻载	KF	4.4	9.0	14.1
轻载	Lucky-KF	6.2	12.9	20.0
轻载	Proposed	6.2	12.9	20.0
中载	PI	19.7	38.9	144.3
中载	LLS	20.8	42.3	123.4
中载	KF	6.8	14.1	20.8
中载	Lucky-KF	8.4	18.0	24.7
中载	Proposed	8.4	18.0	24.7
重载	PI	65.5	140.1	553.3
重载	LLS	73.1	146.6	391.9
重载	KF	11.8	22.8	31.6
重载	Lucky-KF	12.5	26.5	37.6
重载	Proposed	12.5	26.5	37.6

由表 4 可见, 轻载条件下各算法均能达到较好的同步效果, 但 PI 仍会受到少量突发排队影响, 最大误差达到 55.2 ns。固定噪声 KF 在稳态 RMS 指标上较低, 说明当观测噪声近似高斯且尖峰较少时, 状态空间估计能够充分利用连续 PTP 观测。中载条件下, PI 和 LLS 的 RMS 误差约为 20 ns, 而 KF 类算法保持在 10 ns 以内, 表明联合估计频率漂移能够有效抑制随机测量噪声。重载条件下, PI 的最大误差升至 553.3 ns, LLS 也因窗口内混入大量排队报文而出现 391.9 ns 的最大误差; 本文方法将最大误差控制在 37.6 ns, 说明幸运包加权策略能够显著降低长尾 PDV 对时钟伺服的冲击。

Lucky-KF 在 RMS 指标上略高于固定 KF, 但在重载最大误差上更低。这是因为幸运包加权会主动降低高时延报文的影响, 牺牲少量低频跟踪速度以换取尖峰鲁棒性。在工业同步触发场景中, 最大误差和高分位误差往往比均值误差更能反映系统风险, 因此该折中具有工程意义。本文融合算法在 PTP 连续可用时与 Lucky-KF 表现一致, 而其优势主要体现在断链守时和执行端触发补偿阶段。

4.4. PTP 断链守时性能

表 5 给出了 Proposed 算法在 PTP 正常同步阶段获得的温漂模型学习结果。算法共采集 1652 个可信训练样本, 模型拟合 RMSE 为 0.804 ns/s, 对置信度为 0.598。该置信度不会使温漂模型在断链瞬间完全覆盖卡尔曼频率状态, 而是随断链持续时间逐步增加温漂模型权重。这样的设计可避免短时模型误差导致守时性能退化, 同时在温度继续变化时提供必要的频率修正。

Table 5. Online learning result of the temperature-frequency model
表 5. 温度 - 频率模型在线学习结果

项目	结果	说明
训练样本数	1652	仅取稳定残差且路径时延不高于窗口中位数的同步周期
拟合阶数	3	拟合 $f(T)=a_0+a_1(T-25)+a_2(T-25)^2+a_3(T-25)^3$
拟合 RMSE	0.804 ns/s	用于计算模型置信度
模型置信度	0.598	置信度不足时退化为 Lucky-KF 守时
模型系数	[9.2504, 1.1270, 0.0428, -0.0293]	分别对应常数项至三阶项

Table 6. Holdover performance under heavy load and fast temperature transient
表 6. 重载快速温变条件下的断链守时性能

断链时长	算法	RMS/ns	P95/ns	Max/ns
60 s	PI	409.0	680.2	718.0
60 s	LLS	1889.2	2284.2	2322.0
60 s	KF	141.6	247.9	264.0
60 s	Lucky-KF	148.7	257.8	274.2
60 s	Proposed	11.6	18.4	18.7
180 s	PI	1455.5	2576.7	2773.2
180 s	LLS	2917.1	4180.7	4377.2
180 s	KF	689.7	1316.5	1447.7
180 s	Lucky-KF	703.2	1337.5	1469.6
180 s	Proposed	289.2	707.7	895.8
300 s	PI	2730.2	4591.9	4838.3
300 s	LLS	4160.4	6195.9	6442.3
300 s	KF	1462.4	2503.9	2641.4
300 s	Lucky-KF	1482.6	2536.0	2674.9
300 s	Proposed	1061.8	1826.6	1901.9

表 6 给出了重载网络和快速温变条件下的断链守时结果。60 s 断链时，Lucky-KF 最大误差为 274.2 ns，Proposed 最大误差仅 18.7 ns，相对降低约 93.2%；180 s 断链时，Proposed 最大误差为 895.8 ns，相比 Lucky-KF 的 1469.6 ns 降低约 39.0%；300 s 断链时，Proposed 最大误差为 1901.9 ns，相比 Lucky-KF 的 2674.9 ns 降低约 28.9%。随着断链时间延长，所有算法误差均会累积，但 Proposed 利用同步阶段学习得到的温度 - 频率模型持续修正频率漂移，因此在快速温变场景下保持了更好的守时能力。

4.5. 同步触发补偿效果

表 7 为同步触发端的补偿仿真结果。假设硬件链路存在约 185 ns 固定延迟，若不补偿，即便 PTP 时钟已经同步，外部输出沿仍会整体滞后。采用固定预补偿后，RMS 触发偏差降至 8.6 ns；进一步结合当前频率修正比较寄存器，可将 P95 偏差降至 13.5 ns。该结果说明，时钟同步算法需要与执行端延迟模型共同设计，才能真正保证物理信号层面的同步。

Table 7. Trigger alignment after delay pre-compensation
表 7. 延迟预补偿后的触发对齐效果

策略	处理方式	RMS/ns	P95/ns	Max/ns
不补偿	固定硬件延迟直接叠加	184.0	196.5	213.2
固定预补偿	提前写入 Δt_{delay}	8.6	16.8	24.1
预补偿+相位微调	结合当前频率修正比较值	6.9	13.5	20.4

5. 讨论

本文方法的核心优势在于将网络侧、时钟侧和执行侧误差放入同一优化框架。幸运包加权并不要求交换机必须支持 TSN 时隙保护, 因此适合普通工业以太网中的渐进式部署; 卡尔曼伺服以状态估计方式替代固定 PI 参数整定, 降低了不同网络负载下反复调参的成本; 温漂模型利用同步阶段自然产生的数据完成在线学习, 不需要额外昂贵的恒温标定设备; 触发预补偿则把时间同步结果进一步转化为采样或控制动作的一致性。

与前沿算法相比, 本文方案的技术取舍是以较弱的模型表达能力换取更低的部署门槛。深度学习方法[13]更擅长从高维报文序列中恢复非线性 PDV 或路径非对称, 鲁棒多状态卡尔曼方法[14] [15]更适合显式描述未知噪声统计和持续偏置, 快速无迹卡尔曼方法[16]则面向多跳非线性状态估计降低矩阵计算开销; 本文方法利用可直接测得的路径时延、温度和硬件延迟构造可解释权重, 在线运算集中在低维递推和短窗口统计, 更适合 MCU、SoC 或 FPGA 旁路处理器。因而这些方法并非简单的精度替代关系, 而对应不同的数据可得性、算力预算和故障模式。

同时, 本文仍存在一定局限。第一, 仿真实验虽然包含长尾 PDV 和温度变化, 但无法完全覆盖真实交换芯片、PHY 时间戳误差和操作系统驱动延迟, 也没有在统一数据集上直接复现深度学习路径非对称重构、强跟踪自适应卡尔曼、鲁棒三步递归卡尔曼和快速无迹卡尔曼方法, 因此目前的比较主要用于说明原理、复杂度和适用场景, 不能替代同平台数值结论。第二, 三阶温漂模型只适用于训练温区内、频温关系平滑且晶振特性相对稳定的场景; 对于 TCXO 补偿残差、OCXO 热迟滞、器件更换或老化突变, 需要通过分段模型、温度变化率输入、在线遗忘更新和异常降级机制提高鲁棒性[18]。未来工作将在同一硬件时间戳平台上比较各类算法, 并研究与 IEEE 802.1AS 时间同步和 IEEE 802.1Qbv 计划流量调度机制的协同优化[19] [20]。

6. 结论

本文针对工业互联网和分布式同步触发系统中 PTP 同步易受 PDV、报文丢失、晶振温漂和执行端延迟影响的问题, 提出了一种多源融合时钟同步与守时补偿算法。算法以卡尔曼滤波建立相位 - 频率联合估计模型, 通过幸运包加权抑制网络排队噪声, 通过同步阶段在线学习温度 - 频率模型并进行置信度融合, 提升 PTP 中断时的守时能力, 并通过硬件延迟预补偿改善物理触发对齐。仿真实验表明, 在重载网络连续同步条件下, 本文方法可将最大同步误差控制在 37.6 ns; 在重载快速温变场景中, 60 s、180 s 和 300 s 断链守时的最大误差分别为 18.7 ns、895.8 ns 和 1901.9 ns。与传统 PI 伺服相比, 最大误差分别降低约 97.4%、67.7%和 60.7%。在触发端引入预补偿后, RMS 触发偏差降至 10 ns 以内。研究结果说明, 面向复杂工业现场的高精度时间同步不应仅依赖单一伺服控制器, 而应综合考虑网络报文质量、本地晶振特性和执行端延迟。

参考文献

[1] Lo Bello, L. and Steiner, W. (2019) A Perspective on IEEE Time-Sensitive Networking for Industrial Communication

- and Automation Systems. *Proceedings of the IEEE*, **107**, 1094-1120. <https://doi.org/10.1109/jproc.2019.2905334>
- [2] Sundararaman, B., Buy, U. and Kshemkalyani, A.D. (2005) Clock Synchronization for Wireless Sensor Networks: A Survey. *Ad Hoc Networks*, **3**, 281-323. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.002>
 - [3] Levesque, M. and Tipper, D. (2016) A Survey of Clock Synchronization over Packet-Switched Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, **18**, 2926-2947. <https://doi.org/10.1109/comst.2016.2590438>
 - [4] IEEE (2020) 1588-2019—IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems. 1-499. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9120376>
 - [5] Mills, D.L. (1991) Internet Time Synchronization: The Network Time Protocol. *IEEE Transactions on Communications*, **39**, 1482-1493. <https://doi.org/10.1109/26.103043>
 - [6] Correll, K., Barendt, N. and Branicky, M. (2005) Design Considerations for Software Only Implementations of the IEEE 1588 Precision Time Protocol. *Proceedings of the 2005 Conference on IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems*, Winterthur, 10-12 October 2005, 1-6.
 - [7] Giorgi, G. and Narduzzi, C. (2011) Performance Analysis of Kalman-Filter-Based Clock Synchronization in IEEE 1588 Networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **60**, 2902-2909. <https://doi.org/10.1109/tim.2011.2113120>
 - [8] LinuxPTP Project: ptp4l(8): PTP Boundary/Ordinary/Transparent Clock. <https://www.linuxptp.org/documentation/ptp4l/>
 - [9] Kalman, R.E. (1960) A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. *Journal of Basic Engineering*, **82**, 35-45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
 - [10] Bletsas, A. (2005) Evaluation of Kalman Filtering for Network Time Keeping. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, **52**, 1452-1460. <https://doi.org/10.1109/tuffc.2005.1516016>
 - [11] Schriegel, S. and Jasperneite, J. (2007) Investigation of Industrial Environmental Influences on Clock Sources and Their Effect on the Synchronization Accuracy of IEEE 1588. 2007 *IEEE International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication*, Vienna, 1-3 October 2007, 50-55. <https://doi.org/10.1109/ispcs.2007.4383773>
 - [12] Vig, J.R. (2004) Quartz Crystal Resonators and Oscillators for Frequency Control and Timing Applications: A Tutorial. U.S. Army Communications-Electronics Command, Fort Monmouth.
 - [13] Alhashmi, N., Almoosa, N. and Gianini, G. (2022) Path Asymmetry Reconstruction via Deep Learning. 2022 *IEEE 21st Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, 14-16 June 2022, 1171-1176. <https://doi.org/10.1109/melecon53508.2022.9842892>
 - [14] Zhang, W. and Hou, Y. (2023) A Modified Strong Tracking Adaptive Kalman Filter for Precision Clock Synchronization System. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, **18**, 1702-1711. <https://doi.org/10.1002/tee.23900>
 - [15] Liu, X. and Wang, H. (2025) Robust Clock Parameters Tracking for IEEE 1588 with Asymmetric Packet Delays in Industrial Networks. *IEEE Transactions on Communications*, **73**, 1248-1261. <https://doi.org/10.1109/tcomm.2024.3450603>
 - [16] Ji, R., Xu, F., Duan, S., Zhu, J., Tao, Y., Liu, M., et al. (2024) A Cooperative Timestamp-Free Clock Synchronization Scheme Based on Fast Unscented Kalman Filtering for Time-Sensitive Networking. *Computer Networks*, **253**, Article ID: 110711. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110711>
 - [17] Anyaegbu, M., Wang, C.X. and Berrie, W. (2013) Dealing with Packet Delay Variation in IEEE 1588 Synchronization Using a Sample-Mode Filter. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, **5**, 20-27. <https://doi.org/10.1109/mits.2013.2267546>
 - [18] Gong, F. and Sichitiu, M.L. (2017) Temperature Compensated Kalman Distributed Clock Synchronization. *Ad Hoc Networks*, **62**, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.04.009>
 - [19] IEEE (2020) 802.1AS-2020—IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications. 1-421. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9121845>
 - [20] IEEE (2016) 802.1Qbv-2015—IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Bridges and Bridged Networks—Amendment 25: Enhancements for Scheduled Traffic. 1-57. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.8613095>