

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003600

基于滑模控制的 IEEE1588 时钟同步算法研究*

程铁栋¹ 陶征亮¹ 易其文¹ 尹宝勇¹ 袁海平²

(1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院 赣州 341000; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院 合肥 230009)

摘要:针对 IEEE1588 时钟同步过程中存在时钟频率漂移问题,提出了一种基于滑模控制的新型时钟同步算法。首先根据主从时钟偏差与漂移的递推关系,建立系统状态空间模型,然后运用滑模控制缩小时钟偏差与时钟漂移;最后结合滑动平均滤波对实验过程中的频率抖动和随机误差进行优化。结果表明,基于滑模控制的时钟同步算法可有效抑制时钟漂移引起的时钟偏差线性增长,将时钟偏差控制在 $1\ \mu\text{s}$ 以下,从而实现亚微秒级网络对时。相比传统 IEEE1588 协议同步方法,所提方法提供了更高的同步精度。

关键词: IEEE1588; 时钟偏差; 时钟漂移; 滑模控制; 滑动平均滤波

中图分类号: TP274+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4010

Research on IEEE1588 clock synchronization algorithm based on sliding mode control

Cheng Tiedong¹ Tao Zhengliang¹ Yi Qiwen¹ Yin Baoyong¹ Yuan Haiping²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;

2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Aiming at the problem of clock frequency drift in IEEE1588 clock synchronization process, a novel clock synchronization algorithm based on sliding mode control is proposed. Firstly, the state space model of the system is established according to the recurrence relationship between master-slave clock offset and drift. Then, the sliding mode control is used to reduce the clock skew and clock drift. Finally, the frequency jitter and random error in the experimental process are optimized by sliding average filter. The results show that the clock synchronization algorithm based on sliding mode control can effectively restrain the linear growth of clock skew caused by clock drift, and control the clock skew below $1\ \mu\text{s}$, thus, realizing sub microsecond network time synchronization. Compared with the traditional IEEE1588 protocol synchronization method, the proposed method provides higher synchronization accuracy.

Keywords: IEEE1588; clock skew; clock drift; sliding mode control; moving average filter

0 引言

随着分布式系统^[1-2]在工业控制与测量领域的广泛应用,时钟同步作为其中必不可少的一项技术,为分布式网络提供了一个统一的时间基准,用来协调分布式系统的多个设备正常工作与运行。在实现各节点与参考节点的时钟同步过程中,同步精度高是分布式系统实现时钟同步的一个重要考察指标。IEEE1588^[3-7]全称为网络

测量和控制系统的精密时钟同步协议 (precise time protocol, PTP), 该协议通过时钟偏移测量和延迟测量实现了对主从节点的时钟同步, 相较于传统的网络时钟同步协议^[8] (network time protocol, NTP), IEEE1588 能够实现亚微秒级高精度时钟对时。

在分布式系统中, 不同时钟节点由于晶体振荡器受温度及环境因素的影响, 各节点时钟会产生频率漂移, 尤其是温度对晶体振动频率有明显的时效性。若该频率漂移不能得到及时修正, 则会导致主从时钟偏差随着工作

收稿日期: 2020-11-02 Received Date: 2020-11-02

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51874112)、江西省科技厅重点研发项目 (20192BBEL50042)、江西理工大学研究生创新专项资金项目 (ZS2020-S060) 资助

时间的推移不断增加,从而对各节点与参考时钟的同步精度造成一定的影响^[9-10]。针对如上问题,庄晓燕等^[11]提出了基于二阶卡尔曼滤波器加速运动模型的时钟同步算法,对时钟偏差、时钟漂移和时钟漂移变化率进行估计,然后利用其估计值对时钟进行补偿和修正。黄威然等^[12]提出了基于数字锁相环的漂移补偿和 PI 控制器偏移补偿的方法,首先建立数字锁相环漂移补偿模型,然后结合 PI 控制实现漂移和偏移动态分离补偿,以此提高同步精度。Seo 等^[13]提出了一种改进的时间同步算法,通过建立 PTP 时钟系统动态模型,在 PTP 时钟同步控制环路中有效消除干扰,达到减少时钟漂移和网络噪声的效果。上述方法在一定程度上抑制了时钟同步过程中产生的时钟漂移,但现阶段依旧存在频率抖动较大、实时性不足及处理过程复杂等问题,在保证较高同步精度的基础上,还需做进一步研究。

本文结合时钟同步原理,针对其时钟漂移问题提出了一种新的改进算法。即通过建立系统状态空间模型,同时修正时钟偏差与时钟漂移,再利用滑模控制^[14-16]将二者收敛到一个极小值,从而达到抑制时钟漂移和减小时钟偏差的效果。另外,针对实验测量过程中的频率抖动和随机误差,采用滑动平均滤波进行优化,以期达到更优的效果。

1 IEEE1588 时钟同步

IEEE1588 精密时钟同步协议基本原理是首先利用主从时钟收发报文获取时间戳信息,然后通过测量与计算获得时间偏差值与链路延时值实现时间同步。主时钟周期性地将本地时间通过报文发送到网络中,从时钟接收主时钟发送过来的报文从而获取时间戳信息并记录自身接收时间,根据从时钟记录的时间戳信息计算出主从时钟的时钟偏差和链路延迟,通过算法调节本地时钟实现主从时钟的时间一致。

IEEE1588 时钟同步过程如图 1 所示,一共用到 4 种类型的报文,同步 (Sync) 报文、跟随 (Follow) 报文、延时请求 (Delay_Req) 报文和延时请求响应 (Delay_Resp) 报文。

主时钟每隔一个周期发送同步报文至从时钟,并记录同步报文的发送时间 t_1 , 从时钟接收到同步报文后记录其接收时间 t_2 ; 同时主时钟通过发送跟随报文将时间戳 t_1 发送至从时钟,从时钟接收到跟随报文后记录下时间戳 t_1 ; 此时从时钟记录了 t_1 和 t_2 两个时间戳。周期主时钟和从时钟的时钟偏差为 t_{offset} , 主时钟发送报文至从时钟的链路延时为 $t_{\text{delay_ms}}$, 则有如下关系:

$$t_{\text{offset}} + t_{\text{delay_ms}} = t_2 - t_1 \quad (1)$$

式(1)反映了该时钟同步周期内时钟偏差和链路延

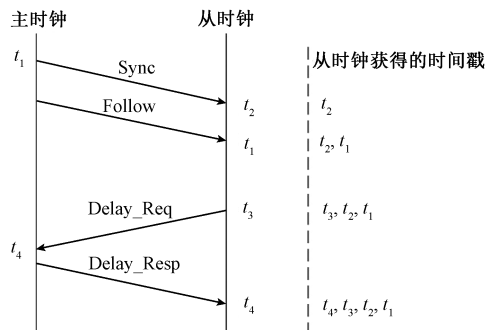


图 1 IEEE1588 协议时钟同步原理

Fig. 1 Clock synchronization principle of IEEE1588 protocol

时的关系式。从时钟在收到同步报文后,会经过一段随机的延迟时间,向主时钟发送一个延时请求报文并记录其发送时间 t_3 , 主时钟接收到报文后记录其精确接收时间 t_4 , 接着主时钟发送延时请求响应报文将时间戳 t_4 发送给从时钟,从时钟接收报文后记录时间戳 t_4 。在这个同步周期内,从时钟一共记录了 4 个时间戳值 t_1 、 t_2 、 t_3 和 t_4 。设从时钟到主时钟的链路延迟为 $t_{\text{delay_sm}}$, 则有如下关系:

$$t_{\text{offset}} - t_{\text{delay_sm}} = t_3 - t_4 \quad (2)$$

在 IEEE1588 协议中,假设主从时钟之间的链路延时是对称的,用 t_{delay} 表示,则有:

$$t_{\text{delay_ms}} = t_{\text{delay_sm}} = t_{\text{delay}} \quad (3)$$

根据式(1)~(3)可得:

$$t_{\text{delay}} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (4)$$

$$t_{\text{offset}} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (5)$$

由式(5)计算得到主从时钟的偏差值 t_{offset} , 通过该值调整从时钟,实现主从时钟的同步过程。

2 基于滑模控制的时钟同步

2.1 滑模控制基本原理

滑模控制 (sliding mode control, SMC), 是 20 世纪 60 年代初前苏联学者 Emeleyanov 提出的一种控制方法,其本质是一类特殊的非线性控制,且具有不连续性。采用该控制时,其系统结构是不固定的,并且会随着系统状态的变化而发生变化,因此滑模控制也称为变结构控制^[17-19]。该控制能够使系统状态到达滑动模态并沿着预先设置的滑模面运动到平衡点。

考虑一个一般的非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u, t) \\ x &\in R^n, u \in R^m, t \in R \end{aligned} \quad (6)$$

若状态空间中存在一个超平面,称之为滑模面,用 s 表示:

$$s(x) = s(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (7)$$

将状态空间分成 $s > 0$ 和 $s < 0$ 两部分, $s = 0$ 两侧的相轨迹都引向切换线 $s = 0$ 。状态轨迹由任一点出发运动到达直线 $s = 0$ 时,将会沿着该直线运动并且逐渐收敛到原点,这种沿着直线 $s = 0$ 滑动至原点的特殊运动称之为滑模运动。直线 $s = 0$ 则称之为滑模面,而相应的函数称之为切换函数。

滑模控制如图 2 所示。其控制作用体现在对于从任一点 x_0 出发的状态轨迹,都能将其引向预设的滑模面,使之沿着该滑模面运动,并且逐步滑动到原点。

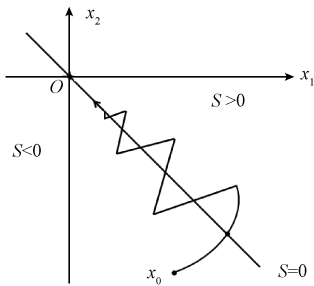


图 2 滑模控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sliding mode control

基于这种控制方法,根据所确定的滑模面函数 s ,设计如下形式控制律:

$$u = \begin{cases} u^+(x), & s(x) > 0 \\ u^-(x), & s(x) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中 $u^+(x) \neq u^-(x)$,由此系统在任意初始位置都能迅速收敛到滑模面,并沿着预先设定的滑模面逐渐稳定到平衡状态^[20]。

2.2 基于滑模控制的改进算法

在 IEEE1588 时钟同步协议中,其同步过程只对主从时钟偏差进行了补偿。但是在实际应用中,对于各节点的时钟采用的不同晶体振荡器。由于不同的频率特性、自身老化效应和外界温度环境等因素影响,晶体振荡器的频率会产生漂移,这种频率上的漂移不断累积会形成一定的时间偏差,这种漂移对时钟偏差的精确测量造成了一定的影响。对于这种时钟频率的漂移,本文提出了基于滑模控制的改进算法。利用该算法将系统状态即时钟偏差与时钟漂移收敛到一个极小值,随着时间的推移,系统状态始终在该极小值的邻域内保持稳定。

首先,根据不同时刻时钟偏差和时钟漂移的递推关系对时钟系统建立模型,系统在每个工作周期内修正时钟偏差和时钟漂移,通过第 $n-1$ 个周期的系统状态来递推第 n 个周期的系统时钟偏差和时钟漂移。定义该系统

时钟周期为 T ,第 n 个周期的主从时钟偏差值为 θ_n ,从时钟漂移值为 α_n 。 $\theta_{n-1}, \alpha_{n-1}$ 分别为第 $n-1$ 个周期内主从时钟未修正前的时钟偏差值和时钟漂移值。 $\varphi_{\theta, n-1}, \varphi_{\alpha, n-1}$ 分别为第 $n-1$ 个周期对时钟偏差和时钟漂移的修正值。则有如下关系:

$$\theta_n = \theta_{n-1} - \varphi_{\theta, n-1} + (\alpha_{n-1} - \varphi_{\alpha, n-1})T \quad (9)$$

$$\alpha_n = \alpha_{n-1} - \varphi_{\alpha, n-1} \quad (10)$$

式(9)和(10)是建立该系统状态方程的基础,通过 $(n-1)T$ 时刻和 nT 时刻系统状态的变化关系,可得到 nT 时刻的系统状态方程为:

$$\mathbf{x}_n = \mathbf{A}\mathbf{x}_{n-1} + \mathbf{B}\mathbf{u}_{n-1} \quad (11)$$

式中: \mathbf{x}_n 表示 nT 时刻系统状态向量, $\mathbf{x}_n = [\theta_n \quad \alpha_n]^T$; \mathbf{A}

表示状态转移矩阵, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$; \mathbf{u}_n 是 nT 时刻对系统的控制量, $\mathbf{u}_n = [\varphi_{\theta, n} \quad \varphi_{\alpha, n}]^T$; \mathbf{B} 为输入控制矩阵,

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1 & -T \\ 0 & -1 \end{bmatrix}。$$

式(11)是一个非线性离散时间系统。在此基础上,建立时钟模型,则有:

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n-1) + \omega(n) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n, \mathbf{u} \in \mathbb{R}^m, (\mathbf{A}, \mathbf{B})$ 可控; $\omega(n)$ 为系统外部干扰。

将系统修正后的状态值用 \hat{x} 表示,则 nT 时刻系统修正后的状态值为:

$$\hat{\mathbf{x}}(n) = \mathbf{A}\mathbf{x}(n-1) + \mathbf{B}\mathbf{u}(n-1) + \omega(n) \quad (13)$$

该系统模型由于预先设定的偏差修正值与漂移修正值大小恒定且时钟漂移具有时变性,因此系统无法实现对时钟偏差和时钟漂移精准修正,为此引入滑模控制保证二者在任意时刻修正后依旧保持稳定状态。根据滑模控制的设计原理,定义 s 为系统该时刻修正前实际测量值和修正后状态值之间的差值,即滑模面,则有:

$$s(n) = \hat{\mathbf{x}}(n) - \mathbf{x}(n) \quad (14)$$

其中, $\mathbf{x}(n)$ 表示第 n 个周期内系统状态的实际测量值。当实际测量值大于修正后的状态值时, $s > 0$; 当实际测量值小于修正后状态值时, $s < 0$ 。

在趋近律的选取上,要保证状态轨迹在远离切换面时具有较快的趋近速度。但趋近速度不宜过大,否则会导致剧烈的抖振。本文选用指数趋近律,定义为 v , 则有:

$$v(n) = -\varepsilon \cdot \text{sgn}(s(n)) - ks(n) \quad (15)$$

式中: ε, k 为常数,且 $\varepsilon > 0, k > 0$; $\text{sgn}(x)$ 为符号函数,当 $x > 0, \text{sgn}(x) = 1$; 当 $x = 0, \text{sgn}(x) = 0$; 当 $x < 0, \text{sgn}(x) = -1$ 。该算法对系统状态轨迹的控制律如下:

$$\hat{\mathbf{x}}(n+1) = \begin{cases} \hat{\mathbf{x}}(n) - \varepsilon - ks(n), & s(n) > 0 \\ \hat{\mathbf{x}}(n) + \varepsilon - ks(n), & s(n) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

根据式(13)~(16)可得 $(n+1)T$ 时刻系统修正后的

状态值为:

$$\hat{x}(n+1) = \mathbf{A}x(n) + \mathbf{B}u(n) + v(n) + \omega(n) \quad (17)$$

通过改进算法得到修正后的状态值如式(17)所示,该值即为下一时刻的状态估计值。在 $(n+1)T$ 时刻之后,根据每一时刻的估计值和实际测量值继续对每个周期内的时钟偏差进行算法修正,使修正后的时钟偏差值始终被限制在预设的值域内,从而达到减小时钟偏差提高同步效果的目的。

3 实验验证

为了验证本文所提算法的有效性,在 MATLAB 平台上搭建时钟模型,通过实验仿真观察该算法下主从时钟同步过程中的时钟偏差值的变化情况,从而对该模型下的同步性能进行评估。

1) 观测普通状态下主从时钟偏差随时间增加的变化情况。主从时钟不进行同步,时钟偏差和时钟漂移不进行修正,设定初始偏差设置为 1×10^{-5} s,从时钟相对主时钟的时钟漂移为 1.2×10^{-6} ,同步过程中的频率抖动和随机误差用高斯噪声代替。图 3 所示为普通状态下滑动平均滤波前后的时钟偏差仿真,其中图 3(a)是未经过滑动平均滤波的时钟偏差,图 3(b)是经过滑动平均滤波处理后的时钟偏差。可以看出,随着时间的推移,时钟漂移不断累积,若时钟漂移没有得到及时修正,时钟偏差将会呈线性增长,对同步精度的影响也越来越大。另外,图 3(a)在增长的过程中伴随着较小的抖动,而图 3(b)经过滑动平均滤波的曲线更加平滑,无明显抖动。以上结果表明本文采用的滑动平均滤波对频率抖动和随机误差有较好的滤除效果。

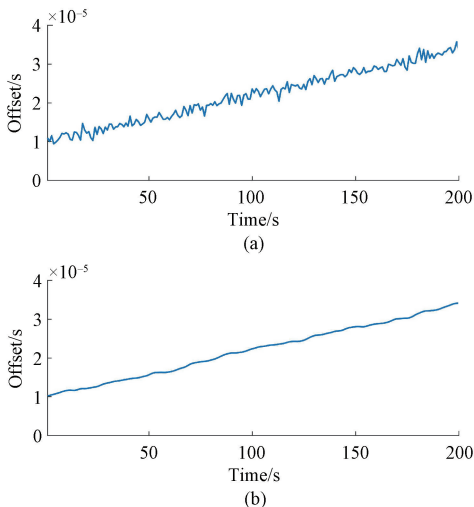


图 3 滑动平均滤波前后的时钟偏差
Fig. 3 Clock deviation before and after moving average filtering

2) 验证基于滑模控制的 IEEE1588 时钟同步改进算法的可行性。设置主从时钟的初始偏差为 1.2×10^{-5} s,从时钟相对主时钟的时钟漂移为 3×10^{-6} ,实验过程中的随机误差用高斯噪声代替。主从时钟在同步过程中,同时对时钟偏差和时钟漂移进行修正,观测时钟偏差和时钟漂移随时间的变化情况,其时钟偏差和漂移仿真结果分别如图 4 和 5 所示。图 4 中,时钟偏差曲线经过一段短暂时间后迅速收敛到一个极小值,之后在极小值附近保持稳态,且该极小值小于 $1 \mu\text{s}$ 。图 5 中,时钟漂移经过该算法处理同样经过一段短暂时间迅速收敛到一个极小值,该极小值也小于 $1 \mu\text{s}$,之后该曲线同样保持在该极小值附近。根据图 4 和 5 可知,时钟偏差和时钟漂移曲线在滑模控制作用下始终沿着小于 $1 \mu\text{s}$ 的极小值运动,伴随着微小的抖动。该结果表明,基于滑模控制的时钟同步改进算法对于抑制时钟漂移与减小时钟偏差是可行的。

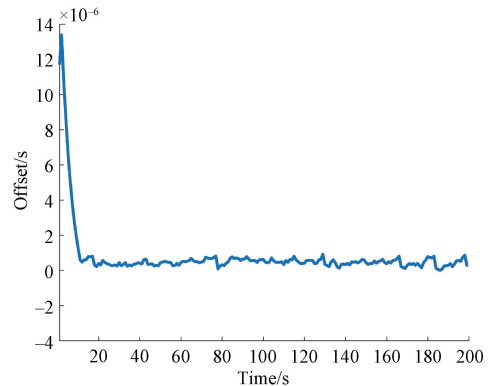


图 4 滑模控制作用下的时钟偏差
Fig. 4 Clock deviation under sliding mode control

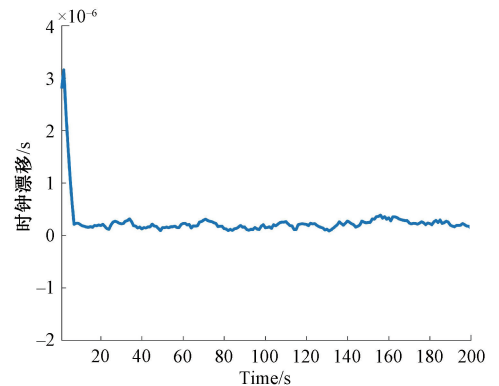


图 5 滑模控制作用下的时钟漂移
Fig. 5 Clock drift under sliding mode control

上述结果验证了基于滑模控制的 IEEE1588 时钟同步改进算法是可行的,但时钟偏差曲线在稳态过程中依旧伴随着不稳定性抖动,这种抖动主要是由节点时钟的晶体振荡器不稳定性造成的,本文选用滑动平均滤波法

滤除实验过程中产生的频率抖动和其他因素产生的随机误差。对比滑动平均滤波前后时钟偏差曲线,仿真结果如图 6 所示。图 6(a)是稳态下未进行滑动平均滤波的时钟偏差曲线,图 6(b)是稳态下经过滑动平均滤波的时钟偏差曲线。根据图像可以看出滤波后的时钟偏差曲线更加平滑,无明显抖动,滑动平均滤波后时钟偏差依旧保持在 $1 \mu\text{s}$ 以下且更加稳定。这种亚微秒级的同步精度已经达到工业上的应用级别,因此,该实验结果符合预期的技术目标。滑模控制与滑动平均滤波的组合模式既提高了主从时钟同步精度,又增强了时钟同步系统的性能。

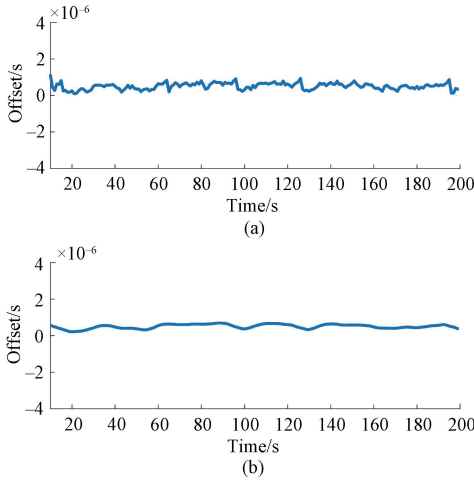


图 6 滑动平均滤波前后稳态下的时钟偏差
Fig. 6 Steady-state clock deviation before and after moving average filtering

3) 通过实验比较不同状态下主从时钟同步精度,仿真结果如图 7 所示,图 7 截取了不同状态下系统稳态时钟偏差曲线。设定主从时钟的初始偏差为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ s}$,从时钟相对主时钟的时钟漂移为 3×10^{-6} ,同步周期为 2 s 。由图 7 可知,普通状态下的 PTP 时钟同步偏差曲线基本维持在 $6 \mu\text{s}$ 以上;滑模控制作用下的时钟偏差曲线基本收敛在 $1 \mu\text{s}$ 以下。根据 3 条曲线上的值计算出 3 种情况下的同步精度,并列表比较。由表 1 可知,普通状态下 PTP 时钟同步精度为 $6.40 \mu\text{s}$,而滑模控制和滑动平均滤波组合模式下时钟同步精度为 $0.33 \mu\text{s}$,比普通状态下的时钟同步精度提高了近 20 倍。从而进一步验证了基于滑模控制的 IEEE1588 时钟同步算法的有效性。

表 1 不同状态下的 PTP 时钟同步精度比较
Table 1 Comparison of PTP clock synchronization accuracy in different states (μs)

PTP 时钟状态	最大偏差值	最小偏差值	同步精度
普通状态	6.64	6.08	6.40
滑模控制	1.33	0.02	0.44
滑模与滤波	0.41	0.25	0.33

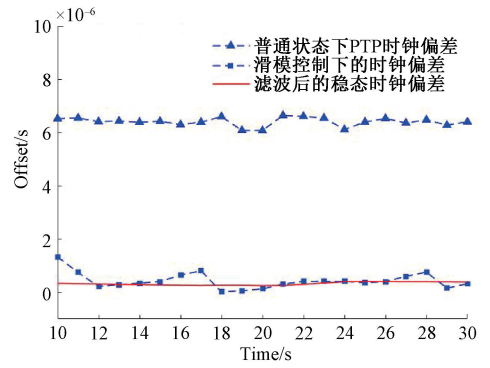


图 7 不同状态下的主从时钟偏差
Fig. 7 Master-slave clock deviation in different states

4 结 论

本文在 IEEE1588 时钟同步协议的研究基础上,构建系统状态空间模型,实现了对时钟偏差与时钟漂移同时修正,采用滑模控制算法解决了频率漂移导致偏差增大问题,并结合滑动平均滤波将时钟偏差值收缩到微秒以下,使偏差值始终保持稳定状态。结果表明,基于滑模控制的改进算法与传统的 IEEE1588 时钟同步相比,其同步精度更高,同步性能更优越。该算法为解决时钟频率漂移提供了一种新的方案。

参考文献

[1] 李本亮,王厚军,师奕兵,等. 基于 PTP 的无线分布式测试系统时钟同步研究[J]. 电子科技大学学报, 2010,39(4):556-559.
LI B L, WANG H J, SHI Y B, et al. Clock synchronization of wireless distributed measurement system based on PTP [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(4):556-559.

[2] 王刚,黄飞,乔纯捷,等. 分布式网络时钟同步研究[J]. 仪器仪表学报,2008,29(11):2399-2403.
WANG G, HUANG F, QIAO CH J, et al. Research of clock synchronization in distributed network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11):2399-2403.

[3] 崔全胜,魏勇,何永吉,等. PTP1588 协议的分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(10):148-154.
CUI Q SH, WEI Y, HE Y J, et al. Analysis of PTP 1588 protocol [J]. Power System Protection and Control,2011,39(10):148-154.

[4] VON ZENGEN G, GARLICH K, SCHRCÖDER Y, et al. A sub-microsecond clock synchronization protocol for wireless industrial monitoring and control networks[C].

- 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2017:1266-1270.
- [5] 李超,徐启峰. IEEE1588 协议延时不对等问题的修正[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10):931-936.
LI CH, XU Q F. Correction methods of unequal delay time based on IEEE1588 [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(10):931-936.
- [6] 魏丰,孙文杰. IEEE-1588 协议时钟同步报文的精确时间标记方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2009(1):162-169.
WEI F, SUN W J. Precise time stamping method for IEEE1588 clock synchronization message [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1):162-169.
- [7] 梅军,徐迅,钱超,等. 应用于配电网的时钟偏移估计的 IEEE1588 改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(9):83-89.
MEI J, XU X, QIAN CH, et al. An improved IEEE1588 synchronization scheme on the clock offset estimation applied in distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 83-89.
- [8] 孙娜,熊伟,丁宇征. 时钟同步的研究与应用[J]. 计算机工程与应用,2003,39(27):177-179.
SUN N, XIONG W, DING Y ZH. Study and application of clock synchronization[J]. Computer Engineering and Applications, 2003,39(27):177-179.
- [9] SCHEITERER R L, NA C, OBRADOVIC D, et al. Synchronization performance of the precision time protocol in industrial automation networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(6):1849-1857.
- [10] 任丰原,董思颖,何滔,等. 基于锁相环的时间同步机制与算法[J]. 软件学报,2007,18(2):372-380.
REN F Y, DONG S Y, HE T, et al. A time synchronization mechanism and algorithm based on phase lock loop [J]. Journal of Software, 2007, 18(2):372-380.
- [11] 庄晓燕,王厚军. 基于卡尔曼滤波器的 IEEE1588 时钟同步算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(9):747-751.
ZHUANG X Y, WANG H J. IEEE1588 clock synchronization algorithm based on Kalman filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(9):747-751.
- [12] 黄威然,楼佩煌,钱晓明. 基于实时以太网的网络化数控系统高精度时钟同步和短周期通信[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(10):2668-2676.
HUANG W R, LOU P H, QIAN X M. High clock synchronization accuracy and short cycle communication in networked CNC system based on real-time Ethernet [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(10):2668-2676.
- [13] SEO Y D, SON K J, AN G S, et al. Improved time-synchronization algorithm based on direct compensation of disturbance effects[J]. Sensors, 2019,19(16):3499.
- [14] 高为炳. 离散时间系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(2):154-161.
GAO W B. Variable structure control of discrete-time systems [J]. Acta Automatica Sinica, 1995, 21(2):154-161.
- [15] KUTLU F, ATAN Ö, SILAHTAR O. Intuitionistic fuzzy adaptive sliding mode control of nonlinear systems [J]. Soft Computing, 2020, 24(1):53-64.
- [16] 樊英,周晓飞,张向阳,等. 基于新型趋近律和混合速度控制器的 IPMSM 调速系统滑模变结构控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(5):9-18.
FAN Y, ZHOU X F, ZHANG X Y, et al. Sliding mode control of ipmsm system based on a new reaching law and a hybrid speed controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5):9-18.
- [17] 李政,胡广大,崔家瑞,等. 永磁同步电机调速系统的积分型滑模变结构控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3):431.
LI ZH, HU G D, CUI J R, et al. Sliding-mode variable structure control with integral action for permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3):431.
- [18] 刘邱,赵东亚. 单输入单输出系统离散积分滑模预测控制[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(9):898-903.
LU Q, ZHAO D Y. Discrete-time integral sliding mode predictive control for single input single output systems [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2020, 54(9):898-903.
- [19] 穆效江,陈阳舟. 滑模变结构控制理论研究综述[J]. 控制工程, 2007, 14(s1):1-5.
MU X J, CHEN Y ZH. Overview of sliding mode variable structure control [J]. Control Engineering of China, 2007, 14(s1):1-5.
- [20] 崔茂振,张昌凡,朱剑. 永磁同步电机滑模调速控制及实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(1):84-92.
CUI M ZH, ZHANG CH F, ZHU J. Implementation of PMSM speed drive system based on sliding mode control [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2012,

26(1): 84-92.

作者简介



程铁栋, 2019 年于广东工业大学获得博士学位, 现为江西理工大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为人工智能装备。

E-mail: Chengtiedong@126.com

Cheng Tiedong received his Ph. D. degree from Guangdong University of

Technology in 2019. Now he is a professor and M. Sc. supervisor at Jiangxi University of Science and Technology. His main

research interest includes artificial intelligence equipment.



陶征亮, 2019 年于赣南师范大学获得学士学位, 现为江西理工大学硕士研究生, 主要研究方向为网络时钟同步。

E-mail: taozl0807@163.com

Tao Zhengliang received his B. Sc. degree from Gannan Normal University in 2019. Now he is a M. Sc. candidate at Jiangxi University of Science and Technology. His main research interest includes network clock synchronization.