

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107471

基于 IEEE 1588 协议的时钟模型线性估计算法

王逸凡 彭良福

(西南民族大学 电子信息学院 成都 610041)

摘要: 针对高网络负载下非对称延时会严重影响时钟同步精度的问题,提出了一种时钟模型线性估计的方法来提高在高网络负载下的时钟同步精度。首先对主从时钟建立线性模型,然后从时钟以主时钟为参考时钟处理当前同步周期获取的4个时间戳,将其组合成两个端点,通过至少两个同步周期的时间戳信息及端点的特性,找到从时钟模型的线性上界和线性下界函数,由两者的均值确定当前同步周期从时钟的线性函数,最后根据此线性函数估计时间戳数值,从而估计出当前同步周期的主从时钟偏差。为了验证算法的有效性,使用基于开源软件 Linux PTP 的时钟同步模块对 DAC 模型和时钟模型线性估计算法进行实验验证和同步精度测试。实验结果表明,时钟模型线性估计算法避免了对本地时钟频率进行连续同向补偿的情况,在弥补了 DAC 模型不足的同时,达到了 23.48 ns 的时钟同步精度。

关键词: IEEE 1588;非对称延时;Linux PTP;线性估计

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4

Linear estimation algorithm of clock model based on IEEE 1588

Wang Yifan Peng Liangfu

(College of Electronic and Information, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China)

Abstract: Aiming at the problem that asymmetric delay will seriously affect the clock synchronization accuracy under high network load, a linear estimation method of clock model is proposed to improve the clock synchronization accuracy under high network load. Firstly, a linear model is established for the master and slave clocks, and then the slave clock uses the master clock as the reference clock to process the four timestamps obtained in the current synchronization cycle, and combine them into two endpoints, through at least two synchronous cycle timestamp information and characteristic of the endpoint, find linear upper bound function and linear lower bound function from the model of the slave clock, the linear function of the slave clock in the current synchronization cycle is determined by the mean value of the two, and the timestamp value is estimated according to the linear function, so as to estimate the master/slave clock offset in the current synchronization cycle. In order to verify the effectiveness of the proposed algorithm, a clock synchronization module based on the open source software Linux PTP is used to perform experimental verification and synchronization accuracy test on the DAC model and the proposed algorithm. Experimental results show that the clock model linear estimation algorithm avoids the continuous compensation in the same direction for the local clock frequency, and achieves 23.48 ns clock synchronization accuracy while making up for the deficiency of the DAC model.

Keywords: IEEE 1588;asymmetric delay;Linux PTP;linear estimation

0 引言

由于分布式网络的特性,各个节点通过可靠的共享通信介质来进行实时的数据交换,而时间是数据交互过程中不可或缺的重要部分,时钟同步是许多应用程序工作的前提^[1]。目前,已经较为广泛地投入应用的时钟同步技术主要有网络时间协议(network time protocol, NTP)和 IEEE

1588 精确时间协议(precision time protocol, PTP)。NTP 协议采用软件来实现,其实现的同步精度为毫秒级,已经无法满足目前通信、工控等领域的高精度同步要求。IEEE 1588 协议能够达到纳秒级的同步精度,可以满足当今各领域的高精度同步要求^[2]。

欧洲核子研究组织提出了一种新型的时钟同步技术—白兔子(white rabbit, WR)技术,该技术以以太网为基础,

使用同步以太网技术、IEEE 1588v2 以及全数字双混频鉴相器,可达到 200 ps 的精度^[3-4],然而,该技术在终端节点和交换机上需要昂贵的硬件支持。文献[5-7]采用特定芯片设计了硬件电路,通过硬件辅助提高了点到点设备的同步精度,然而未考虑在实际的以太网中报文的传输延时情况,该延时将会在很大程度上影响同步的精度。针对此问题,文献[8]提出了一种提高 PTP 关于非对称延时的鲁棒性的方法,解决了在传输路径延时未知的情况下,时钟偏移和频率漂移估计的建模问题,但理论复杂,实际部署难以实现。文献[9]提出了一种基于 BP 神经网络的时钟偏差补偿方法,以时钟偏差作为输入,通过该模型的输出结果来调整时钟偏差,以此来提高非对称路径延时的同步精度,然而神经网络模型的固化导致了该方法的局限性。文献[10]提出了一种 DAC(delay asymmetry correction)模型,该模型对时钟偏差进行两个阶段的筛选,保证只使用良好的时钟偏差来更新本地时钟,提高了在高网络负载下的系统稳定性及时钟同步精度,但是在连续的高网络延时的情况下,DAC 模型无法作出良好的处理。

基于上述研究背景,本文在 DAC 模型的基础上,提出了一种时钟模型的线性估计(linear estimation of clock model, LEC)算法来优化 DAC 模型,利用同步过程中产生的时间戳信息作出端点确定当前同步周期的时钟线性函数,并估计当前周期的时钟偏差,最后利用嵌入式平台来验证算法的有效性,在连续的高网络延时情况下,该算法相对于 DAC 模型有较大改善。

1 IEEE 1588 协议

1.1 PTP 同步原理

PTP 协议在实现时钟同步之前需要确定时钟源以及时钟的主从关系。在确定了最佳主时钟和时钟间的主从关系后,主从时钟间开始时钟同步^[11-13]。假设主从时钟之间报文往返路径延时相同,通过主从时钟之间加盖时间戳的报文交互,可以计算出主从时钟的时间偏差,根据时间偏差调整本地时钟,即可实现与主时钟的同步。

1.2 影响时钟同步精度的因素分析

影响时钟同步精度的主要因素有如下几点^[14-16]。

1) 获取时间戳的位置

同步报文的传输会经历从应用层到物理层的逐层传递,可以在网络协议栈的应用层、网络层、MAC 层和物理层获取时间戳信息。由于操作系统和网络协议栈的延时抖动,在靠近物理层的位置获取的时间戳精度最高。

2) 时钟晶振的不稳定性

在时钟同步系统中,稳定的时钟晶振至关重要。主时钟的晶振的质量和稳定性不可能完全相同,从时钟需要不断地调整本地时钟频率来与主时钟进行频率同步。

3) 非对称路径延时

在 IEEE 1588 协议的同步原理中,假设报文往返传输

延时是对称的,但是在实际以太网中并非如此。在实际以太网中有两种情况都会产生非对称延时,一种是报文往返传输的路径距离不同,另一种是报文往返传输时的数据流量不同。本文主要分析第 2 种情况。

2 DAC 模型

2.1 DAC 模型描述

在实际的 PTP 网络拓扑结构中,会加入路由和交换设备。当网络中流量过大,PTP 报文会因为排队传输导致报文的接收时间戳信息异常,由此造成主从路径延时的严重非对称,导致错误地计算主从时钟偏差。这些异常的时钟偏差严重偏离实际,称为离群值,将会严重影响时钟同步的精度。

为了解决非对称路径延时的问题,采用一种非对称路径延时校正(DAC)模型。DAC 模型分为两个测试阶段:在第 1 阶段,使用主从时钟非对称延时比率 R ,进行“R”测试;第 2 阶段用来更新通过“R”测试的时钟偏差值。DAC 模型的第 1 个测试阶段流程如图 1 所示。

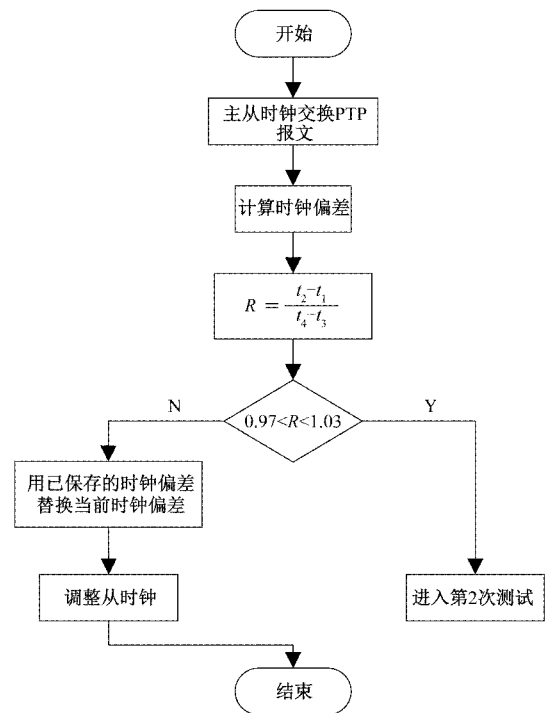


图 1 DAC 模型第 1 个测试阶段

PTP 同步过程中主要的延时变化会在正向路径(主到从)或反向路径(从到主)上发生,可以使用非对称延时比率 R 来判断当前同步周期的正向和反向路径延时是否为非对称。

$$R = \frac{t_2 - t_1}{t_4 - t_3} = \frac{\text{offset} + \text{delay}_{ms}}{-\text{offset} + \text{delay}_{sm}} \quad (1)$$

式中: $t_1 \sim t_4$ 为延时请求响应测量机制中从时钟获得的时间戳; offset 为主从时钟偏差; delay_{ms} 和 delay_{sm} 分别为正向路径延时和反向路径延时。非对称延时比率 R 的值表示

当前正反向路径延时的对称情况。当时钟偏差相对于实际的传输延时较小时,表示的效果和程度更优。 R 的取值范围是基于在正常网络负载情况下,通过进行多次较长时间的实验测试收集的统计信息来确定的。图 2 为时钟同步模块在通过交换机连接和正常网络负载情况下的 R 值分布。

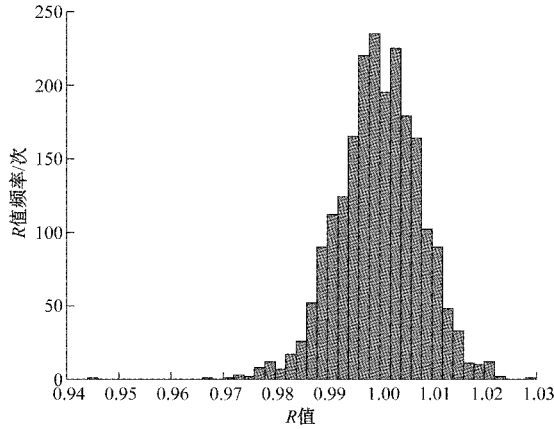


图 2 R 值的频率分布直方图

由于 R 边界条件的取值为实验测试的估计值,因此通过“ R ”测试的偏差值会有高于或低于预期偏差值的可能,这样的值同样会被认为是离群值。当使用该离群值调整从时钟时,主从同步精度可能会受到严重影响。故设定第 2 次测试,以保证用来调整本地时钟的时钟偏差值足够准确。图 3 为第 2 次测试流程。

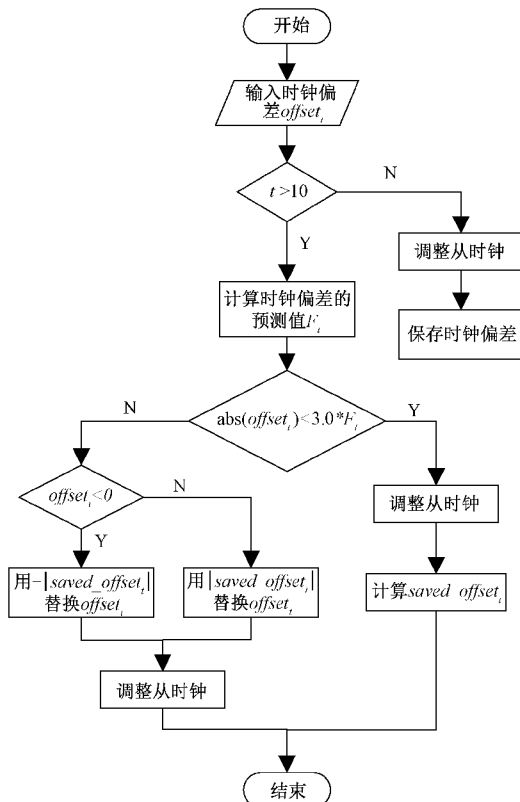


图 3 DAC 模型第 2 个测试阶段

其输入为通过“ R ”测试的第 t 个同步周期的时钟偏差值 $offset_t$,随后计算偏差值的预测值 F_t :

$$F_t = \frac{\sum_{p=9}^t |offset_p|}{10} \quad (2)$$

式中: $offset_p$ 为第 p 个通过两次测试的时钟偏差值。若当前时钟偏差值通过边界条件,则使用该偏差值调整本地时钟,同时保存通过该边界条件的最近 10 个周期的偏差值,对这些偏差值做滑动平均计算得出 $saved_offset_t$,其计算公式如下:

$$saved_offset_t = \frac{\sum_{p=9}^t offset_p}{10} \quad (3)$$

若未通过该边界条件,则根据当前周期偏差值的正负情况调整 $saved_offset_t$,使其代替当前周期计算的偏差值调整时钟。

2.2 理论验证与同步精度测试

本文使用以 AM3358 微处理器和 AR8031 系列的 PHY 芯片为核心设计的时钟同步模块进行实验测试。AM3358 芯片可以搭载 Linux 操作系统,因此使用开源软件 Linux PTP 在 Linux 系统上实现 PTP^[17-18]。为了验证 DAC 模型的有效性,在将其部署到时钟同步模块之前,先模拟高网络负载导致非对称延时的情况,测试主从时钟在该情况下的同步精度。

通过在主从时钟上运行不断向彼此发送数据包的应用程序,模拟高网络负载的情况,同时对正向路径引入 70% 的流量负载,反向路径引入 30% 的流量负载以模拟主从路径延时非对称的情况。在模拟高网络负载的实验环境下,主从时钟运行 Linux PTP,实验测试结果如图 4 所示。结果表明,高网络负载导致的非对称延时严重影响了时钟同步的精度,必须消除此情况对同步精度的影响,提高系统的鲁棒性。

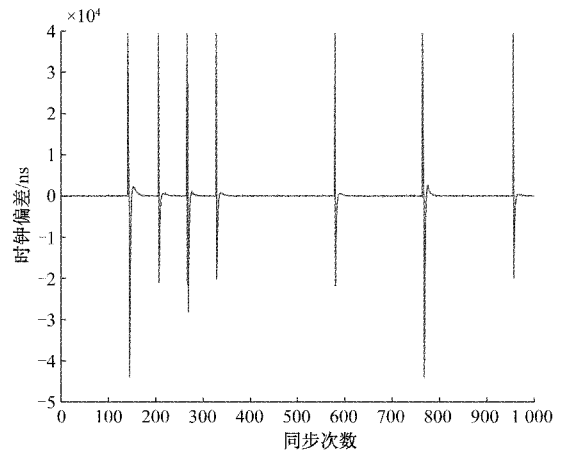


图 4 非对称延时的时钟同步精度

为了验证 DAC 模型的有效性,在标准 PTP 同步中引

入 DAC 模型,在相同的实验环境下进行时钟同步精度测试,引入 DAC 前后的对比测试结果如图 5 所示。

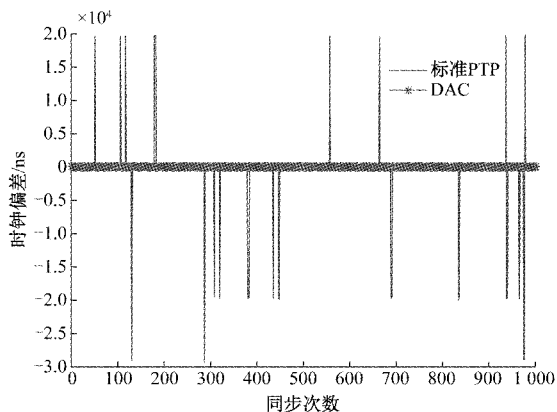


图 5 DAC 模型和标准 PTP 时钟同步精度对比

由图 5 可以看出,DAC 模型的引入有效抑制了非对称路径延时带来的影响,提高了高网络负载情况下的系统稳定性和时钟同步精度。由图 6 可知,DAC 模型下测试的时钟偏差均值为 23.73 ns,对应的标准差为 30.01 ns。

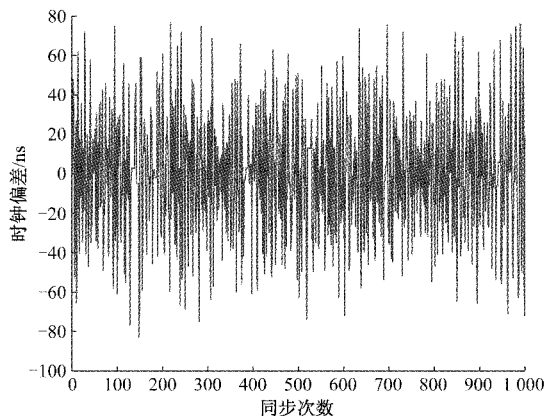


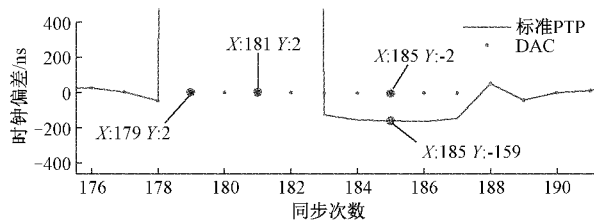
图 6 DAC 模型下的时钟同步精度

3 时钟模型线性估计

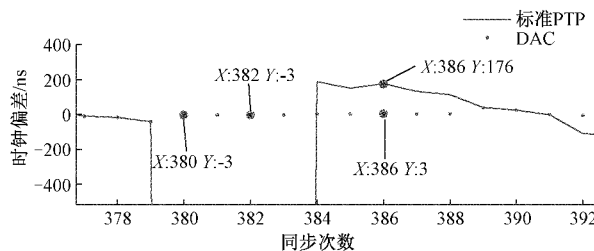
3.1 算法描述

由 2.2 节的测试结果可以看出,DAC 模型提高了主从时钟同步过程的鲁棒性,抑制了由高网络负载引起的非对称路径延时对同步带来的影响,在一定程度上保证了同步的精度。图 7 是图 5 中两段时钟偏差值的放大,由图 7 可以看出,在连续的高度非对称延时的持续时间内,出现了一段连续的 *saved_offset* 值,紧跟其后的时钟偏差值的正负属性与 *saved_offset* 值相反,并且该部分偏差值被 *saved_offset* 代替的原因是未通过 DAC 模型的第 2 阶段测试。究其原因是因为在连续的高度不对称路径延时的情况下,以 *saved_offset* 值替代当前偏差值的处理方式使得在此期间对本地时钟频率进行同一方向的补偿,将会导致即使当前同步周期的非对称比满足“R”测试,但由于先前连

续同一方向的频率补偿错误地调整了本地时钟频率,使得计算的时钟偏差偏离预期值。虽然通过时钟偏差的反向补偿保证了同步过程的继续进行,但该情况的出现是由于 DAC 模型不完美的处理方式导致的,这也是 DAC 模型需要改进的地方。



(a) DAC 和标准 PTP 时钟同步精度对比图 a



(b) DAC 和标准 PTP 时钟同步精度对比图 b

图 7 DAC 和标准 PTP 时钟同步精度对比

为了解决这一问题,本文提出一种时钟模型的线性估计算法(LEC),旨在主从路径延时非对称的情况下,计算准确的主从时钟偏差,提高同步精度。LEC 算法假设时钟在短时间内是线性的,通过从时钟由 PTP 报文交互获取的 4 个时间戳来实现从时钟模型准确的线性估计,并实时更新时钟斜率。在对时钟模型进行线性估计前,先建立时钟的线性模型。考虑主从时钟遵循线性函数 $M(t)$ 和 $S(t)$:

$$M(t) = t, S(t) = k \times t + \theta(0) \tag{4}$$

其中, t 为主时钟的时间,并将 $M(t)$ 作为参考时钟; $S(t)$ 是 t 的线性函数,作为时钟斜率为 k 的从时钟模型; $\theta(0)$ 为主从时钟初始偏差。

LEC 算法的基础是从时钟通过 PTP 协议报文交互获得精确的硬件时间戳,对这些时间戳进行应用处理,通过主时钟 $M(t)$ 作为参考时钟来估计从时钟 $S(t)$ 线性模型的参数,包括时钟斜率 k 和截距 $\theta(0)$ 。获取在 n 个连续同步周期的主时钟的 PTP 时间戳 T_i^m 和从时钟的 PTP 时间戳 $S(T_i^m)$,并使用这些时间戳为从时钟模型的线性估计做铺垫,找出两个线性函数,一个在从时钟线性函数 $S(t)$ 之上,另一个在 $S(t)$ 之下,分别为 $S(t)$ 的线性上界和线性下界函数,由两者的平均值估计从时钟的线性函数。图 8 所示为单个同步周期 PTP 时间戳和主从时间情况,可以看出点 $P(T_1, S(T_2))$ 始终位于 $S(t)$ 之上,同时点 $P'(T_4, S(T_3))$ 始终位于 $S(t)$ 之下,LEC 利用这一特性来准确估计 $S(t)$ 。

时钟斜率 k 和截距 $\theta(0)$ 的确定是构造 $S(t)$ 线性函数的必要条件,LEC 通过 n 个连续同步周期内的 PTP 时间戳

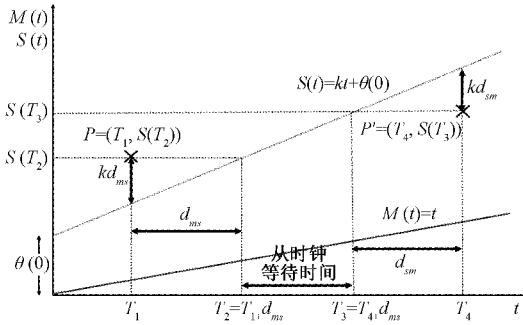


图 8 一个同步周期内主从时钟的 PTP 时间戳和时间

$T_1^n, S(T_2^n), S(T_3^n), T_4^n$ 来确定从时钟线性函数。 T_1^n 表示在第 n 个同步周期获取的 PTP 时间戳, n 至少为 2。对 $S(t)$ 线性函数进行估计前, 先找出 $S(t)$ 的线性上界和下界函数。 $S(t)$ 的线性上界函数: 使用连续两个正常的同步周期内获得的 PTP 时间戳 $T_1^1, S(T_2^1), T_2^1, S(T_3^1)$ 来定义两个点 $P_1(T_1^1, S(T_2^1))$ 和 $P_2(T_2^1, S(T_3^1))$, 两者均始终位于 $S(t)$ 之上。利用两点可以确定一个线性函数, 即为 $S(t)$ 的线性上界函数。

$$f_{ub}(t) = k_{ub} \times t + b_{ub} \quad (5)$$

$$\text{其中, } k_{ub} = \frac{S(T_3^1) - S(T_2^1)}{T_2^1 - T_1^1}, b_{ub} = S(T_2^1) - k_{ub} \times T_1^1。$$

$S(t)$ 的线性下界函数: 函数的确认方式与线性上界函数相同, 通过 PTP 时间戳 $T_3^1, S(T_4^1), T_4^1, S(T_5^1)$ 定义点 $P_3(T_3^1, S(T_4^1))$ 和 $P_4(T_4^1, S(T_5^1))$, 两点始终位于 $S(t)$ 之下。由此确定 $S(t)$ 的线性下界函数为:

$$f_{lb}(t) = k_{lb} \times t + b_{lb} \quad (6)$$

$$\text{其中, } k_{lb} = \frac{S(T_5^1) - S(T_4^1)}{T_4^1 - T_3^1}, b_{lb} = S(T_4^1) - k_{lb} \times T_3^1。$$

至此, 已经通过 PTP 时间戳确定了 $S(t)$ 的线性上界和下界函数, 如图 9 所示。

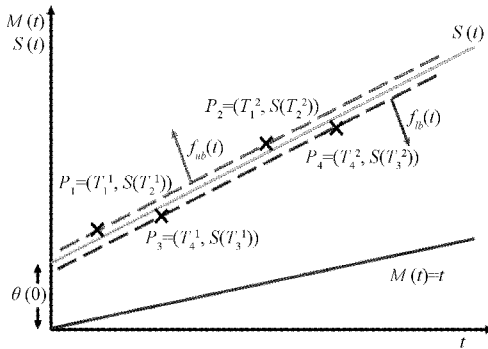


图 9 从时钟模型的线性上界和下界函数

令 $k = \frac{k_{ub} + k_{lb}}{2}, b = \frac{b_{ub} + b_{lb}}{2}$, 可以估计出 $S(t)$ 的线性函数:

$$S(t) = k \times t + b \quad (7)$$

假设前两个正常同步情况下的单向路径延时分别为

$delay_1$ 和 $delay_2$, 两者均值为 $delay$ 。当主从时钟路径延时高度不对称时, 会导致同步报文到达从时钟和主时钟的时间 t_2 和 t_4 异常, 从而无法准确计算当前同步周期的时钟偏差, 但是可以通过式(7)和 $delay$ 计算得出当前周期同步报文发送和接收时间戳的估计。

$$\hat{t}_2 = t_1 + delay \times k \quad (8)$$

$$\hat{t}_4 = \frac{t_3 - b}{k} + delay \quad (9)$$

式中: \hat{t}_2 和 \hat{t}_4 分别为当前同步周期 t_2 和 t_4 的估计。由式(8)和(9)可以估计出当前周期的同步报文时间戳, 以此来校正时钟偏差, 对正常同步情况下的时钟偏差进行准确估计。结合 LEC 算法后的 PTP(L-PTP) 计算流程如图 10 所示, 其中 D 为 $delay, \theta$ 为时钟偏差, $\hat{\theta}$ 为时钟偏差的估计值。

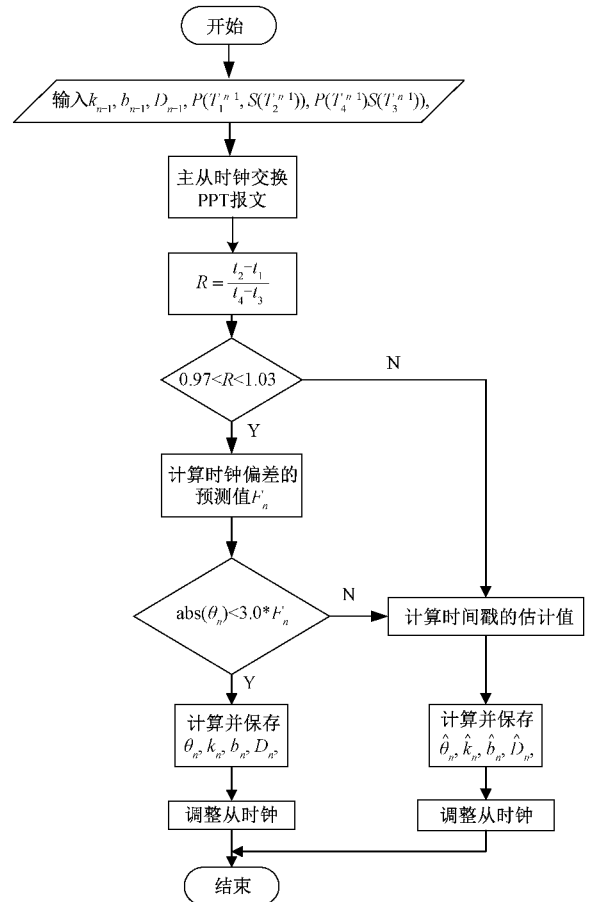


图 10 LEC 算法的时钟偏差计算流程

3.2 算法验证与同步精度测试

如图 11 所示, 将 L-PTP 和标准 PTP 的同步精度进行对比, 其测试环境和 2.2 节的实验相同。结果显示, LEC 算法的引入较好地抑制了时钟偏差离群值对同步精度的影响, 提高了系统的鲁棒性。

此外, 由图 12 可知, L-PTP 的时钟偏差均值为 23.48 ns, 对应的标准差为 28.33 ns, 保证了时钟同步的精度。

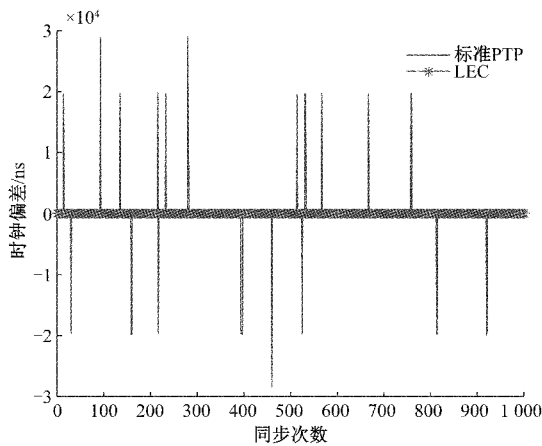


图 11 L-PTP 算法和标准 PTP 时钟同步精度对比

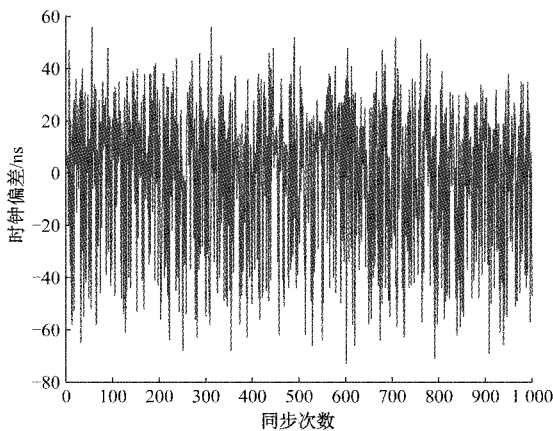
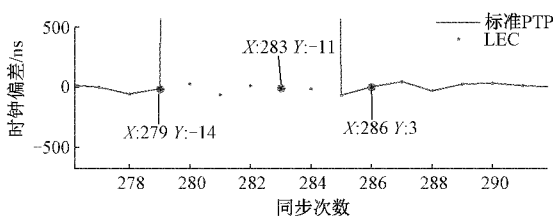
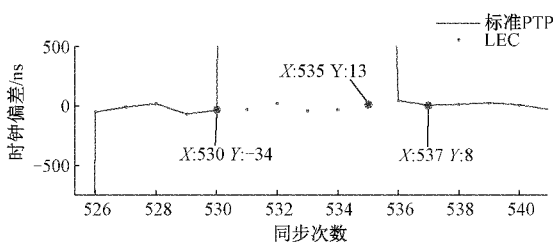


图 12 L-PTP 的时钟同步精度

图 13 是图 11 中两段连续非对称延时部分的时钟偏差值。通过图 13 中的数据可以看出, LEC 通过估计当前同步周期时间戳的数值来对时钟偏差进行估计, 实现了对连续高度不对称情况下的时钟偏差的合理估计, 避免了对本地时钟频率进行连续同向补偿的情况, 有效弥补了 DAC 模型的不足。



(a) L-PTP 算法和标准 PTP 时钟同步精度对比图 a



(b) L-PTP 算法和标准 PTP 时钟同步精度对比图 b

图 13 L-PTP 算法和标准 PTP 时钟同步精度对比

通过以上分析,证实了 L-PTP 检测和剔除时钟偏差离群值以及对其进行合理估计的有效性。相较于 DAC 模型, L-PTP 更加契合于时钟同步系统,使得同步过程更加平滑、稳定。

4 结 论

本文对非对称路径延时对 PTP 时钟同步的影响进行了分析,为了降低该因素对时钟同步精度的影响,在标准 PTP 中引入了 DAC 模型并进行实验测试。实验表明, DAC 模型有效抑制了高网络负载情况下的非对称延时对时钟同步精度的影响,提高了同步精度。此外,针对 DAC 模型对连续的高度不对称情况下处理方式的不足,本文提出了一种时钟模型线性估计(LEC)的方法对其进行优化。实验结果表明, LEC 算法在保证时钟同步精度的前提下,解决了 DAC 模型存在的问题。

参考文献

- [1] 王旭. 分布式测试系统时钟同步及触发研究与实现[D]. 太原:中北大学,2020.
- [2] 陈希,滕玲,高强,等. NTP 和 PTP 协议的时间同步误差分析[J]. 宇航计测技术,2016,36(3):35-40.
- [3] 李培基,李卫,朱祥维,等. 网络时间同步协议综述[J]. 计算机工程与应用,2019,55(3):30-38.
- [4] HENNING P, PETER D, REHAN S, et al. Estimators for time synchronization-survey, analysis, and outlook[J]. IoT, 2020, 1(2):398-435.
- [5] 王晋祺. 基于 IEEE 1588v2 协议的分布式测试系统时钟同步研究[D]. 太原:中北大学,2019.
- [6] 高志昊. 基于物理层时钟频率补偿的 IEEE 1588 网络时钟同步研究与实现[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2017.
- [7] 王军. IEEE 1588 与同步以太网技术的研究与实现[D]. 西安:西安电子科技大学,2016.
- [8] KARTHIK A K, BLUM R S. Robust clock skew and offset estimation for IEEE 1588 in the presence of unexpected deterministic path delay asymmetries[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5102-5119.
- [9] 王志斌,孔祥瑞,邓玉萍,等. 基于 PTPd2 的非对称链路时间偏差补偿方法[J]. 光通信技术,2019,43(7): 37-41.
- [10] RAHMAN M, KUNZ T, SCHWARTZ H. Delay asymmetry correction model for master-slave synchronization protocols [C]. 2014 IEEE 28th International Conference on Advanced Information Networking and Applications, 2014: 1-8.
- [11] 罗峰,徐金鹏. 基于车载环境的时间同步协议优化[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):96-104.

- [12] 王延年,宋小伟.高精度时钟同步系统的研究与实现策略[J].国外电子测量技术,2018,37(3):30-33.
- [13] 曾庆琦.高精度网络时间同步的研究与实现[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [14] 陶稳静.基于 IEEE 1588 协议的精确时钟同步系统的研究与设计实现[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- [15] 陈雷,朱天林,刘锋,等.晶振源特性对 IEEE 1588 同步性能影响的量化分析[J].电子测量与仪器学报,2014,28(6):650-656.
- [16] 仲婧. IEEE 1588 在智能变电站的应用及测试分析[J].信息通信,2020(12):91-95.
- [17] 朱望纯,钟震林,覃斌毅.嵌入式 Linux 设备的高精度 IEEE 1588 时钟同步实现[J].计算机测量与控制,2014,22(5):1619-1622.
- [18] 任昕畅.基于 PTP 的高精度网络时间同步系统的研究与优化[D].北京:北京邮电大学,2020.

作者简介

王逸凡,硕士,主要研究方向为时钟同步技术。

E-mail:ricardo_wyf@163.com

彭良福(通信作者),博士,教授,主要研究方向为光纤通信、时间频率同步技术。

E-mail:pengliangfu@126.com