

文章编号:1001-9081(2015)03-624-05

doi:10.11772/j.issn.1001-9081.2015.03.624

## 半实物网络测试系统从时钟频率漂移影响分析

孙磊刚\*, 张明清, 孔红山, 刘小虎

(信息工程大学 密码工程学院, 郑州 450000)

(\*通信作者电子邮箱 sunleigang0520@163.com)

**摘要:**针对精确时钟协议(PTP)用于半实物网络仿真测试时难以实现精确系统同步的问题,研究从时钟频率漂移对PTP仿真系统同步性能的影响。建立了半实物网络环境下PTP系统模型和时钟模型,解析性推导出单向传输链路中Slave<sub>n</sub>对主时钟的时延误差估计,得出从时钟模型时延误差表达式具有一致的加权结构,且各误差项都将累积并渗透到传输线路中,影响整个网络的同步精度。基于此,设计多种半实物网络仿真场景进行验证、分析和测试。仿真结果表明:单个从时钟频率漂移对系统同步精度影响甚微,但系统内从时钟均存在漂移或主时钟存在时间抖动的情况下,造成的同步误差是单个从时钟频率漂移时的10倍,会对系统同步精度产生严重的影响,研究成果能为半实物网络测试环境时钟部署策略提供重要参考。

**关键词:**半实物网络仿真;精确时钟协议;频率漂移;时钟同步;时延估计

**中图分类号:** TP391.9    **文献标志码:**A

### Influence of slave clock frequency drift on hanwave-in-the-loop network testing system

SUN Leigang\*, ZHANG Mingqing, KONG Hongshan, LIU Xiaohu

(Institute of Cryptographic Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450000, China)

**Abstract:** For the difficulties of achieving accurate clock synchronization in hanwave-in-the-loop network simulation testing using Precise Time Protocol (PTP), the performance of the simulation system of PTP in the face of slave clock frequency drift was studied. The system model and clock model of PTP under hanwave-in-the-loop network environment were established, the time delay estimation error for the master clock estimated by Slave<sub>n</sub> in unidirectional transmission line was analytically derived. It turned out that each drifting slave led to an additive error of identical structure, these error terms got added both in the drifting slave and its successor, and were then percolated down the line together with the previous accumulated error. Based on this, various network simulation scenarios were designed for verification, analysis and testing. The simulation results show that if only one slave clock drifts, the error at the end of the line is slight; but when all the slave clocks drift, synchronization error is more than 10 times larger, and the same relationship holds for the master versus all slaves drifting, which makes a serious impact on the system synchronization accuracy. The research provides an important reference for the clock deployment strategy in hanwave-in-the-loop network simulation.

**Key words:** hanwave-in-the-loop network simulation; Precision Time Protocol (PTP); frequency drift; clock synchronization; time delay estimation

### 0 引言

网络测试和控制对仿真系统实时性要求日益严格,时钟同步成为系统首要指标,需要提供严格的时钟控制策略<sup>[1]</sup>。同实物仿真、传统纯软件仿真相比,半实物网络仿真(Network Simulation)方法<sup>[2-4]</sup>在大规模网络设计、分析和测试方面具有显著优势。半实物网络仿真系统中,对于基于Socket通信的网络管理、安全等实时性要求不高的场合,可利用操作系统时钟函数、多媒体定时器等来保证系统实时性,但对基站同步、移动通信和网络硬件测试等只允许微秒级时钟同步误差的场合,需要专用的时钟协议加以保证。IEEE1588标准提供的精确时钟协议(Precision Time Protocol, PTP)<sup>[5]</sup>既适用于时钟伺服、时间截机制和协议栈等单模块系统,也适用

于大型异构网络系统时钟同步。PTP主从时钟同步方案中,时钟偏差和漂移的精确测量是时钟同步的重要保证,时钟稳定性是影响系统同步精度的关键因素。近年来,诸多学者致力于PTP同步机制的研究,取得了不少成果。文献[6]研究了基于软件的PTP主从时钟同步方案研究和相对时钟漂移模型;Scheiterer等<sup>[7]</sup>研究时钟漂移现象对单向延迟的影响,提出平均时间差算法对主时钟抖动误差进行估计;文献[8-9]提出运用卡尔曼滤波方法对时钟偏差、频率偏差以及频率变化率同时进行估计;Ciuffolelli<sup>[10]</sup>提出同步时间标记方法降低从时钟请求消息碰撞率来提高主从节点之间时钟同步精度;Liu等<sup>[11]</sup>基于OMNeT++/INET Framework,运用仿真的方法实现了IEEE1588 PTP时钟协议。

在半实物网络测试环境中,主时钟可采取有效的温度补

收稿日期:2014-09-28;修回日期:2014-11-16。

**作者简介:**孙磊刚(1990-),男,陕西咸阳人,硕士研究生,CCF会员,主要研究方向:半实物网络仿真;张明清(1961-),男,湖北孝感人,副教授,主要研究方向:系统建模与仿真;孔红山(1981-),男,河南濮阳人,讲师,博士研究生,主要研究方向:系统建模与仿真;刘小虎(1989-),男,河南周口人,助教,硕士,主要研究方向:网络安全建模仿真。

偿措施或恒温晶体振荡器来保证频率稳定性,而系统内从时钟均由仿真器进行模拟,由于数据时间戳获得、事件触发控制机制、消息队列处理、虚拟网络流量传输、软件操作和中央处理器(Central Processing Unit, CPU)中断等因素,引起系统内从时钟频率产生漂移,进而引入不可忽略的同步误差。所以,本文在建立半实物环境下PTP系统模型和时钟模型的基础上,假设主时钟频率恒定,解析性分析从时钟频率漂移对系统同步性能的影响,推导一阶线性级联半实物网络系统从时钟频率漂移所引起的同步误差,并进行基于OMNeT++仿真器的网络仿真实验,探索影响同步过程质量的因素,为半实物网络测试环境时钟部署策略提供参考。

## 1 模型建立

PTP1.0中采用边界时钟模型来解决网络连接设备对系统同步的影响问题,2.0版本引入透明时钟(Transparent Clock, TC)<sup>[12]</sup>的概念,网络连接设备被认为是具有已知延迟的网络组件,能够将端口的网络传输时延和端口间时延累加到时间修正域,以补偿数据通过网络连接设备时的时间延迟。本文基于点到点透明时钟模型<sup>[13]</sup>,建立半实物网络环境下PTP系统模型,如图1所示。

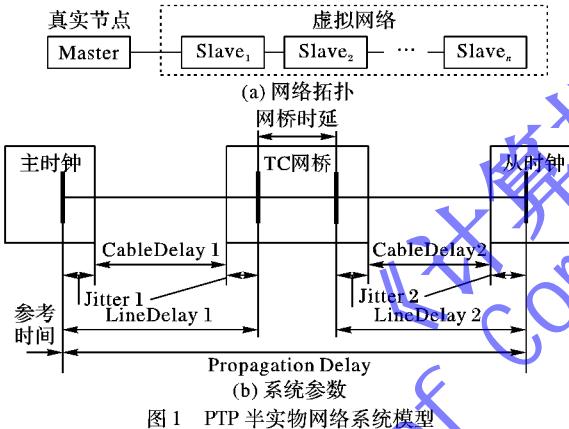


图1 PTP半实物网络系统模型

模型由 $N+1$ 个级联单元构成线性主从拓扑结构。Slave节点向Master节点的同步操作过程为:Slave节点向Master节点发送时钟同步请求信息;Master通过TC为Slave提供标准参考时间,主时钟同步消息发送时间间隔为 $T$ ,同步消息携带有主时钟的计数器状态 $M^i$ 和发送时间戳;Slave节点再根据获得的时钟信息以及测试的链路状态,对自身逻辑时钟进行修正和处理。同步消息传递机制如图2(a)所示。

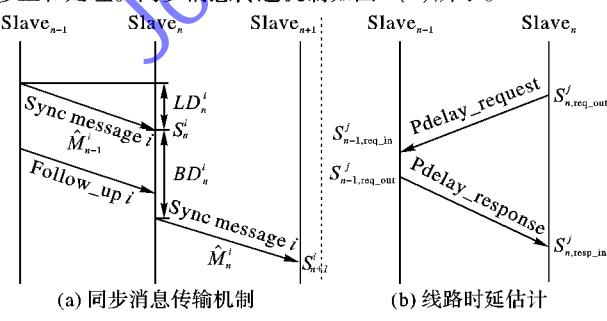


图2 PTP时钟模型

$t^i$ 时刻与主时钟同步消息相关量标号为 $i$ , $LD_n^i$ 表示 $Slave_n$ 与 $Slave_{n-1}$ 之间的传播时延,通过线路时延评估过程得

到。同步消息通过网桥延迟 $BD_n^i$ 后转发, $Slave_{n+1}$ 记录的 $BD_n^i$ 时延为同步消息接收时间戳与 $Slave_n$ 转发时间戳之间的差值, $Slave_n$ 本地时钟测量时间为 $S_n$ 。定义 $LB_n^i$ 为 $Slave_n$ 上第*i*个同步消息的线路时延与网桥时延总和, $\delta_{LB}^{i,n} = LB_n^i - LB_n^{i-1}$ 表示 $Slave_n$ 上第*i*, $i-1$ 个同步消息线路时延差。 $Slave_n$ 上第*i*个同步消息到达 $n$ 的传播时延记为 $L_n^i$ ,对任何 $Slave$ 节点,有 $L_0^i = 0$ 。估计值带上标表示,如 $\hat{S}_n(BD_n^i)$ 表示 $Slave_n$ 上第*i*个同步消息的TC时延估计量。

$Slave_n$ 对接收到的同步消息进行时延扩展,将线路时延转化为为主时钟时间,实现对消息内主时钟计数器的更新。频率补偿系数(Rate Compensation Factor, RCF),也称速率比(Rate Ratio),用来表示两个时钟的频率比值,时钟X和Y之间的频率比为 $RCF_{X/Y}$ ,理想状况下, $RCF_{X/Y} = f_X/f_Y$ 。每个 $Slave$ 通过本地时间计算对Master的频率偏移,文献[6]中对主时钟的频率偏移通过同步消息时间间隔内主时钟计数器差值和 $Slave_n$ 本地计数器差值来计算:

$$RCF_{M/S_n} = (\hat{M}_{n-1}^i - \hat{M}_{n-1}^{i-1}) / (S_n^i - S_n^{i-1}) \quad (1)$$

$Slave_n$ 将本地测量时延与 $RCF_{M/S_n}$ 乘积作为主时钟时间,根据接收到的主时钟计数器估计值 $\hat{M}_{n-1}^i$ ,更新自身计数器状态为:

$$\begin{cases} \hat{M}_n^i = \hat{M}_{n-1}^i + (\hat{S}_n(LD_n^i) + \hat{S}_n(BD_n^i)) \cdot RCF_{M/S_n} \\ \hat{M}_0^i = M^i = M(t_i) \end{cases} \quad (2)$$

更新过程中,需要对前向同步消息线路时延进行估计,估计流程如图2(b)所示。用 $j$ 表示线路时延估算过程,整个过程包含4个时间戳: $Slave_n$ 以周期 $R$ 向 $Slave_{n-1}$ 发送时延请求消息,记录消息发出时间戳 $S_{n,req,out}^j$ (1<sup>st</sup>); $Slave_{n-1}$ 收到后回复一个时延响应消息,并将接收消息时间戳记为 $S_{n-1,req,in}^j$ (2<sup>nd</sup>),将时延响应消息发送时间戳记为 $S_{n-1,resp,out}^j$ (3<sup>rd</sup>), $Slave_{n-1}$ 绝对时间下响应时延为 $RD_{n-1}^j$ ,本地响应时延为:

$$S_{n-1,resp,D}^j := S_{n-1,resp,out}^j - S_{n-1,req,in}^j \quad (3)$$

当时延响应消息到达 $Slave_n$ 时,记录到达时间戳 $S_{n,resp,in}^j$ (4<sup>th</sup>),一个时延请求周期过后 $Slave_n$ 的时钟为:

$$S_{n,resp,D}^j := S_{n,resp,in}^j - S_{n,req,out}^j \quad (4)$$

为计算式(3)、(4)之间的时间间隔,需要为每个 $Slave$ 节点需保留一个RCF估计值,如节点 $n$ 对节点 $n-1$ 的RCF估计为:

$$RCF_{S_n/S_{n-1}}^j = \frac{S_{n,req,out}^j - S_{n-1,req,out}^{j-1}}{S_{n-1,req,in}^j - S_{n-1,req,in}^{j-1}} \quad (5)$$

从而,计算节点 $n$ 对 $n-1$ 线路时延估计量为:

$$\hat{S}_n(LD_n^j) = (S_{n,req,D}^j - S_{n-1,resp,D}^j \cdot RCF_{S_n/S_{n-1}}^j) / 2 \quad (6)$$

前文提到,对主时钟的频率进行人为控制,使其保持稳定。另外,进行轻微的理想化假设,认为系统运行时单向线路延迟零偏移,因为IEC61784-5-3对线路延迟偏差提出了严格的要求,如用于PROFINET<sup>[14]</sup>网络的线路偏差不能超过20 ns/100 m。半实物网络环境下,期望得到的是从时钟频率对系统同步性能的影响,下节在模型基础上,运用隔离分析方法,忽略主时钟抖动情况下(消息随机的发送和接收时间噪声等),讨论从时钟频率偏移对系统同步精确度的影响。作为对比,主时钟抖动的影响会在第3章仿真中体现。

## 2 从时钟频率漂移误差传播分析

### 2.1 线路延迟影响分析

本节讨论单向线路线性延迟对同步精度的影响。对于频率非线性变化的情况,通常采取局部一阶线性近似分析方法<sup>[15]</sup>。所有节点在初始时刻  $t_0$  频率均保持稳定,随着系统运行,事件处理频繁,仿真器 CPU 温度升高,处理性能降低,造成从时钟短期频率漂移呈线性增长。

根据前提假设,主时钟 Master 频率保持不变,即  $f_M(t_i) = f_M(t_{i-1}) = f_M$ , Slave<sub>n</sub> 频率线性增长,设斜率为  $\Delta_n$ ,则有:

$$f_n(t_i) = f_n(t_{i-1}) + \Delta_n \cdot (t_i - t_{i-1}); t_i > t_{i-1} > t_0 \quad (7)$$

$$f_n(t_2)/f_n(t_1) = 1 + \Delta_n \cdot (t_2 - t_1)/f_n(t_1) \quad (8)$$

各 Slave 在时间间隔  $(t_{i-1}, t_i)$  内计数器增量为时钟频率对时间的积分值,对于频率稳定的主时钟,有:

$$M(t_i) = M(t_{i-1}) + f_M \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (9)$$

Slave<sub>n</sub> 计数器增量为:

$$S_n(t_i) - S_n(t_{i-1}) = \int_{t_{i-1}}^{t_i} f_n(t) dt = f_n(t) \cdot (t_i - t_{i-1}) + (\Delta_n/2) \cdot (t_i - t_{i-1})^2 \quad (10)$$

由于从时钟频率线性变化,根据线性理论,计数器增量可以写成时间间隔中点频率值与时间间隔长度的乘积,即:

$$S_n(t_i) - S_n(t_{i-1}) = f_n\left(\frac{t_i + t_{i-1}}{2}\right) \cdot (t_i - t_{i-1}) \quad (11)$$

利用第 1 章中对时间延迟的定义,网桥时延也可计算为:

$$\hat{S}_n(BD_n^i) = f_n(t_i + L_n^i + BD_n^i/2) \cdot BD_n^i \quad (12)$$

### 2.2 频率漂移对线路延迟估计精度影响

在式(10) 中, Slave<sub>n</sub> 单向线性延迟估计值计算为:

$$\hat{S}_n(LD_n^i) \approx f_n(t_i + L_n^i - A_n^{i,j(i)}) \cdot LD_n^i + RD_{n-1}^i \cdot \frac{R + RD_{n-1}^i}{4} \cdot (\Delta_n - \Delta_{n-1}) \quad (13)$$

其中:  $A_n^{i,j(i)}$  表示线路延迟  $j$  对同步消息  $i$  的有效计算次数(文献[13])。所有时钟频率估计值均要在时间间隔中点处计算,直到当前同步消息的到达时间,计算次数的上界由同步请求消息发送周期  $R$  决定。

### 2.3 从时钟同步误差估计

同步消息到达 Slave 节点时,根据 TC 时延,对主时钟时间进行修正,并将修正后的时间发送到其他端口,在获得修正时间值的过程中,也会产生相应的估计误差。所以,首先推导 Slave 对 Master 计数器的估计误差。根据式(9)、(11) 得出 Slave<sub>1</sub> 的 RCF 值为:

$$RCF_{M/S_1}^i = \frac{M(t_i) - M(t_{i-1})}{S_1(t_i + LD_1^i) - S_1(t_{i-1} + LD_1^{i-1})} = \frac{f_M \cdot T}{f_1\left(t_i + LD_1^i - \frac{T + \delta_{BD}^{i,1}}{2}\right) \cdot (T + \delta_{BD}^{i,1})} \quad (14)$$

前提假设主时钟抖动  $\delta_{BD}^{i,1} = 0$ , 所以:

$$RCF_{M/S_1}^i = \frac{f_M}{f_1(t_i + LD_1^i - T/2)} \quad (15)$$

Slave<sub>1</sub> 在  $t_i + LD_1^i$  时刻转发接收到的同步消息,根据式(2),得到 Slave<sub>1</sub> 对主时钟的计数器估计值:

$$\begin{aligned} \hat{M}_1^i &= M^i + (\hat{S}_1(LD_1^i) + \hat{S}_1(BD_1^i)) \cdot RCF_{M/S_1}^i = \\ &= M^i + f_M \cdot \frac{f_1(t_i + LD_1^i - A_1^{i,j(i)})}{f_1(t_i + LD_1^i - T/2)} \cdot LD_1^{i(i)} + \\ &\quad f_M \cdot \frac{\Delta_1}{f_1(t_i + LD_1^i - T/2)} \cdot RD_M^{i(i)} \cdot \frac{R + RD_M^{i(i)}}{4} + \\ &\quad f_M \cdot \frac{f_1(t_i + LD_1^i + BD_1^i/2)}{f_1(t_i + LD_1^i - T/2)} \cdot BD_1^i \end{aligned} \quad (16)$$

利用式(8) 简化 RCF 系数,根据式(15)、(13), 得到:

$$\begin{aligned} \hat{M}_1^i &= M^i + f_M \cdot (LD_1^{i(i)} + BD_1^i) + \frac{f_M \cdot \Delta_1}{f_1(t_i + LD_1^i - T/2)} \cdot \\ &\quad (LD_1^{i(i)} \cdot (T/2 - A_1^{i,j(i)}) + RD_M^{i(i)} \cdot \frac{R + RD_M^{i(i)}}{4} + \\ &\quad BD_1^i \cdot (BD_1^i + T)/2) \end{aligned} \quad (17)$$

观察式(17) 分母项,有:

$$[f_n(t_i \pm \tau)]^{-1} = [f_n(t_i) \pm \Delta_n \cdot \tau]^{-1} \approx [f_n(t_i)]^{-1} [1 \mp \Delta_n \cdot \tau/f_n(t_i)] \quad (18)$$

其中: 实际情况下,  $f$  的标称频率值约为 100 MHz, 75 Hz/s  $\leq \Delta_n \leq 300$  Hz/s,  $\tau \approx 30$  ms, 代入式(18) 中, 可以计算出  $\Delta_n \cdot \tau/f_n(t_i)$  的实际值约为  $6 \times 10^{-8}$ , 可忽略不计。所以, 将式(17) 化简为:

$$\begin{aligned} \hat{M}_1^i &= M^i + f_M \cdot (LD_1^{i(i)} + BD_1^i) + \frac{f_M \cdot \Delta_1}{f_1(t_i)} \cdot (LD_1^{i(i)} \cdot (T/2 - \\ &\quad A_1^{i,j(i)}) + RD_M^{i(i)} \cdot \frac{R + RD_M^{i(i)}}{4} + BD_1^i \cdot (BD_1^i + T)/2) \end{aligned} \quad (19)$$

根据式(9), 此时主时钟计数器状态表示为:

$$M|_{t_i+LB_1^i} = M(t_i) + f_M \cdot LB_1^i = M^i + (LB_1^i + BD_1^i) \quad (20)$$

所以, Slave<sub>1</sub> 对主时钟计数器的估计误差可由下式给出:

$$M - \hat{M}_1|_{t_i+LB_1^i} = f_M \cdot (LD_1^i - LD_1^{i(i)}) - \frac{f_M \cdot \Delta_1}{f_1(t_i)} \cdot (-LD_1^{i(i)} \cdot (A_1^{i,j(i)} - T/2) + RD_M^{i(i)} \cdot (R + RD_M^{i(i)})/4 + BD_1^i \cdot (BD_1^i + T)/2) \quad (21)$$

式(21) 中第一项由线路延迟估计值和实际线路延迟误差导致, 从时钟内若存在抖动时此误差不可避免。第二项中第一部分远小于后两部分, 所以, Slave<sub>1</sub> 时钟频率增长时, 对主时钟的估计值会过高, 相反, 若频率下降则估计值过低。

Slave<sub>2</sub> 的 RCF 系数计算为:

$$RCF_{M/S_2}^i = \frac{\hat{M}(t_i + LB_1^i) - \hat{M}(t_{i-1} + LB_1^{i-1})}{S_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i) - S_2(t_{i-1} + LB_1^{i-1} + LD_2^{i-1})} \quad (22)$$

根据式(11) 和式(19), 重复上述推理过程, 同样忽略时钟抖动  $\delta_{BD}^{i,1}$ , 计算新的线路延迟估计:

$$\begin{aligned} RCF_{M/S_2}^i &= f_M \cdot T + f_M \cdot \delta_{BD}^{i,1} + \frac{f_M \cdot \Delta_1}{f_1(t_{i-1})} \cdot \left[ \frac{\delta_{BD}^{i,1}}{2} \cdot (T + BD_1^i + BD_1^{i-1}) + LJ \right] \cdot [f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2) \cdot (T + \delta_{BD}^{i,1})]^{-1} \\ &= \frac{f_M}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta_1}{f_1(t_{i-1})} \cdot [\dots] \right) \end{aligned} \quad (23)$$

其中  $LJ$  为线路抖动的影响, 计算为:

$$LJ = \begin{cases} -T \cdot LD_1^{(i)}, & \text{忽略线路抖动} \\ (R - T) \cdot LD_1^{(i)} + \frac{\delta_{RD_M}^{(i)}}{4} \cdot (R + RD_M^{(i)} + RD_M^{(i)-1}), & \text{考虑线路抖动} \end{cases} \quad (24)$$

式(23)括号中第二项实际参数值小于  $10^{-8}$ , 所以, 忽略第二项, 对其进行如下近似处理:

$$RCF_{M/S_2}^i \cong \frac{f_M}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \quad (25)$$

Slave<sub>2</sub> 在  $t_i + LB_1^i + LD_2^i$  时刻转发收到的同步消息, 根据式(2), 得到 Slave<sub>2</sub> 对 Master 计数器估计值:

$$\begin{aligned} \hat{M}_2^i|_{t_i+LB_1^i+LD_2^i} &= \hat{M}_1^i + (\hat{S}_2(LD_1^i) + \hat{S}_2(BD_2^i)) \cdot RCF_{M/S_2}^i \approx \\ &\hat{M}_1^i + f_M \cdot \frac{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - A_2^{i,j(i)})}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot LD_2^i + f_M \cdot \\ &\frac{\Delta_2 - \Delta_1}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot \frac{RD_1^{(i)}}{4} \cdot (R + \\ &RD_M^{(i)}) + f_M \cdot \frac{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i + BD_2^i/2)}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot BD_2^i \end{aligned} \quad (26)$$

同样, 利用式(8)简化频率系数, 根据式(25)、(13)和(12), 得:

$$\begin{aligned} \hat{M}_2^i &= \hat{M}_1^i + f_M \cdot (LD_2^{(i)} + BD_2^i) - \\ &\frac{f_M \cdot \Delta_2}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot \frac{RD_1^{(i)}}{4} \cdot (R + \\ &RD_1^{(i)}) + \frac{f_M \cdot \Delta_2}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot \\ &(LD_2^{(i)} \cdot ((T + \delta_{BD}^{i,1})/2 - A_2^{i,j(i)}) + RD_1^{(i)} \cdot \\ &\frac{R + RD_1^{(i)}}{4} + BD_2^i \cdot (BD_2^i + T + \delta_{BD}^{i,1})/2) \end{aligned} \quad (27)$$

此时实际主时钟计数器为:

$$M|_{t_i+LB_1^i+LD_2^i} = M|_{t_i+LB_1^i} + f_M \cdot (LD_2^i + BD_2^i) \quad (28)$$

所以, Slave<sub>2</sub> 对主时钟计数器的估计误差可通过式(29)给出:

$$\begin{aligned} M - \hat{M}_2^i|_{t_i+LB_1^i+LD_2^i} &= M - \hat{M}_1^i|_{t_i+LB_1^i} + f_M \cdot (LD_2^i - LD_2^{(i)}) + \\ &\frac{f_M \cdot \Delta_2}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot \frac{RD_1^{(i)}}{4} \cdot (R + RD_1^{(i)}) - \\ &\frac{f_M \cdot \Delta_2}{f_2(t_i + LB_1^i + LD_2^i - (T + \delta_{BD}^{i,1})/2)} \cdot (LD_2^{(i)} \cdot ((T + \delta_{BD}^{i,1})/2 - \\ &2 - A_2^{i,j(i)}) + RD_1^{(i)} \cdot \frac{R + RD_1^{(i)}}{4} + BD_2^i \cdot (BD_2^i + T + \delta_{BD}^{i,1})/2) \end{aligned} \quad (29)$$

再利用式(18)简化分母, 运用数学归纳法推断 Slave<sub>N</sub> 的时钟估计误差为:

$$\begin{aligned} M - \hat{M}_N^i|_{t_i+LB_N^i+BD_N^i} &= M - \hat{M}_{N-1}^i|_{t_i+LB_{N-1}^i+BD_{N-1}^i} + f_M \cdot (LD_N^i - \\ &LD_N^{(i)}) + \frac{f_M \cdot \Delta_{N-1}}{f_N(t_i)} \cdot \frac{RD_{N-1}^{(i)}}{4} \cdot (R + RD_{N-1}^{(i)}) - \frac{f_M \cdot \Delta_N}{f_N(t_i)} \cdot \\ &(LD_N^{(i)} \cdot ((T + \delta_L^{i,N})/2 - A_N^{i,j(i)}) + RD_{N-1}^{(i)} \cdot \frac{R + RD_{N-1}^{(i)}}{4} + \end{aligned}$$

$$BD_N^i \cdot (BD_N^i + T + \delta_L^{i,N})/2) \quad (30)$$

式(29)中估计误差由 4 部分组成: 第 1 部分通过前向 Slave 继承而来; 第 2 部分由线路时延估计与实际线路时延不同所导致; 第 3 部分是前向 Slave 在计算线路时延时的误差, 导致该从时钟自身对主时钟计数器的计算产生误差, 而与从时钟自身是否存在频率漂移无关; 第 4 部分是包含线路时延估计误差时, Slave 自身频率漂移所产生的同步误差。Slave<sub>n</sub> 上的 4 部分估计误差可通过图 3 表示。

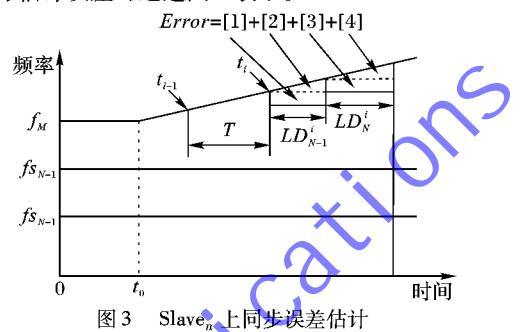


图 3 Slave<sub>n</sub> 上同步误差估计

可以看出, 从时钟频率漂移将导致具有一致结构的加权误差, 不会因为节点数增多, 或同步消息在线路上的传输而改变。另外, 线路时延估计会产生一个较小的误差, 将对下一个从时钟误差计算产生一定影响。对于每个频率漂移从时钟, 这些误差项都将影响到该时钟及其后继者的时钟同步精度, 并且会将累积的误差渗透到整个同步网络中。

### 3. 仿真测试

笔者基于 OMNeT++ 仿真器进行单向线路传输网络 PTP 的半实物网络仿真, 仿真拓扑包含 50 个 Slave 仿真节点和一个真实 Master 节点, 用来测试和分析串联网桥模式下 IEEE1588 同步性能, 参照 Siemens Automation & Drive 部门发布的标准, 设置仿真系统模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

参数	值	参数	值
节点个数	50	同步消息发送时间间隔	32 ms
标称频率	100 MHz	延迟请求消息发送时间间隔	8 s
线路时延	100 ns	系统同步周期	20 s
网桥时延	Uniform [5 15] ms	RFC 值计算周期	200 ms
温度变化速率	3 K/s	RFC 均值计算次数	7
频率变化速率	1 ppm/K	线路平均延时计算次数	8

仿真中, 定义仿真器 CPU 温度以 3 K/s 的速度增长, 仿真器内从时钟模型若存在自身频率漂移, 随仿真器温度变化引起的频率增长速率为 3 ppm/s。仿真器 CPU 温度从仿真进行到 20 s 时开始变化, 在随后的 20 s 内从 25°C 上涨到 85°C, 而后进行周期性的系统同步。设计多种半实物网络仿真场景来测试 PTP 的同步性能, 并将仿真结果进行对比。

下列仿真结果为 Slave<sub>1</sub>、Slave<sub>2</sub>、Slave<sub>32</sub> 和 Slave<sub>49</sub> 上的同步误差。图 4 为仅有 Slave<sub>1</sub> 频率漂移时引起的同步误差; 图 5 显示了 Slave<sub>1</sub>、Slave<sub>2</sub> 同时存在频率漂移时的结果; 图 6 显示所有 Slave 均存在频率漂移的仿真结果; 第 1 章提到, 作为对

比,将主时钟抖动的情况也进行仿真,测试结果如图 7 所示。

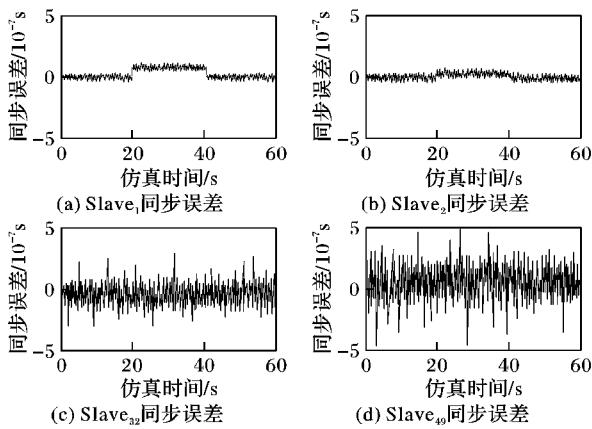


图 4 Slave<sub>1</sub> 频率漂移时节点同步性能

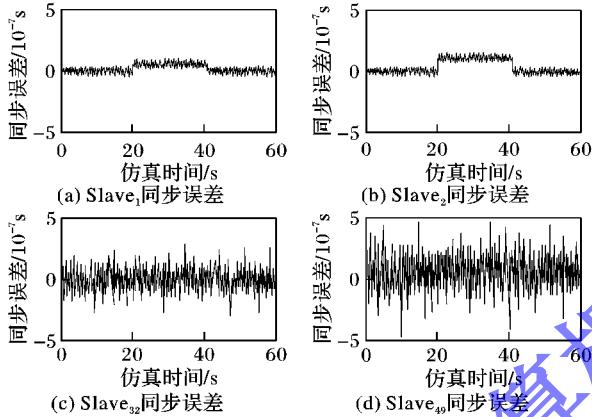


图 5 Slave<sub>1</sub>, Slave<sub>2</sub> 频率漂移时节点同步性能

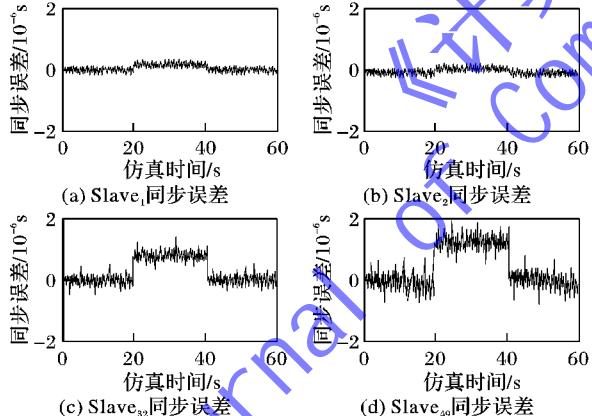


图 6 所有 Slave 均存在频率漂移时节点同步性能

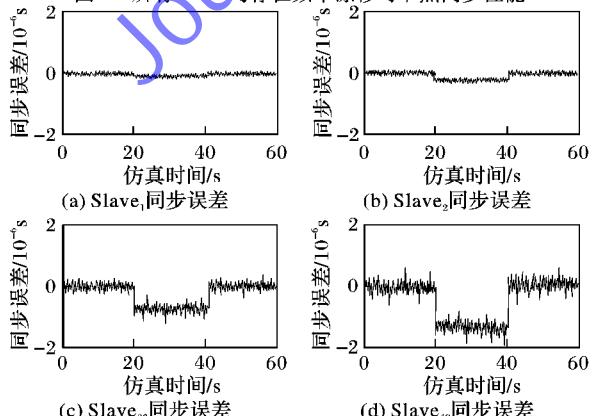


图 7 Master 频率抖动时节点同步性能

从各仿真结果可以看出:与单向同步线路上最初两个 Slave 漂移对系统同步性能影响相比,主时钟频率抖动情况下,会使线路尾部从时钟结点同步误差成 10 倍系数增长,此时系统同步精度较差,当所有从时钟表现出一致的非零频率漂移时,对系统同步性能的影响与主时钟抖动的情况相同。而且,无论从时钟自身频率漂移与否,误差的产生时间始终开始于仿真器 CPU 开始变化的时间 20 s,之后 20 s 内误差在一个梯度范围内随机变化,链路尾部从时钟误差较大。所以,在进行 PTP 主从时钟同步的过程中,可采用周期性消息同步的策略,使系统运行一定时间后回到初始稳定状态来提高同步性能。

#### 4 结语

本文首先假设主机时钟模型为一次线性函数,在半实物网络环境下,忽略主时钟抖动的影响,推导出从时钟频率漂移对 PTP 半实物网络仿真系统同步性能影响表达式。设置多种仿真场景进行测试和分析,可得出如下结论:与其分配相应成本和代价去来提高每个从时钟模型的同步消息处理性能,不如配置成本较高、性能优越的外部主时钟和有较强并发事件处理能力的仿真器,且可采取周期性时钟同步的策略,来提高系统的同步精度和稳定性。下一步工作是在半实物环境下,分析具有双向不对称线路延迟的从时钟频率漂移同步误差表达式,并进一步研究同步精度量化误差所引起的短期频率偏移。

#### 参考文献:

- [1] MATAR M, KARIMI H, ETEMADI A, et al. A high performance real-time simulator for controllers hardware-in-the-loop testing [J]. Energies, 2012, 5(6): 1713 – 1733.
- [2] SHAN J, MENG X, DING Y, et al. Hardware-in-the-loop simulation [M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 7 – 10. (单家元, 孟秀云, 丁艳, 等. 半实物仿真 [M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2013: 7 – 10.)
- [3] YOO I D, GOLE A M. Compensating for interface equipment limitations to improve simulation accuracy of real-time power hardware in loop simulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1284 – 1291.
- [4] YANG J, LI Y. Hardware-in-the-loop simulation of communication networks [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 21(3): 376 – 381.
- [5] MAHMOOD A, EXEL R, SAUTER T. Delay and jitter characterization for software-based clock synchronization over WLAN using PTP [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1198 – 1206.
- [6] FERRARI P, FLAMMINI A, RINALDI S, et al. Experimental characterization of uncertainty sources in a software-only synchronization system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(5): 1512 – 1521.
- [7] 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.
- [8] GIORGI G, NARDUZZI C. Performance analysis of Kalman-filter-based clock synchronization in IEEE 1588 networks [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(8): 2902 – 2909.

(下转第 642 页)

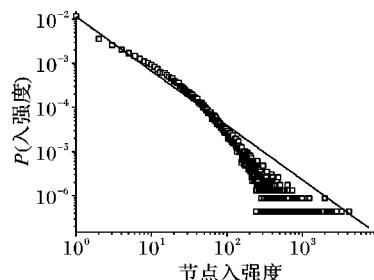


图 10 微博转发网络节点入强度分布

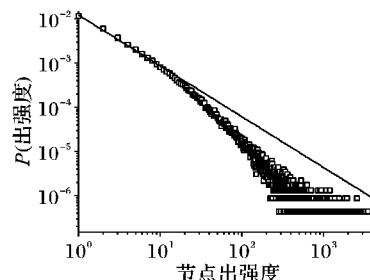


图 11 微博转发网络节点出强度分布

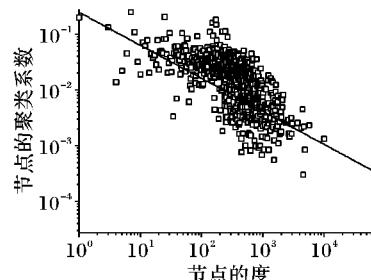


图 12 微博转发网络节点聚类系数和度的关系

观察图 8 ~ 12 可以看出：真实的微博转发网络的出入度和出入强度分布的确呈现幂律分布的特征；而且节点的聚类系数和节点度之间也呈现幂律分布的态势。更进一步对度与强度分布进行了幂律拟合得到以下表达式： $y = 0.38x^{-1.57}$ ， $y = 0.45x^{-1.67}$ ， $y = 0.01x^{-1.23}$ ， $y = 0.012x^{-1.15}$ 。与第 3 章的仿真结果比较，两者的幂律拟合表达式的系数和指数基本相似，处于同一个数量级，只有仿真与实际的出强度指数大小差值超过了 1，但是针对如此庞大的数据分析，这也是可接受的误差范围。因此，证实了根据本文提出的有向加权网络算法可以用于模拟构建实际的微博转发网络。

## 5 结语

本文充分考虑了微博信息传播的单向性特点和微博经多次转发形成三角构成的信息传播特征，引入三角连接机制，探究了微博转发网络的构建机制，提出了有向加权网络模型，很好地展现了实际微博转发网络的信息传播特点。分析结果表明模型的强度、度以及聚类系数的分布都符合幂律特征，且与相关模型比较，该模型可以通过调节模型中连边的概率有效改变网络的聚集特性，获得高聚类网络，使得平均聚类系数达到了 0.42，提高了网络的稳定性。同时，根据模型呈现的统计特性，提出了针对微博营销和舆情管控的切实可行的建议。因此，本文提出的模型可以正确地反映微博转发网络的拓扑结构。

## 参考文献：

- [1] ERDŐS P, RÉNYI A. On the evolution of random graphs [J]. Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences, 1960, 5: 17 – 60.
- [2] ERDŐS P, RÉNYI A. On random graphs [J]. Publications Mathematicae-Debrecen, 1959, 6: 290 – 297.
- [3] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440 – 442.
- [4] BARABÁSI A-L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509 – 512.
- [5] YOOK S H, JEONG H, BARABÁSI L. Weighted evolving networks [J]. Physical Review Letters, 2001, 86(25): 5835 – 5838.
- [6] BARRAT A, BARTHÉLEMY M, VESPIGNANI A. Weighted evolving networks: coupling topology and weighted dynamics [J]. Physical Review Letters, 2004, 70(6): 92.
- [7] WANG D, HAO B. A weighted scale-free network model with high clustering and its synchronizability [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(22): 1 – 8. (王丹, 赫彬彬. 一类高聚类系数的加权无标度网络及其同步能力分析[J]. 物理学报, 2013, 62(22): 1 – 8.)
- [8] WANG D, JIN X. On weighted scale-free network model with tunable clustering and congestion [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(22): 1 – 9. (王丹, 金小峰. 可调聚类系数加权无标度网络建模及其拥塞问题研究[J]. 物理学报, 2012, 61(22): 1 – 9.)
- [9] CENTOLA D. The spread of behavior in an online social network experiment [J]. Science, 2010, 329(9): 1194 – 1197.
- [10] WANG G, ZHOU J, XIE Y. Directed weighted network model based on BBV [J]. Computer Engineering, 2010, 36(12): 141 – 143. (王桂英, 周健, 谢飚. 基于 BBV 的有向加权网络模型[J]. 计算机工程, 2010, 36(12): 141 – 143.)
- [11] HOLME P, KIM B J. Growing scale-free networks with tunable clustering [J]. Physical Review E, 2002, 65(2): 1 – 4.
- [12] WANG X, LI X, CHEN G. Network science : an introduction [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 99 – 103. (汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 99 – 103.)
- [13] WEI F, SUN W. Precise time stamping method for IEEE 1588 clock synchronization message [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 30(1): 162 – 169. (魏丰, 孙文杰. 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, 30(1): 162 – 169.)
- [14] FERRARI P, FLAMMINI A, RINALDI S, et al. On the seamless interconnection of IEEE1588-based devices using a PROFINET IO infrastructure [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(3): 381 – 392.
- [15] EXEL R. Mitigation of asymmetric link delays in IEEE 1588 clock synchronization systems [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3): 507 – 510.

(上接第 628 页)

- [9] ZHUANG X, WANG H. IEEE 1588 clock synchronization algorithm based on Kalman filter [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(9): 747 – 751. (庄晓燕, 王厚军. 基于卡尔曼滤波器的 IEEE 1588 时钟同步算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(9): 747 – 751.)
- [10] CIUFFOLETTI A. Preventing the collision of requests from slave clocks in the Precision Time Protocol (PTP) [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(6): 2096 – 2103.
- [11] LIU Y, YANG C. OMNeT ++ based modeling and simulation of the IEEE 1588 PTP clock [C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering. Piscataway: IEEE, 2011: 4602 – 4605.
- [12] WALKER J, CANTONI A. Experimental evaluation of the jitter generated in timing transfer [J]. IEEE Transactions on Commun-

cations, 2010, 58(12): 3605 – 3612.

- [13] WEI F, SUN W. Precise time stamping method for IEEE 1588 clock synchronization message [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 30(1): 162 – 169. (魏丰, 孙文杰. 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, 30(1): 162 – 169.)
- [14] FERRARI P, FLAMMINI A, RINALDI S, et al. On the seamless interconnection of IEEE1588-based devices using a PROFINET IO infrastructure [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(3): 381 – 392.
- [15] EXEL R. Mitigation of asymmetric link delays in IEEE 1588 clock synchronization systems [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(3): 507 – 510.