

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.10.023

# 无线传感网络环境下 IEEE 1588 协议的仿真实现<sup>①</sup>

何沐曦<sup>1</sup>, 黄艺文<sup>1</sup>, 吕保强<sup>1</sup>, 李太华<sup>2</sup>

1. 西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715; 2. 西南大学 物理科学与技术学院, 重庆 400715

**摘要:** 仿真实验评估 IEEE 1588 精密时钟同步协议(PTP)在无线传感器网络环境下的同步性能, 对开展真实环境下的开发和应用具有较强的现实意义. 本文实现了无线传感器网络节点各层、偏移时钟以及 PTP 协议的仿真; 基于不同的时间标记模块, 实现了硬件时间标记、软件时间标记以及时间标记不确定性的仿真; 对 PTP 时间同步过程、仿真结果和影响 PTP 性能的因素进行了评估和分析.

**关键词:** 无线传感器网络; 时间同步; 时间标记; IEEE 1588 协议

**中图分类号:** TP393

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2015)10-0138-07

在有线分组包交换网络中, IEEE 1588 协议的时间同步精度可达微秒级<sup>[1]</sup>, 远高于 NTP 的时间同步精度. 同时, 由于操作简单, 所需的带宽相对较低, 与传统的时钟同步协议(例如 RBS, FTSP 等)相比, PTP 更适合用于通信带宽和能源受限的 WLAN 设备中<sup>[2-3]</sup>.

PTP 的同步精度受传输时延抖动和时间标记精度的影响较大. 由于无线通信的复杂性(如共享媒介、信道衰落严重、隐藏节点、避退较长)以及碰撞和数据包丢失会造成大量数据包重发, 因此, 针对无线传感器网络的 PTP 性能分析具有一定的挑战性. 在目前的研究中, 虽然已经出现了许多针对时间同步的离散事件仿真器, 如 Simsync<sup>[4]</sup>, x-simulator<sup>[5]</sup>等, 但 Simsync 和 x-simulator 仅用通信网络(即 MAC 层和 IP 层)的详细模型来对时间同步仿真, 没有将 PTP 时间同步的仿真和真实的无线信道及 MAC 层仿真相结合, 而工业无线传感器网络设备通常工作在复杂的电磁环境中, 因此需要一个详细的无线信道模型来实现对 MAC 延迟的模拟.

为了研究时间标记的不确定性、通信和中断过程中的延迟和抖动对 PTP 同步精度的影响, 本文利用 MiXiM 来模拟无线传感器网络中的无线电信道(物理层)和 MAC 层, 并在 x-simulator 上开发一个新的时钟模型, 通过修改其接口使它整合在 MiXiM 模块的 802.11 网络中, 从而实现 PTP 协议更真实的模拟.

## 1 时钟建模

在无线传感网络中, 由不同计数器和晶体振荡器组成的时钟属性是不可能完全相同的. 为了准确测量由瞬时相位变化引起的时钟偏差和由晶体振荡器的标准值引起的时钟频率偏移, 我们需要对时钟进行建模.

### 1.1 PTP 包交换过程建模

主节点和从其节点之间的时间同步过程基于延迟的请求-响应机制. 在实现时间同步过程中有 4 种类

① 收稿日期: 2014-10-09

基金项目: 重庆市研究生教育教研项目(yjg153064); 西南大学基本科研业务费专项资助(XDJK2014C167).

作者简介: 何沐曦(1990-), 男, 贵州兴义人, 硕士研究生, 主要从事无线传感器网络方面的研究.

通信作者: 李太华, 副教授, 硕士研究生导师.

型的数据包, 分别是: Sync 消息包, Follow\_Up 消息包, Delay\_Req 消息包和 Delay\_Resp 消息包. 这些包中包含了测量时钟偏移量和时钟延时所需的模块. 本文主节点的时钟被假定为足够精准, 因此不需要使用同步信息跟随包.

测量时钟偏移量的时候, 主节点在  $t_1$  时刻向从节点发送一个 Sync 消息包, 从节点在  $t_2$  时刻接收到该 Sync 消息包并记录下时间. 用  $d_{ms}$  表示一个 Sync 消息包从主节点传送到从节点的时间延迟, 由于传播延迟是一个未知量, 所以需要对传播延迟进行测量. 传播延迟测量是由从节点发起, 首先, 从节点在  $t_3$  时刻向主节点发送一个延迟测量请求消息包 Delay\_Req, 主节点接收该包并记录其到达的时间  $t_4$ . 主节点再将含有时间标记  $t_4$  的延时响应包发送给从节点. 用  $d_{sm}$  表示在第  $k$  个同步时刻消息包从从节点传送到主节点的时间延迟.

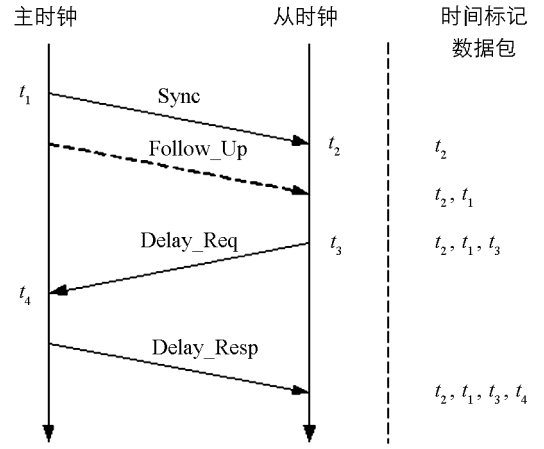


图 1 PTP 协议的时间同步机制

时钟偏移  $\theta_m$  是一个未知量, 在实际的网络中, 节点之间的传播延迟可能不同, 即  $d_{ms} \neq d_{sm}$ .  $t_1, t_2, t_3$  和  $t_4$  之间的关系如下

$$\begin{cases} t_2(k) = t_1(k) + \theta_m(k) + d_{ms}(k) \\ t_4(k) = t_3(k) - \theta_m(k) + d_{sm}(k) \end{cases} \quad (1)$$

由此可得, 在第  $k$  个同步时刻主节点和从节点之间的时钟偏移量为

$$\theta_m(k) = \frac{[t_2(k) - t_1(k)] - [t_4(k) - t_3(k)]}{2} + \frac{d_{sm}(k) - d_{ms}(k)}{2} \quad (2)$$

## 1.2 主节点的精确时钟

用  $t$  和  $M(t)$  分别表示参考时间(或称全局时间)和主节点在  $t$  时刻的时间, 通常情况下, 假设主节点的时钟是精确的, 即

$$M(t) = t \quad (3)$$

因此, 从节点与主节点在  $M(t)$  时的时间同步相当于和参考时间  $t$  同步.

## 1.3 从节点的有偏时钟

用  $\theta(t)$  表示节点有误差的本地时间  $C(t)$  与参考时间(或全局时间)  $t$  之间的差值

$$\theta(t) = C(t) - t \quad (4)$$

$\alpha(t)$  表示时钟偏移率, 它是本地时钟频率与参考时钟频率之间的差值,

$$\alpha(t) = \frac{dC(t)}{dt} - 1 \quad (5)$$

当  $\alpha(t) = 0$  时, 时钟偏移率  $dC(t)/dt = 1$ . 当  $\alpha(t) \neq 0$  时, 时钟偏移量会随着时间的推移逐渐积累而变大. 在稳定条件下, 时钟偏移率可以看成是一个常数, 从节点的时钟如下式所示

$$C(t) = \theta_0 + [\alpha(t) + 1]t + \omega(t) \quad (6)$$

其中,  $\theta_0$  表示最初的时钟偏移,  $\omega(t)$  表示噪声.

从时钟由 SKM 模型<sup>[6]</sup>构建, 在这个模型中, 时钟偏移和时钟偏移率的变化被视为随机过程, 时钟偏移和时钟偏移率的递归状态方程如下

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \gamma(t)\tau(t) + \omega_\theta(t+1) \quad (7)$$

$$\alpha(t+1) = \alpha(t) + \omega_\alpha(t+1) \quad (8)$$

其中,  $t$  表示在第  $t$  时刻的时间同步,  $\tau(t)$  为时间同步间隔,  $\omega_\theta(t)$  代表时钟偏移的白噪声;  $\omega_\alpha(t)$  代表时钟偏移率的噪声. 通常认为  $\omega_\theta(t)$  和  $\omega_\alpha(t)$  是 2 个不相关的高斯白噪声过程, 方差分别为  $\sigma_\theta^2$  和  $\sigma_\alpha^2$ .

同样需要注意的是, 时钟同步系统中每更新一次时钟的偏移和偏移率, 同时也要更新从时钟. 所以从时钟在每一个同步时间间隔  $\tau(t)$  的时候都会更新.

## 2 PTP 时间标记不确定性的建模

跟所有基于数据包交换的时钟同步协议一样, IEEE 1588 时钟同步协议要求对 Sync, Delay\_Req 和 Delay\_Resp 消息包的采样时间尽可能的精确. 尤其是时间同步消息包 (Sync) 需要 2 个时间标记: 主节点的发送时间和从节点的接收时间. 但由于硬件电路的延迟、中断请求、CPU 的处理延迟、传输延迟等原因, 时间标记往往不能在发送/接收事件发生时记录下精确的时间. 为了评估在真实场景中 IEEE 1588 时钟同步协议的性能, 本研究通过一种机制来模拟在时间标记过程中的延迟和不精确的时间标记.

时间标记过程是把读取时钟的时钟采样不确定性作为观测噪声进而读取时钟值的过程. 因此, 在模拟器中, 运用随机过程  $\omega_\gamma(t)$  来表示从时钟的时间标记不确定性, 把  $\omega_\gamma(t)$  加到  $C(t)$  上来表示精确的时钟. 从时钟的测量值表示为

$$C_m(t) = C(t) + \omega_\gamma(t) \quad (9)$$

其中,  $C(t)$  表示 Clock 模块接受到消息的时间,  $\omega_\gamma(t)$  是一个均值为 0、方差为  $\sigma_\gamma^2$  的高斯随机过程.

## 3 从时钟的校正算法

从时钟与主时钟同步的过程中, 需要估计和调整时钟偏移和时钟偏移率. 如图 1 所示, 时钟偏移的测量值表示为公式(2), 在 IEEE 1588 时钟同步协议标准中, 假定时钟偏移  $\theta(t)$  为在 PTP 同步数据包交换过程中不变, 则时钟偏移率的测量值可以由 2 个连续的同步过程来获得, 即

$$\alpha_m(n) = \frac{\theta_m(n) - \theta_m(n-1)}{\tau(t)} \quad (10)$$

其中,  $\tau(t)$  为时间同步周期, 即  $t(n) - t(n-1)$ , 时间标记的不确定性是零均值的独立高斯随机变量, 主节点时间标记的不确定性  $\omega_{\eta 1}(t)$  和  $\omega_{\eta 4}(t)$  的方差是  $\sigma_{\eta m}^2$ , 从节点时间标记的不确定性  $\omega_{\eta 2}(t)$  和  $\omega_{\eta 3}(t)$  的方差是  $\sigma_{\eta p}^2$ .

由于  $\omega_{\eta 1}(t), \omega_{\eta 2}(t), \omega_{\eta 3}(t)$  和  $\omega_{\eta 4}(t)$  是独立的高斯随机变量, 时钟偏移噪声  $\omega_\theta(t)$  是这 4 个独立随机变量之和, 因此  $\omega_\theta(t)$  也是一个高斯随机变量, 且它的方差就是各个独立随机变量的方差之和.

在第  $n$  个时间同步结束时, 可以计算出测量值  $\mu_\theta(n)$  和  $\mu_\alpha(n)$ , 并用来调整时钟偏移和时钟偏移率. 理想情况下, 如果时间标记是准确的, 时钟偏移和时钟偏移率的测量值可以直接作为校正值来调整从时钟, 即  $\mu_\theta(n) = \theta_m(t)$  和  $\mu_\alpha(n) = \alpha_m(t)$ .

此外, 由于观测噪声的影响, 当时钟偏移被矫正时, 由(10)给出的时钟偏移率测量值不会等于实际的时钟偏移率. 因此, 之前的测量值  $\theta_m(n-1)$  应修改为  $\theta_m(n-1) - \mu_m(n-1)$ .

## 4 PTP 协议的仿真实现

### 4.1 仿真器的开发

根据 IEEE 1588 标准, PTP 协议的概念是使一个节点(从节点)的有偏时钟保持与主节点精确时钟同步. 本节给出了开源模拟器在 WLAN 中实现 PTP 时间同步的一般结构. 如图 2 所示, 该模拟器具有 2 个 WLAN 节点: 主节点 snode 和从节点 mnode, 2 者都通过 IEEE 802.11 的无线通道链接. connectionManager 负责管理无线通道, world 模块定义了无线节点随机分布的区域. 白点表示 PTP 数据包在 802.11 无线频道的空中帧的传输. 该模拟器的一个特点是无线节点可以在指定的区域内以任意的速度和方向移动, 更真实的模拟移动无线网络.

图 3 描述了主节点(mnode)的实现. mnode 模块中 nic(Network Interface Card)模块是物理层和 MAC 层; net 模块为 IP 网络层; tmaster 模块用于模拟主时钟 PTP 协议. 还有一些辅助子模块: arp 模块用于网

络层地址到链路层地址的解析; mobility 模块用于管理节点的位置和运动; blackboard 模块用于模块间的信息共享.

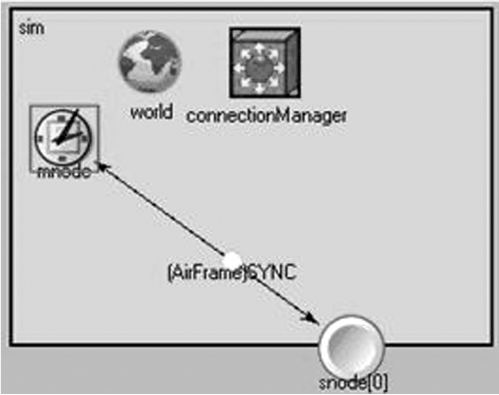


图 2 网络仿真的总体架构

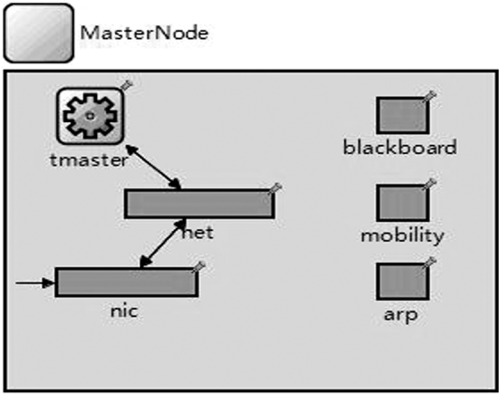


图 3 主节点 mnode 模块

tmaster 模块的主要任务是模拟主时钟和实现 IEEE 1588 协议中主节点的功能. 主时钟提供了 PTP 时钟同步协议的参考时间. 当从时钟的时间与主时钟的时间同步时, 把主时钟的时间看作是精确的时间. 因此, 在该模拟器中, 主时钟的时间始终与获得的仿真时间是一样的. tmaster 的另一个任务是调度时间同步计时以启动 PTP 数据包交换.

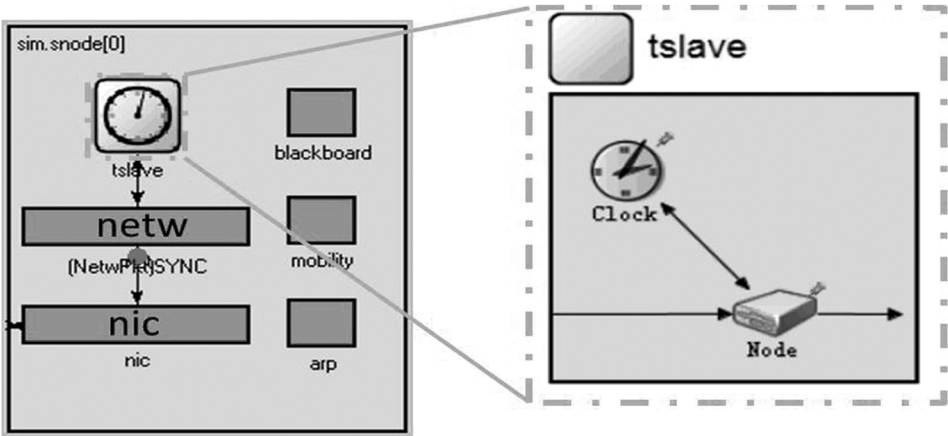


图 4 从节点 snode 模块

从节点(snode)与主节点具有相同的结构, 但从节点的 tslave 模块替代了主节点的 tmaster 模块, 用于执行由 IEEE 1588 协议描述的从节点的功能. tslave 模块是一个复合模块(如图 4 所示), 由 Node 模块和 Clock 模块复合而成. Node 模块负责 PTP 的包交换, 时钟偏移估计和从时钟调节. 它对节点间的时间同步起着核心作用. Clock 模块负责模拟不准确的偏移从时钟, 提供从时钟的本地时间, 更新从时钟, 实现时间标记机制.

4.2 PTP 包交换的实现

除了 Sync, Follow\_Up, Delay\_Req 和 Delay\_Resp 这 4 个用于时间标记的消息包外, 还需要一些其他的消息来协助 PTP 同步程序的执行. PTP 协议通过交换含有主从节点时间标记的数据包来实现时间偏移和时间偏移率的估计. 在该模拟器中, PTP 协议方案的实现如图 5 所示.

数据包交换的动态过程具体步骤如下:

- 1) mnode 模块在每一个时间间隔给对应的 snode 模块发送一个 Sync 消息包, 该 Sync 消息包包含时间标记  $t_1$ , 这是由主时钟测量的同步的传输时间;
- 2) Sync 消息包到达 snode 的输入门, 然后由 Node 模块接收. Node 模块记录  $t_1$ , 在同一瞬间传送 Syn



\_Time\_Req 消息到 Clock 模块. Clock 模块接收 Syn\_Time\_Req, 并获得其到达时间  $t_2$ , 然后发送包含  $t_2$  的 Time\_Res 到 Node 模块;

3) Node 模块接收 Time\_Res, 并记录该时间  $t_2$ . 经过一段时间的延时, Node 模块发送一个 Dreq\_Time\_Req 消息到 Clock 模块. Clock 模块一旦接收到 Dreq\_Time\_Req 就获取本地时间  $t_3$ , 然后给 Node 模块发送一个含有时间  $t_3$  的 Time\_Res 消息包;

4) Node 模块接收到 Time\_Res 并记录下  $t_3$ , 并立即发送延迟请求 Delay\_Req 到 snode 的输出门. 最后, 该消息通过 snode 的输出门发送到 mnode;

5) mnode 接收 Delay\_Req, 并记录其到达时间  $t_4$ . 然后 mnode 将含有  $t_4$  的一个 Delay\_Resp 消息包发送回 snode. 此数据包具有跟 Sync 数据包相同的传输过程, Node 模块是它的最终目的地;

6) Node 模块接收 Delay\_Resp, 并记录时间  $t_4$ , 然后启动伺服时钟操作来估计时钟偏移和时钟偏移率. 时钟偏移和时钟偏移率分别含在 Adj\_Offset 和 Adj\_Skew 消息包中被发送到时钟用以调整时钟偏移和时钟偏移率.

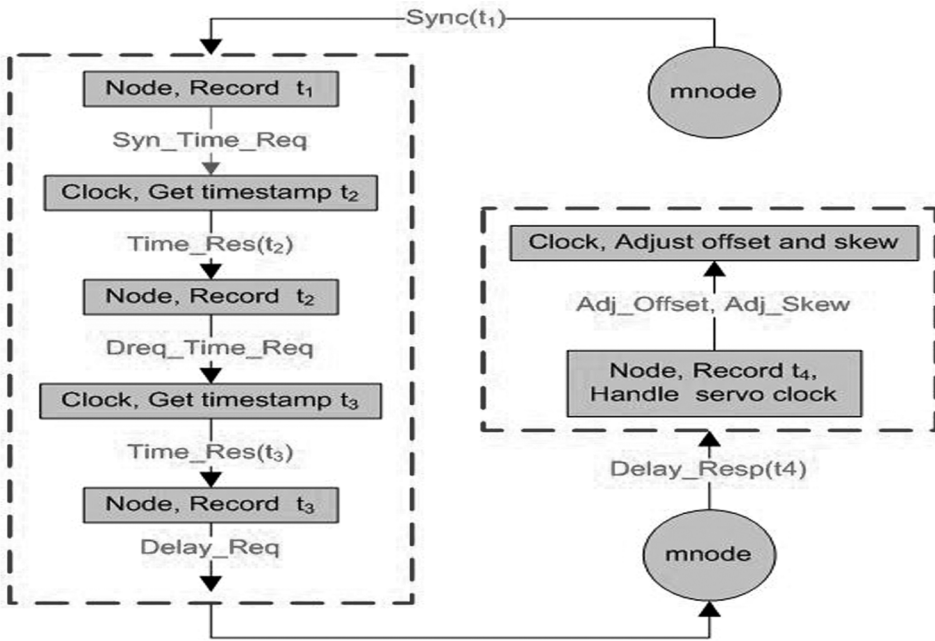


图 5 仿真器的 PTP 同步过程

## 5 仿真结果

该时钟模型通过参数变化(如时钟的稳定性、时间标记不确定性)对 PTP 同步性能的影响来验证. 在这些仿真中, 时钟偏移和频率偏移的初始值分别设置为  $0 \mu\text{s}$  和  $10 \text{ ppm}$ . 从时钟的时间更新间隔为  $0.1 \text{ ms}$ .

在第一个实验中, 我们模拟了 2 种不同的时钟. 一个是  $\sigma_a = 10^{-9}$  和  $\sigma_\theta = 10^{-7}$  的相对稳定的时钟(Clock A)<sup>[7]</sup>, 另一个  $\sigma_a = 10^{-8}$  和  $\sigma_\theta = 10^{-6}$  的相对不稳定的时钟(Clock B)<sup>[8]</sup>.

为了研究时间标记不确定性  $\omega_\gamma(t)$  的对 PTP 同步精度的影响, 不同的时间标记不确定性由改变  $\sigma_\gamma$  的值来实现. 较小的  $\sigma_\gamma$  对应于硬件时间标记, 而较大的  $\sigma_\gamma$  代表软件时间标记. 2 种不同的方法在图 6 和图 7 中给出, 其中时间同步周期  $T_{\text{sync}} = 0.1 \text{ 秒}$ .

图 6 描述了时钟偏移的标准差随着观测噪音的增大而变化的曲线. 当  $\sigma_\gamma \leq 10^{-7}$  时, 随着观测噪音的增大时钟偏移的标准差几乎没有变化, 基本为一个固定值. 此外, 还可看出 Clock A 的时钟偏移的标准差比 Clock B 的时钟偏移的标准差小. 这表明当时间标记不确定性较小时, 振荡器的频率偏移和时钟偏移白噪声对时钟偏移的影响较大. 当  $\sigma_\gamma > 10^{-7}$  时, 随着时间标记不确定性的增大, 时钟偏移的标准差将逐渐递增, 尤其当  $\sigma_\gamma > 10^{-5}$  时, Clock A 时钟偏移的标准差几乎与 Clock B 时钟偏移的标准差相等. 这说

明当时间标记不确定性较大时,时间标记不确定性是影响时钟同步精度的主要因素。

图 7 描述了频率偏移的标准差随着时间标记不确定性的增加而变化的曲线。频率偏移的标准差与时钟偏移的标准差具有相同的变化趋势。当时间标记不确定性较小时,频率偏移的标准差受频率偏移白噪声的影响较大,而当时间标记不确定性变大时,时间标记不确定性对频率偏移的标准差有显著的影响。

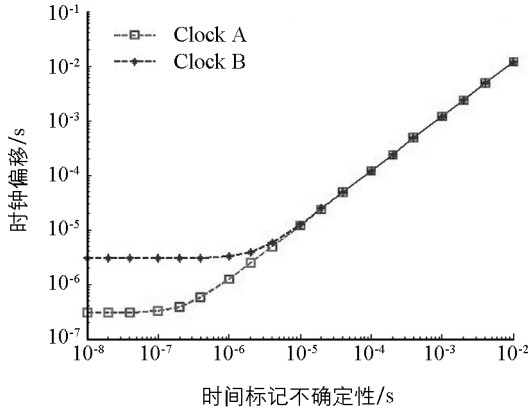


图 6 时钟偏移的标准差随时间  
标记不确定性  $\omega_q(t)$  的变化

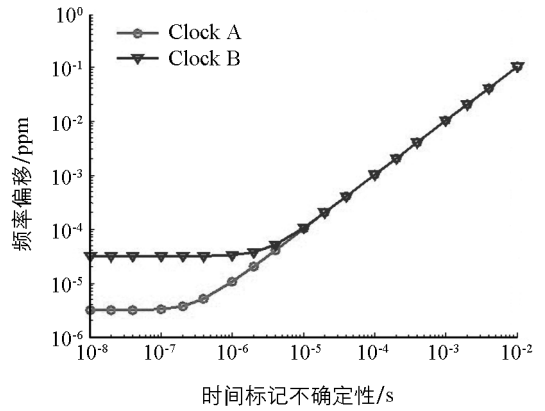


图 7 频率偏移的标准差随时间  
标记不确定性  $\omega_q(t)$  的变化

基于以上分析可知:在靠近应用层的位置打时间标记,将显著降低 PTP 的同步性能,而通过 MAC 层和物理层之间产生的硬件时间标记则可以减少不确定性来源,例如调度、中断延迟等。

本文还设置了不同的时间同步周期以分析其对 PTP 时间同步性能的影响。从图 8 可以看出,随着同步周期的增大,时钟偏移的标准差时钟偏移会越来越大,但当观测噪声较大( $\sigma_q > 10^{-6}$ )时,因同步周期不同而引起的时钟偏移差异较小。这表明,在硬件时间标记的情况下,采用一个较小的同步周期可获得更好的时间同步性能。

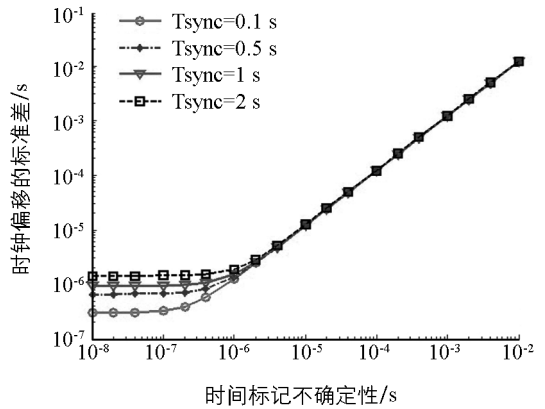


图 8 采用不同的同步周期时时钟偏移的  
标准差随时间标记不确定性  $\omega_q(t)$  的变化

## 6 结束语

本文详细地阐述了一种基于无线传感网络的 IEEE 1588 协议的仿真模拟器的实现过程。该模拟器对分析和评估时钟同步协议 PTP 提供了一种高效、可视化的方法,能够分析时间标记不确定性以及其它因素(如时钟偏移和时钟偏移率的白噪声、时间同步间隔等)对 PTP 性能的影响。此外,该模拟器还具有较强的可移植性和可扩展性。

在以后的工作中,我们会利用该仿真器的便携性和可扩展性,来模拟多跳时间同步,在更贴合实际的无线传感网络中对 PTP 时间同步性能进行详细的研究。

## 参考文献:

- [1] RHEE I K, LEE J, KIM J, et al. Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks: An Overview [J]. Sensors, 2009, 9(1): 56—85.
- [2] SHANG F. An Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Sensor Networks [J]. Journal of Networks, 2011, 6(7): 999—1008.
- [3] 翟红生, 于海鹏. 基于时间同步的 WSNs 声音定位系统研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2013, 35(7): 156—161.

[4] XU C, ZHAO L, XU Y, et al. Time Synchronization Simulator and Its Application [C]// Industrial Electronics and Applications, 2006 1ST IEEE Conference on. Singapore: IEEE, 2006: 1 — 6.

[5] GIORGI G, NARDUZZI C. Modeling and Simulation Analysis of PTP Clock Servo [C]// Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2007. ISPCS 2007. IEEE International Symposium on. Vienna: IEEE, 2007: 155—161.

[6] GIORGI G, NARDUZZI C. Performance Analysis of Kalman-Filter-Based Clock Synchronization in IEEE 1588 Networks [J]. Instrumentation & Measurement IEEE Transactions on, 2011, 60(8): 2902—2909.

[7] ABUBAKARI H, SASTRY S. IEEE 1588 Style Synchronization Over Wireless Link [C]// Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication, 2008. ISPCS 2008. IEEE International Symposium on. Ann Arbor, MI: IEEE, 2008: 127—130.

[8] CORRELL K, BARENDT N. Design Considerations for Software Only Implementations of the IEEE 1588 Precision Time Protocol [C] // In Conference on IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement & Control Systems. Zurich, Switzerland: IEEE, 2006: 10—12.

An Open Source Simulator for IEEE 1588 Time Synchronization Over Wireless Sensor Networks

HE Mu-xi<sup>1</sup>, HUANG Yi-wen<sup>1</sup>, LÜ Bao-qiang<sup>1</sup>, LI Tai-hua<sup>2</sup>

1. School of Electronics and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. School of Physics and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** It is very difficult and important to evaluate the performance of IEEE 1588 precise time protocol (PTP) by realistic simulation in WSNs (wireless sensor networks). The main contributions and benefits of the developed simulator are: the WSNs node’s various layers, drifting oscillator clocks and PTP protocols are simulated accurately and realistically. Simulation of hardware time-stamping and software time-stamping, as well as time-stamping uncertainties is realized by the respective modular time-stamping modules. The behavior of the PTP time synchronization, the simulation results and the factors that affect the PTP performance are presented and evaluated.

**Key words:** wireless sensor networks (WSNs); time synchronization; time-stamping; IEEE 1588

责任编辑 崔玉洁

