

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201207033

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20121116.1701.005.html>

# 无线传感器网络环境下基于卡尔曼滤波的 PTP 协议

叶玲, 李太华, 代学武

(西南大学 电子信息工程学院, 重庆 400715)

**摘要:** 作为分布式系统的重要组成部分, 精确时间同步是对时间敏感的工业无线网络的核心技术. 基于时间信息包交换的 IEEE 1588 精确时间同步协议 (PTP) 主要针对有线网络提出, 其同步精度受制于时间戳的精度和传输延迟抖动. 在无线传感网中, 节点难以获取精确时钟戳, 同时由于信道共享、包冲突和信道衰落, 无线网络的传输延迟抖动非常明显. 研究了无线网络中 PTP 的性能与时间戳精度之间的关系, 提出了一个自回归模型来描述时钟漂移, 将 PTP 中的包交换过程抽象为一组状态空间方程, 将延迟抖动等作为观测噪声, 从而利用卡尔曼滤波器予以滤除. 仿真结果表明, 在不同时间戳精度和延迟抖动下, 卡尔曼滤波能有效改善时钟误差和稳定性.

**关键词:** 精确时间同步协议; 卡尔曼滤波; 无线传感器网络; 自回归模型; 状态空间模型

**中图分类号:** TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)06-0518-07

## Kalman filtering based precision time protocol (PTP) in wireless sensor networks

YE Ling, LI Taihua, DAI Xuewu

(School of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** As a key technique in any distributed system, precision time synchronization plays a core role in time-sensitive industrial wireless networks. Based on the time package exchange techniques, the IEEE 1588 Precision time protocol (PTP) is developed for wired Ethernet and its performance is degraded by the precision of time stamping and jitters of transmission delay. However, in wireless sensor network, it is difficult for the low-cost node to acquire accurate time stamps. Due to the sharing of wireless channel, transmission collision and severe fading, the jitters in WSN are overwhelming. In this paper, the relationship between PTP performance and precision of time stamping in wireless network is investigated. The drifting clock is modeled by an autoregressive (AR) model and the package exchanging behavior of PTP is abstracted as a set of state space equations. This allows the uncertainties of time stamping and jitters are treated as observation noises, which can be removed by the mature Kalman filter. The simulation results show that the proposed Kalman filtering technique improves the time synchronization, in terms of clock estimation error and clock stability, under various conditions of time stamping uncertainties and jitters.

**Keywords:** precision time synchronization; Kalman filter; wireless sensor networks; AR model; state space model

保持节点之间时间上的同步在分布式系统中具有十分关键的地位, 是保证各节点协同工作, 处理数据正确和信息传输可靠的前提. 时间同步 (time synchronization) 是一个将各分布式节点上的时钟对准的过程, 其目的是把各节点和设备的时钟偏差限定

在足够小的范围内. 作为分布式系统的一个重要分支, 无线传感器网络的很多应用依赖于时间同步<sup>[1]</sup>, 比如数据融合、TDMA 调度、基于 TOF (time of flight) 定位技术<sup>[2]</sup>、面向波束成形 (beam forming) 的多节点协同技术<sup>[3]</sup>等. 无线传感器网络具有能量受限、计算能力低、通信容量低等特点<sup>[4]</sup>. 无线网络节点的时钟通常是通过本地的晶振和中断机制来实现的, 受制造误差、温度变化、CPU 处理延迟等影响较

收稿日期: 2012-07-23. 网络出版日期: 2012-11-16.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61101135); 西南大学基本科研业务费专项资金资助项目 (XDJK2012C063).

通信作者: 李太华. E-mail: catalyst@swu.edu.cn.

明显.因此,实施高精度的时间同步算法是一项具有挑战性的工作.

目前在数据包交换网络中,广泛使用的时间同步算法主要采用时间信息包交换技术,其研究的内容主要是如何通过时间信息的交换来提高不够精确的时钟的精确度,比如因特网上广泛采用的 NTP 协议、针对工业以太网的 IEEE 1588 PTP 等.针对无线传感器网络已陆续出现多种时间同步协议,主要可以分为以下几类:1) 基于发送者—接收者的双向同步,典型算法如 TPSN<sup>[5]</sup> (timing-sync protocol for sensor networks) 算法;2) 基于发送者—接收者的单向时间同步,如 FTSP<sup>[6]</sup> (flooding time synchronization protocol) 算法和 DMTS<sup>[7]</sup> (delay measurement time synchronization) 算法;3) 基于接收者—接收者的同步算法,如 RBS (reference broadcast synchronization)<sup>[8]</sup> 算法.但它们未能在能效和精度上进行充分的优化<sup>[9]</sup>.针对有线包交换网络,已经形成了一个 IEEE 1588 精确时间同步协议 (precision time synchronization protocol, PTP) 标准<sup>[10]</sup>.在一定条件下,其时间同步的精度可以控制在微秒范围内,该同步的精度远高于基于 NTP 时间同步协议.相比于 FTSP 等时间同步协议,由于 PTP 操作简单、对带宽的要求相对较低,更适用于通信带宽和能量受限的无线传感器网络设备.上述特点使其在同步精度和功耗上能够实现较好的平衡.但由于 IEEE1588 PTP 协议是针对有线网络提出的,如何将 PTP 运用于无线传感器网络以提高无线网络的时间同步精度尚未有定论,国际和国内相关的工作才刚刚展开.因此本文重点研究如何利用卡尔曼滤波器在无线传感器网络中实现高精度的时间同步.

时间同步的本质是一个用通信带宽和计算功耗换取时间精度的问题,受到通信延迟抖动(与通信带宽相关)和时间戳精度(与 CPU 处理能力相关)的影响很大.基于时间信息包交换的时间同步过程涉及 2 个方面:有偏差的物理时钟和时间信息交换协议(即时间同步算法).为了更好地研究时间同步,需要对物理时钟和时间信息交换分别进行建模.时钟模型主要有 2 种比较典型的方案:1) 采用基于时钟振荡器物理特征的差分方程进行描述<sup>[11]</sup>.在真实的无线传感器网络中,节点时钟频率漂移在不同时期服从不同规律.因此该方案的关键是获取差分方程模型的参数.2) 采用一阶高斯马尔可夫链模型,也称一阶自回归模型 (autoregressive, AR) 来描述时变的时钟漂移<sup>[12]</sup>.

本文尝试将 PTP 协议用于无线传感器网络,主

要研究 PTP 时间同步精度与时钟截的不确定性和延迟抖动之间的数量关系.利用 AR 时钟模型构建时钟的状态转移方程,将 PTP 协议建模为一组观测方程,然后基于卡尔曼滤波器对时钟偏移 (offset) 和时钟偏移率 (skew) 进行跟踪,以提高 PTP 同步协议在无线传感器网络的时间同步的性能.

## 1 系统建模

### 1.1 时钟模型

时钟建模使用状态转移方程组来描述网络节点自身的本地(物理)时钟变化规律,而物理时钟通常有偏差且不精确.如图 1 所示,横坐标表示基准时间(或全局时间) $t$ ,纵坐标表示一个节点有误差的本地时间  $C(t)$ .  $C(t)$  具有分段线性特征,除在可数点集  $P \subset \mathbf{R}$  (集合  $P$  表示时钟参数发生改变的情况) 外二次可导的函数,即  $dC^2(t)/dt^2$  在  $t \notin P$  时总是存在的.  $C(t)$  可表示为

$$C(t) = \int_0^t \frac{dC(\tau)}{d\tau} d\tau + \theta_0. \quad (1)$$

式中:  $\theta_0$  为时钟偏移的初始值,  $dC(t)/dt$  为时钟变化率,也称作时钟变化频率偏移,描述了本地时钟的频率.理想情况下,精确时钟  $C(t) = t$ , 其时钟变化率为  $dC(t)/dt = 1$  且  $P = \emptyset$ .

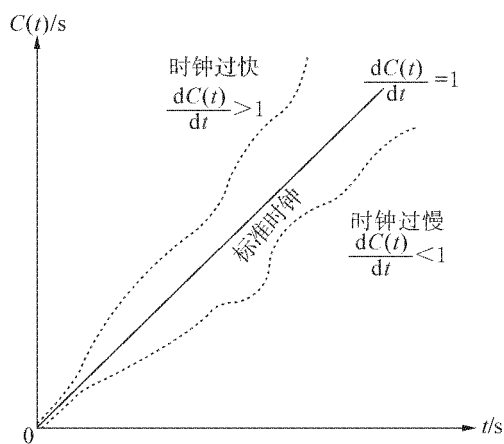


图1 时钟漂移模型

Fig. 1 Clock model

在此后的论述中,用  $T_M(t) = t$  来表示精确时钟,即主时钟或全局时钟.时钟偏移  $\theta$  用来描述本地时钟  $C(t)$  和全局时钟  $T_M(t)$  之间的差值,  $\theta = T_M(t) - C(t)$ . 时钟偏移率  $\alpha = 1 - dC(t)/dt$ , 描述了本地时钟频率和全局时钟频率之间的差异.

本地软件时钟模型主要描述软件时钟和物理时钟的关系,常用模型是:软件时钟对硬件时钟值作仿射变换,硬件时钟是只读的,即不能更改硬件时钟速率.不同的软硬件配置有不同的软件时钟模型.本

文中软件时钟的值是把物理时钟的值根据  $\theta$  和  $\alpha$  来修正后得到的。

由于时钟偏移率  $\alpha$  通常会受温度等环境因素影响,但比较缓慢,通常可以假设在一个较小的时间间隔内,  $\alpha$  是不变的. 因此,通过离散化处理,连续时钟模型(1)可转化为一组离散时间域上的状态转移方程:

$$\theta[k] = \sum_{i=0}^{k-1} \alpha[i] \tau[i] + \theta_0 + \psi_\theta[k]. \quad (2)$$

式中:  $\theta_0$  是初始时钟漂移(即  $t=0$  时刻的时钟漂移值),  $\alpha[i]$  是时间段  $\tau[i]$  内的时钟偏移率( $0 \leq i \leq k-1$ ),  $\psi_\theta[k]$  是瞬时的时钟偏移波动  $\omega_\theta[k]$  的累积和,即  $\psi_\theta[k+1] = \psi_\theta[k] + \omega_\theta[k]$ . 将式(2)写成递归的形式,则时钟偏移的状态转移方程为

$$\theta[k+1] = \theta[k] + \alpha[k] \tau[k] + \omega_\theta[k]. \quad (3)$$

根据文献[12],时钟偏移率的变化可以用一个AR过程来描述,于是  $\alpha$  的状态转移方程为

$$\alpha[k+1] = \alpha[k] + \omega_\alpha[k]. \quad (4)$$

式中:  $\tau[k]$  为时间同步间隔(即2次同步之间的时间间隔),本文中假定为固定不变,即  $\tau[k] = \Delta T$ ;  $\omega_\theta[k]$  代表时钟偏移的白噪声;  $\omega_\alpha[k]$  代表时钟偏移率的噪声(白频率噪声).  $\omega_\theta[k]$  和  $\omega_\alpha[k]$  是2个不相关的高斯白噪声过程,方差分别为  $\sigma_\theta^2$  和  $\sigma_\alpha^2$ .

## 1.2 PTP 时间同步协议模型

PTP 协议<sup>[10]</sup>是一种主从时钟同步协议,其基本原理是:从节点通过与主节点交换包含时间标记的时间信息包,计算出主从节点之间的时钟偏移  $\theta$ ,从而估计出主节点的时间,并调整从节点的本地时钟使其与主时钟保持同步. PTP 中的时间标记信息包交换过程如图2所示.

图2中  $t_1$  和  $t_2$  为一次同步中主从时钟记录下的时间标记,  $t_3$  和  $t_4$  为紧接着的一次 Delay\_Req 请求报文传输过程中,从时钟和主时钟记录下的时间标记. 考虑到主从之间数据包的传输延迟,它们之间的关系如下:

$$\begin{cases} t_2[k] = t_1[k] + \theta[k] + d_{ms}[k], \\ t_4[k] = t_3[k] - \theta[k] + d_{sm}[k]. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $k$  代表第  $k$  次时间同步过程,  $d_{ms}$  代表数据包从主时钟到从时钟的传播时延,  $d_{sm}$  代表数据包从从时钟到主时钟的传播时延. 将主从时钟间的时钟偏移  $\theta$  看作待求解未知量,解方程组(5),可得到

$$\theta_M[k] = \frac{[(t_2[k] - t_1[k]) - (t_4[k] - t_3[k])] + d_{sm}[k] - d_{ms}[k]}{2}. \quad (6)$$

式(5)描述了时间同步协议中时间标记信息包

交换过程中主从时间标记之间的关系. 式(6)是时钟偏移的观测方程,描述了如何从时间信息包交换中“测量”出主从时钟偏移.

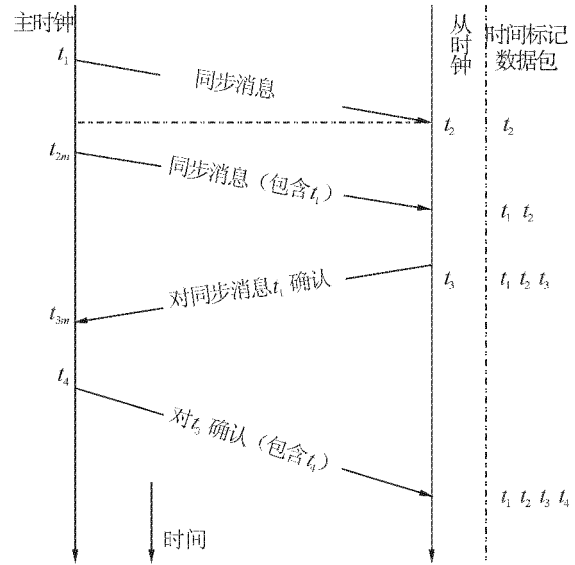


图2 PTP 协议时间标记包交换过程

Fig. 2 Timing diagram of message exchange by PTP

在 PTP 时间同步协议中,传输时延假定对等,即  $d_{sm} = d_{ms}$ . 但实际网络中由于无线介质的共享、冲突退避和重发等因素,数据包的传输时延不会相等,即  $d_{sm} \neq d_{ms}$ . 在这里,将传输延迟的不对称性可以用延迟抖动来描述,即把传输时延  $d_{sm}$  和  $d_{ms}$  看作一个均值为  $d$ 、方差为  $\sigma_d^2$  的高斯随机过程  $N(d, \sigma_d^2)$  的2次取值. 令  $\Delta d = (d_{sm} - d_{ms})/2$ , 计算  $\theta$  的式(6)可写为

$$\theta_M[k] = \frac{[(t_2[k] - t_1[k]) - (t_4[k] - t_3[k])]}{2} + \Delta d.$$

式中:  $\Delta d$  描述了传输延迟的不对称性,  $\Delta d$  是一个均值为0,方差为  $1/2 \times \sigma_d^2$  的高斯随机变量. 进一步考虑由于嵌入式系统中断处理延迟等所造成时间戳的不确定性,在主从时钟的观测值  $t_i$  中,同样存在时钟值读取误差  $\Delta t_i$  ( $i=1,2,3,4$ ),  $\Delta t_1$  和  $\Delta t_4$  是主时钟的盖戳的不确定性,  $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$  是从时钟的盖戳的不确定性. 于是  $\theta$  的观测方程为

$$\theta_M[k] = \frac{[(t_2[k] - t_1[k]) - (t_4[k] - t_3[k])]}{2} + v_{\theta_M}. \quad (7)$$

式中:  $v_{\theta_M}$  代表  $\theta$  的观测噪声, 定义为

$$v_{\theta_M}[k] = \frac{\Delta t_2 + \Delta t_3}{2} - \frac{\Delta t_1 + \Delta t_4}{2} + \Delta d.$$

观测噪声  $v_{\theta_M}$  是时间标记误差  $\Delta t_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) 与传输延迟不对称性  $\Delta d$  之和. 假设时间标记的不确定性是零均值的独立随机变量.  $\sigma_{MTS}^2$  是  $\Delta t_1$  和

$\Delta t_4$  的方差,  $\sigma_{\text{STS}}^2$  是  $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$  的方差, 则  $v_{\theta_M}$  的方差是各个独立随机变量的方差之和:

$$\sigma_{\theta_M}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{\text{MIS}}^2 + \sigma_{\text{STS}}^2 + \sigma_d^2).$$

因为  $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$  的均值不为零(时间延迟始终是个正数), 故  $v_{\theta_M}$  的均值不为 0, 而是  $\Delta t_2$  和  $\Delta t_3$  的平均值相加. 假定在一个同步周期  $\tau[k]$  内恒定不变, 则时钟偏移率  $\alpha[k]$  可以从  $\theta$  的观测值中计算出来,  $\alpha[k]$  的观测方程为

$$\alpha_M[k] = \frac{\theta[k] - \theta[k-1]}{\tau[k]} = \frac{\theta[k] - \theta[k-1]}{\Delta T}. \quad (8)$$

同理, 可以得到  $\alpha_M[k]$  的观测噪声的方差为

$$\sigma_{\alpha_M}^2 = \frac{2}{(\Delta T)^2} \sigma_{\theta_M}^2.$$

注意, 由于  $\alpha_M[k]$  是从  $\theta$  的观测值得到的, 观测噪声  $v_{\alpha_M}$  与  $v_{\theta_M}$  相耦合, 它们的协方差为

$$\text{Cov}(\sigma_{\alpha_M}, \sigma_{\theta_M}) = \text{Cov}(\sigma_{\alpha_M}, \sigma_{\alpha_M}) = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\theta_M}^2}{\Delta T}.$$

## 2 基于卡尔曼滤波器的时间同步

假设基于主从时钟包交换所获取的时间信息是绝对精确且可靠的, 则如第 1 部分所述的关于时钟偏移和时钟偏移率的观测值可直接用于矫正本地时钟, 以实现时间同步. 然而, 由于主从时钟包交换过程中存在着各种不确定因素, 期间获取的时间信息通常是不精确且不可靠的. 因此, 需要通过滤波器技术对其进行预处理. 在第 1 部分已经建立的递归时钟模型和同步协议模型的基础上, 可以利用卡尔曼滤波器方程实现递归估计器.

基于这一目的, 正如第 1 部分所述, 从式(7)和式(8)可以得到观测方程:

$$\begin{cases} \theta_M[k] = \theta[k] + v_{\theta_M}[k], \\ \alpha_M[k] = \alpha[k] + v_{\alpha_M}[k]. \end{cases} \quad (9)$$

将状态转移方程(3)、(4)和观测方程(9)写成矩阵形式, 可建立时钟同步的状态空间模型:

$$\begin{cases} \mathbf{x}[k] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k-1] + \boldsymbol{\omega}[k], \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{H}\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k]. \end{cases} \quad (10)$$

式(10)分别称为时钟状态方程和观测方程. 式中:  $\mathbf{x}[k] = [\theta[k] \quad \alpha[k]]^T$  为第  $k$  轮时钟状态向量;  $\mathbf{y}[k] = [\theta_M[k] \quad \alpha_M[k]]^T$  为第  $k$  轮时钟观测向量;  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta T \\ 0 & p \end{bmatrix}$ , 为状态转移矩阵;  $\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  为测量系统的参数矩阵, 它将真实状态空间映射到观测空间;  $\boldsymbol{\omega}[k] = [\omega_\theta[k] \quad \omega_\alpha[k]]^T$ ,  $\mathbf{v}[k] =$

$[v_{\theta_M}[k] \quad v_{\alpha_M}[k]]^T$  分别表示过程噪声和观测噪声,  $\boldsymbol{\omega}[k]$  服从  $N(0, \mathbf{Q})$  正态分布,  $\mathbf{v}[k]$  服从  $N(0, \mathbf{R})$  正态分布, 且两噪声的各样本间均相互独立.  $\mathbf{v}[k]$  的零均值假设在实际系统中并不一定成立,  $\mathbf{v}[k]$  的均值同样是一个与发送节点、接收节点相关的变量, 尽管如此, 在  $\mathbf{v}[k]$  均值未知的情况下对其进行零均值的假设是开展卡尔曼滤波所要求的条件, 而零均值的假设所引入的误差最终将体现在时钟同步误差的均值上. 在这里, 设定

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_\theta^2 & 0 \\ 0 & \sigma_\alpha^2 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R} = \sigma_{\theta_M}^2 \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{2}}{\Delta T} \\ \frac{\sqrt{2}}{\Delta T} & \frac{2}{(\Delta T)^2} \end{bmatrix}.$$

由此, 卡尔曼滤波器的迭代算法过程可以描述成如式(11)、(12):

$$\tilde{\mathbf{x}}(k|k-1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k-1), \quad (11)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k-1)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}. \quad (12)$$

式(13)~(15)为更新过程:

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T[\mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}, \quad (13)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}(k) = \tilde{\mathbf{x}}(k|k-1) + \mathbf{K}(k)[\mathbf{y}(k) - \tilde{\mathbf{x}}(k|k-1)], \quad (14)$$

$$\mathbf{P}(k) = [1 - \mathbf{K}(k)]\mathbf{P}(k|k-1). \quad (15)$$

## 3 实验结果分析

在这一部分, 基于不同观测噪声条件, 主要分析主从时钟之间, 时钟偏移和时钟偏移率估计误差平均值和标准差的变化趋势.

在仿真实验中, 时钟模型(式(3)、(4))用来仿真不精确时钟, 最小步长是  $10^{-6}$  s, 远远小于时钟同步周期  $\Delta T$  (在仿真实验中  $\Delta T = 0.1$  s),  $\Delta T$  同样是卡尔曼滤波器进行迭代算法的周期.

模拟了 2 组不同的时钟, 相对稳定的时钟 ( $\sigma_\alpha^2 = 10^{-18}$ ,  $\sigma_\theta^2 = 10^{-14}$ )<sup>[13]</sup> 和相对不稳定的时钟 ( $\sigma_\alpha^2 = 10^{-16}$ ,  $\sigma_\theta^2 = 10^{-12}$ )<sup>[14]</sup>. 这 2 组时钟分别在基于卡尔曼滤波器和不使用卡尔曼滤波器的 PTP 时钟同步算法中, 通过改变观测噪声(从时钟做时间标记的不确定性, 即  $\sigma_{\text{STS}}$ , 变化区间为  $[10^{-8}, 10^{-4}]$ , 跨越 4 个数量级, 反映不同时间标记机制引起的时延.  $\sigma_{\text{STS}}$  较小时, 对应于基于硬件的时间标记, 这时时钟偏移主要受频率偏移和初始的  $\theta_0$  影响;  $\sigma_{\text{STS}}$  越大则对应于基于软件的时间标记. 基于卡尔曼滤波的时钟将提高时钟同步的精度, 因为它是基于当前

观测噪声的最优估计). 在仿真实验中, 着重比较  $\sigma_{\text{STS}}$  对算法的性能的影响.

对于时间同步的精确度的衡量, 采用了时钟偏移的估计误差和时钟扭曲率估计误差这 2 项指标, 分别用估计误差的均值和估计误差的方差来表示.

图 3、4 反应了在不同  $\sigma_{\text{STS}}$  取值下, 主从时钟在时钟偏移(offset) 和时钟偏移率(skew) 估计误差均值的变化趋势, 体现了时钟可靠性的变化规律.

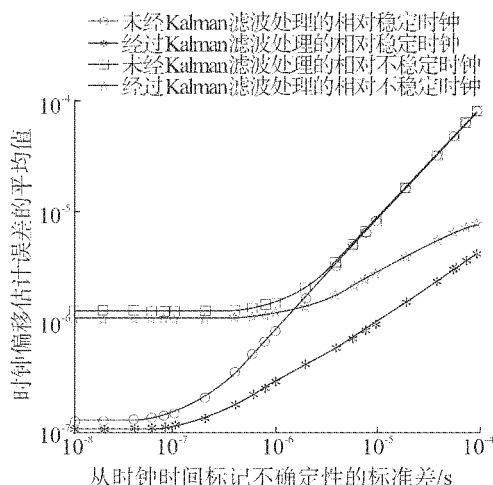


图3 时钟偏移估计误差的平均值

Fig.3 Offset estimation error mean

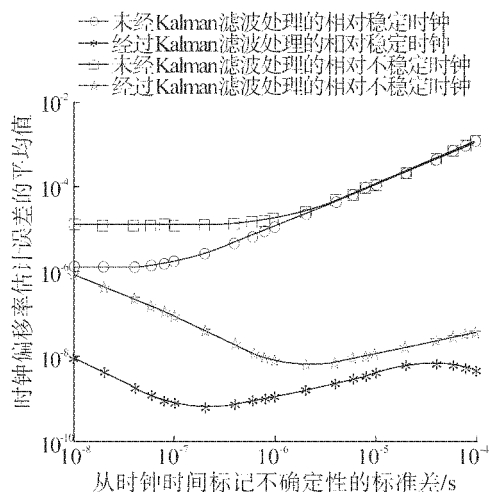


图4 时钟偏移率估计误差的平均值

Fig.4 Skew estimation error mean

由图 3 可知, 随着时间标记不确定性的增加, 时钟偏移估计误差均值在 2 种算法模式下均呈现增加趋势, 但基于卡尔曼滤波器的 PTP 算法的均值明显小于无卡尔曼滤波器的 PTP 算法. 针对不同的时钟类型, 可以看出相对稳定时钟, 在不同算法模式下其估计误差均值均低于相对不稳定时钟. 但同样可以看出同一时钟在 2 种算法模式下, 当时间标记不

确定性很小时, 时钟偏移估计误差均值差别不显著, 但随着时间标记不确定性增大, 基于卡尔曼滤波器伺服的 PTP 算法的优势则十分显著.

由图 4 知, 随着时间标记不确定性的增加, 时钟偏移率估计误差均值在无卡尔曼滤波器的算法模式下呈现显著增大趋势, 但在基于卡尔曼滤波器的 PTP 算法模式下, 估计误差均值则表现出相对的稳定性, 且明显小于无卡尔曼滤波器的 PTP 算法. 针对不同的时钟类型, 可以看出相对稳定时钟, 在不同算法模式下其估计误差均值均低于相对不稳定时钟.

由图 5 可知, 随着时间标记不确定性的增加, 时钟偏移估计误差的标准差在 2 种算法模式下均呈现增加趋势, 但基于卡尔曼滤波器的 PTP 算法的标准差明显小于无卡尔曼滤波器伺服的 PTP 算法. 针对不同的时钟类型, 可以看出, 相对稳定时钟, 在不同算法模式下其估计误差的标准差均低于相对不稳定时钟. 但同样可以看出, 同一时钟在 2 种算法模式下, 当时间标记不确定性很小时, 时钟偏移(offset) 估计误差的标准差差别不显著, 但随着时间标记不确定性增大, 基于卡尔曼滤波器的 PTP 算法的优势显著.

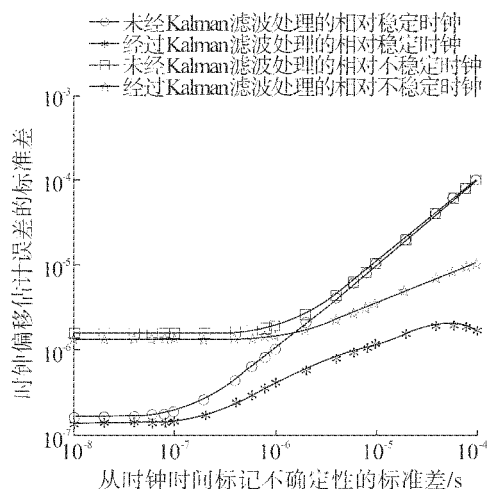


图5 时钟偏移估计误差的标准差

Fig.5 Offset estimation error standard deviation

由图 6 可知, 随着时间标记不确定性的增加, 时钟偏移率估计误差的标准差在无卡尔曼滤波器的模式下呈现显著增大趋势, 但在基于卡尔曼滤波器的 PTP 模式下, 估计误差的标准差则表现出相对的稳定性, 且明显小于无卡尔曼滤波器伺服的 PTP 算法. 针对不同的时钟类型, 可以看出相对稳定时钟, 在不同算法模式下其估计误差的标准差均低于相对不稳定时钟. 值得注意的是, 图 6 中时钟偏移率估计误差的标准差在前一段存在一变小趋势, 这需要更

加精确的理论推导证明。

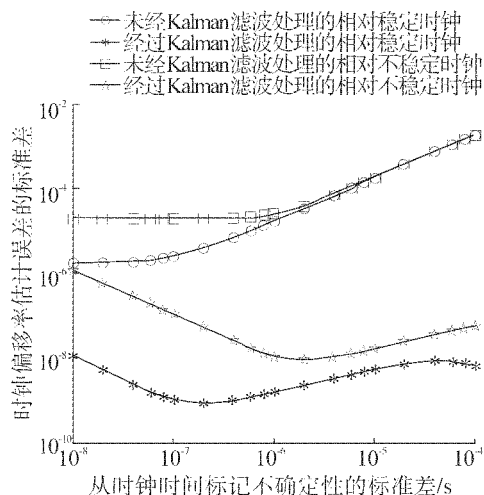


图6 时钟偏移率估计误差的标准差

Fig. 6 Skew estimation error standard deviation

主从时钟时钟偏移和时钟偏移率估计误差均值和标准差反映了时钟同步算法的精度和稳定性。综合图3~6可知,基于卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法对主从时钟在时钟偏移和时钟偏移率的估计,无论是精度还是稳定性,均优于无卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法。但是,当观测噪声比较小,即从时钟时间标记不确定性非常小时(比如,  $\sigma_{\text{STS}} = 10^{-8}$  s),基于卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法优势不显著,而随着观测噪声逐步增大时,基于卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法优势则愈发显著。因此,基于卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法比较适用于观测噪声较大的应用中。标准的无线传感器网络节点时钟之间标记不确定性的标准差  $\sigma_{\text{STS}}$  在  $10^{-5}$  左右<sup>[15]</sup>。由图3~6可以看出,当观测噪声处于这一量级时,基于卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法优势已十分显著。因此,基于卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法适用于无线传感器网络的应用。

根据仿真实验结果(图3~6)可知,稳定性不同的2类时钟,在2种不同时钟同步算法模式下,当观测噪声较小时,比如  $\sigma_{\text{STS}} \leq 10^{-5}$  时,相对稳定的时钟的时钟同步精度和稳定性均优于相对不稳定的时钟。但是当观测噪声较大时,比如  $\sigma_{\text{STS}} > 10^{-5}$  时,则相对稳定的时钟的时钟同步精度和稳定性相对不稳定的时钟虽有优势,但趋于不显著,特别是在无卡尔曼滤波器的PTP时钟同步算法模式下。因此,可以得出结论,当观测噪声较大时,选择具有高稳定度(往往价格更高)时钟的无线传感器网络节点已无必要。

## 4 结束语

本文对基于卡尔曼滤波器的PTP时间同步算法进行了理论分析、建模和仿真,并与无卡尔曼滤波的PTP时间同步算法就时钟估计误差精度和稳定性进行比较研究。实验结果显示,基于卡尔曼滤波器的时间同步算法在精度和稳定性上有明显的优势,并为在真实物理环境中配置无线传感器网络提供了参考,比如在不同噪声环境下,节点时钟精度的选择等。

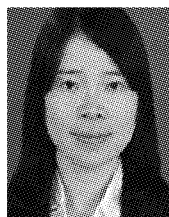
## 参考文献:

- [1] SUNDARARAMAN B, BUY U, KSHEMKALYANI A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey[J]. *Ad Hoc Networks*, 2005, 3(3): 281-323.
- [2] CAPKUN S, CAGALJ M, SRIVASTAVA M. Secure localization with hidden and mobile base stations[C]// *Proceedings of 25th IEEE International Conference on Computer Communications*. Barcelona, Spain, 2006: 1-10.
- [3] MUDUMBAI R, BARRIAC G, MADHOW U. On the feasibility of distributed beamforming in wireless networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007, 6(5): 1754-1763.
- [4] LIU Q, LIU X, ZHOU J, et al. Adasynch: a general adaptive clock synchronization scheme based on Kalman filter for WSNs[J]. *Wireless Personal Communications*, 2012, 63(1): 217-239.
- [5] GANERIWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]// *The First ACM Conference on Embedded Networked Sensor System*. New York, USA, 2003: 138-149.
- [6] MAROTI M. The flooding time synchronization protocol[C]// *Proc 2nd ACM Conf Embedded Networked Sensor Systems*. New York, USA, 2004: 39-49.
- [7] PING S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks IRB-TR-03-013[R]. Berkeley: Intel Research, 2003.
- [8] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]// *Proc fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation*. New York, USA, 2002: 147-163.
- [9] ZENG Y, HU B, LIU S. Vector Kalman filter using multiple parents for time synchronization in multi-hop sensor networks[C]// *Proc of the IEEE SECON*. San Francisco, USA, 2008: 413-421.
- [10] EIDSON J C, FISCHER M, WHITE J. IEEE 1588 standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]// *IEC 61588*

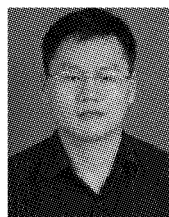
(E):2004-IEEE Std. 1588(E), 2002.

- [11] GALLEANI L, SACERDOTE L, TAVELLA P, et al. A mathematical model for the atomic clock error[J]. Metrologia, 2003, 40(3): 257-264.
- [12] HAMILTON B R, MA X, ZHAO Q, et al. Aces: adaptive clock estimation and synchronization using Kalman filtering [C]//Proceedings of the 14th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA, 2008: 152-162.
- [13] ABUBAKARI H, SASTRA S. IEEE 1588 style synchronization over wireless link[C]//Proc IEEE ISPCS. Ann Arbor, USA, 2008: 127-130.
- [14] BARENDT N, CORRELL K, BRANICKY M. Servo design considerations for software-only implementations of the precision time protocol[C]//ISPCS. Zurich, Switzerland, 2005: 10-12.
- [15] SAVVIDES A, HAN C, SRIVASTAVA M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors[C]//Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. New York, USA, 2001: 166-179.

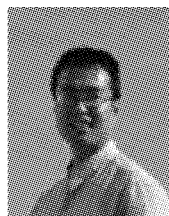
#### 作者简介:



叶玲,女,1988年生,硕士研究生,主要研究方向为无线传感器网络。



李太华,男,1977年生,副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能信号处理、无线传感器网络。



代学武,男,1976年生,副教授,硕士生导师,主要研究方向为智能信号处理、无线传感器网络。

## 《计算机研究与发展》征订启事

《计算机研究与发展》(Journal of Computer Research and Development)是中国科学院计算技术研究所和中国计算机学会联合主办、科学出版社出版的学术性刊物,中国计算机学会会刊。创刊于1958年(月刊),是中国第一个计算机刊物。主要刊登计算机科学技术领域高水平的学术论文、最新科研成果和重大应用成果以及技术进展。反映计算机领域内的新理论、新思想、新技术、重大科研任务的突破创新,是专业性很强的学术刊物。

《计算机研究与发展》历次被评为我国计算机类核心期刊,多次被评为中国百种杰出学术期刊。是本领域最有影响力的学术期刊之一。此外,还被美国工程索引(EI)检索系统、日本《科学技术文献速报》、俄罗斯《文摘杂志》、英国《科学文摘》(SA)、《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文索引》、“中国科学引文数据库”、“中国科技论文统计源数据库”等重要检索机构收录。所投稿件无论录用与否均经过同行专家的严格评审,读者对象为从事计算机研究与开发的研究人员、工程技术人员、各大专院校计算机相关专业的师生以及高新企业研发人员等。

国内邮发代号:2-654;国外发行代号:M603

国际标准连续出版物号:ISSN1000-1239

国内统一连续出版物号:CN11-1777/TP

联系方式:100190 北京海淀区中关村科学院南路6号《计算机研究与发展》编辑部

电话: +86(10)62620696(兼传真); +86(10)62600350

E-mail: crad@ict.ac.cn

http://crad.ict.ac.cn