

面向多跳无线传感网的 IEEE 1588 PTP 时间同步优化*

吴论生¹, 吕保强²

(1. 重庆青年职业技术学院, 重庆 400712; 2. 广东水利电力职业技术学院, 广州 510925)

摘要:有关时间同步的文献,以及作者之前的研究工作,均表明基于卡尔曼滤波的 IEEE 1588 PTP 在单跳时间同步中有很高的同步精度和稳定性。在 OMNet++ 仿真平台上,验证了基于卡尔曼滤波的 IEEE 1588 PTP 在多跳无线传感器网络中的性能,仿真结果表明:在多跳无线传感器网络中,相比于无卡尔曼滤波伺服的 IEEE 1588 PTP,基于卡尔曼滤波的 IEEE 1588 PTP 有更高的同步精度和稳定性,更少的误差传递性,此外,对不同时钟的性能分析也表明:基于卡尔曼滤波的 IEEE 1588 PTP 在真实的无线传感器网络中有更好的适应性能。

关键词:时间同步;卡尔曼滤波;IEEE1588 PTP;OMNet++;多跳无线传感器网络

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2016)03-0107-08

在分布式系统中,无线传感器网络中的许多应用^[1]依赖于时间同步^[2],譬如,森林火灾预警、数据融合和远程医疗检测等。无线传感器网络的时钟节点通过晶体振荡器和中断机制实现,然而时钟节点的精度容易受到制造误差、温度变化和中断延迟的影响^[3],此外,由于无线节点在能源、计算资源和计算能力等方面的限制以至于在无线传感器网络中很难实现高精度的时间同步^[4]。因此,获取高精度的时间同步,改善同步的性能,是一项极具有意义的工作。

对于有线包交换的网络,传统的 Network time protocol(NTP)^[5]已经在互联网中得到了广泛应用,然而,即使是在理想的条件下,在无线传感器网络中,NTP 协议的时间同步精度只达到了毫秒级,对于部分工业无线网络,这远不能满足其对时间同步精度的高要求。目前已经提出了多种无线传感器网络环境下的时间同步协议,如 Flooding time synchronization protocol (FTSP)^[6], Timing-sync protocol for sensor networks (TPSN)^[7], Reference broadcast synchronization (RBS)^[8], Delay measurement time synchronization (DMTS)^[9],然而,它们都未能在能效和精度上进行充分的优化^[10]。因此,在无线传感器网络中,有必要对时间同步协议进行大量研究,针对该问题,IEEE1588 精确时间同步协议于 2002 年被提出 (Precision time synchronization protocol, PTP)^[11]。该协议的时间同步精度能够控制在微秒级,远高于 NTP、FTSP 等。

无线传感器网络的节点能量有限,因此,使用多跳无线传感器网络就显得很有必要,在多跳无线网络中,各节点既可以是网络的路由节点,也可以是数据的终端节点。近年来,越来越多的研究者开始关注多跳无线传感器网络中的时间同步,且许多的时间同步机制已被陆续提出。在无线传感器网络中,肖海涛等人提出了针对疾病检测系统的多跳时间同步算法,该算法的主要目的是减少网络的能量消耗^[12]。用于水下声学网络的多跳时间同步算法已被提出^[13]。在多跳无线传感器网络中,V. Kaseva 等人提出了基于延迟的时间同步协议,该协议被用来计算数据包在主从节点间的延迟^[14]。文献[15]提出了基于集群的异构无线传感器网络的时间同步算法。杨玉景等人在 Matlab 的平台上构建数学模型,研究了基于 Kalman 滤波器的 PTP 多跳时间同步^[16]。但是,提出的这些算法均不能获得足够高的时间同步精度,且缺乏对多跳时间同步的真实仿真。因此,作者在一个开源的多协议网络仿真软件 OMNet++^[17]上开发了由 3 个节点构成的多跳无线传感网络的 IEEE1588 PTP 仿真器,该仿真器使得作者能够更好地研究复杂网络下的多跳时间同步协议的性能,并可以通过大量的接近于真实的无线传感器网络的仿真来研究多跳时间同步的性能。

* 收稿日期:2015-02-10 修回日期:2015-11-03 网络出版时间:2016-04-29 18:34

资助项目:国家自然科学基金(No. 61101135)

作者简介:吴论生,男,讲师,研究方向为光通信,E-mail: 1148501505@qq.com

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.n.20160429.1834.012.html>

在本文中,作者提出了把 IEEE1588 PTP 应用于多跳无线传感器网中,建立了时间同步的状态空间模型、将时间同步转化为状态空间中对未知状态的估计问题,在提出的动态观测器零极点配置基础上,引入卡尔曼滤波器滤波技术(Kalman filter, KF),可以有效地抑制观测噪声,提高时间同步精度,增强健壮性,探讨了基于卡尔曼滤波的 IEEE1588 PTP 在多跳无线传感器网络中的适应性和拓展性,并进行了 OMNeT++ 仿真,为多跳时间同步提供理论依据和技术基础,进而建立一个有效的多跳时间同步系统模型。

1 时钟建模

无线传感器网络中的节点时钟由晶体振荡器与计数器构造而成,在实际的应用中,晶体振荡器存在着频率漂移,即实际频率通常与标称频率之间存在着微小的偏差。频率漂移可能是由晶体不纯净而引起的,也可能是由温度、压力和空气湿度等外界环境因素发生变化引起的,为了减小晶体振荡器存在的偏差,有必要对时钟进行建模,以便通过观测值对时钟模型进行修正,提高时钟同步精度。

$\theta(t)$ 表示从节点在基准时间 t 的时钟偏移(Offset),它被定义为从时钟 $C(t)$ 与主时钟 t 之间的偏差:

$$\theta(t) = C(t) - t. \quad (1)$$

$\alpha(t)$ 表示时钟偏移率(Skew),它是本地时钟频率与基准时钟频率之间的偏差,表示为:

$$\alpha(t) = \frac{dC(t)}{dt} - 1. \quad (2)$$

时钟偏移率由 PPM(Parts per million)来表示。对于精确时钟,即 $\alpha(t) = 0$,从时钟与基准时钟间只有初始偏差;对于不精确时钟,即 $\alpha(t) \neq 0$,时钟偏移随着时间的推移,会逐渐积累而变大。在仿真中,时钟通过“SKM”(Simple skew model)模型来建模^[18],时钟偏移和时钟偏移率的变化被视为随机过程,因此它们的状态方程可以写成:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \alpha(k)\tau(k) + \omega_\theta(k), \quad (3)$$

$$\alpha(k+1) = \alpha(k) + \omega_\alpha(k), \quad (4)$$

其中, k 表示在第 k 次的时钟同步更新, $\tau(k)$ 为时钟更新间隔, $\omega_\theta(k)$ 表示时钟偏移的白噪声; $\omega_\alpha(k)$ 表示时钟偏移率的白噪声。通常认为 $\omega_\theta(k)$ 和 $\omega_\alpha(k)$ 是两个不相关的高斯白噪声^[19], 方差分别为 σ_θ^2 和 σ_α^2 。

需要指出的是,当每更新一次时钟偏移和时钟偏移率时,同时也要更新从时钟。所以从时钟在每一个时钟更新间隔 $\tau(k)$ 中都会进行更新。在模型中,为了使时钟模型更接近于真实的系统,时钟更新间隔 $\tau(k)$ 的值在 omnetpp.ini 文件中设定为 10^{-4} s, 时钟同步间隔 ΔT 设定为 0.1 s。

2 PTP 时间同步的状态空间建模

2.1 时钟偏移观测方程建模

PTP 协议^[11] 是主从时间同步协议,基本原理是:主节点首先发送一个 Sync 包,紧接着发送包含了时间戳 t_1 的 Followes_Up 包给从节点。当从节点接收到 Sync 包时,就会立即记录下它的达到时间 t_2 , 并通过解析 Followes_Up 包中的数据信息来获取时间 t_1 。当从节点接收到 Sync 包,就会立即发送一个 Delay_Req 包给主节点,并记录下该包的发送时间 t_3 。

由于从节点在处理 Sync 和 Delay_Req 包时会受到 CPU 中断、缓存和 MAC 避退等因素的影响,因此时间戳 t_2 和 t_3 之间常会存在一个传输延迟 d_{ms} 。当从节点在发送 Delay_Req 包给主节点时,也同样会产生一段传输延迟 d_{sm} 。当主节点在 t_4 时刻接收到 Delay_Req 包时,就会立即将时间戳 t_4 嵌入到 Delay_Resp 包中,并发送给从节点。PTP 中的时间包交换过程如图 1 所示。这样,在从节点之中就有了 4 个时间戳,分别是: t_1, t_2, t_3 和 t_4 。他们之间的关系如下:

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

式中 n 代表第 n 次时间同步时刻, θ 为主节点和从节点之间的时钟偏移,将其看作待求解的未知量,解方程组 (5), 可得到:

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

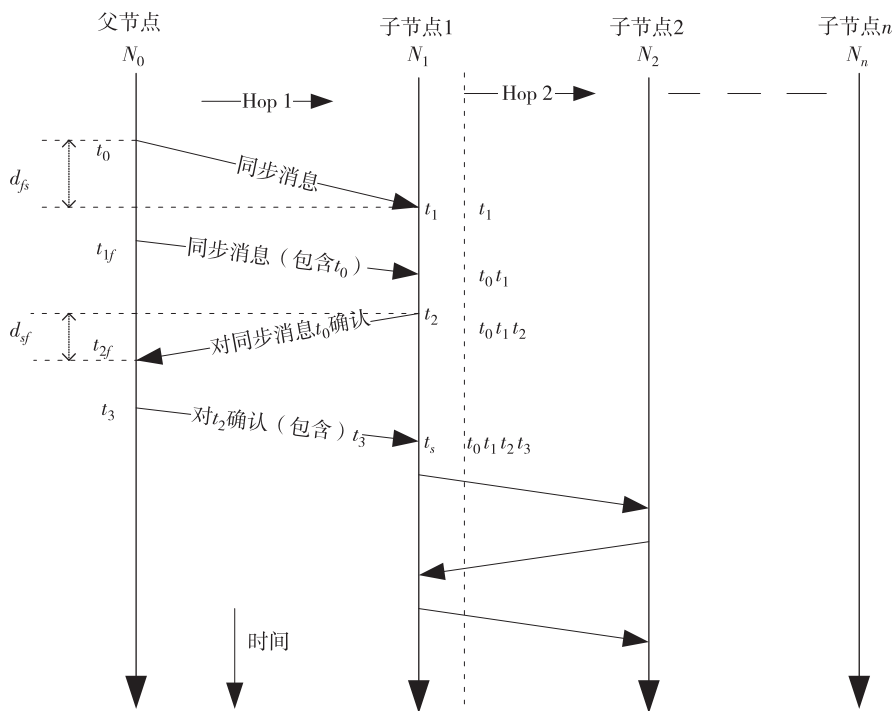


图 1 PTP 协议时间包交换过程

Fig. 1 Timing diagram of message exchange by PTP

(6)式是时钟偏移的观测方程,由于传输延迟的不对称和时间戳获取中的处理延迟等因素,观测的时钟偏移 θ_M 与真实的时钟偏移 θ 之间有一个差量 $\frac{(d_{sm} - d_{ms})}{2}$ 。因此,从本质上来看,PTP 估计得到的时钟偏移实际上是 $\theta_M(n)$,它是一个带有观测误差的测量值。

在 IEEE 1588 PTP 标准中,主从节点之间的传播延迟对称,即 $d_{ms} = d_{sm}$,且没有时钟偏移的观测误差。然而,真实的无线传感器网络由于受到无线媒体碰撞、共享等因素的影响,主从节点间的传播延迟常常不对称,即 $d_{ms} \neq d_{sm}$ 。因此,由 PTP 估计的时钟偏移存在一个传输延迟不对称造成的误差项:

$$\Delta d(n) = \frac{d_{sm}(n) - d_{ms}(n)}{2} \tag{7}$$

2.2 时间戳不确定性对 PTP 观测值 θ_M 的影响

进一步考虑由于 CPU 中断处理时延等因素造成的时间戳不确定性,在主从节点的时钟观测值 t_i 中,可能会存在一定的时间标记误差 Δt_i ($i=1,2,3,4$),即在 t_1, t_2, t_3 和 t_4 时刻由 PTP 获得的时间戳的实际值分别是 $t_1 + \Delta t_1, t_2 + \Delta t_2, t_3 + \Delta t_3$ 和 $t_4 + \Delta t_4$ 。于是在第 n 次时间同步时刻时,时钟偏移 $\theta(n)$ 的真实值应该是:

$$\theta(n) = \frac{[t_2(n) - \Delta t_2(n)] - [t_1(n) - \Delta t_1(n)]}{2} - \frac{[t_4(n) - \Delta t_4(n)] - [t_3(n) - \Delta t_3(n)]}{2} + \frac{d_{sm}(n) - d_{ms}(n)}{2} \tag{8}$$

将(7)式代入(6)式,并联合(8)式可以得到:

$$\theta(n) = \theta_M(n) - \frac{\Delta t_2(n) + \Delta t_3(n)}{2} + \frac{\Delta t_1(n) + \Delta t_4(n)}{2} + \Delta d(n) \tag{9}$$

对(9)式进行整理可以得到:

$$\theta_M(n) = \theta(n) + v_{\theta_M}(n) \tag{10}$$

其中 v_{θ_M} 为时钟偏移 θ 的观测噪声,则 v_{θ_M} 可表示为:

$$v_{\theta_M}(n) = -\left(\frac{\Delta t_2(n) + \Delta t_3(n)}{2} - \frac{\Delta t_1(n) + \Delta t_4(n)}{2} + \Delta d(n)\right) \tag{11}$$

分析了影响时间戳不确定性的因素之后,可知观测噪声 v_{θ_M} 包括两部分:时间戳标记误差 Δt_i 与传播时延不对称性 Δd 。其中, Δt_1 和 Δt_4 是主时钟的盖戳的不确定性, Δt_2 和 Δt_3 是从时钟的盖戳的不确定性。

2.3 时钟偏移率观测方程建模

假设时间标记的不确定性是零均值的独立高斯随机变量,主节点时间戳标记的不确定性 Δt_1 和 Δt_2 的方差是 σ_{MRS}^2 ,从节点时间戳标记的不确定性 Δt_3 和 Δt_4 的方差是 σ_{STS}^2 。由于 $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ 和 Δt_4 是独立的高斯随机变量, v_{θ_M} 是这 4 个独立随机变量之和,因此 v_{θ_M} 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。

$$\sigma_{\theta_M}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{MRS}^2 + \sigma_{STS}^2 + \sigma_d^2) \tag{12}$$

因为 Δt_2 和 Δt_3 的均值不等于零,所以 v_{θ_M} 的均值也是不等于 0,而是 Δt_2 均值和 Δt_3 均值之和。在 PTP 标准中,假定在一次时间同步周期中的时钟偏移保持不变,于是可以通过时钟偏移的观测值 θ_M 计算出时钟偏移率 $\alpha_M(n)$,则 $\alpha_M(n)$ 的观测方程可以表示为:

$$\alpha_M(n) = \frac{\theta_M(n) - \theta_M(n-1)}{\Delta T} \tag{13}$$

同理,能够获得 α_M 的观测噪音的方差为:

$$\sigma_{\alpha_M}^2 = 2 \left(\frac{\sigma_{\theta_M}}{\Delta T} \right)^2 \tag{14}$$

需要注意的是,因为 $\alpha_M(n)$ 是由从时钟偏移的观测值中计算得到的,所以观测噪音 v_{α_M} 与 v_{θ_M} 是相关的,他们的协方差是:

$$\text{Cov}(v_{\alpha_M}, v_{\theta_M}) = \text{Cov}(v_{\theta_M}, v_{\alpha_M}) = \sqrt{2} \frac{\sigma_{\theta_M}^2}{\Delta T} \tag{15}$$

v_{θ_M} 的自协方差是:

$$\text{Cov}(v_{\theta_M}, v_{\theta_M}) = \sigma_{\theta_M}^2 \tag{16}$$

3 伺服时钟设计

在时钟校正机制中,为了实现从时钟与主时钟之间的时间同步。在第 n 次时间同步周期中通过输入参数 $\mu_\theta(n)$ 和 $\mu_\alpha(n)$ 修改当前时钟的时钟偏移和时钟偏移率。如图 2 所示,描述了伺服时钟工作的全过程,其中, t 是主节点发送同步报文的时间, $C(t)$ 为对应的从节点接收该报文的时间, $\mu_\theta(n)$ 为第 n 次时间同步中伺服时钟估计得到的时钟偏移校正量,为了实现从时钟与主时钟的时间同步,在每个同步时刻都要得到时钟偏移和时钟偏移率的校正量 $\mu_\theta(n)$ 和 $\mu_\alpha(n)$,假设在理想的情况下,将获得的时钟偏移的观测值 $\theta_M(n)$ 和时钟偏移率的观测值 $\alpha_M(n)$ 直接作为校正量来校正从时钟,如下:

$$\begin{cases} \mu_\theta(n) = \theta_M(n), \\ \mu_\alpha(n) = \alpha_M(n) \end{cases} \tag{17}$$

从图 2 可以看出,在第 $n+1$ 次时间同步发生时, $\theta(n)$ 已在第 n 次同步过程中得到了校正,其值实际上已经发生了改变,所以时钟偏移率的观测值的计算公式(13)已不够精确。因此,(3)式中前一次的值 $\alpha(n)$ 应该改写为 $(\alpha(n) - \mu_\alpha(n))$, (4)式中前一次的值 $\theta(n)$ 应该改写为 $(\theta(n) - \mu_\theta(n))$,因此根据(3)式和(4)式,在第 n 次时间同步中,时钟偏移和时钟偏移率可被写成如下关系式:

$$\theta(n+1) = \theta(n) - \mu_\theta(n) + [\alpha(n) - \mu_\alpha(n)]\Delta T + \omega_\theta(n), \tag{18}$$

$$\alpha(n+1) = \alpha(n) - \mu_\alpha(n) + \omega_\alpha(n). \tag{19}$$

4 多跳同步的卡尔曼滤波

假设基于主节点和从节点间交换时间包所获取的时间戳绝对精确,则通过 IEEE 1588 PTP 所获得的时钟偏移和时钟偏移率的观测值可以直接用于校正本地时钟以实现时间同步,如(17)式。然而,在实际的无线传感器网络中,由于时间标记的不确定性、传输延时等影响,所获取的时间戳通常不精确且不可靠。因此,有必要通过滤波器技术对其

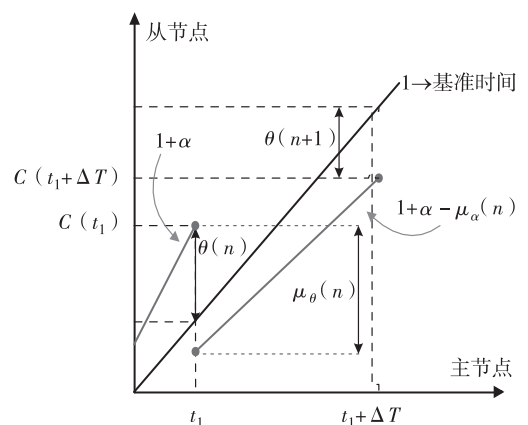


图 2 伺服时钟算法

Fig. 2 Algorithm of servo clock

进行预处理。在第二部分建立的递归时钟模型与同步协议模型的基础上,卡尔曼滤波器可以用来实现方程(18)和(19)的递归估计。为了使用卡尔曼滤波器,可将时钟状态方程(18)和(19)表示为矩阵形式:

$$\tilde{\mathbf{x}}(n) = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{x}}(n-1) + \mathbf{B} \boldsymbol{\mu}(n-1) + \boldsymbol{\omega}(n-1), \quad (20)$$

其中, $\boldsymbol{\mu}(n) = [\mu_\theta(n), \mu_\alpha(n)]^T$ 和 $\tilde{\mathbf{x}}(n) = [\theta(n), \alpha(n)]^T$ 分别为第 n 次时间同步时刻的输入控制向量和时钟状态向量, $\boldsymbol{\omega}(n) = [\omega_\theta(n), \omega_\alpha(n)]^T$ 为随机过程噪声, $\boldsymbol{\omega}(n)$ 服从 $N(0, \mathbf{Q})$ 正态分布, $\mathbf{A} = [1 \ \Delta T; 0 \ 1]$ 和 $\mathbf{B} = [-1 \ -\Delta T; 0 \ -1]$ 分别表示状态转移矩阵和输入控制矩阵。同理, (6) 式和 (13) 式分别对应于时钟偏移 $\theta_M(n)$ 和时钟偏移率 $\alpha_M(n)$ 的观测方程, 可以通过定义第 n 轮时钟观测向量 $\mathbf{y}(n) = [\theta_M(n), \alpha_M(n)]^T$ 来表示矩阵观测方程。

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{H} \tilde{\mathbf{x}}(n) + \mathbf{v}(n), \quad (21)$$

其中, $\mathbf{H} = [1 \ 0; 0 \ 1]$ 是测量系统的参数矩阵, 将真实状态空间映射到观测空间。 $\mathbf{v}(n) = [v_{\theta_M}(n), v_{\alpha_M}(n)]^T$ 是服从 $N(0, \mathbf{R})$ 正态分布的观测噪声。 $\mathbf{v}(n)$ 的零均值假设在实际应用中并不是一定成立, $\mathbf{v}(n)$ 的均值是一个与主节点和从节点有关的变量, 尽管这样, 开展卡尔曼滤波的前提是对 $\mathbf{v}(n)$ 进行零均值的假设, 而对于零均值假设所带来的误差最终将体现于时间同步误差的均值上。

卡尔曼滤波器递归算法过程如下:

$$\tilde{\mathbf{x}}(n|n-1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(n-1), \quad (22)$$

$$\mathbf{P}(n|n-1) = \mathbf{A} \mathbf{P}(n-1) \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}, \quad (23)$$

其中, $\tilde{\mathbf{x}}(n|n-1)$ 是根据上一状态的最优结果进行状态预测的先验估计值。 $\mathbf{P}(n|n-1)$ 为先验估计误差协方差, $\mathbf{P}(n|n-1)$ 代表了第 $n-1$ 次时间同步时的后验估计误差的协方差。矩阵 \mathbf{Q} 为随机过程噪声协方差矩阵, 由于随机过程 $\omega_\theta(n)$ 和 $\omega_\alpha(n)$ 是相互独立的, 所以 \mathbf{Q} 为 2×2 的对角矩阵, 即:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_2^2 & 0 \\ 0 & \sigma_1^2 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

矩阵 $\mathbf{P}(n|n-1)$ 可以初始化为 \mathbf{Q} , 即 $\mathbf{P}(1|0) = \mathbf{Q}$ 。

卡尔曼滤波器增益矩阵 $\mathbf{K}(n)$ 的一般表达式表示如下:

$$\mathbf{K}(n) = \mathbf{P}(n|n-1) \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}(n|n-1) \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1} \quad (25)$$

其中, \mathbf{x} 为观测噪声协方差矩阵, 通过 (12) 式和 (14) 式中观测的不确定性来定义 \mathbf{x} 。

$$\mathbf{R} = \sigma_{\theta_M}^2 \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sqrt{2}}{\Delta T} \\ \frac{\sqrt{2}}{\Delta T} & \frac{2}{(\Delta T)^2} \end{bmatrix}. \quad (26)$$

卡尔曼滤波器的状态更新方程如下:

$$\tilde{\mathbf{x}}(n) = \tilde{\mathbf{x}}(n|n-1) + \mathbf{K}(n) [\mathbf{y}(n) - \tilde{\mathbf{x}}(n|n-1)], \quad (27)$$

$$\mathbf{P}(n) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(n)] \mathbf{P}(n|n-1). \quad (28)$$

通过卡尔曼滤波估计获得状态的估计值, 如 (27) 式, 通过 $\boldsymbol{\mu}(n) = \tilde{\mathbf{x}}(n)$ 对时钟模型进行校正, 最终实现从时钟与主时钟的时间同步。

5 多跳同步性能估计

5.1 仿真平台

在本节中, 作者在 OMNeT++ 网络仿真器上建立了一个由 3 个节点构成的多跳无线传感器网络, 来测试基于卡尔曼滤波的时钟模型的多跳时间同步性能。该网络的拓扑结构如图 3 所示。Master1 是第一跳时间同步的主节点, 即是 Slave1 要与之保持同步的主节点。Slave1 是第二跳时间同步的主节点, 即是 Slave2 要与之保持同步的主节点。需要指出的是 Slave1 既是第一跳时间同步的从节点, 也是第二跳的主节点。在仿真器中, 第一跳和

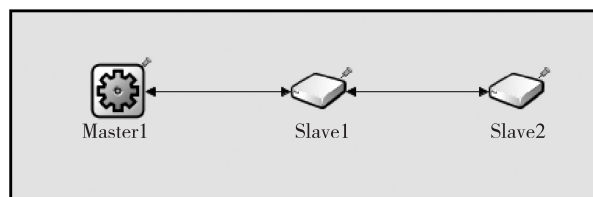


图3 多跳同步拓扑结构

Fig. 3 Multi-hop synchronization topology

第二跳的时间同步间隔 ΔT 设为相同, 每次时间同步中, 一跳时间同步开始时, 二跳时间同步也随之开始。在不同观测噪声条件下, 作者主要分析了主时钟与从时钟间, 时钟偏移和时钟偏移率标准差的变化趋势。

5.2 仿真结果

在仿真实验中, 时钟偏移和时钟偏移率的初始值分别是 0 s 和 10 PPM ; 在仿真实验中, 时钟模型((3),(4)式)被用来仿真不精确的时钟, 时钟更新间隔 $\tau(k)$ 被设定为 10^{-4} s , 其比时间同步间隔 ΔT ($\Delta T=0.1\text{ s}$) 少得多, ΔT 也是使用卡尔曼滤波器进行递归算法的周期。观测噪声(σ_{STS})的变化范围是 $[10^{-2}\sim 10^{-8}]$, 表示的是不同时间标记的机制所带来的时延。当 σ_{STS} 较小时, 对应的则是基于硬件的时间标记, 此时的时钟偏移主要受它的初始值和时钟偏移率的影响; 当 σ_{STS} 较大时, 对应的则是基于软件的时间标记, 这时的观测噪声比较大。

图 4 和图 5 比较了在相同时钟条件下, 对于分别使用卡尔曼滤波和不使用卡尔曼滤波的 PTP 中, 第一跳时间同步和第二跳时间同步的性能。

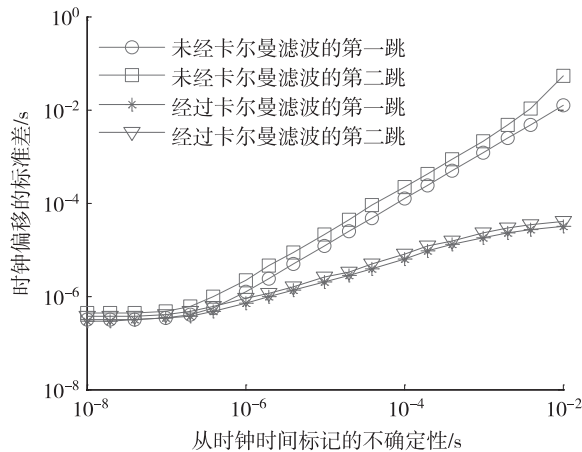


图 4 相同时钟的时钟偏移的标准差

Fig. 4 The offset standard deviation for the same clock

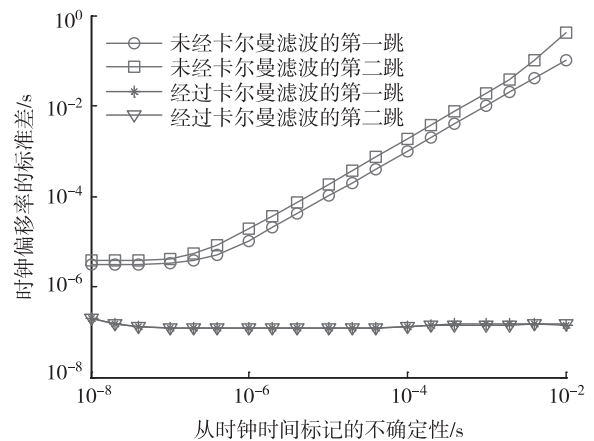


图 5 相同时钟的时钟偏移率的标准差

Fig. 5 The skew standard deviation for the same clock

由图 4 可知, 在第一跳和第二跳时间同步中, 基于卡尔曼滤波的时钟偏移标准差明显小于无卡尔曼滤波器伺服的值, 且无论是否使用卡尔曼滤波, 第二跳的时钟偏移标准差均大于第一跳的值, 这表明在多跳时间同步网络中出现了误差的传递性。同时, 在无卡尔曼滤波伺服的情况下, 第二跳的时钟偏移标准差明显大于第一跳的值; 然而, 在使用卡尔曼滤波的情况下, 第二跳的时钟偏移标准差略大于第一跳的值。

由图 5 可知, 随着时间标记不确定性的增加, 无卡尔曼滤波器伺服的时钟偏移率标准差也逐渐增大。然而, 使用卡尔曼滤波后, 时钟偏移率标准差则保持了相对稳定的状态, 且明显小于无卡尔曼滤波器伺服的值。同时, 在无卡尔曼滤波器伺服的情况下, 第二跳的时钟偏移率标准差明显大于第一跳的值; 然而, 在使用卡尔曼滤波的情况下, 第二跳的时钟偏移率标准差几乎与第一跳的值相同。

综合图 4 和图 5 的分析, 可以得出如下结论: 与无卡尔曼滤波器伺服的情况相比, 使用卡尔曼滤波的时间同步误差的传递性并不明显, 时钟同步精度得到的提高, 能更好地适应多跳时间同步网络。

在第二个仿真实验中, 作者模拟了两组不同的时钟, 相对稳定的时钟 Clock A ($\sigma_a^2 = 10^{-18}$, $\sigma_b^2 = 10^{-14}$)^[20], 相对不稳定的时钟 Clock B ($\sigma_a^2 = 10^{-16}$, $\sigma_b^2 = 10^{-12}$)^[21]。这两组不同的时钟分别使用于有卡尔曼滤波器伺服和无卡尔曼滤波器伺服的同步算法中, 通过改变观测噪声, 着重分析了基于 IEEE1588 PTP 在不同时钟间的多跳无线传感器网络中的的适应性和拓展性。

图 6 和图 7 比较了两种不同的应用情况, 一种是 Clock A 的第二跳的时间同步, 另一种是 Clock B 的第二跳的时间同步。

由图 6 可知, 在时间标记不确定性的范围中, 无论是 Clock A 还是 Clock B, 基于卡尔曼滤波的时钟偏移标准差均小于无卡尔曼滤波伺服的值, 且随着时间标记不确定性的增加, 这种差异会更加明显。

当时间标记的不确定性增大时, 例如 $\sigma_{STS} > 10^{-5}$, 在无卡尔曼滤波伺服的情况下, Clock A 和 Clock B 的时钟偏移标准差几乎相同; 而在使用卡尔曼滤波的情况下, Clock A 的时钟偏移标准差明显小于 Clock B 的值。同时, 作者还发现使用卡尔曼滤波的 Clock B 的时钟偏移标准差小于无卡尔曼滤波伺服的 Clock A 的值。

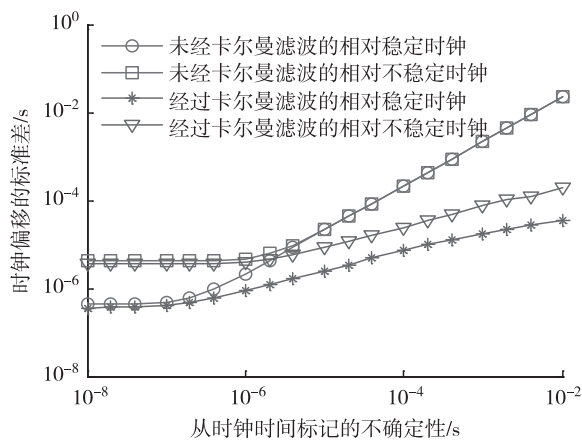


图6 不同时钟的时钟偏移的标准差

Fig. 6 The offset standard deviation for the different clock

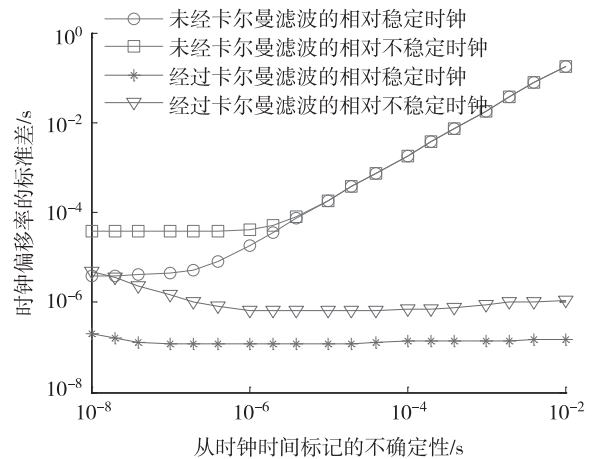


图7 不同时钟的时钟偏移率的标准差

Fig. 7 The skew standard deviation for the different clock

由图7可知,在无卡尔曼滤波伺服的情况下,如果出现更大的观测噪音,时钟偏移率标准差表现出明显增大的趋势;而使用卡尔曼滤波后,时钟偏移率标准差则会保持相对稳定,且明显小于无卡尔曼滤波伺服的值,Clock A和Clock B均是如此。此外,Clock A的时钟偏移率标准差明显小于Clock B的值。同时,作者还发现使用卡尔曼滤波的Clock B的时钟偏移率标准差小于无卡尔曼滤波伺服的Clock A的值。

综合图6和图7的分析,可以得出如下结论:由于无线传感网中各节点价格低廉,因此各节点的时钟大多数不稳定、不准确;另外,由于外界环境复杂,时间标记的不确定性较大。因此,对于无卡尔曼滤波伺服的无线传感器网络而言,使用稳定且精准的节点时钟(如Clock A)并不划算。然而,即使使用不稳定、不准确的时钟(如Clock B),也可以通过卡尔曼滤波获得更高的估计精度。因此,基于卡尔曼滤波的PTP在多跳无线传感器网络中具有良好的适应性和拓展性。

6 结语

在本文中,通过OMNet++的仿真来分析基于卡尔曼滤波器优化的IEEE 1588 PTP在多跳无线传感器网络中的性能,实验结果显示,相比于无卡尔曼滤波伺服的IEEE 1588 PTP,基于卡尔曼滤波器优化的IEEE 1588 PTP有着更高的时间同步精度,并能够抑制同步误差的传递,此外,针对不同时钟的无线传感器网络的性能分析也表明,卡尔曼滤波优化的IEEE1588 PTP在多跳无线传感器中有良好的适应性和稳定性。

参考文献:

- [1] 詹松,尼玛扎西,格桑多吉,等. ZigBee无线传感网络在西藏粮仓监测中的应用[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2014(8):92-97.
Tang S, Nima Z X, Gesang D J, et al. Application of Tibetan Granary monitoring research based on ZigBee wireless sensor network[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2014(8):92-97.
- [2] Sundararaman B, Buy U, Kshemkalyani A D. Clock synchronization for wireless sensor networks: a survey[J]. Ad Hoc Networks, 2006, 3(3):281-323.
- [3] Philips J, Kundert K. Noise in mixers, oscillators, samplers, and logic: An introduction to cyclo stationary noise [C]//in Proc IEEE CICC. Orlando, FL: IEEE, 2000: 431-438.
- [4] Shang F J. An energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of Networks, 2011, 6(7):999-1008.
- [5] Deeths D. Using NTP to control and synchronize system clocks, system clocks[M]. New York: Sun Micro-systems, Inc, 2001.
- [6] Maroti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol[C]//Proc 2nd ACM conf embedded networked sensor systems. New York: ACM, 2004:39-49.
- [7] Ganeriwala S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks[C]//The first ACM conference on embedded networked sensor system. New York: ACM, 2003: 138-149.
- [8] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]//Proc fifth symposium on operating systems design and implementa-

- tion. New York: Sun Microsystems, 2002: 147-163.
- [9] Ping S. Delay measurement time synchronization for wireless sensor networks[J]. Intel Research, 2003: 3-13.
- [10] Zeng Y, Hu B, Liu S. Vector Kalman filter using multiple parents for time synchronization in multi-hop sensor networks[C]//In Proc of the IEEE SECON. CA: San Francisco, 2008: 413-421.
- [11] IEEE 1588 Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems[S]. IEEE1588-2008 Standard, IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2008.
- [12] Xiao H, Lu C, Ogai H. A multi-hop low cost time synchronization algorithm for wireless sensor network in bridge health diagnosis system[J]. Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), 2012: 392-395.
- [13] Sun C, Yang F, Ding L. Multi-hop time synchronization for underwater acoustic networks[J]. IEEE Conference Publications, 2012: 1-7.
- [14] Kaseva V, Hamalainen T D. Time synchronization for resource-constrained multi-hop wireless sensor networks based on hop delay estimation[J]. The Fifth International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2011: 79-84.
- [15] Bao X U. Time synchronization for heterogeneous WSNs based on cluster[J]. Journal of Networks, 2013, 8(12): 2915-2921.
- [16] 杨玉景, 黄艺文, 李太华, 等. 多跳无线传感器网络下基于KF优化的PTP协议[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 174-179.
- Yang Y J, Huang Y W, Li T H, et al. Kalman filtering based precision time protocol (PTP) in multi-hop wireless sensor networks[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(2): 174-179.
- [17] Omnetpp. OMNeT++ release 4.1[EB/OL]. (2015-02-10). <http://www.omnetpp.org>.
- [18] 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): 152-159.
- [19] Rutman J, Walls F. Characterization of frequency stability in precision frequency sources[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(7): 952-960.
- [20] Barendt N, Correll K, Branicky M. Servo design considerations for software-only implementations of the precision time protocol[C]//in ISPCS. Switzerland: Zurich, 2005: 10-12.
- [21] Savvides A, Han C, Srivastava M. Dynamic fine-grained localization in ad-hoc networks of sensors[C]//In proceedings of the 7th annual international conference on mobile computing and networking. New York: ACM, 2001: 166-179.

Optimization of IEEE 1588 PTP for Multi-Hop Wireless Sensor Networks

WU Lunsheng¹, LÜ Baoqiang²

(1. Chongqing Youth Vocational & Technical College, Chongqing 400712;

2. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric, Guangzhou 510925, China)

Abstract: Literature on time synchronization, including our research work, show that IEEE 1588 PTP based on Kalman filter has high precision and stability of synchronization in peer to peer wireless sensor networks (WSNs). To validate the performance of the IEEE 1588 PTP based on Kalman filter in multi-hop WSNs simulated by OMNet++. The result show that, IEEE 1588 PTP based on Kalman filter has higher precision and stability of synchronization, smaller transitivity of synchronization error in multi-hop WSNs, compared with IEEE 1588 PTP without Kalman filter. Furthermore, the performance analyses of different node clocks shows that IEEE 1588 PTP based on Kalman filter has better adaptability for real WSNs.

Key words: time synchronization; Kalman filter; IEEE1588 PTP; OMNeT++; multi-hop WSNs

(责任编辑 游中胜)