

论文

基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络时间同步方法

王照伟^{①②③}, 郑萌^{①②}, 曾鹏^{①②*}, 李栋^{①②③}

① 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳 110016

② 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳 110016

③ 中国科学院大学, 北京 100049

* 通信作者. E-mail: zp@sia.cn

收稿日期: 2015-08-28; 接受日期: 2015-09-25; 网络出版日期: 2016-05-27

中国科学院战略性先导科技专项 (批准号: XDA06020500) 资助

摘要 考虑无线链路的非对称传播时延、中间节点的转发时延以及从节点的时钟源计时误差因素, 提出一种全新的基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络时间同步方法. 该方法首先建立主从时钟之间的时钟偏移以及时钟偏移率的状态空间模型, 然后基于此状态空间模型, 利用 Kalman 滤波方法对从节点的时间进行估计. 仿真结果表明, 本文的时间同步方法与现有工作相比具有更高的同步精度.

关键词 多跳无线网络 时间同步 Kalman 滤波 非对称时延 IEEE 1588

1 引言

目前, 多跳的组网方式在无线回程网络^[1]、无线自组织网络^[2]、无线传感器网络^[3]以及无线 Mesh 网络^[4]等多跳无线网络 (multi-hop wireless networks, MWNs) 中得到了广泛应用. 随着 MWNs 技术不断成熟, 应用对于 MWNs 也提出了高可靠性和高实时性等苛刻的性能要求. 精确的时间同步对于保证多跳无线网络的高实时性和高可靠性应用要求至关重要^[5,6]. 本文的时间同步旨在将网络节点的时间信息与网络主时钟源之间的偏差维持在足够小的范围^[7]. 然而, 由于网络工作环境的诸多不利因素 (如温度和湿度变化、电磁干扰、晶体老化等) 以及晶振的内在属性差异对晶振运行的巨大影响^[8~10], 网络中各个节点的晶振性能通常会不相同, 网络节点的时间也因此很难实现精确的同步.

目前, 可应用于 MWNs 中的时间同步方法有很多, 一般分为分布式时间同步方法和集中式时间同步方法. 分布式时间同步方法主要利用局部节点的时间信息达到网络内的相对同步, 但该方法无法提供外部时钟源, 且网络中存在的通信和处理不确定性时延不能保证算法最佳收敛. 如分别基于平均一致性和最大一致性理论的时间同步方法 ATS^[11]、MTS^[12]等. 在集中式时间同步方法中, 基于跳数的误差积累造成其可扩展性差, 而且需要额外的开销来维护网络结构. 如 FTSP^[13]方法使用泛洪时

引用格式: 王照伟, 郑萌, 曾鹏, 等. 基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络时间同步方法. 中国科学: 信息科学, 2016, 46: 777-788, doi: 10.1360/N112014-00342

间信息的方式实现源节点和普通节点之间的时间同步. 而 FCSEA^[14] 方法建立在 FTSP 方法的基础上, 通过对邻居节点的时间信息进行线性回归, 使得本地节点与邻居节点的时钟速率同步, 降低了因跳数增加引起的邻居节点之间的时间误差. 尽管关于多跳无线网络时间同步的研究有很多, 但并未出现相对统一的标准.

IEEE 1588^[15] 协议作为当前成熟的有线以太网时间同步协议, 单跳环境下其精度可达 50 ns. 同时, 又因为 IEEE 1588 协议是建立在 UDP/IP 协议之上的, 这使得利用 IEEE 1588 协议提升无线网络的时间同步精度成为可能. 但是, 实现 IEEE 1588 协议的高精度时间同步是以硬件时间戳为基础的, 而现有的无线芯片集成度很高, 不提供媒体独立接口 (media independent interface, MII) 以及开放的介质访问控制 (media access control, MAC) 层环境, 只能提供网络驱动层的软件时间戳技术^[7,16]. 所以, 直接将 IEEE 1588 协议应用到无线网络中的时间同步精度不高. 即使采用通过提高同步包发送速率补偿信道接入延迟的解决方法, 时间同步精度也只能达到毫秒的量级.

现有针对 IEEE 1588 协议的时间同步工作主要集中在补偿单跳网络的从时钟源计时误差^[17], 以及多跳环形以太网的时钟源量化误差补偿^[18], 透传时钟的时钟源计时误差补偿^[19], 非对称链路节点端时延补偿^[20,21], 以及基于软件时间戳的同步性能分析和误差补偿^[22,23]等. 其中, 文献 [17] 在建立模型时忽略了多跳环境下链路的非对称性问题, 所以该方法适用于单跳有线环境下的同步. 文献 [18] 则针对环形的有线网络拓扑结构, 考虑透传时钟节点的时钟源计时误差, 采用基于 PI 控制的 Kalman 滤波方法补偿该误差引起的报文驻留时间计时误差. 该方法在文献 [17] 的基础上, 提出了频率补偿的时钟模型, 并结合 PI 控制以及 Kalman 滤波设计时钟控制模型. 文献 [19] 则针对链状的网络拓扑结构下透传时钟的计时误差所引起的干扰进行补偿. 文献 [20] 则针对无线链路速率改变所引起的链路非对称性干扰, 利用同步信息包大小与传输速率的比值来替代报文时间值, 计算链路平均时延. 文献 [21] 中的从节点则通过多个主节点发送的冗余同步信息来计算和补偿链路的非对称性所引起的同步误差, 但该方法会增加网络中的通信开销. 文献 [22,23] 则分析当 IEEE 1588 协议应用到无线网络中时的误差来源, 同时文献 [22] 提出了时钟伺服系统补偿软件时间戳误差以及晶振误差.

不同于有线链路, 由于射频环境的高度动态特性, 无线链路的传播时延通常具有非对称性, 即数据在节点间上下行通信链路中的传播时延差具有不确定性^[17,24~26]. 加之多跳的特性, 多跳无线网络中的主从时钟源间的时间偏差将变得更加难以预测, 链路非对称传播时延已然成为阻碍多跳无线网络实现高精度时间同步的主要因素. 现有方法忽略了链路非对称传播的时延, 多跳无线网络的多跳方式将使得这种简单处理链路非对称性的方法弱点被累积放大, 导致较大的同步误差. 此外, 节点硬件老化等因素所造成的中间节点转发时延存在不确定性^[21], 也将影响时间同步的精度. 据笔者所知, 针对多跳无线网络中链路非对称传播时延和中间节点转发时延补偿的 IEEE 1588 时间同步协议研究, 目前还是空白.

针对上述问题, 本文首次提出一种基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络时间同步方法. 该方法对多跳无线网络的链路非对称传播时延以及中间节点转发时延进行补偿, 并考虑从节点的时钟源计时干扰影响, 得到从节点的近似时钟偏移和时钟偏移率状态空间模型, 并由此利用 Kalman 滤波^[17,27] 方法对从节点的时间进行估计. 仿真结果显示本文方法的时间同步误差精度明显优于现有的工作.

2 系统建模

考虑如图 1 所示的一个多跳无线网络, 在该网络中存在一个管理器节点 (master) 作为全网的主时钟节点. 主时钟节点可采用高精度的晶振源或引入全球定位系统 (global positioning system, GPS)

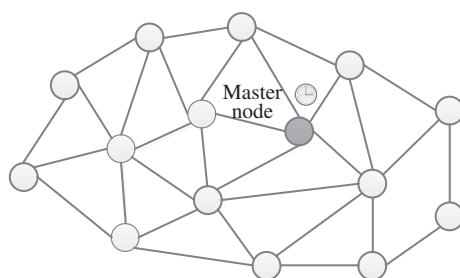


图 1 多跳无线网络结构
Figure 1 Structure of the MWNs

外部时钟作为时钟源. 网络中其他节点以单跳或者多跳的方式与主节点进行时戳信息包的交换, 期望实现与主时钟节点的时间同步.

然而, 报文的空间传播时延受射频环境的影响, 在多跳环境下产生累积误差, 造成主从时钟节点的上下行通信链路时延产生较大的不对称性^[17, 24~26], 严重影响二者之间的时间同步精度. 加之, 中间节点因报文信息的排队、处理以及硬件老化等因素造成上下行链路的转发时延不一致. 而且, 主从时钟节点间的时间同步精度也会受到节点本身的时钟源计时误差的干扰^[17, 18, 27]. 针对以上问题, 本文研究考虑无线链路的非对称传播时延、中间节点的转发时延以及从节点的时钟源计时误差因素的一种新型多跳无线网络时间同步方法.

2.1 时钟建模

首先针对时钟计时过程进行建模, 建立时钟偏移和时钟偏移率的状态转移方程.

(1) 连续时钟模型

主时钟通常可外接高精度的时钟源, 如 GPS 等, 因此可将主时钟作为理想时钟 t . 网络中的节点通常都有独立的内部时钟, 其本地时间都是根据晶振的输出脉冲来计算, 因此其时钟精度由晶振的精度决定. 由于节点的晶振受到环境变量的影响会产生偏移, 因此从时钟的本地时间 $S(t)$ ^[27] 表达式如下:

$$S(t) = \int_0^t \gamma(\tau) d\tau + \theta_0 + \varphi(t), \quad (1)$$

其中, $\gamma(\tau)$ 为从时钟的瞬时时钟斜率, θ_0 为主从时钟间的初始时钟偏移, $\varphi(t)$ 为时钟计时时刻的 Gauss 噪声.

于是, 主从时钟之间的时钟偏移, $\theta(t) = S(t) - t$, 即

$$\theta(t) = \int_0^t \alpha(\tau) d\tau + \theta_0 + \varphi(t), \quad (2)$$

其中, $\alpha(\tau) = \gamma(\tau) - 1$ 为主从时钟间的瞬时时钟偏移率.

(2) 离散时钟模型

在较短时间内, 时钟偏移的瞬时时钟偏移率为一定值. 将时钟偏移的连续模型离散化得到其离散模型, 即主从时钟的时钟偏移为

$$\theta[k] = \sum_{i=0}^{k-1} \alpha[i] \tau[i] + \theta_0 + \varphi[k], \quad (3)$$

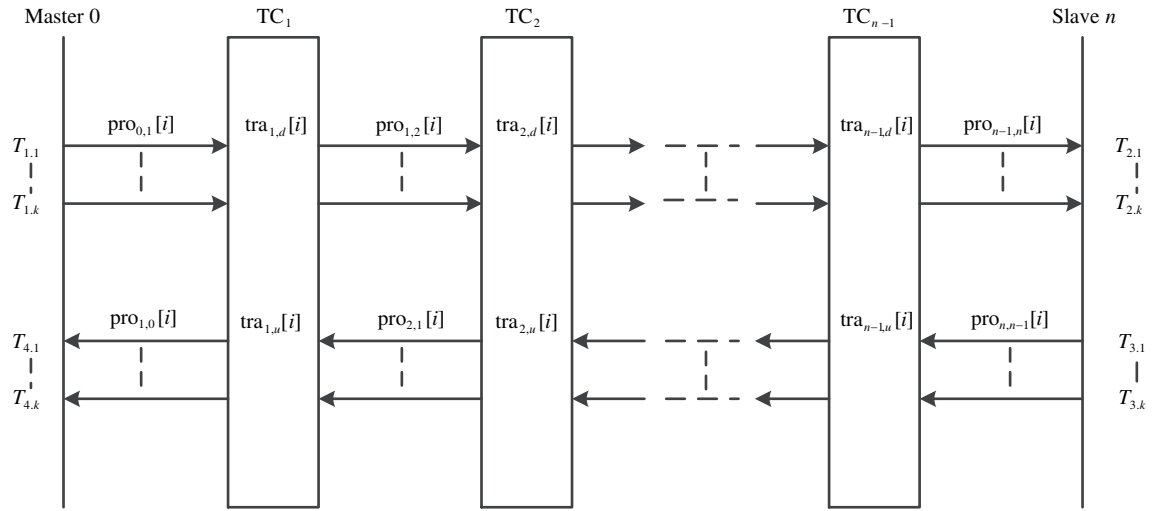


图 2 多跳无线网络中主从节点时戳信息包交换

Figure 2 Message exchange of the time-stamping between the master and the slave in MWNs

其中, $\alpha[i]$ 为时间段 $\tau[i]$ 内的瞬时时钟偏移率, θ_0 为初始时钟偏移, $\varphi[k]$ 为时间段 $\sum_{i=0}^{k-1} \tau[i]$ 内的干扰噪声.

基于式 (3), 进而得到时钟偏移的状态转移方程

$$\theta[k] = \theta[k - 1] + \alpha[k - 1]\tau[k - 1] + \omega_\theta[k], \quad (4)$$

其中, $\omega_\theta[k] = \varphi[k] - \varphi[k - 1]$ 为干扰 Gauss 噪声, 服从正态分布 $N(0, \sigma_\theta^2)$ [17].

假设时钟偏移率的状态转移为随机过程 [17], 则

$$\alpha[k] = \alpha[k - 1] + \omega_\alpha[k], \quad (5)$$

其中, $\omega_\alpha[k]$ 为干扰 Gauss 噪声, 服从正态分布 $N(0, \sigma_\alpha^2)$. $\omega_\theta[k]$ 与 $\omega_\alpha[k]$ 相互独立.

2.2 基于非对称时延补偿的协议建模

IEEE 1588 协议的基本原理 [15] 是从时钟通过与主时钟交换时戳信息包, 获得相应的时戳值, 根据计算得到与主时钟的时钟偏移 θ , 并调整本地时钟实现与主时钟的时间同步. 由于 IEEE 1588 协议建立在 UDP/IP 协议上, 所以网络中 IEEE 1588 设备和非 IEEE 1588 设备可以共存. 在这种混合的多跳网络结构中, 非 IEEE 1588 设备并不与主时钟设备同步, 因此从时钟与主时钟的通信链路中会存在非 IEEE 1588 设备. 当主从节点的通信链路中存在其他 IEEE 1588 设备时, 当前节点将链路中的上层从节点视为父节点, 并与其同步. 当主从节点的通信链路中只存在非 IEEE 1588 设备时, 即可将主从时钟的同步过程视为端到端的同步. 所以, 可以将 IEEE 1588 协议实施于多跳网络中.

在多跳无线网络中, 从节点通过至少一跳的距离与主节点进行时戳信息包交换, 如图 2 所示, 其中主节点号为 0. 当主从节点之间进行第 k 次时戳信息包交换时, $\text{pro}_{i,j}[k]$ 为节点 i 到 j 在第 k 次时戳信息包交换时的传播时延, $\text{tra}_{i,u}[k]$ 为上行链路中节点 i 的第 k 次转发时延, $\text{tra}_{i,d}[k]$ 为下行链路中节点 i 的第 k 次转发时延, $T_i[k]$ 为主 ($i=1, 4$)、从 ($i=2, 3$) 节点的第 k 次计时的时戳.

根据 IEEE 1588 的基本原理, 第 k 次时间同步过程中, 主从时钟间的时钟偏移 θ 的观测方程为

$$\theta_M[k] = \frac{(T_2[k] - T_1[k]) - (T_4[k] - T_3[k])}{2}, \quad (6)$$

其中, $T_i[k]$ 表示主从时钟在时戳信息包交换过程中得到的时戳值. 但由于上下行链路时延存在非对称性, 即 $T_2[k] = T_1[k] + \theta_M[k] + \text{Delay}_d[k]$, $T_4[k] = T_3[k] - \theta_M[k] + \text{Delay}_u[k]$, $\Delta d[k] = (\text{Delay}_d[k] - \text{Delay}_u[k]) \neq 0$, 所以时钟偏移 θ 的真实值为 $\theta_M[k] - \frac{\Delta d[k]}{2}$.

采用网络驱动层的软件时间戳, 则时戳信息包在传递中的链路时延 [25, 26]:

$$\text{Delay} = D_{\text{ace}} + D_{\text{pro}} + D_{\text{tra}} + D_{\text{trans}}, \quad (7)$$

其中, D_{ace} 为时戳信息包在 MAC 层的排队时延, D_{trans} 为物理层 (physical layer, PHY 层) 的传输时延, D_{pro} 为空间链路的传播时延, D_{tra} 为中间节点的转发时延.

采用优先级服务机制, 为时戳信息包赋予最高优先级, 则在中间节点转发过程中的时延 D_{tra} 的不确定性只与硬件性能有关, 即服从 Gauss 分布. 同时, 当选定 Wi-Fi 硬件设施, 物理层的信道传输速率以及时戳信息包的大小固定, 所以 PHY 层的传输时延 D_{trans} 是定值. 而且, MAC 层的排队时延 D_{ace} 可以根据网络信息进行预估计. 则, 从时钟 n 在与主时钟进行第 k 次时间同步过程中的链路时延为

$$\text{Delay}[k] = D_{\text{pro},n}[k] + D_{\text{tra},n}[k] = \sum_{i=1}^n \text{pro}_i[k] + \sum_{i=1}^{n-1} \text{tra}_i[k], \quad (8)$$

其中, $D_{\text{pro},n}[k] = \sum_{i=1}^n \text{pro}_i[k]$ 为第 k 次时间同步过程中的链路传播时延, $D_{\text{tra},n}[k] = \sum_{i=1}^{n-1} \text{tra}_i[k]$ 为第 k 次时间同步过程中的中间节点转发时延.

从时钟 n 与主时钟进行第 k 次时间同步时的链路非对称性:

$$\Delta d_n[k] = \sum_{i=1}^n \{\text{pro}_{i-1,i}[k] - \text{pro}_{i,i-1}[k]\} + \sum_{i=1}^{n-1} \{\text{tra}_{i,d}[k] - \text{tra}_{i,u}[k]\}. \quad (9)$$

由于空间电磁干扰, 射频环境的高度动态性, 以及节点处理过程中的芯片老化等本地干扰因素, 则有

$$\Delta \text{pro}_i[k] + \varphi_{\text{pro},i}[k] = \text{pro}_{i-1,i}[k] - \text{pro}_{i,i-1}[k], \quad (10)$$

$$\Delta \text{tra}_i[k] + \varphi_{\text{tra},i}[k] = \text{tra}_{i,d}[k] - \text{tra}_{i,u}[k], \quad (11)$$

其中, $\varphi_{\text{pro},i}[k]$ 和 $\varphi_{\text{tra},i}[k]$ 为 Gauss 干扰噪声 [26]. 由于节点间距离固定, 中间节点转发时延一定, 所以 $\Delta \text{pro}_i[k] = 0$ 和 $\Delta \text{tra}_i[k] = 0$. 将式 (10) 和 (11) 代入式 (9) 得

$$\Delta d_n[k] = \sum_{i=1}^n \varphi_{\text{pro},i}[k] + \sum_{i=1}^{n-1} \varphi_{\text{tra},i}[k]. \quad (12)$$

根据式 (12) 得到链路非对称性的状态转移方程:

$$\Delta d_n[k+1] = \Delta d_n[k] + \omega_{\Delta d_n}[k+1], \quad (13)$$

其中, $\omega_{\Delta d_n}[k+1] = \sum_{i=1}^n \omega_{\text{pro},i}[k] + \sum_{i=1}^{n-1} \omega_{\text{tra},i}[k]$, $\omega_{\text{pro},i}[k+1] = \varphi_{\text{pro},i}[k+1] - \varphi_{\text{pro},i}[k]$, $\omega_{\text{tra},i}[k+1] = \varphi_{\text{tra},i}[k+1] - \varphi_{\text{tra},i}[k]$. $\omega_{\text{pro},i}[k]$ 与 $\omega_{\text{tra},i}[k]$ 为相互独立的 Gauss 噪声, 且 $\omega_{\text{pro},i}[k]$ 服从正态分布

$N(0, \sigma_{\text{pro},i}^2)$, $\omega_{\text{tra},i}[k]$ 服从正态分布 $N(0, \sigma_{\text{tra},i}^2)$, $\omega_{\text{pro},i}[k]$ 与 $\omega_{\text{pro},j}[k]$ 相互独立, $\omega_{\text{tra},i}[k]$ 与 $\omega_{\text{tra},j}[k]$ 相互独立, 于是 $\omega_{\Delta d_n}[k]$ 服从正态分布 $N(0, \sum_{i=1}^n \sigma_{\text{pro},i}^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{\text{tra},n-i}^2)$.

由式 (6) 可知, 时钟偏移观测值 θ_M 的不确定性由主时钟和从时钟的计时不确定性 δ_t 和 $\delta_{S(t)}$ 组成, 且两者之间相互独立, 于是容易得到观测噪声 ω_{θ_M} 的方差为 $\sigma_{\theta_M}^2 = \frac{1}{2}(\sigma_{S(t)}^2 + \sigma_t^2)$. 其中, $\sigma_{S(t)}^2$ 为从时钟的计时噪声方差, σ_t^2 为主时钟的计时噪声方差. 由于主时钟为理想时钟源, 所以 $\sigma_t^2 = 0$.

根据相邻两次的时钟偏移值可得时钟偏移率的观测方程:

$$\alpha_M[k] = \frac{\theta_M[k] - \theta_M[k-1]}{\tau[k]}, \quad (14)$$

其中, $\tau[k]$ 为时间间隔, 则时钟偏移率的观测噪声方差为 $\sigma_{\alpha_M}^2 = \frac{2}{\tau[k]^2} \sigma_{\theta_M}^2$.

3 采用 Kalman 滤波实现时间估计

如第 1 节所述, 从时钟获得的时间信息具有较大的不确定性, 则直接通过观测值对从时钟的时钟偏移和时钟偏移率进行修正时存在较大的误差. 在此通过 Kalman 滤波对观测值进行处理获得高精度的时间估计, 同时把链路的非对称性作为主要考虑因素.

首先, 建立从时钟的状态空间模型.

根据式 (4), (5) 和 (13) 建立时钟状态转移方程, 其中时间段 $\tau[k] = T_{\text{sync}}$, T_{sync} 为时间同步周期:

$$\begin{cases} \theta[k] = \theta[k-1] + \alpha[k-1]T_{\text{sync}} + \omega_{\theta}[k], \\ \alpha[k] = \alpha[k-1] + \omega_{\alpha}[k], \\ \Delta d_n[k] = \Delta d_n[k-1] + \omega_{\Delta d_n}[k]. \end{cases} \quad (15)$$

根据式 (6) 和 (14) 建立时钟观测方程:

$$\begin{cases} \theta_M[k] = \theta[k] + \frac{\Delta d_n[k]}{2} + \omega_{\theta_M}[k], \\ \alpha_M[k] = \alpha[k] + \frac{\Delta d_n[k]}{2T_{\text{sync}}} + \omega_{\alpha_M}[k], \\ \Delta d_{nM}[k] = \Delta d_n[k] + \omega_{\Delta d_{nM}}[k], \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\omega_{\theta_M}[k]$ 为时钟偏移观测噪声, $\omega_{\alpha_M}[k]$ 为时钟偏移率观测噪声, $\omega_{\Delta d_{nM}}[k]$ 为链路非对称性观测噪声 (噪声的统计特性可通过观测链路状态得到).

根据式 (15) 和 (16) 建立矩阵模型:

$$\begin{cases} \mathbf{z}[k] = \mathbf{H}\mathbf{x}[k] + \mathbf{v}[k], \\ \mathbf{x}[k] = \mathbf{F}\mathbf{x}[k-1] + \boldsymbol{\omega}[k], \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\mathbf{z}[k] = [\theta_M[k] \ \alpha_M[k] \ \Delta d_{nM}[k]]^T$ 为第 k 次时间同步的时钟状态观测向量, $\mathbf{x}[k] = [\theta[k] \ \alpha[k] \ \Delta d_n[k]]^T$ 为第 k 次时间同步的时钟状态转移向量, $\mathbf{v}[k] = [\omega_{\theta_M}[k] \ \omega_{\alpha_M}[k] \ \omega_{\Delta d_{nM}}[k]]^T$ 和 $\boldsymbol{\omega}[k] = [\omega_{\theta}[k] \ \omega_{\alpha}[k] \ \omega_{\Delta d_n}[k]]^T$ 分别为观测噪声和过程噪声. 同时, $\boldsymbol{\omega}[k] \sim N(0, \mathbf{Q})$, $\mathbf{v}[k] \sim N(0, \mathbf{R})$. $\mathbf{H} =$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & \frac{1}{2T_{\text{sync}}} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 为观测矩阵, } \mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & T_{\text{sync}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ 为状态转移矩阵.}$$

记 \mathbf{Q} 为状态转移过程噪声的协方差矩阵, \mathbf{R} 为观测过程中的处理噪声的协方差矩阵, 则有

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\alpha}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta d_n}^2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} \sigma_{\theta_M}^2 & \frac{\sigma_{\theta_M}^2}{T_{\text{sync}}} & 0 \\ \frac{\sigma_{\theta_M}^2}{T_{\text{sync}}} & \frac{2\sigma_{\theta_M}^2}{T_{\text{sync}}^2} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta d_n, M}^2 \end{bmatrix}.$$

初始值: $\mathbf{P}[1|0] = \mathbf{Q}$, $\mathbf{x}[1|0] = \mathbf{E}[\mathbf{x}[m]]$, $\mathbf{E}[\cdot]$ 表示求元素均值.

然后, 采用如算法 1 所示的 Kalman 滤波实现时间估计. Kalman 滤波估计当前时钟参数主要分为两个步骤, 分别是预测过程和更新过程. 当从节点收到时间信息时, 则计算时钟状态的观察值, 同时构建时钟状态观测向量.

算法 1 Kalman filter-based time estimation

Input: $\mathbf{x}[1|0]$, $\mathbf{P}[1|0]$, \mathbf{H} , \mathbf{F} , \mathbf{Q} , \mathbf{R}

`\` Calculates the observation value of the clock state based on the timestamp.

$$\theta_M[k] = \frac{(T_2[k] - T_1[k]) - (T_4[k] - T_3[k])}{2};$$

$$\alpha_M[k] = \frac{\theta_M[k] - \theta_M[k-1]}{\tau[k]};$$

`\` Construct the observation vector of the clock state.

$$\mathbf{z}[k] = [\theta_M[k] \quad \alpha_M[k] \quad \Delta d_{nM}[k]]^T;$$

Kalman_filter(){

`\` Predict the current state of the clock.

$$\mathbf{x}[k|k-1] = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}[k-1];$$

`\` Predict the current estimated covariance matrix.

$$\mathbf{P}[k|k-1] = \mathbf{F} \cdot \mathbf{P}[k-1] \cdot \mathbf{F}^T + \mathbf{Q};$$

`\` Calculate the Kalman gain.

$$\mathbf{G}[k] = \mathbf{P}[k|k-1] \cdot \mathbf{H}^T \cdot [\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}[k|k-1] \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1};$$

`\` Update the current state of the clock and the estimated covariance matrix.

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{x}[k|k-1] + \mathbf{G}[k] \cdot (\mathbf{z}[k] - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}[k|k-1]);$$

$$\mathbf{P}[k] = (\mathbf{I} - \mathbf{G}[k] \cdot \mathbf{H}) \cdot \mathbf{P}[k|k-1];$$

}

在预测过程中, 从节点根据上一时刻时钟状态、估计协方差矩阵、系统转移矩阵、状态转移过程和观察过程中噪声的协方差矩阵, 预测当前的时钟状态和估计协方差矩阵, 同时计算 Kalman 增益:

$$\mathbf{x}[k|k-1] = \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}[k-1], \quad (18)$$

$$\mathbf{P}[k|k-1] = \mathbf{F} \cdot \mathbf{P}[k-1] \cdot \mathbf{F}^T + \mathbf{Q}, \quad (19)$$

$$\mathbf{G}[k] = \mathbf{P}[k|k-1] \cdot \mathbf{H}^T \cdot [\mathbf{H} \cdot \mathbf{P}[k|k-1] \cdot \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}. \quad (20)$$

在更新过程中, 从节点则依据预测过程中获得的时钟状态信息和协方差矩阵更新当前的时钟信息:

$$\mathbf{x}[k] = \mathbf{x}[k|k-1] + \mathbf{G}[k] \cdot (\mathbf{z}[k] - \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}[k|k-1]), \quad (21)$$

$$\mathbf{P}[k] = (\mathbf{I} - \mathbf{G}[k] \cdot \mathbf{H}) \cdot \mathbf{P}[k|k-1]. \quad (22)$$

最后, 从节点根据估计的时钟状态信息调整本地时钟与主时钟同步.

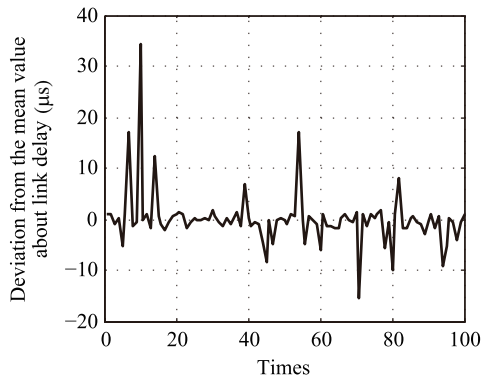


图 3 相邻节点间链路非对称性

Figure 3 Link asymmetry between adjacent nodes

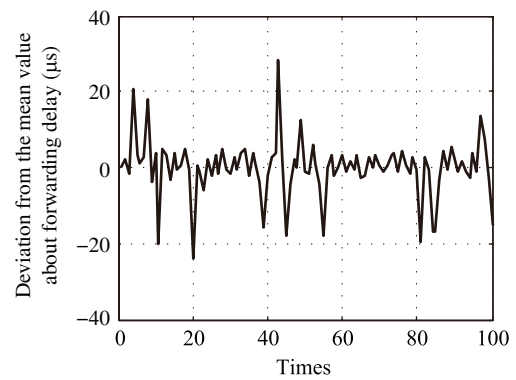


图 4 节点的转发时延非对称性

Figure 4 Asymmetry of forwarding delay in node

4 仿真分析

时间同步的精度通常通过时钟偏移和时钟偏移率的误差均值来体现, 其抖动性则由相应误差的标准偏差来反映 [22]. 因此, 基于不同的链路非对称性以及跳数, 分析相应的时钟偏移和时钟偏移率的估计误差均值和标准偏差, 进而分析本文的时间同步方法 NTSM 与现有的时间同步方法 ETSM [17] 在多跳组网方式下的性能差异.

采用 Matlab/Simulink 工具进行仿真实验. 根据时钟模型 (式 (4) 和 (5)) 产生主从时钟, 仿真步长为 1 ppm, 时间同步周期 $T_{\text{sync}} = 0.1 \text{ s}$, 从节点初始时钟偏移 $\theta_0 = 0 \text{ s}$, 从节点初始时钟偏移率为 $2\text{e}-7$. 首先, 当链路非对称性为变量时, 计时不确定性 $\sigma_{\theta_M}^2$ 设为 $2\text{e}-8$, 将本文的时间同步方法同现有时间同步方法 [17] 的同步性能进行分析比较. 其次, 当跳数为变量时, 跳数分别设为 2, 3, 4, 5, 6, 中间节点的转发时延均服从 Gauss 分布 $N(0, 2\text{e}-6)$, 单跳环节的链路传播时延均服从 Gauss 分布 $N(2\text{e}-6, 2\text{e}-8)$, 从节点计时不确定性 $\sigma_{\theta_M}^2$ 为 $2\text{e}-8$, 分析比较本文的时间同步方法与现有时间同步方法 [17] 的同步精度.

4.1 非对称性分析

首先, 利用 YOBTON 公司的 YBT5N9220 无线网卡以及 COMPEX 公司的 WP546HV 主板构成无线网络节点, 采用驱动层实现的软件时间戳, 通过实验来验证链路的非对称性. 如图 3 和 4 所示, 相邻节点间的链路传播时延非对称性和节点转发时延的非对称性分别可达 $34.17 \mu\text{s}$ 和 $28.07 \mu\text{s}$, 即主从节点之间的通信链路存在严重的非对称性.

针对不同链路非对称性 $\sigma_{\Delta d_n M}^2, \sigma_{\Delta d_n M}^2 \in [10^{-10}, 10^{-3}]$, 图 5 和 6 的仿真结果分别显示了本文的时间同步方法与现有时间同步方法 [17] 的主从时钟, 在时钟偏移和时钟偏移率估计误差均值和标准偏差上的变化趋势.

如图 5 和 6 所示, 随着链路非对称性的增加, 经本文时间同步方法和现有时间同步方法处理所得到的时钟偏移和时钟偏移率的误差均值和标准偏差的变化趋势相似, 均在 $\sigma_{\Delta d_n M}^2$ 较小时变化缓慢, 且近似相等, 但随着 $\sigma_{\Delta d_n M}^2$ 的进一步增大, 又均呈现出递增趋势, 而且经过本文的时间同步方法处理获得的误差均值和标准偏差要明显低于现有时间同步方法. 这表明, 随着链路非对称性的增加, 本文的时间同步方法在精度上以及抖动性上要优于现有的时间同步方法. 现有时间同步方法, 在进行时钟偏

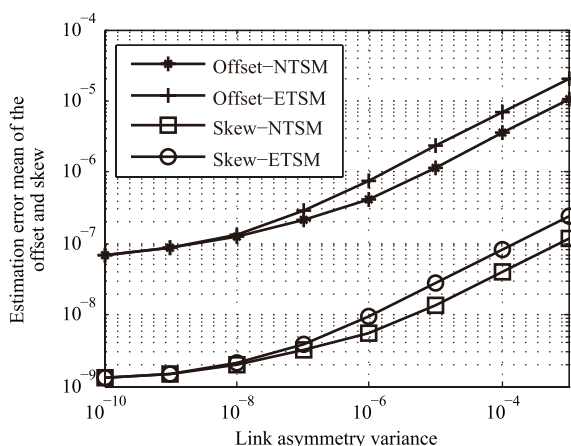


图 5 时钟偏移 (率) 估计误差均值 —— 链路非对称性

Figure 5 Estimation error mean of the master — slave offset and skew against link asymmetry

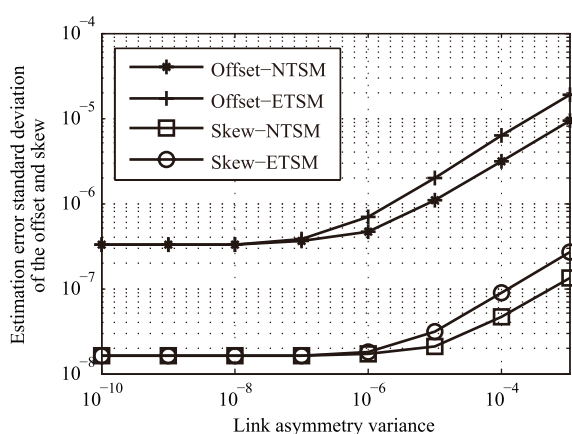


图 6 时钟偏移 (率) 估计误差标准偏差 —— 链路非对称性

Figure 6 Estimation error standard deviation of the master — slave offset and skew against link asymmetry

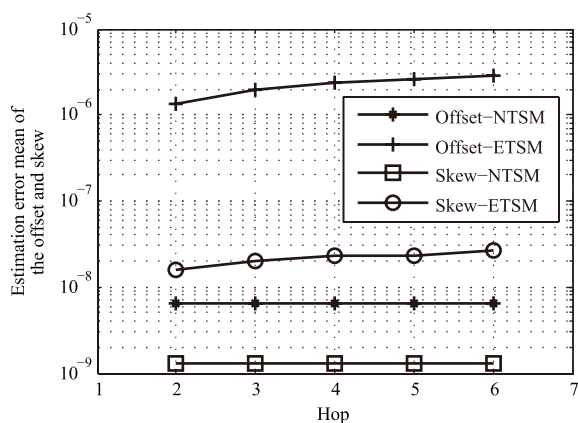


图 7 时钟偏移 (率) 估计误差均值 —— 跳数

Figure 7 Estimation error mean of the master-slave offset and skew against hop-count

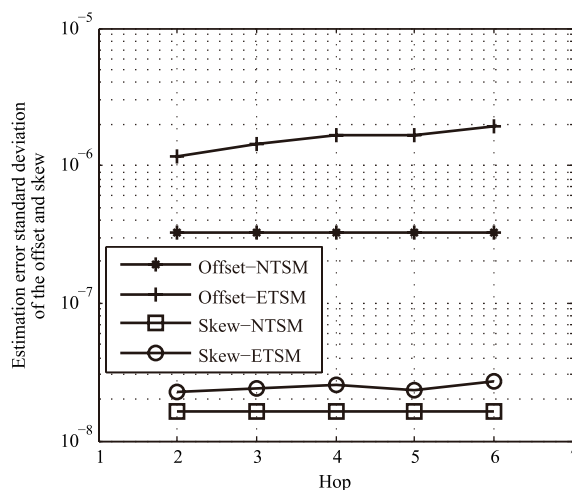


图 8 时钟偏移 (率) 估计误差标准偏差 —— 跳数

Figure 8 Estimation error standard deviation of the master-slave offset and skew against hop-count

率和时钟偏移率的估计时, 未对链路非对称性进行补偿. 然而, 链路非对称性严重影响采用软件时间戳技术的无线网络时间同步精度. 本文的时间同步方法, 在构建时间同步模型时即考虑了链路非对称性因素, 图 5 和 6 的仿真结果说明本文的时间同步方法能够有效应用到无线网络时间同步中.

4.2 跳数分析

针对不同的跳数 2, 3, 4, 5, 6, 图 7 和 8 分别显示了本文的时间同步方法与现有的时间同步方法^[17]的主从时钟, 在时钟偏移和时钟偏移率估计误差均值和标准偏差上的变化趋势.

如图 7 和 8 所示, 在跳数影响下, 本文时间同步方法的同步性能明显优于现有时间同步方法. 此外, 现有时间同步方法的性能随着跳数增加而降低. 这是因为, 多跳组网方式下, 随着跳数的增加, 链路非对称传播时延和中间节点转发时延会产生累积, 进而造成链路的非对称性增大. 相反, 本文时间同步方法却基本没有变化. 本文的时间同步方法将现有时间同步方法忽略的链路非对称性作为主要补偿因素, 有效提高了时间同步的精度. 图 7 和 8 的仿真结果显示, 在多跳组网方式下, 本文的时间同步方法与现有的时间同步方法相比, 同步精度更高, 抖动性更小.

5 结论

针对现有时间同步方法在建立同步模型时只考虑时钟源的计时误差, 而忽略了链路非对称性所造成的同步误差的问题, 本文提出了一种基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络时钟同步方法. 该方法考虑无线链路的非对称传播时延、中间节点的转发时延以及从节点的时钟源计时误差, 首先对基于 IEEE 1588 协议的多跳无线网络主从时钟的时间偏差和时间偏移率进行建模, 然后利用 Kalman 滤波方法对从节点的时间进行估计. 最后, 通过仿真手段, 针对链路非对称性, 比较了本文时间同步方法和现有时间同步方法的同步精度; 针对跳数影响, 比较了本文时间同步方法和现有时间同步方法的性能差异. 仿真结果验证了本文的时间同步方法的优越性. 然而, 相比于现有同步方法的二维状态空间模型, 本文时间同步方法增加了部分计算开销所产生的能耗. 本文的下一步工作是搭建物理实验平台, 用以验证本文的时间同步方法在实际多跳无线网络中的应用效果.

参考文献

- 1 Lee J F, Kuo W H. Fairness provisioning in multi-hop wireless backhaul networks: challenges and solutions. *Comput Commun*, 2010, 33: 1767–1772
- 2 Khoukhi L, Badis H, Merghem-Boulahia L, et al. Admission control in wireless ad hoc networks: a survey. *Eurasip J Wirel Commun Netw*, 2013, 2013: 1–13
- 3 Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Comput Netw*, 2008, 52: 2292–2330
- 4 Pathak P H, Dutta R. A survey of network design problems and joint design approaches in wireless mesh networks. *IEEE Commun Surv Tut*, 2011, 13: 396–428
- 5 Shin Y J, Lee J R. Time synchronization protocol in ad hoc network. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Information Networking*, Bangkok, 2013. 375–378
- 6 Sivrikaya F, Yener B. Time synchronization in sensor networks: a survey. *IEEE Netw*, 2004, 18: 45–50
- 7 Zhou S J. The technology research on time synchronization in wireless network based on IEEE 1588. Dissertation for the M.E. Degree. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2013 [周思捷. 基于 IEEE 1588 无线网络时间同步技术研究. 硕士学位论文. 上海: 上海交通大学, 2013]
- 8 Wang F Q, Zeng P, Yu H B. An energy-efficient time synchronization algorithm for wireless sensor networks. *Inf Control*, 2011, 40: 753–759 [汪付强, 曾鹏, 于海斌. 一种能量高效的无线传感器网络时间同步算法. *信息与控制*, 2011, 40: 753–759]
- 9 Xu C N, Zhao L, Xu Y J, et al. Simsync: a time synchronization simulator for sensor networks. *Acta Autom Sin*, 2006, 32: 1008–1014
- 10 Chen J, Yu M, Dou L H, et al. A fast averaging synchronization algorithm for clock oscillators in nonlinear dynamical network with arbitrary time-delays. *Acta Autom Sin*, 2010, 36: 873–880
- 11 Schenato L, Fiorentin F. Average TimeSync: a consensus-based protocol for clock synchronization in wireless sensor networks. *Automatica*, 2011, 47: 1878–1886
- 12 He J, Cheng P, Shi L, et al. Time synchronization in WSNs: a maximum-value-based consensus approach. *IEEE Trans Autom Control*, 2014, 59: 660–675

- 13 Maróti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM, 2004. 39–49
- 14 Yildirim K S, Kantarci A. Time synchronization based on slow-flooding in wireless sensor networks. *IEEE Trans Parall Distrib Syst*, 2014, 25: 244–253
- 15 IEEE Instrumentation and Measurement Society. IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems. *IEEE Std 1588TM-2008*, <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4579760>
- 16 Ferrari P, Flammini A, Rinaldi S, et al. Experimental characterization of uncertainty sources in a software-only synchronization system. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2012, 61: 1512–1521
- 17 Giorgi G, Narduzzi C. Performance analysis of kalman-filter-based clock synchronization in IEEE 1588 networks. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2011, 60: 2902–2909
- 18 Xu X, Xiong Z H, Sheng X J, et al. A new time synchronization method for reducing quantization error accumulation over real-time networks: theory and experiments. *IEEE Trans Ind Inf*, 2013, 9: 1659–1669
- 19 Fontanelli D, Macii D, Rinaldi S, et al. A servo-clock model for chains of transparent clocks affected by synchronization period jitter. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2014, 63: 1085–1095
- 20 Lee S, Lee S, Hong C. An accuracy enhanced IEEE 1588 synchronization protocol for dynamically changing and asymmetric wireless links. *IEEE Commun Lett*, 2012, 16: 190–192
- 21 Lv S, Lu Y M, Ji Y F. An enhanced IEEE 1588 time synchronization for asymmetric communication link in packet transport network. *IEEE Commun Lett*, 2010, 14: 764–766
- 22 Mahmood A, Exel R. Servo design for improved performance in software timestamping-assisted WLAN synchronization using IEEE 1588. In: Proceedings of the IEEE 18th Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Cagliari, 2013. 1–8
- 23 Mahmood A, Exel R, Sauter T. Delay and jitter characterization for software-based clock synchronization over WLAN using PTP. *IEEE Trans Ind Inf*, 2014, 2: 1198–1206
- 24 Gresset N, Letessier J. A random broadcast consensus synchronization algorithm for large scale wireless mesh network. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Shanghai, 2012. 1573–1577
- 25 Maggs M K, O’Keefe S G, Thiel D V. Consensus clock synchronization for wireless sensor networks. *IEEE Sens J*, 2012, 12: 2269–2277
- 26 Xiong G, Kishore S. Performance of distributed consensus time synchronization with gaussian delay in wireless sensor networks. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Budapest, 2009. 1–5
- 27 Kim H, Ma X L, Hamilton B R. Tracking low-precision clocks with time-varying drifts using kalman filtering. *IEEE/ACM Trans Netw*, 2012, 20: 257–270

IEEE 1588 protocol-based time synchronization method for multi-hop wireless networks

Zhaowei WANG^{1,2,3}, Meng ZHENG^{1,2}, Peng ZENG^{1,2*} & Dong LI^{1,2,3}

¹ *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

² *Key Laboratory of Networked Control System, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;*

³ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

*E-mail: zp@sia.cn

Abstract Considering the asymmetric propagation delays of wireless links, the forwarding delays of intermediate nodes, and the timing error of the clock of slave nodes, this paper presents a novel IEEE 1588 protocol-based time synchronization method for multi-hop wireless networks. We first build state-space models of the time offset and the time offset skew between the master clock and the slave clocks. Then, based on the formulated state space models, we estimate the clock of the slave nodes using a Kalman filter. The simulation results obtained show that the proposed method yields higher synchronization precision than existing works.

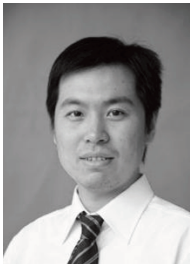
Keywords multi-hop wireless networks, time synchronization, Kalman filter, asymmetric delays, IEEE 1588



Zhaowei WANG was born in 1991. He received a B.S. degree in measurement & control technology and instrumentation from Zhengzhou University, in 2012. Currently, he is pursuing a Ph.D. degree in control theory and control engineering at the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests include wireless sensor networks and industrial wireless networks.



Meng ZHENG was born in 1983. He received a Ph.D. degree in mechatronic engineering from the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS), in 2012. He was a visiting student from 2010 to 2012 in the Fraunhofer Institute. Currently, he is an associate professor at the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests include wireless ad hoc and sensor networks, cognitive radio networks, and security in smart grids.



Peng ZENG was born in 1976. He received a Ph.D. degree in mechatronic engineering from the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS), in 2005. Currently, he is a professor and Ph.D. supervisor at the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests include industrial communication and wireless sensor networks.



Dong LI was born in 1986. He received a B.S. degree in electronic information science and technology from Fudan University, in 2008. Currently, he is pursuing a Ph.D. degree in mechatronic engineering at the Shenyang Institute of Automation (SIA), Chinese Academy of Sciences (CAS). His research interests include wireless mesh networks and industrial wireless networks.