

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)01-0110-04

基于延时补偿的无线网络节点时钟自动同步方法

张力军

(上海思博职业技术学院,上海 201399)

摘要:由于无线网络节点具有地理位置分散等特点,在设计无线网络节点时钟自动同步方法时,通常会出现时钟状态估计不准确的问题,导致方法同步性能差。针对无线网络节点时钟特点,构建时钟状态模型,利用滤波算法估计时钟状态,得到对应的状态方程。在无线网络节点传输信息时,添加时间戳,并分析时钟的延时情况,再结合当前时刻时钟的状态估计值,计算时钟的偏移量。通过计算时钟节拍比和时钟调整频率,计算出时钟的延时补偿值,由此建立时钟的自动同步机制。实验结果表明,设计的同步方法在实际应用中节点同步率均值为98.76%,同步性能较好。

关键词:延时补偿;无线网络;时钟同步;状态估计;无线网络节点

中图分类号:TN926

文献标志码:A

文章编号:1003-7241(2026)01-0110-04

Wireless network node clock automatic synchronization method based on delay compensation

ZHANG Lijun

(Shanghai Sipo Polytechnic, Shanghai 201399, China)

Abstract: Due to the geographical dispersion of wireless network nodes, inaccurate clock state estimation often occurs when designing automatic clock synchronization methods for wireless network nodes, resulting in poor synchronization performance of the methods. Based on the characteristics of wireless network node clocks, a clock state model is constructed, and a filtering algorithm is used to estimate the clock state and obtain the corresponding state equation. When transmitting information in wireless network nodes, add timestamps, analyze clock delay, and calculate clock offset based on the estimated state of the clock at the current time. By calculating the clock beat ratio and clock adjustment frequency, the delay compensation value of the clock is calculated, thereby establishing an automated synchronization mechanism for the clock. The experimental results show that the designed synchronization method has an average node synchronization rate of 98.76% in practical applications, indicating good synchronization performance.

Keywords: delay compensation; wireless network; clock synchronization; state estimation; wireless network nodes

无线网络节点由于地理位置分散、传输介质不稳定、节点处理能力差异大等因素,导致节点间的时钟难以自然保持同步。时钟偏差不仅会影响数据传输的时效性,还可能引发数据冲突、时序错乱等问题,特别是在需要精确时间控制的场景中,时钟同步的精度和稳定性显得尤为重要^[1]。

在国内外研究领域,无线网络节点时钟同步技术一直是学术界和工业界关注的热点之一。国内外学者近年来针对无线网络节点时钟同步的研究也取得了显著进展。研究者们不仅关注于传统同步方法的改进,还积极探索新技术、新方法在时钟同步中的应用。文献[2]利用双频技术,作为时钟同步架构的基础,并设定时间同步传输协议,将电网主节点作为时间基准,从该节点出发,计算不同节点的时钟相位偏差,再结合频率锁定环(frequency-locked loop, FLL)和相位锁定环(phase locked loop, PLL)实现节点与主节点时

钟的同步。但该方法应用的双频技术容易受到系统稳定性的干扰,导致方法的同步稳定性不高。文献[3]先捕获无线信号中的信标帧,再对其进行解析,提取出其中的时间戳信息,计算时间偏差,通过精确时间协议(precision time protocol, PTP)和信道访问(channel access, CA)机制对无线信号时钟进行调整,由此得到相应的时间同步结果。该方法过于依赖信标帧,若信标帧的发送频率发生改变,将会直接影响到同步结果的准确性。文献[4]将电力线载波通信技术作为信号的传输媒介,确定时钟同步协议,并设计同步协议的数据帧结构,在考虑信号在传输过程中的衰减情况,设计时延补偿算法,计算出时钟的误差,实现对时钟的同步。电力网络不同节点之间的通信路径存在不同,导致信号在传输过程中的时延差异较大,部分节点的同步结果存在偏差。文献[5]设计分数型锁相环,通过收集信号时间戳来解析通信

收稿日期:2024-08-16;录用日期:2024-09-18

基金项目:上海高等教育学会规划研究项目(Y1-70)

作者简介:张力军(1975—),男,硕士,工程师,讲师,研究方向:程序设计与软件自动化。

引用本文:张力军. 基于延时补偿的无线网络节点时钟自动同步方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(1): 110-113. (ZHANG Lijun. Wireless network node clock automatic synchronization method based on delay compensation[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(1): 110-113.)

频率,并利用模糊控制优化时钟调整。调整时钟变量以匹配信号频率,实现高效时钟同步。该方法应用的分数型锁相环频率转换时间依赖于环路带宽,若带宽过窄,锁定时间较长,将会导致时钟同步的实时性不高。

基于此,本文设计了基于延时补偿的无线网络节点时钟自动同步方法。旨在提升无线网络系统的整体性能,提高数据传输的实时性和准确性,促进物联网、工业自动化等领域的快速发展和创新。

1 时钟自动同步方法设计

1.1 无线网络节点时钟状态估计

无线网络节点的时钟通常是由晶体振荡器构成,在其运行过程中,会因外界因素,如温度、制造工艺等,导致其自身频率受到影响^[6],从而导致时钟出现偏差。为此,需要确保节点时钟的同步,确保数据传输的稳定性和实时性。

在这个过程中,为实现高精度的时钟同步,需要对无线网络节点时钟进行状态估计^[7]。在估计时,先构建的无线网络节点的时钟状态模型。其构建的状态模型为

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_w \\ \delta_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T_n & T_n^2 \\ 0 & 1 & T_n \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_x^{k-1} \\ \delta_w^{k-1} \\ \delta_p^{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_w \\ \kappa_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, δ_x 表示无线网络节点时钟的相位误差, δ_w 表示无线网络节点时钟的频率误差, δ_p 表示无线网络节点时钟的频率漂移, T_n 表示无线网络节点时钟的时间戳更新时间, δ_x^{k-1} 、 δ_w^{k-1} 、 δ_p^{k-1} 分别表示时钟在 $k-1$ 时刻的状态参数值, κ_x 表示相位误差补偿值, κ_w 表示频率误差补偿值, κ_p 表示频率漂移补偿值。

考虑到该时钟状态模型中包含着较多噪声,这些噪声会对时钟同步结果造成影响,为此,需要利用滤波算法对时钟状态进行估计^[8]。基于公式(1),获取时钟的状态方程。其时钟状态方程为

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{A}_z \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_w \\ \delta_p \end{bmatrix} + \mathbf{w}_k \quad (2)$$

式中, \mathbf{x}_k 表示时钟在 k 时刻的状态向量, \mathbf{A}_z 表示时钟的状态转移矩阵, \mathbf{w}_k 表示无线网络节点时钟在运行过程中的噪声向量。

由此,对时钟的状态进行估计^[9]。其具体的状态估计结果为

$$z_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k + v_k \times Q_1 \quad (3)$$

式中, z_k 表示时钟状态估计结果, \mathbf{H}_k 表示时钟的状态估计矩阵, v_k 表示测量噪声, Q_1 表示滤波算法在状态估计时的过程噪声。

基于公式(3),得到时钟状态估计结果,为后续测量节点时钟偏移量奠定基础。

1.2 无线网络节点时钟偏移测量

基于时钟状态估计的结果,考虑到无线网络节点在传

输过程中,会受到节点间的距离、信号传播速度等多种因素的影响^[10],不同节点的时钟会出现偏移,这种偏移会导致时钟同步受到影响。为此,测量出不同节点之间的时钟偏移量,为后续时钟同步奠定基础^[11]。

在测量节点时钟偏移的过程中,需要在传输的信号中添加时间戳,由此分析时钟的延时情况^[12]。其具体过程如图1所示。

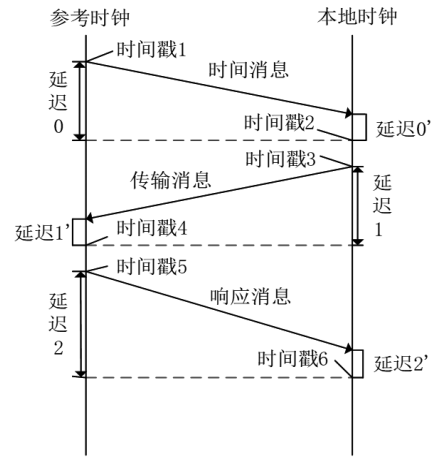


图1 时钟延时过程

Fig. 1 Clock delay process

如图1所示,在无线网络的主节点向其他节点发送时间消息时,会产生一个时间信号,将此时产生的时间信号存入到时间戳寄存器中^[13]。当从其他节点接收到主节点传输的消息时,会通过无线网络的其他设备进行消息判断,并对其进行解析,并再次释放响应信号。在传输的过程中,还会释放传输信号,加快信息的传递。同时,在解析过程中,由于需要较长的时间对其解析,导致节点传输出现延时抖动。

基于图1中出现的延时抖动,需要先计算时钟的延时值,再通过时间差值,计算出时钟偏移量。在这个过程中,时钟延时的具体计算公式为

$$T_y = \left(\frac{T_1 - T_0}{2} - \frac{T_{1'} - T_{0'}}{2} \right) + \left(\frac{T_2 - T_1}{2} - \frac{T_{2'} - T_{1'}}{2} \right) \quad (4)$$

式中, T_y 表示计算的时钟延时, T_0 表示主节点发送消息的时刻, T_1 表示节点传输消息的时刻, T_2 表示节点接收消息的时刻, $T_{0'}$ 表示主节点发送消息的时钟值, $T_{1'}$ 表示节点传输消息的时钟值, $T_{2'}$ 表示节点接收消息的时钟值。

由此,结合在时钟延时情况下,时钟的偏移量,计算时钟的偏移量^[14]。其具体计算公式为

$$P_z = \frac{(T_p - T_k - T_y) \times k_p}{f_z} \times z_k \quad (5)$$

式中, P_z 表示计算的节点时钟偏移量, T_p 表示无线网络节点的传输时间, T_k 表示节点到反馈点的时间戳, k_p 表示时钟传输参数, f_z 表示无线网络节点的时钟漂移系数。

1.3 时钟自动同步机制建立

在考虑测量节点时钟偏移量的基础上,计算出节点在传输过程中的延时补偿。在计算时,将本地时钟的频率与

参考时钟的频率进行对比,并分析两者之间的关系,由此,计算其时钟节拍比及对应的时钟调整频率。其具体计算公式为

$$\begin{cases} f_b = \frac{\Delta N_c}{\Delta n_b} \times f_c \\ f_t = f_b \times \left(\frac{t_0 - t_1}{t_{0'} - t_{1'}} - \frac{t_1 - t_2}{t_{1'} - t_{2'}} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中, f_b 表示计算的时钟节拍比, ΔN_c 表示参考时钟的计数值, Δn_b 表示本地时钟的计数值, f_c 表示时钟的频率偏差值, f_t 表示时钟的调整频率, t_0, t_1, t_2 分别表示时间戳在节点发送时、节点传输时、节点接收时的计数值, $t_{0'}, t_{1'}, t_{2'}$ 分别表示时间戳在节点发送时、节点传输时、节点接收时的延时抖动。

基于此,计算出时钟的延时补偿值。其具体计算公式为

$$B_c = \eta_z t_x f_t + \vartheta_y + \sqrt{p_m} B(t) + P_z \quad (7)$$

式中, B_c 表示时钟的延时补偿值, η_z 表示节点的瞬时相位值, t_x 表示节点的标准化频率, ϑ_y 表示节点的相位累加值, p_m 表示节点时钟的质量参数, $B(t)$ 表示节点时钟的频率变化函数。

根据计算的延时补偿值,构建节点时钟自动同步机制。在该机制中,利用时间偏差和延时补偿值,对节点时钟偏差进行调整^[15]。其同步过程为

$$\begin{cases} d_c = s_c c_t + \lambda_t + d_t f_d + B_c \\ f_d = \frac{\gamma_d e^{-\gamma_d d_p}}{1 - e^{-\gamma_d}} \end{cases} \quad (8)$$

式中, d_c 表示时钟自动同步的偏差调整值, s_c 表示时钟相对频估计, c_t 表示节点的信息交互参数, λ_t 表示时钟的一致性参数, d_t 表示数据丢失概率, f_d 表示时钟出现时延的概率密度函数, γ_d 表示时钟的相对频偏参数, d_p 表示时钟的同步参数, d_r 表示时钟频偏的衰减因子。

根据计算的 d_c 值,对时钟的偏差进行调整,实现对时钟的自动同步处理。该过程能够确保无线网络数据传输的稳定性和准确性。至此,基于延时补偿的无线网络节点时钟自动同步方法的设计完成。

2 实验测试

实验中,设计对比实验。其中,本文设计的同步方法为方法1,面向5G智能电网的高精度时钟在线实时同步方法为方法2,一种基于信标的低开销无线时间敏感网络(time sensitive networking, TSN)时钟同步方法为方法3。为对比三种方法在实际应用中的效果,设计的对比实验具体如下。

2.1 实验准备

实验以某无线网络为研究对象,该无线网络的频段为5.32 GHz,信道宽度为40 MHz,最大传输速率为126 Mbps,节点密度为100个/平方公里,信号强度为-40 dBm,信噪比为30 dB。该无线网络在传输过程中的传输错误率为 $1e-$

6,运行周期为24 h。该无线网络的拓扑结构如图2所示。

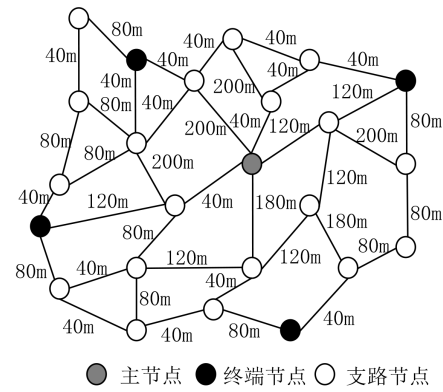


图2 某无线网络的拓扑结构

Fig. 2 Topology of a wireless network

如图2所示,该无线网络中存在多种节点,其中,主节点为1个,终端节点为4个,其余节点为支路节点。在不同的节点之间,节点间距为40-200 m不等。

基于该无线网络,结合本文设计的方法,设定实验参数。其具体的实验参数如表1所示。

表1 实验参数

Tab. 1 Experimental parameters

序号	实验参数	参数设置
1	时钟传输参数 k_p	1.25
2	时钟漂移参数 f_z	2.46
3	节点标准化频率 t_x	10 Hz
4	时钟质量参数 p_m	2.88
5	节点交互参数 c_t	4.32
6	衰减因子 d_r	3.11
7	同步参数 d_p	4.16

如表1所示,结合该实验参数,利用本文设计的方法统计无线网络主节点和支路节点的时钟频率。其具体如图3所示。

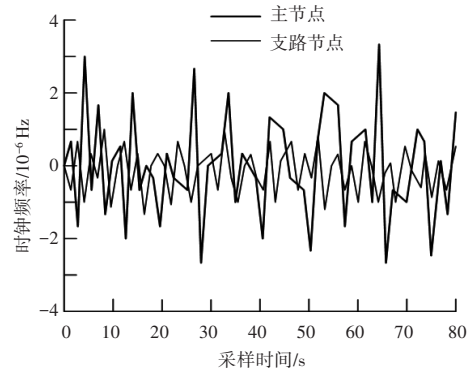


图3 无线网络节点的时钟频率

Fig. 3 Clock frequency of wireless network nodes

如图2所示,基于节点的时钟频率,计算出节点的延时补偿值,实现对节点时钟的自动同步。

2.2 实验结果讨论

利用三种方法对某无线网络节点时钟进行同步处理,统计其同步处理后,不同节点的时钟频率,通过对比节点的时钟频率值,对比三种方法的同步精度。三种方法的同

步结果如图4所示。

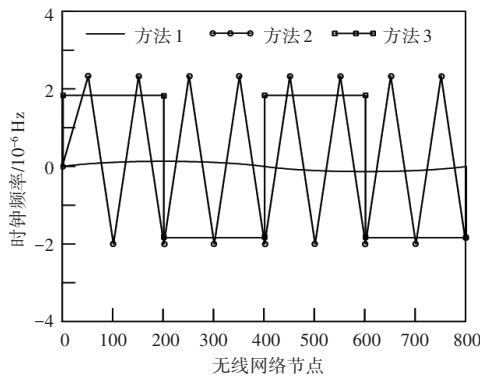


图4 三种方法的同步结果

Fig. 4 Synchronization results of three methods

如图4所示,利用方法1同步后,无线网络节点的时钟频率基本持平,频率变化较小。方法2的时钟频率波动较大,方法3同步后,部分节点的时钟频率基本相同,但整个无线网络节点的时钟频率却仍存在较大差距。因此,本文设计的方法的同步性能较好。

以方法的节点同步率为作为评价指标,对比三种方法的同步性能。实验中,利用三种方法对某无线网络进行同步,统计其同步后无线网络节点的同步率。三种方法的节点同步率如表2所示。

表2 三种方法的节点同步率

Tab. 2 Node synchronization rates of three methods

同步次数	节点同步率/%		
	方法1	方法2	方法3
1	99.25	75.64	55.23
2	98.76	74.22	56.23
3	99.24	76.05	54.26
4	98.69	74.15	57.12
5	97.48	76.26	53.26
6	96.59	74.15	54.56
7	98.36	73.26	55.99
8	98.65	75.15	54.78
9	97.48	76.26	54.12
10	96.59	75.15	56.26

如表2所示,通过多次同步,方法1的节点同步率较高,均值为98.76%,方法2的节点同步率均值为74.26%,方法3的节点同步率均值为55.64%。由此可见,方法1

的同步性能较好。

3 结论

综上所述,本研究通过精准地补偿网络传输中的延时,实现了无线节点间时钟的高精度同步,为分布式系统、实时监测系统以及诸多依赖时间同步性的应用场景提供了坚实的支撑。该方法不仅增强了系统的稳定性和可靠性,使得数据传输与处理更加精确无误,还极大地促进了资源的高效利用与管理的精细化。特别是在工业自动化、智能交通、远程医疗等领域,高精度的时间同步是保证系统正常运作与性能优化的关键环节。此外,该同步方法的自动化特性减轻了人工维护的负担,降低了操作成本,同时提升了系统的响应速度与适应能力。

参考文献

- [1]王宁,牛玥瑶,崔西宁. 分区OS与TTE网络之间的时钟同步方法研究[J]. 航空计算技术, 2024, 54(1):117-120.
- [2]韩子媛,王轩,秦靖尧,等. 面向5G智能电网的高精度时钟在线实时同步方法[J]. 电子设计工程, 2023, 31(20):45-48, 53.
- [3]张鹏,龚龙庆,徐丹妮. 一种基于信标的低开销无线TSN时钟同步方法[J]. 微电子学与计算机, 2022, 39(10):80-87.
- [4]王清,荆臻,代燕杰,等. 基于电力线载波通信协议的时钟同步方法研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(10):184-190.
- [5]张仕奇,田恒. 基于分数型锁相环的宽带电力线载波通信时钟同步方法[J]. 电子测量技术, 2022, 45(1):49-55.
- [6]陈威林. 基于工频数据的馈线自动化时钟同步技术分析[J]. 集成电路应用, 2023, 40(3):172-173.
- [7]程良,陈晓范,申海杰. 一种基于锚节点子集的无线传感器网络定位算法[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(11):111-115, 174.
- [8]赵国锋,危瑞鹏,邢媛,等. 基于IEEE 802.1AS的多跳时钟同步算法与系统实现[J]. 电子学报, 2024, 52(3):814-823.
- [9]赵永成,陈健,张俊杰,等. 基于IEEE1588的多路可调同步时钟板设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2024, 37(2):4-7.
- [10]许万,余磊涛,夏瑞东. 基于无迹卡尔曼滤波的精密时钟同步算法[J]. 湖北工业大学学报, 2024, 39(1):8-11, 27.
- [11]彭逸飞,涂晓东,许都,等. 时间触发以太网与时间敏感网络时钟同步失效对比分析[J]. 电子科技大学学报, 2023, 52(5):718-727.
- [12]苏畅,梁昊. 基于白兔时间同步协议的加速器节点时钟同步系统[J]. 网络安全与数据治理, 2023, 42(8):83-87, 94.
- [13]瞿智,张慧晴,陈建云. 基于UWB的无线网络精密时钟同步设计[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(6):86-92.
- [14]马卓斌,李鑫,金冰鑫. 基于关联规则算法的无线通信网络安全分类方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(2):119-122, 148.
- [15]符强,孔健明,纪元法,等. 基于改进粒子群优化PID的双补偿时钟同步算法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2023, 43(1):27-34.

(上接第109页)

- [11]王雪,王立德,王彪,等. 基于系统调用序列的车载主机设备入侵检测方法研究[J]. 机车电传动, 2023(6):106-113.
- [12]张建平,曹华锋,井含香,等. 基于曼哈顿距离的用电信息采集运维系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(9):116-120.
- [13]李国燕,周相茹,刘毅,等. 一种并行多尺度特征融合的人侵检测模型[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(11):29-35.
- [14]RAHMAN S, PAL S, MITTAL S, et al. SYN-GAN: A robust

- intrusion detection system using GAN-based synthetic data for IoT security[J]. Internet of Things, 2022, 12(1):336-339.
- [15]王俊恒,朱铭铭. 基于多原型指导的小样本家族域名入侵检测算法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(11):1049-1057.
- [16]曹春明,何戡,宗学军,等. 基于VAE和DLIESN的工控系统入侵检测方法[J]. 计算机工程与设计, 2023, 44(11):3283-3289.