

Clock Synchronization Method in Wireless Sensor Networks Based on Local Clock Self-Correction*

XU Jian-xin, FENG Dong-qin*

(National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Advanced
Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: By analyzing TPSN synchronization protocol and various factors that cause uncertainties of clock deviation, combining with the characteristics of low power consumption and the special requirements of synchronization accuracy in Wireless Sensor Networks, aiming at the problem that TPSN does not estimate clock frequency drifting. A method named local clock self-correction is proposed. An index of average clock deviation is also proposed to evaluate the accuracy of clock during a synchronization period. The contrast experiment results validate that this method is good feasibility and can prolong synchronization period under guaranteeing synchronization precision, reduce synchronization spending and power consumption.

Key words: clock synchronization; WSN; self-correction; frequency compensation

EEACC:6150P

基于本地时钟自校正的无线传感器网络同步方法*

许剑新, 冯冬芹*

(浙江大学先进控制研究所工业控制技术国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 通过分析 TPSN 同步协议和造成时钟偏差不确定性的各种因素, 结合无线传感器网络低功耗的特点及其对时钟同步算法精度的要求, 针对 TPSN 未对时钟频率漂移进行估计的问题, 提出一种节点本地时钟自校正方法, 并设计了平均时钟偏差指标对一个同步周期内时钟精度进行评价。对比实验结果表明本方法易于实现, 在保证同步精度的同时可以延长同步周期, 减少同步开销, 节约了能耗。

关键词: 时钟同步; 无线传感器网络; 自校正; 频率补偿

中图分类号: TP393

文献标识码: A **文章编号:** 1004-1699(2008)08-1448-05

时钟同步是传感器网络实现 TDMA 接入、协同休眠、能耗管理、通信调度、目标定位等技术的基础。传统网络中时钟同步算法已经有了成熟可靠的成果和广泛的应用, 但是由于电池能量和硬件资源的有限性, 传统网络的同步机制并不适合无线传感器网络^[1]。

无线传感器网络节点间时钟同步要求具备一定精度, 并且减少同步开销。现有的时钟同步算法有 RBS^[2]、TPSN^[3] 和 DMTS^[4] 等, 新的算法如 FTSP^[5] 等也相继提出, 但都未兼顾这两方面。传感

器网络同步协议 TPSN (Timing-sync Protocol for Sensor Network), 采用双向通信, 在精度方面较其他算法 (如 RBS) 可以提高一倍的精度, 对于单跳的同步误差大约为 $17 \mu\text{s}$ ^[6], 但它未对时钟频差进行估计, 因此需要频繁同步保证精度, 开销较大, 本文利用 TPSN 协议同步后, 通过计算在相邻层次节点同步过程中得到的参考时钟和本地时钟的差值并分析其与同步过程周期之间的线性关系, 以此为基础实现节点对本地时钟的自校正来维持本地时钟精度, 此方法延长了同步过程周期, 减少了同步分组开销,

基金项目: 国家创新群体基金资助项目 (NCRGSFC 60421002); 国家高技术研究发展计划资助 (863 计划 2006AA040301); 浙江省重大科技专项课题资助 (2006C11109)

收稿日期: 2008-01-25 **修改日期:** 2008-03-18

降低了耗费在同步过程中的能耗,即延长了节点的生存周期。

1 TPSN 同步协议

传感器网络时钟同步协议(TPSN)是基于层次模型的全网络同步协议,采用发送者\接受者同步机制,通过相邻层次节点之间对称的分组交互实现同步过程。协议的实现需要以下两个阶段^[7]:层次发现阶段和同步阶段。网络层次确定后,参考节点发起同步过程,根据 level 值划分的相邻层次节点之间同步,直到延伸至全网。每两个节点之间的同步过程如图 1。

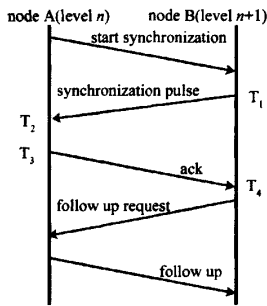


图 1 TPSN 同步分组交互

T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别是节点 A、B 发送、接收分组时间戳。

设两个节点的时钟偏差值为 Δ , 分组传输延迟为 δ_1 、 δ_2 , 则有:

$$T_2 = T_1 + \Delta + \delta_1 \quad (1)$$

$$T_4 = T_3 - \Delta + \delta_2 \quad (2)$$

由公式(1)、式(2) 求出 Δ :

$$\Delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2} - \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \quad (3)$$

公式(3)的计算过程在节点 B 中完成,节点 B 与节点 A 的同步只需在节点 B 的本地时钟上加上偏差 Δ 即可。TPSN 旨在通过节点间交互分组的对称性消除 δ_1 、 δ_2 对 Δ 的影响。

2 时钟偏差不确定性分析

节点间时钟偏差不确定性主要由分组传输延迟不确定性和时钟频率不确定性引起,而后者又会影响前者,本文重点解决由晶振漂移造成的时钟频率不确定性。

2.1 分组传输延迟不确定性

分组传输时间由四部分构成^[6]:发送时间、访问时间、传播时间和接收时间,每一部分都造成一定的时间延迟,分别用 $\delta_s, j, t_p, \tau, \delta_r, i$ 表示,对于大小相

等的分组,两个方向上的 t_p 和 τ 相等,结合公式(3)得:

$$\frac{\delta_1 - \delta_2}{2} = \frac{\delta_{s,i} - \delta_{r,i}}{2} + \frac{\delta_{r,j} - \delta_{s,j}}{2} \quad (4)$$

如果分组发送、接收时间戳打在 MAC 层,保证分组交互的对称性,由 TPSN 的同步偏差计算公式可以得出在此情况下分组传输延迟对偏差 Δ 的影响可以消除。

2.2 时钟频率不确定性

理想情况下,各节点时钟频率相同,同步一次之后稳定运行,不会产生累积偏差。

实际情况下,由于不同节点晶振频率(产生时钟的信号源)的差异会造成同步后两节点实际时钟 $C_A(t)$ 和 $C_B(t)$ 的漂移,由于晶振频率的稳定性,二者之间存在一定的线性关系:

$$C_A(t) - C_A(t_0) = k(C_B(t) - C_B(t_0)) \quad (5)$$

$$C_A(t) = kC_B(t) + C_A(t_0) - kC_B(t_0) \quad (6)$$

$C_A(t_0)$ 和 $C_B(t_0)$ 为每次同步过程结束后两节点的时钟实时值; k 表示节点 A 相对于节点 B 的晶振漂移率,理想情况下, k 的值应该为 1,但通常所使用晶振的 ppm 为 10~100,即 1 s 会产生 10~100 μ s 的漂移, k 也会产生 $\pm 0.000\ 01 \sim 0.000\ 1$ 的偏差。

图 2 中实线表示同步后的两节点实际时钟的线性关系,点线表示不存在晶振漂移的情况下两节点时钟的线性关系,设

$$d = C_A(t_0) - kC_B(t_0) \quad (7)$$

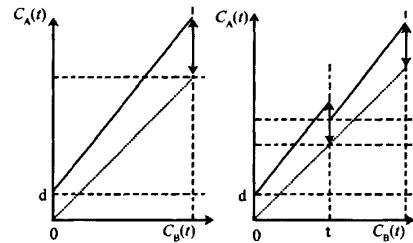


图 2 同步的两节点实际时钟的线性关系

图 2(a)表示一次同步后结果曲线,图 2 (b)表示在 0 时刻和 t 时刻进行了两次同步。

从两图均可以看出,每次同步后都会产生 d 的绝对偏差,随着时间的推移,由晶振漂移造成的两节点时钟累积偏差(图中的双向箭头表示)慢慢增大,很明显同步周期越长,下一次同步前的时钟偏差越大,本文将利用一种补偿方法减小时钟累积偏差,提高两次同步过程之间的本地时钟精度。

3 本地时钟自校正方法

由公式(6)可得 t 时刻本地时钟与参考时钟的

偏差为:

$$\Delta = C_A(t) - C_B(t) = (k-1)C_B(t) + C_A(t_0) - kC_B(t_0) \quad (8)$$

由于晶振漂移的存在,下一次同步前时钟偏差 Δ 会随着同步周期的增大而增大,缩短同步周期可以提高平均同步精度,但势必会增加分组数量。在无线传感器网络中,节点间通信占节点能耗的主要部分,即使节点处于侦听状态^[8],能耗也远远高于休眠状态,所以频繁地分组交互不利于节约能耗。对此,本文提出了一种在不缩短同步周期的前提下通过节点自身修正晶振频率漂移值^[9]来提高本地时钟实时精度的方法,以及一种平均时钟偏差指标对其进行评价。

3.1 自校正原理

节点内部时钟格式由时钟秒值和计数器的计数值(ticks)构成。节点使用频率为 32 768 Hz 的晶振作为时钟源,计数器计数 32 678 次为本地时钟的 1 s,并产生一次中断,将时钟的秒值加 1。时钟的最小单位(分辨率)就是计数器的 ticks 值。时钟同步就是使节点间对应的秒值和计数值都相等,而晶振漂移造成不同节点计数器的计数间隔产生微小差异,使得节点本地时钟与参考时钟同步后,随着时间推移,本地时钟计数器的计数值就会渐渐偏离参考时钟,使本已同步的时钟不再同步,直至下一次同步过程。

自校正的原理是在两次同步过程之间通过节点自身对计数器的调节来维持本地时钟精度。

本地时钟实现自校正前,为了减小其他不确定因素的干扰,先作如下假设:

假设① 以参考时钟作为准确时钟,而不是以真实的物理时钟为准。

假设② 同步双方分组交互对称,即双向传输延迟 δ 相等,排除它对时钟偏差 Δ 的影响。

假设③ TPSN 同步后,本地时钟与参考时钟绝对同步,即 $CA(t_0)$ 和 $CB(t_0)$ 相等,并且忽略了同步分组交互过程中本地时钟相对于参考时钟的偏移。

3.2 自校正的实现

节点利用 TPSN 协议同步后,得到一个同步周期内本地时钟和参考时钟的偏差值,即两个节点计数器 ticks 值的差值,记为 Δ ,同步周期记为 T ,根据 Δ 和 T 之间的线性关系,求出产生一个 tick 偏差的时间:

$$T_{\text{comp}} = \frac{T}{\Delta} \quad (9)$$

与时钟格式一样, T_{comp} 也包含秒值和 ticks 值,鉴于 Δ 的正负,为 T_{comp} 增加一个符号项 sign, sign 为正代表本地时钟偏快。

MCU 内部定时/计数器的 CCR 寄存器用于与 ticks 值比较,将 CCR 的值设定为 32 767,则计数器从 0 计数到 32 767 的时间对应节点时钟的 1 s,而由于晶振的漂移,对于参考时钟的 1 s,本地时钟的实际计数次数会偏离 32 768 次。公式(9)已经得出产生 1 次的计数偏差经过时间 T_{comp} ,所以每经过 T_{comp} 的时间对本地时钟进行一次补偿即可完成自校正,一个同步周期内共补偿 Δ 次,这样两次同步过程之间本地时钟产生的计数偏差将完全消除。

本地时钟的 1 s 由计数器和 CCR 比较寄存器共同决定,在每次补偿时刻来临时调整 CCR 寄存器设定值,即延长或缩短本地时钟下一秒的时间长度来校准时钟。

根据前面得到的 T_{comp} 以及 Δ ,可以计算出对 CCR 进行调整的时刻 t_{sec} ,当这个时刻到来时根据 T_{comp} . sign 的正负对 CCR 值做加一或减一处理,当计数器的 ticks 值再次到达新的 CCR 设定值后,即完成了一次时钟补偿,每次补偿后复位 CCR 值并计算出下一次补偿的时刻 t_{sec} ,当完成 Δ 次后,本同步周期的时钟补偿结束。第 n 次调节的时刻计算公式如下:

$$t_{\text{sec}} = T_{\text{comp}} \cdot \text{sec} \times n + (T_{\text{comp}} \cdot \text{ticks} \times n) \div 32768 \quad (10)$$

3.3 平均时钟偏差指标算法

本地时钟与参考时钟在整个同步周期的平均偏差指标计算方法如下:

将 T_{comp} 转换为以秒为单位的实数值,记为 g ,设 i 为补偿时刻序号,其取值为 1 到 Δ ,图 3 为每次补偿前后偏差变化曲线,用图中两次同步过程之间阴影部分的面积除以同步周期,即可得到一个同步周期的平均时钟偏差值。

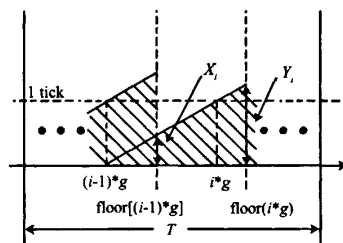


图3 补偿后时钟偏差变化曲线图

图中每两次补偿时刻之间的阴影为梯形,设其上底、下底分别为 X_i 、 Y_i ,高为 H_i 。floor() 为上取整函数。则根据图中的比例关系可以得到 X_i :

$$\frac{\text{floor}[(i-1)g] - (i-1)g}{g} = \frac{X_i}{1} \quad (11)$$

$$X_i = \frac{1}{g} \{ \text{floor}[(i-1)g] - (i-1)g \} \quad (12)$$

同理得到 Y_i :

$$\frac{g}{\text{floor}(i \times g) - (i-1)g} = \frac{1}{Y_i} \quad (13)$$

$$Y_i = \frac{1}{g} [\text{floor}(ig) - (i-1)g] \quad (14)$$

梯形的高 H_i 为:

$$H_i = \text{floor}(i \cdot g) - \text{floor}[(i-1)g] \quad (15)$$

梯形的面积 S_i 为:

$$S_i = \frac{1}{2} \cdot (X_i + Y_i) \cdot H_i = \frac{1}{2g} \text{floor}^2(i \cdot g) - \text{floor}^2[(i-1)g] - (i-1) \cdot \{ \text{floor}(i \cdot g) - \text{floor}[(i-1)g] \} \quad (16)$$

$$S = \sum_{i=1}^{\Delta} S_i = \frac{1}{2g} \text{floor}^2(\Delta \cdot g) + \text{floor}(\Delta \cdot g) -$$

$$\sum_{i=1}^{\Delta} i \times \{ \text{floor}(i \cdot g) - \text{floor}[(i-1)g] \} \quad (17)$$

将 g 代入:

$$S = T + \sum_{i=1}^{\Delta} \text{floor}[(i-1)g] - \frac{\Delta \cdot T}{2} \quad (18)$$

则平均偏差 $\bar{\Delta}$ 得:

$$\bar{\Delta} = \frac{S}{T} = 1 + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^{\Delta} \text{floor}[(i-1)g] - \frac{\Delta}{2} \quad (19)$$

4 实验及结果分析

实验硬件平台是 MSP430F1612 微控制器 + CC2420 射频控制器(基于 IEEE802.15.4^[10]),节点时钟信号源是一颗标定频率为 32 768 Hz 的晶振。

实验方式为双节点两级同步,由参考时钟节点主动发起同步请求,对两节点时钟分别进行采样,采样周期为 1 s,对采样值做差处理,得到同步偏差曲线,并对比、分析自校正与非自校正方式下的同步偏差曲线。

图 4、图 5 和图 6 是未应用自校正算法时不同同步周期下(20 s、10 s、1 s)的偏差曲线。

由图 4~图 6 可以看出,同步偏差具有以下特点:每次同步后晶振漂移造成偏差逐渐增大,直至下一次同步;缩短同步周期,可以减少每次同步前的最大偏差。

图 7 是同步周期为 20 s 时,应用节点自校算法后的偏差曲线。

比较使用节点自校正算法前后的实验结果,可

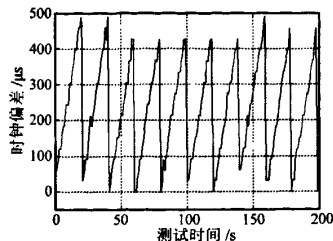


图 4 同步周期为 20 s 的同步偏差曲线

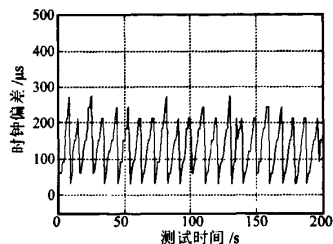


图 5 同步周期为 10 s 的同步偏差曲线

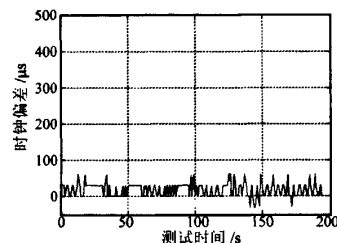


图 6 同步周期为 1 s 的同步偏差曲线

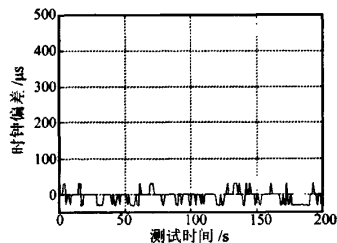


图 7 自校正后同步周期为 20 s 的同步偏差曲线

以看出经过补偿,时钟偏差不再有明显漂移,趋于稳定状态。偏差主要分布在 $\pm 100 \mu\text{s}$ 以内,已经达到自校正前同步周期为 1 s 时的效果,并且已经分辨不出明显的同步时刻,理论上可以无限延长同步周期,直至同步出错或设备掉电重启。

实验得到同步周期为 20 s 时的时钟偏差是 14 ticks,所以需要进行 14 次补偿,产生 1 tick 偏差的时间间隔为 $20 \div 14 \approx 1.428$,每次产生 1 tick 偏差对应补偿时刻 2 s、3 s、5 s、6 s、8 s、9 s、10 s、12 s、13 s、15 s、16 s、18 s、19 s、20 s,将以上各值代入公式(19),得 $\bar{\Delta} = 1.65$,平均偏差大约为 $1.65 \times 1 \div 32768 = 50 \mu\text{s}$,与图 7 基本吻合。

5 结语

本文提出将 TPSN 同步协议与本地时钟自校正相结合,最大限度地削减两次同步过程之间的晶振频率漂移,对网络长期稳定运行有重要意义。

实际应用中,存在相邻节点中同时与参考节点同步交互以及邻级同步隐终端的情况,协调器需对各节点同步时刻进行有效调度分配;对于同步过程出错,除备份前次同步时钟外,还可以通过同步偏差值反馈来保证同步校正的稳定性。

参考文献:

- [1] Sundararaman B, Buy U, and Kshemkalyani A D. Clock Synchronization in Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Ad-Hoc Networks, 2005-3(3):281-323.
- [2] Elson J, Girod L and Estrin D. Fine-grained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[C]// Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, 2002:147-163.
- [3] Noh Kyoung-Lae, Chaudhari Qasim, Serpedin Erchin, Suter Bruce. Analysis of Clock Offset and Skew Estimation in Timing-sync Protocol for Sensor Networks[C]// Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE Nov, 2006:1-5.
- [4] Ping S. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[J]. Intel Research, IRB-TR-03-013, June 2003.
- [5] Maroti M, Kusy B, Simon G, Ledeczi A. Flooding Time Synchronization in Wireless Sensor Networks[C]// ACM SenSys '04, 2004.
- [6] Saurabh Ganeriwal, Ram Kumar, Mani B. Srivastava. Timing-sync Protocol for Sensor Networks[C]// Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, 2003:138-149.
- [7] Gao Qiang, Xu Baomin. Time Synchronization Improvement for Wireless Sensor Networks[C]// 1st International Symposium on Pervasive Computing and Applications, August 3-5, 2006.
- [8] Dennis Cox, Emil Jovanov, Aleksandar Milenkovic. Time synchronization for ZigBee networks[C]// System Theory, 2005. SSST '05. Proceedings of the Thirty-Seventh Southeastern Symposium, 2005:135-138.
- [9] Kamin Whitehouse, David Culler. Calibration as Parameter Estimate in Sensor Networks[R]. In Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications(WSNA), Atlanta, USA, 2002.
- [10] IEEE std. 802. 15. 4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer(PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPAN)[S],[EB/OL] <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4-2003.pdf>.



许剑新(1984-),男,黑龙江,浙江大学信息学院硕士研究生,研究方向为无线传感器网络在实时工业通信中的应用, xjx009@gmail.com



冯冬芹(1968-),男,江苏,工学博士,浙江大学教授,浙江中控技术有限公司EPA标准研发中心主任;主要研究方向是工业数字数据通信技术及其标准化(包括现场总线、实时以太网、实时无线通信关键技术);智能化仪器仪表等, dqfeng@iipc.zju.edu.cn