

文章编号:1671-8879(2011)01-0107-04

异构无线传感器网络下的分簇时间同步算法

包 旭, 巨永锋

(长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064)

摘 要: 为了降低大型无线传感器网络的时间同步能耗, 分析并计算了同步信息发送和接收过程中的时延组成, 得出节点的时钟偏差, 并利用线性回归法计算节点的频率漂移, 在此基础上, 将异构网络中的中继节点作为簇首, 首先实现簇首与 sink 节点的时间同步, 然后实现簇内的时间同步。分析表明, 本算法同步误差只与传播时延和编解码时延有关, 同时在同步过程中所需发送和接收的同步字节少, 可以延长网络的生命周期。

关键词: 计算机网络; 异构; 无线传感器网络; 时间同步; 分簇

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A

Cluster-based time synchronization algorithm for heterogeneous wireless sensor networks

BAO Xu, JU Yong-feng

(School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to low energy consumption of time synchronization in large wireless sensor networks (WSN), the components of transmission delay of synchronization message between sender and receiver are analyzed and computed, the time offset of nodes are obtained, and the frequency drift are computed by linear regression method. On this basis, the relay nodes in the heterogeneous WSN are taken as cluster heads, the time synchronization between cluster heads and sink node are firstly realized, and then the time synchronization in clusters are realized. Analysis indicates that, for one thing, the error of this algorithm is only relative to propagation delay, coding and encoding delay, for another thing, synchronization words needed in the process of synchronization are less, so this algorithm can prolong the lifecycle of WSN. 3 figs, 7 refs.

Key words: computer network; heterogeneous; wireless sensor network; time synchronization; clustering

0 引 言

几乎每个无线传感器网络节点都使用一个特定频率的晶体振荡器和一个计数寄存器, 实现本地时钟对时间的测量^[1]。每出现一个振荡脉冲, 寄存器就加 1, 控制器读取计数值后, 就可知道节点的本地

时间。然而, 由于网络中每个节点启动时间各不相同, 以及每个节点晶体振荡器的实际振动频率具有不同的漂移, 因此存在网络中节点时间不同步问题。

时间同步是无线传感器网络的诸多应用和协议的基础, 而由于受到节点能量、通信距离和带宽等条件限制, 传统网络同步协议并不适用。正因如此, 国

收稿日期: 2010-02-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(60806043)

作者简介: 包 旭(1982-), 男, 江苏淮安人, 工学博士研究生, E-mail: baouxubaouxu@126.com。

内外做了大量的研究,提出了众多无线传感器网络时间同步协议,如RBS(reference broadcast synchronization)、LTS(lightweight time synchronization)、TPSN(timing-sync protocol for sensor networks)、FTSP(flooding time synchronization protocol)、TinySync和MiniSync协议等^[2-6]。这些协议侧重于提高同步精度,或侧重于降低同步能耗,但是,实际监测区域往往地域广、传感器数目多,一般的同步算法往往会出现能耗较高、多跳情况下的同步精度较低的情况。为此,本文研究异构无线传感器网络下的时间同步,利用异构中继节点在通信距离、传输宽带等方面的优势,以其为簇首,减少同步消息包的发送节点,在保证同步精度的基础上降低能耗,具有较好的稳定性和扩展性。

1 网络模型

假设 n 个无线传感器节点密集地分布在某个监控区域内,其网络模型如下所述。

(1) 监测节点 x 个,用于监测实时数据,记为待同步节点。

(2) 中继节点 $y = n - x$ 个。中继节点能实现对待同步节点的完全覆盖,用于对待同步节点的数据

进行融合,并通过一定的路由算法传输至sink节点。具体的路由算法和覆盖算法不在本文研究范围内。中继节点也是待同步节点的时钟参考节点,记为时间汇聚节点。时间汇聚节点通信半径可调。

(3) sink节点不受能量限制,通信半径可调。sink节点时钟是精确的,记为标准时间节点。

2 单跳节点之间的时间同步

2.1 信号传输时延分析

由于节点执行指令消耗的能量比发送、接收信号所消耗的能量要小得多,所以在同步过程中,尽量避免待同步节点发送数据包,只计算其相对于参考时钟节点的频率漂移和时钟偏差,并自己纠正,有利于节约整个网络的能量^[7]。

研究信号从发送节点开始发送到接收节点接收结束的时延是时间同步的基础。发送节点 S 要发送一个数据包至接收节点 R ,在经过从物理层到MAC层的发送时延、在MAC层等待的访问时延和发送中断时延后,在 T_s 时刻发送出该数据包, R 在本地时刻 T_r 时刻接收完该数据包。可以将整个时延分为若干部分,如图1所示。

由于 S 和 R 可以在MAC层添加时间戳,所以

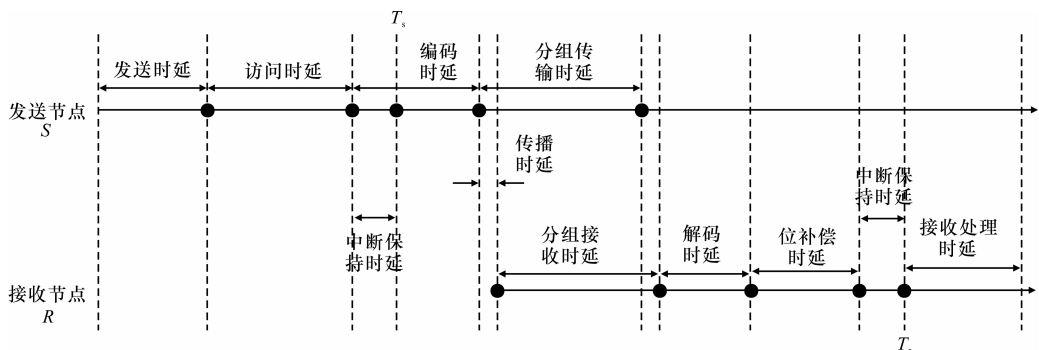


图1 发送接收信息时延

可以去掉发送时延、访问时延和接收处理时延的影响。因此在信号的传输过程中,经历了以下时延。

(1) 编码时延 δ_e 。S在数据包发送之前将其编码为二进制编码和无线电信号的时间。

(2) 传播时延 δ_p 。无线电信号在空中传播的时间。由于无线电信号的传播速度极快,故在传播距离较短(小于300 m)的情况下,传播时延小于 $1 \mu\text{s}$,可以忽略。

(3) 传输时延 δ_t 。S按bit发送数据包的时间和R按bit接收数据包的时间。若忽略传播时延,S和R的传输时延重叠,计算式为

$$\delta_t = k\gamma$$

式中: k 为发送的bit数; γ 为发送1 bit的速度。

(4) 解码时延 δ_d 。R接收无线电信号并对其进行解码的时间。为了方便计算,可将发送编码时延和接收解码时延作为一个整体来计算,记为 δ_{ed} 。S和R的位同步的误差可能导致 δ_{ed} 出现波动。

(5) 位补偿时延 δ_b 。由于R和S数据包字节不对齐,所以必须在R节点有进行位对齐的时间,计算式为

$$\delta_b = P\gamma$$

式中: P 为需要位对齐的位数。

(6) 中断保持时延 δ_i 。R的中断响应时延,有时长有时短,可通过额外的硬件装置实现对其测量。

设在 S 发送的同步信息数据包中除了前导字节和校验位外,还有 m 个同步字节, S 发送完 m 中的每一个字节都记录发送时刻 T_{sj} ,并随同数据包一起发送至 R 。 R 接收完每个字节也对应记录本地接收时刻 T_{rj} ,对应的编码解码时延、传输时延和位对齐时延分别为 $\delta_{ed,j}$ 、 δ_{tj} 和 δ_{bj} , $j \in m$ 。由于单次传输一个数据包的过程中,接收节点 R 只需一次中断保持,故相邻 2 个字节之间存在编码解码时延、传输时延和位对齐时延。取

$$\delta_{ed} = \frac{1}{m-1} \sum_{j=1}^{m-1} (T_{r(j+1)} - T_{rj} - \delta_{b(j+1)} - \delta_{t(j+1)})$$

则发送接收每个字节对应的总时延为

$$\delta_j = \begin{cases} \delta_{tj} + \delta_{ed} + \delta_i + \delta_{bj}, & j = 1 \\ \delta_{tj} + \delta_{ed} + \delta_{bj}, & j \neq 1 \end{cases}$$

2.2 时钟偏差和频率漂移的计算

在第 m 个字节接收结束后,可计算当时的时钟偏差 Δ ,计算式为

$$\Delta = T_{rm} - T_{sm} - \delta_m$$

式中: T_{rm} 为 S 发送完 m 个字节的发送时刻; T_{sm} 为 R 接收完 m 个字节的接收时刻; δ_m 为发送接收 m 个字节对应的总时延。

全局发送和接收时刻 T_s 、 T_r 对应的全局发送、接收时间分别为 t_s 、 t_r 。针对每一个本地时间 T_{rj} ,所对应的全局时间为

$$t_{rj} = t_{sj} + \delta_j$$

其中,令 $T_{rj} = \alpha t_{rj} + \Delta$, α 为频率漂移,则根据最小二乘拟合法,可计算出节点的频率漂移值。

3 异构无线传感器网络的时间同步

异构无线传感器网络的时间同步包括 3 个步骤:簇的形成,时间汇聚节点与标准时间节点的同步,待同步节点与时间汇聚节点的同步。

3.1 簇的形成

(1)时间汇聚节点首先向邻居广播自己作为簇首的信息 $Chh_message$ 。在广播过程中,网络利用 CSMA 协议避免冲突。

(2)在时间汇聚节点单跳通信范围内的待同步节点接收到第一个簇首信息后,保存该信息中的节点 ID 作为本节点的簇首 ID。

(3)待同步节点向邻居节点广播加入该簇的信息 $Jon_message$,且不再接收其他簇首节点广播的信息。信息 $Jon_message$ 可能直接发送至簇首,也可能经过与簇首较近的待同步节点转发至簇首。

(4)簇首为簇内的各个待同步节点建立路由表,并调度各个待同步节点的信息发送时间。

整个网络形成的簇结构如图 2 所示。

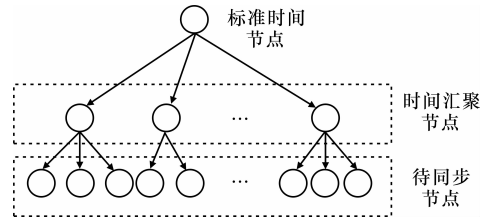


图 2 异构无线传感器网络的簇结构

3.2 同步过程

无线传感器网络的同步首先从各个时间汇聚节点与标准时间节点的同步开始,然后进行各个簇内待同步节点与时间汇聚节点同步。时间汇聚节点与标准时间节点的同步和簇内同步的原理是相同的,因此可以把标准时间节点看作由各个时间汇聚节点和标准时间节点所组成的簇的簇首。在某个簇内,假定簇首节点为发送节点 S ,而待同步为接收节点 R ,则同步过程如下所述。

(1) S 向 R 发送自己的同步信息包 $Syn_message$,一个同步信息包中包括多个时间戳。

(2) R 节点在接收到同步信息时,也相应地记录接收时刻,分析并去除误差较大的数据后,计算出传输时延 δ 。

(3) R 节点计算 R 相对于 S 的时钟偏差和频率漂移。

(4) R 节点根据计算出的时钟偏差和频率漂移调节自身的时钟。

簇首与待同步节点的同步时序如图 3 所示。

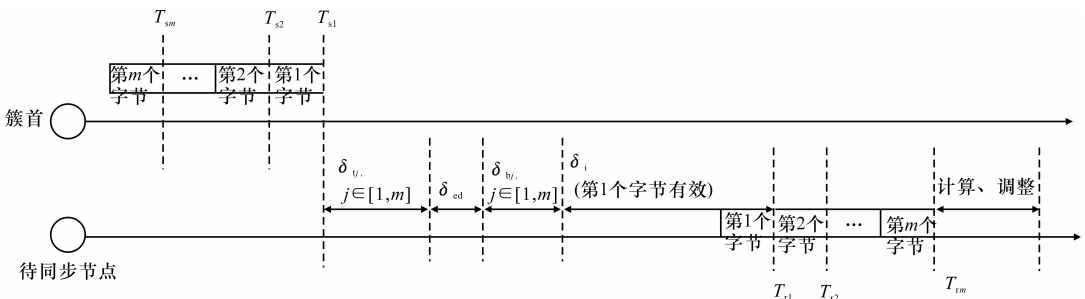


图 3 簇首与待同步节点的同步时序

3.3 同步周期

同步周期的大小与对同步精度的要求密切相关,同步周期越大,则精度越低;反之,精度越高。同时,同步周期也与能耗密切相关,周期越小,频率越高,能耗越大;反之则能耗越低。具体的同步周期的选择应根据不同的精度和能耗要求来确定。

4 算法分析

4.1 同步精度分析

不考虑短时节点频率漂移的情况下,由于本算法忽略了传播时延,因此单跳同步误差主要是由编码解码时延和传播时延引起的。在第 m 个字节接收完毕后,节点 R 调整相对 S 时钟偏差 Δ ,而实际上,由于位偏移等原因,可能会导致编码解码的时间波动,设第 m 个字节的编码解码时间为 $\delta_{ed,m}$,则同步误差 $E_r = \delta_{ed} - \delta_{ed,m} + \delta_p$ 。

另外,待同步节点距离 sink 节点的跳数对于同步精度也有一定影响,本算法只需要 2 跳就可完成全网络的同步。而随着网络节点数的增加,FTSP、TPSN 等算法中的跳数也随之增加,同步精度也将随之降低。

4.2 单轮全网同步能耗分析

使用泛洪算法时,每个节点都要接收同步信息,并向每个邻居节点发送同步信息,而本算法只有标准时间节点和时间汇聚节点需要发送同步信息。假设发送一组长度为 m (bit) 的信息至距离为 d 的节点所消耗的能量 E_t 为

$$E_t = mE + \epsilon d^2$$

式中: E 为发送 1 bit 的能耗; ϵ 为传输放大器的能耗系数。

节点接收 m (bit) 的信息所消耗的能量为 mE ,则本算法中所消耗的能量 E_{sum} 为

$$E_{sum} = 2nmE + \sum_{i=1}^y \epsilon d_i^2 + \sum_{i=1}^y \sum_{j=1}^{x_i} \epsilon d_{ij}^2$$

式中: d_i 为 sink 节点到第 i 个时间汇聚节点的距离; y 为时间汇聚节点数; d_{ij} 为第 i 个时间汇聚节点到簇内第 j 个待同步节点的距离; x_i 为第 i 个簇内的待同步节点数。

5 结 语

(1)针对异构无线传感器网络的特点,提出具有

2 层簇结构的同步算法。

(2)在提高同步精度方面,算法一方面计算同步消息发送过程中的传输时延,较精确地计算节点间的时间偏差,并利用线性回归法计算节点的频率漂移,另一方面,利用簇结构减少全网同步的跳数。

(3)在减少能耗方面,主要利用网络中的异构中继节点发送同步信息到普通待同步节点,减少网络发送信息的数量;分析表明,本算法复杂度低,适合于大型异构无线传感器网络。

参考文献:

References:

- [1] Coulouris G, Dollimore J, Kindberg T. Distributed systems: concepts and design[M]. 3 ed. Harlow: Addison-Wesley, 2000.
- [2] Elson J, Girod L, Estrin D. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [C]// ACM Dress Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation(OSDI 2002). Boston: ACM Press, 2002: 147-163.
- [3] Greunen J V, Rabaey J. Lightweight time synchronization for sensor networks [C]// ACM Dress Proceedings of the 2nd ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications (WSNA). Atlanta: ACM Press, 2003: 11-19.
- [4] Ganeriwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync protocol for sensor networks [C]// ACM Dress Proceedings of the 1st ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Los Angeles: ACM Press, 2003: 138-149.
- [5] Maroti M, Kusy B, Simon G, et al. The flooding time synchronization protocol [C]// ACM Dress Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Baltimore: ACM Press, 2004: 39-49.
- [6] Sichitiu M L, Veerarittiphan C. Simple, accurate time synchronization for wireless sensor networks [C]// IEEE Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking 2003 (WCNC). New Orleans: IEEE Computer Society, 2003: 1266-1273.
- [7] Pottie G J, Kaiser W J. Embedding the internet: wireless integrated network sensors [J]. Communications of the ACM, 2000, 43(5): 51-58.