

能量高效的 WSN 时间同步算法^①

刘庆龙, 高 航

(南京航空航天大学计算机科学与技术学院, 南京 210016)

摘 要: 本文主要研究了无线传感器网络时间同步技术, 针对传感器网络能量有限的特点, 提出了一种能量高效的时间同步算法 EETS(Energy Efficient Time Synchronization). 它采用分层成簇的策略, 将网络节点划分为主次两种网络, 分别使用 TPSN 算法和 DMTS 算法的思想进行时间同步, 从而降低了算法复杂度, 减少了通信量. 仿真结果表明, 与 TPSN 算法相比, 该算法在一定程度上降低了网络能耗, 有效延长了网络的生命周期.

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 能量高效; EETS; 分层成簇

Energy Efficient Time Synchronization Algorithm for WSN

LIU Qing-Long, GAO Hang

(College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper studies the wireless sensor network time synchronization technology for sensor networks with limited energy, we proposed an energy efficient time synchronization algorithm EETS (Energy Efficient Time Synchronization). It uses a hierarchical clustering strategy, divides the network into two different subnets, respectively TPSN algorithm and idea of the DMTS algorithm for time synchronization, thereby reducing the complexity of the algorithm, reducing traffic. Simulation results show that, compared with the TPSN algorithm, this algorithm reduced the energy consumption of the network, effectively extended the network life cycle.

Keywords: WSN; time synchronization; energy efficient; EETS; hierarchical cluster

1 概述

时间同步是无线传感器网络中一项非常关键的技术. 它是无线网络节点定位、数据融合、休眠调度等应用的基础, 通过时间同步可以保证整个通信网内所有节点都有相同的时间标准, 从而确保传输数据的可靠性. 同时, 无线传感器网络能量有限的特点, 要求我们在设计时间同步算法时把降低网络能耗作为考虑的重点. 传统的时间同步算法^{[1][2]}如 GPS、NTP 由于复杂度高、能耗大等特点, 不适合用在无线传感器网络上. 而自 2002 年, J Elson 和 Kay Romer 首次提出并阐述了无线传感器网络时间同步技术以来, 已经出现了许多成熟的实现和改进算法. 比如 RBS^[3]算法、TPSN^[1]算法、FTSP^[4]算法、DMTS^[5]算法等等. 不同的算法实现的复杂度、同步精度不尽相同, 适合于不

同的应用场景.

本文在 TPSN 算法的基础上, 结合分层成簇的思想, 提出了一种改进的能量高效的时间同步算法. 利用能量模型进行了量化分析, 并通过 NS2 进行仿真. 分析结果和仿真实验表明, 与 TPSN 算法相比, 该算法减少了通信量、降低了网络能耗, 有效延长了网络的生命周期.

2 EETS 算法

2.1 TPSN 算法

TPSN(Timing-Sync Protocol for Sensor Networks)算法与传统的 NTP 算法类似, 采用层次型的网络结构, 是基于发送者-接收者的双向同步算法^{[6][7]}. 该算法分成两个阶段, 第一阶段为层次发现阶段, 该阶段是在

^① 收稿时间:2013-10-17;收到修改稿时间:2013-11-08

网络部署后将网络节点层次化, 分为 0 到 n 个层次; 第二阶段为时钟同步阶段, 层次结构建立后, 通过同步广播包, 从 0 层到 n 层逐层时钟同步. 其时钟同步过程如图 1 所示.

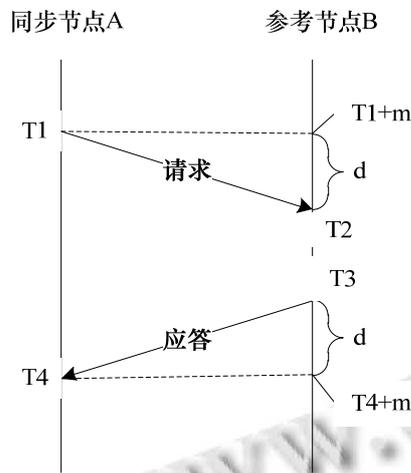


图 1 TPSN 时钟同步过程

T_1 、 T_4 用来记录同步节点的本地时间, T_2 、 T_3 用来记录参考节点的本地时间. 同步节点 A 在 T_1 时刻向参考节点 B 发送一个同步请求报文, 报文中包含了同步节点的级别和 T_1 , 当参考节点 B 收到报文后, 记录下接收时刻 T_2 , 并立即向同步节点 A 回复一个同步应答报文, 该报文中包含了参考节点 B 的级别和 T_1 、 T_2 以及回复时刻 T_3 . 同步节点 A 收到参考节点的回复后, 记下时刻 T_4 , 假设来回报文的传输延迟相同都为 d , 且 m 为同步节点在 T_1 时刻两者之间的时钟偏差, 由:

$$T_2 = T_1 + m + d, T_4 = T_3 - m + d$$

可得到:

$$m = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}, d = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{2}$$

则在 T_4 时刻, 若同步节点 A 的本地时间增加修正量 m , 就能达到同步节点 A 与参考节点 B 之间的同步.

2.2 EETS 算法

TPSN 算法实现复杂度高, 而且因为两次握手, 能量消耗比较大, 我们在此基础上结合 DMTS 算法的思想, 提出了 EETS 算法, 目的是为了降低网络能耗, 延长网络工作周期. 图 2 为其网络拓扑图. 其中实线部分为主路径, 虚线部分为簇头节点与成员节点的通路.

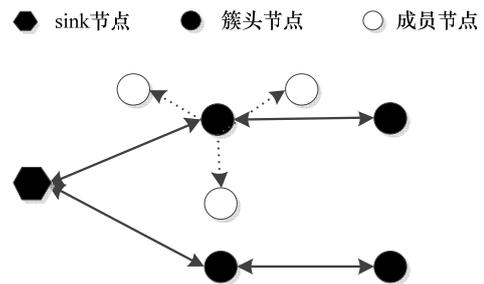


图 2 EETS 算法网络拓扑图

EETS 算法分成两个阶段: 第一个阶段为主路径上的同步阶段. 首先, sink 节点通过广播时间同步报文启动同步阶段, 第 1 级节点收到报文后, 各自分别等待一段随机时间, 再通过与 sink 节点交换消息同步到 sink 节点. 第 2 级节点侦听到第 1 级节点的交换消息后, 等待一段随机时间, 再与它记录的上一级别的节点交换报文进行同步, 网络中的簇头节点依次与上一级节点进行同步, 最终都同步到 sink 节点. 等待一段随机时间是为了保证该级节点在上一级节点同步完成后才启动消息交换. 图 3 为主路径上每个簇头节点的工作流程图.

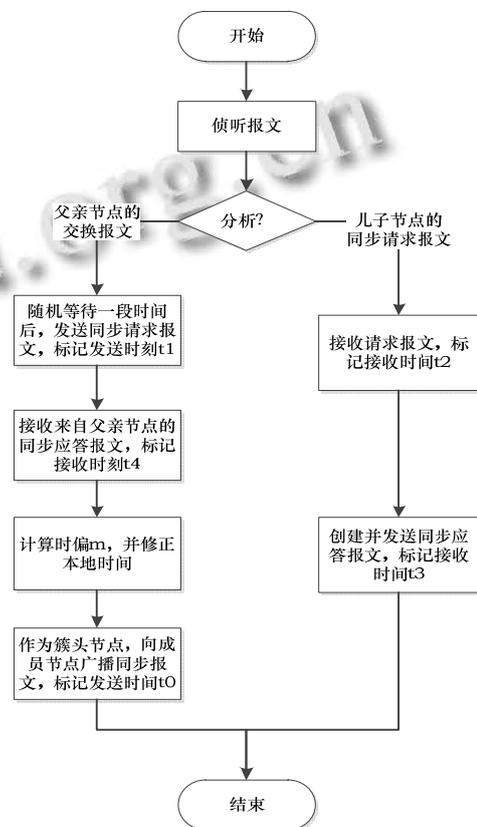


图 3 主路径上簇头节点工作流程图

第二阶段为簇头节点与簇内各成员节点之间的时间同步. 簇头节点完成本地节点的时钟修正以后, 广播一个时间同步报文给簇内成员节点, 并标有发送时间 t_0 , 成员节点收到同步报文后, 依据 DMTS 算法的思想进行本地时钟的修正. 成员节点具体的工作流程如图 4 所示.

EETS 算法通过两个阶段的操作, 完成了网络范围内所有节点的时间同步, 相较于 TPSN 算法来说, 减少了报文交换次数、降低了整个网络算法的复杂度, 从而提高了整个网络的能量效率.

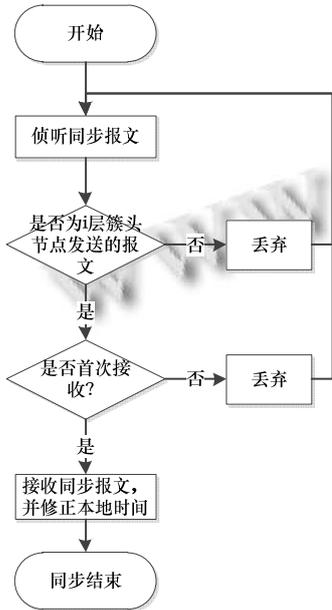


图 4 成员节点工作流程图

3 算法分析

3.1 节点能量传输模型

从硬件电路考虑, 传感器节点消耗能量的模块包括传感器模块、处理器模块和无线通信模块. 随着集成电路工艺飞速发展, 高性能和低功耗的处理器和传感器模块技术日益成熟, 使得指令计算和数据采集消耗的能量大大小于无线通信模块^{[1][8]}. 而且这种常量性消耗不影响通讯模型, 因此我们主要对无线通信模块进行分析, 并采用文献[9]给出的节点能量传输模型. 假设网络环境为自由空间, 将一个 k 比特的信息传送距离 d , 射频电路的发送耗能和接收耗能分别为:

$$E_{TX}(k, d) = kE_e + k\epsilon d^2 \quad (1)$$

$$E_{RX}(k) = kE_e \quad (2)$$

式中 E_e 表示发射装置(transmit electronics, TE)和

接收装置(receive electronics, RE)每发送或接收单位 bit 的耗能; ϵ 表示发射放大器将每 bit 数据传送单位平方米所耗的能量.

3.2 TPSN 能耗分析

我们利用上述能量传输模型计算 TPSN 算法完成一轮时间同步所消耗的能量. 首先为方便分析, 令:

$$l = kE_e, \quad \mu = k\epsilon$$

将式(1)和式(2)改写成:

$$E_{TX}(k, d) = kE_e + k\epsilon d^2 = l + \mu d^2 \quad (3)$$

$$E_{RX}(k) = kE_e = l \quad (4)$$

假设所有的数据包都有固定长度, 则数据包长度因子被吸收在 l 和 μ 里, 而定长数据包可通过 MAC 层协议对数据进行分片实现.

每个层次上的节点 v_i 与其父亲层次节点进行同步时均包含 2 次发送和 2 次接收操作. 共消耗总能量为:

$$E_{node}(v_i) = 2E_T(v_i) + 2E_R(v_i) = 2(l + \mu d_i^2) + 2l = 4l + 2\mu d_i^2 \quad (5)$$

假设共有 N 个节点, 那么总体消耗的能量为:

$$E_{net} = \sum_{i=1}^N E_{node}(v_i) = \sum_{i=1}^N (4l + 2\mu d_i^2) \quad (6)$$

设 H 为网络层数, 当节点使用全向天线时, 通信区域是半径为 R 的圆, 整个网络覆盖区域是半径为 $R_H = H \cdot R$ 的圆形区域. 由于无线传感器节点是随机抛洒, 因而在半径为 R_H 的圆形检测范围内节点服从均匀分布, 即

$$f(x, y) = \begin{cases} \frac{1}{\pi R_H^2} & x^2 + y^2 \leq R_H^2 \\ 0 & x^2 + y^2 > R_H^2 \end{cases} \quad (7)$$

现在, 我们把各层次的圆形区域内进行的同步操作假想成在同一个圆形区域内完成. 则所有子节点到同一个父亲节点的距离的期望为:

$$E(d) = \sum_{i=1}^N d_i p_i = \int_0^R \frac{2\pi x^2}{\pi R^2} dx = \frac{2}{3} R \quad (8)$$

将上式带入式(6), 则有:

$$E_{net} = \sum_{i=1}^N (4l + 2\mu d_i^2) = 2N \left[2l + \mu \left(\frac{2}{3} R \right)^2 \right] \quad (9)$$

3.3 EETS 能耗分析

在上述TPSN算法的基础上, 我们取出 N_1 个节点作为我们主路径上的节点, 其能量消耗的算法与 TPSN 算法一致, 故得出:

第一阶段, 主路径上的能量消耗:

$$E_{net1} = \sum_{i=1}^{N_1} (4l + 2\mu d_i^2) = 2N_1 \left[2l + \mu \left(\frac{2}{3}R \right)^2 \right] \quad (10)$$

第二阶段,簇头节点向簇内成员节点广播一个时间同步报文,包含修正过的本地时间 t_0 .成员节点接收后进行本地时间修正.假设全网范围内共有 N_2 个成员节点,则该过程涉及 N_1 次发送和 N_2 次接收.消耗的总能量为:

$$\begin{aligned} E_{net2} &= N_1 \cdot E_{TX}(\text{broadcast}) + N_2 \cdot E_{RX}(k) \\ &= N_1 l + \sum_{i=1}^{N_2} \mu d_i^2 + N_2 l \end{aligned} \quad (11)$$

将(8)式带入(11)式得:

$$E_{net2} = (N_1 + N_2)l + N_2 \mu \left(\frac{2}{3}R \right)^2 \quad (12)$$

所以,一轮同步过后,整个网络的能量消耗为:

$$\begin{aligned} E_{sum} &= E_{net1} + E_{net2} \\ &= 2N_1 \left[2l + \mu \left(\frac{2}{3}R \right)^2 \right] + (N_1 + N_2)l + N_2 \mu \left(\frac{2}{3}R \right)^2 \\ &= (5N_1 + N_2)kE_e + (2N_1 + N_2)k\varepsilon \left(\frac{2}{3}R \right)^2 \end{aligned} \quad (13)$$

令 $p = N_1/N$,则 $N_2 = (1-p)N$,带入公式(13)结果为:

$$E_{sum} = N \left[(4p+1)kE_e + (p+1)k\varepsilon \left(\frac{2}{3}R \right)^2 \right] \quad (14)$$

当 $p = 1$ 时,该算法会比TPSN算法多消耗 NkE_e 的能量,这是因为不管有没有从路径,每个主路径上的簇头节点都会进行时间同步的发射操作.

从 E_{net} 和 E_{sum} 两个公式对比来看, E_{sum} 值的大小跟 p 的取值有关,由于 p 的取值小于1,所以使用EETS算法会比TPSN算法节省能耗.而且 p 的值越小,节省的能耗就越多.但如果 p 太小的话,会影响到时间同步的精度,所以 p 的取值往往依赖于具体的应用环境,根据环境的要求选取适当的值以满足能耗和精度的双重需求.

4 仿真与实验分析

使用NS2^[10]仿真工具对TPSN算法和EETS算法的时间同步性能进行仿真,分别从一轮同步过后单个节点的能耗和网络总体能量消耗两方面进行了对比.在区域200m×200m方形区域内,布置50个传感器节

点,节点的通信半径 R 为20m.其它参数设置:数据包长度:50Bytes,节点初始能量:1J, ε :0.25nJ, E_e :165nJ.取 $p = 0.2$,即表示每个簇内包含1个簇头节点和4个成员节点.簇头节点间执行主路径操作,簇头与成员节点执行从路径操作.则实验可得,一轮时间同步后,各类节点的能量消耗如图5所示.

可以得出,使用TPSN算法,每个同步节点所消耗的能量为898.7uJ;使用EETS算法,每个簇头节点的能量消耗为634.7uJ,每个成员节点的能量消耗为66uJ.由于簇头节点由成员节点轮流充当,所以EETS算法中平均每个节点的能量消耗为179.7uJ.实验结果显示,TPSN算法在1112次同步时出现死亡节点,EETS算法则在5563次轮询的时候开始出现死亡节点.显然,EETS算法减少了报文通信量,有效延长了网络生存时间.

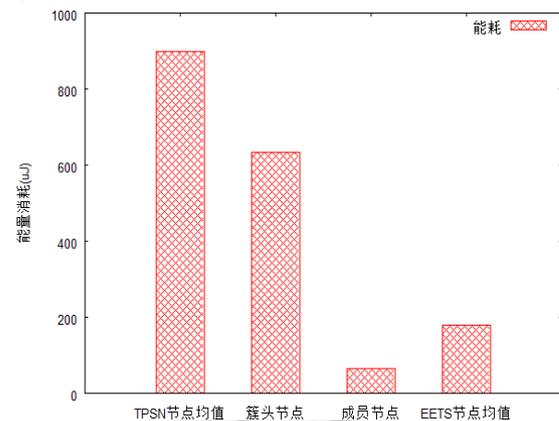


图5 一轮同步后各类节点能耗对比

图6为 $p = 0.75$ 时对比TPSN算法和EETS算法在一轮时间同步过程中的能量消耗情况.相对于TPSN来说,EETS的节能效果更为可观,而且随着节点数的不断增加,EETS算法的低功耗特性就越明显.这是因为簇内时间同步减少了通信量,减轻了簇头节点的工作负担,从而在一定程度上降低了网络能耗,延长了网络生命周期.

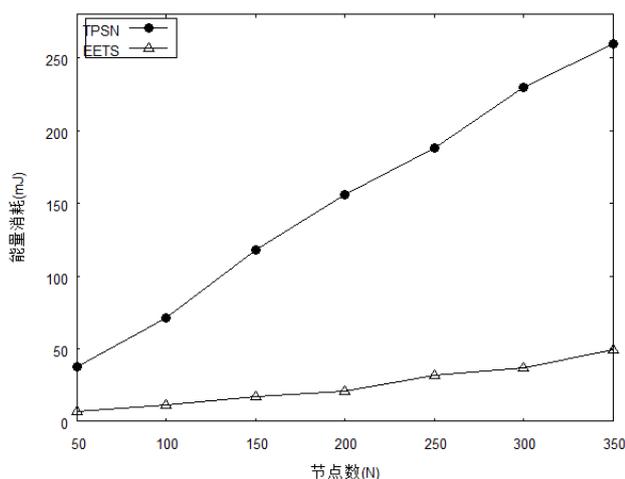


图6 网络能耗对比

5 结束语

低功耗技术一直是无线传感器网络领域里研究的一个重点问题。众多学者围绕能量消耗进行了各个层次的研究,并给出了一系列降低能耗的解决方案^{[11][12][13]}。本文在研究时间同步技术的基础上,针对能耗问题,设计了一种能量高效的时间同步算法 EETS。该算法相较于 TPSN 算法在时间同步精度上略有下降,但是同时降低了算法的实现复杂度、减少了节点间报文交换的次数,大大提高了能量效率,适用于多种对能耗有不同要求的应用场合。

参考文献

- 薛亮.无线传感器网络中时间同步技术的研究[学位论文].杭州:杭州电子科技大学,2010.
- Li XJ, Qin XY, Zheng L, Qiu H. Simultaneous clock synchronization in double broadcast domain of WSN. The 5th Global Symposium Millimeter Waves(GSMM). 2012. 367-371
- 李文锋,王汝传,孙力娟.基于RBS的无线传感器网络时间同步算法.通信学报,2008,29(6):82-86.

- 徐雄伟,王平,徐世武,黄晞.无线传感器网络同步算法的研究与探讨.单片机与嵌入式系统应用.2012,12(3):8-11
- Su P. Delay Measurement Time Synchronization for wireless sensor networks. Intel Research:IRB—TR—03—013. 2003.
- 王越超,程良伦.基于局部路由的中高速传感器网络同步算法研究.计算机科学,2012,39(7):52-54.
- Liu XL, Zhou SM. Evaluation of several time synchronization protocols in WSN. International Conference of Information Science and Management Engineering(ISME). 2010. 488-491.
- Chand G, Sharma GTP, Katiyar V, Kumar A. Time synchronization protocol for wireless sensor networks using clustering. International Conference on Recent Trends in Information Technology(ICRTIT). 2011.417-422.
- 平安,龚刚军,刘向军等.无线传感器网络的能量估计路由算法.计算机仿真.2013,30(8):285-288
- 于斌,孙斌,温暖等.NS2与网络模拟(第1版).北京:人民邮电出版社,2007.
- Lee SH, Choi L. Chaining clock synchronization: An energy-efficient clock synchronization scheme for wireless sensor networks. The 10th International Symposium on Pervasive System, Algorithms, and Networks(ISPAN). 2009. 172-177.
- Samanta AK, Mukherjee A, Hossein SM. Efficient time synchronization by K-D tree in WSN. The 2nd International Conference Computer and Automation Engineering (ICCAE). 2010. 655-659.
- Seareesavetrat S, Pornavalai C, Varakulsiripunth R. A light-weight fault-tolerant time synchronization for wireless sensor networks. The 8th International Conference on ITS Telecommunications. 2008. 182-186.