

一种节能的无线传感器网络分簇时间同步算法

叶雪, 孙燕

(南京师范大学数学与计算机科学学院, 南京 210097)

摘要: 提出一种节能的无线传感器网络分簇时间同步算法(CBTS)。利用高性能的晶体振荡器稳定性原理, 通过高性能簇头组成簇状拓扑结构实现时间同步, 取得延长簇的同步更新周期和减少簇内节点双向同步交换数据包次数成效。实验结果表明, CBTS 算法与 TPSN 算法相比, 在精度一定条件下, 能有效降低整个网络的能耗。

关键词: 无线传感器网络; 时间同步; 分簇

Low Energy Cluster-Based Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks

YE Xue, SUN Yan

(School of Mathematics and Computer Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210097)

【Abstract】 This paper proposes a low energy Cluster-Based Time Synchronization algorithm(CBTS) for wireless sensor networks. The algorithm makes use of the principle of high-crystal to obtain frequency stability, and achieves network-wide time synchronization by clusters topology of high-crystal heads. It acquires the effect that prolong the cluster update synchronization time and reduce the transmissions of data messages. Experimental result shows that in the condition of some precision, compared with TPSN algorithm, the algorithm can reduce the energy consumption of the whole network.

【Key words】 wireless sensor networks; time synchronization; clustering

1 概述

时间同步是无线传感器网络的关键技术之一, 它在节点的数据融合、声波测距定位、时分复用等场合都起着重要的作用^[1]。时间同步对网络资源的消耗是伴随着整个生命周期。

时间同步的精度与晶体振荡器性能有关, 也受到时间同步方式中网络的拓扑结构等影响, 同时还有传感器节点能量、成本等因素的限制, 使设计适合的时间同步算法受到很多新的挑战。目前已有的时间同步算法, 如 RBS^[2]算法、TPSN^[3]算法、FTSP^[4]算法等在提高同步的精度、降低节点的能耗和可扩展性等方面做了工作。现有的时间同步策略多数是从如何实现同步以及同步协议、精度和能耗进行研究, 很少将节点的位置关系和节点晶体振荡器性能 2 个方面结合起来进行考虑。本文提出的分簇时间同步算法(Cluster-Based Time Synchronization algorithm, CBTS)通过增加部分高性能的晶体振荡器节点, 并基于这些节点分簇, 分簇的拓扑结构与多层的拓扑结构相比, 减少了时间同步包的传输次数、消除了多层同步带来的累积误差, 达到了降低节点的能耗、提高全网的生命周期的目的。

2 问题描述

2.1 预备知识

无线传感器网络中由 3 类节点组成: 汇聚节点, 时间参考节点和时间同步节点。时间参考节点和时间同步节点总的个数记为 N 。对网络的相关术语作如下定义。

定义 1(时间参考节点) 该类节点配有高性能晶体振荡器, 且通信半径可调, 均匀随机分布在网络中, 时钟漂移为 10 ppm。节点的个数记为 M , 占总的节点数的 5% 或 10%,

节点记为 $N_{r_i}(1 \leq i \leq M)$ 。

定义 2(时间同步节点) 该类节点配有普通晶体振荡器, 均匀随机分布在网络中, 时钟漂移为 100 ppm, 节点的个数为 $(N-M)$ 个, 节点记为 $N_{s_j}(1 \leq j \leq N-M)$ 。

定义 3(时间汇聚节点) 该节点的时间作为全局时间, 即全网以该时间作为同步时间, 该节点具有高性能晶体振荡器, 通信半径可调。节点记为 N_{sink} 。

在网络部署的初期, 网络自组织成以时间参考节点为簇头的簇状结构。时间参考节点首先与汇聚节点进行数据传输, 获得与汇聚节点的同步。然后由时间参考节点发起与时间同步节点间的数据传输, 使时间同步节点同步到时间参考节点, 进而使全网节点的时间达到同步。

2.2 问题描述

本文采用分簇同步和簇内单点回复相结合的策略, 在保证同步时间精度前提下, 可进一步减低能耗。为了方便对分簇时间同步策略的解释, 从时间同步的 2 个基本过程证明时间同步与能耗的关系。

定理 1 当同步总时间一定的情况下, 时间同步更新周期与全网节点的总能耗成反比。

证明: 设时间汇聚节点与所有的时间参考节点进行一次同步的能耗为 E_{sink-r} , 所有的时间参考节点与时间同步节点同步的能耗为 E_{r-s} , 时间参考节点的同步周期为 T_{sink-r} , 时间同

作者简介: 叶雪(1984-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 无线传感器网络, 嵌入式系统; 孙燕, 副教授

收稿日期: 2009-01-20 **E-mail:** yexue19840204@sina.com.cn

步节点的同步周期为 T_{r-s} 。

假设执行时间同步算法的总时间为 T ，全网节点消耗的总能耗为 E ，则 E 的计算公式如下：

$$E_{\text{total}} = \frac{T}{T_{\text{sink-r}}} \times E_{\text{sink-r}} + \frac{T}{T_{r-s}} \times E_{r-s} \quad (1)$$

可见，当 $E_{\text{sink-r}}$ 和 E_{r-s} 一定时， $T_{\text{sink-r}}$ 和 T_{r-s} 越小，全网节点的总能耗越多。

证毕。

定理 1 说明，如果提高更新周期，则会降低整个网络的能耗。在一定全网同步精度的前提下，高性能晶体振荡器的时钟漂移比普通晶体振荡器小，单位时间内的时间误差小，因此，达到同样精度，可延长同步周期，减少数据传输次数，从而大大降低了节点的能耗。

定理 2 当单点回复时间误差允许情况下，单点回复同步能耗小于全部回复同步能耗。

证明：全部回复同步过程如图 1 所示。

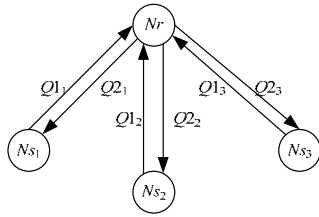


图 1 全部回复同步

同步节点 $Ns_j(j=1, 2, 3)$ 在 t_1 时刻发送时间同步包 $Q1_j$ 给参考节点，参考节点在 t_2 时刻接收到 $Q1_j$ 包后，立即在 t_3 时刻发送携带 t_2 的同步返回包 $Q2_j$ 给 Ns_j ，节点 Ns_j 在 t_4 时刻接收到 $Q2_j$ 包，根据式(3)、式(4)计算出时间偏移 t_{offset} 和传输延迟 t_{delay} ，并调整自己的本地时间。

$$t_{\text{offset}} = \frac{(t_2 - t_1) - (t_4 - t_3)}{2} \quad (2)$$

$$t_{\text{delay}} = \frac{(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)}{2} \quad (3)$$

设参考节点发送的能耗为 E_{r-sj} ，同步节点 Ns_j 发送能耗为 E_{sj-r} ，全部回复方式的总能耗为 E_{atotal} 。假设同步节点的个数为 m ，接收和处理能耗忽略，则 E 计算式为

$$E_{\text{total}} = \sum_{j=1}^m (E_{r-sj} + E_{sj-r}) \quad (4)$$

单点回复同步过程如图 2 所示。

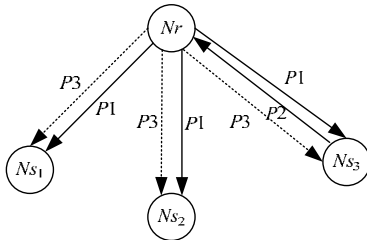


图 2 单点回复同步

时间参考节点在 t_1 时刻广播时间同步包 $P1$ ，以该参考节点为簇头的簇内所有时间同步节点 $Ns_j(j=1, 2, 3)$ 接收 $P1$ 包，并以本地时间记录接收时刻 t_{2j} ，然后立即在 t_3 时刻发送携带 t_{2j} 的同步返回包 $P2$ 。参考节点记录下收到第 1 个同步返回包 $P2$ 的时刻 t_4 ，将 $P2$ 包中的 t_{2j} 记做 t_2 ，且不再接收返回包。参考节点根据式(2)、式(3)计算出时间偏移 t_{offset} 和传输延迟 t_{delay} 后，广播包含 t_{delay} 和 t_2 的同步包 $P3$ 。同步节

点 $Ns_j(j=1, 2, 3)$ 接收到 $P3$ 后，调整自己的本地时间为 $(t + t_{\text{offset}} + (t_2 - t_{2j}))$ ， t 为调整前节点的本地时间。

设参考节点发送的能耗为 E_{r-sj} ，同步节点 Ns_j 发送能耗为 E_{sj-r} ，单点回复方式的总能耗为 E_{btotal} 。假设同步节点的个数为 n ，接收和处理能耗忽略，则 E 计算式为

$$E_{\text{btotal}} = 2 \times E_{r-s} + E_{s-r} \quad (5)$$

比较式(4)和式(5)可得，单点回复同步能耗小于全部回复同步能耗。

证毕。

定理 2 说明，用单点回复同步代替全部回复，在一定的同步周期下，可以降低节点能耗。

3 基于分簇的时间同步算法(CBTS)

本文提出的 CBTS 算法由 3 个部分组成：(1)以时间参考节点为簇头的簇形成算法；(2)时间汇聚节点与簇头节点的同步算法；(3)时间参考节点与普通同步节点的时间同步算法。同步算法按以上 3 个步骤实现。

3.1 簇的形成

在同步开始之前，网络按照如下过程自组织成簇状拓扑结构。

算法 1 分簇算法

输入 M 个时间参考节点， $(N-M)$ 个未分簇的时间同步节点

输出 $(N-M)$ 个时间同步节点的簇头号

for($i=1$; $i \leq M$; $i++$)

时间参考节点 Nr_i 广播发送包含本节点的节点号和位置的成簇信息包

end

for($j=1$; $j \leq N-M$; $j++$)

时间同步节点 Ns_j 接收到 1 个成簇信息包后，计算位置关系，保存信息包中的发送者的节点号作为本节点的簇头号，且不再接收其他信息包

end

3.2 汇聚节点与时间参考节点同步

网络组织成簇状结构后，为了保证其同步精度，时间参考节点与汇聚节点进行双向成对同步。同步算法如下：

算法 2 时间参考节点同步算法

输入 同步前的 M 个时间参考节点

输出 同步后的 M 个时间参考节点

以簇号作为的参考节点分配时隙顺序；

for($i=1$; $i \leq M$; $i++$)

时间参考节点 Nr_i 在时隙的 t_1 时刻发送时间同步包 $Q1$ 给 sink 节点；

 sink 节点在 t_2 时刻接收到 $Q1$ 包

 sink 节点立即在 t_3 时刻发送携带 t_2 的同步返回包 $Q2$ 给 Nr_i ；

 节点 Nr_i 在 t_4 时刻接收到 $Q2$ 包

 节点 Nr_i 根据式(2)、(3)计算出时间偏移 t_{offset} 和传输延迟 t_{delay}

 节点 Nr_i 根据计算出的时间偏移值调整自己的本地时间

end

3.3 时间参考节点与时间同步节点同步

当时间参考节点与汇聚节点完成同步后，时间参考节点发起簇内同步过程。对于第 $m(1 \leq m \leq M)$ 个簇，簇内的时间同步节点数为 N_m ，同步算法如下：

算法 3 簇内时间同步算法

输入 N_m 个未同步的时间同步节点

输出 N_m 个同步后的时间同步节点

参考节点 Nr_m 在 t_1 时刻广播发送时间同步包 $P1$ ，随机指定一个节点为回复节点

```

for(j=1; j <= Nm; j++)
    同步节点 Nsmj 在 t2 时刻接收到包 P1
    if(同步节点 Nsmj==指定回复节点)
        同步节点 Nsmj 立即在 t3 时刻发送携带 t2 的同步返回
包 P2
    end
end
参考节点记录下收到的同步返回包 P2 的时刻 t4
参考节点根据式(2)、式(3)计算出时间偏移 toffset 和传输延迟 tdelay
参考节点广播包含延迟 tdelay 和 t2 的同步包 P3
for(j=1; j <= Nm; j++)
    同步节点 Nsj 接收到 P3 包, 比较自己的接收时间 t2j 和 P3 包
中的接收时间 t2
    Nsj 计算时间的调整值为 (t + toffset + (t2 - t2j)), 并按此值调整本地
时间
end

```

4 性能评估

为验证 CBTS 算法的性能, 选取典型的分层拓扑算法 TPSN 作为比较。用 Matlab7.0 对算法进行仿真实验。实验中的传输延迟采用满足均值为 1 ms, 标准差为 11 μs 的高斯分布。节点随机分布在 100 m×100 m 的区域中, 节点的个数分别为 100, 200 和 300。CBTS 算法中的高性能振荡器占的比率为 10%。图 3 为 CBTS 与 TPSN 的同步精度比较。

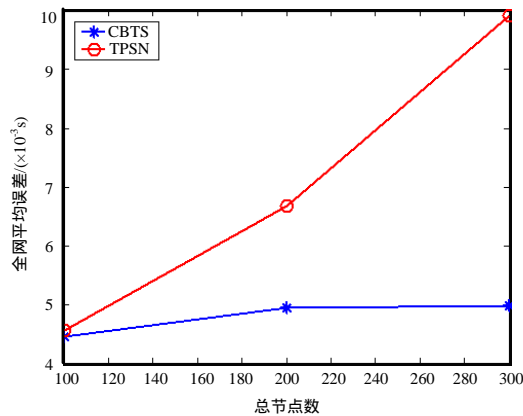


图 3 CBTS 与 TPSN 的同步精度比较

可以看出, 随着节点数的增加, TPSN 算法的同步精度逐渐降低, 而 CBTS 算法的精度没有明显变化, 且精度略高于 TPSN 算法。

在实验区域中随机布置 100 个节点, 分别将 CBTS 和 TPSN 算法执行 100 轮, CBTS 与 TPSN 的剩余能量的比较如图 4 所示。

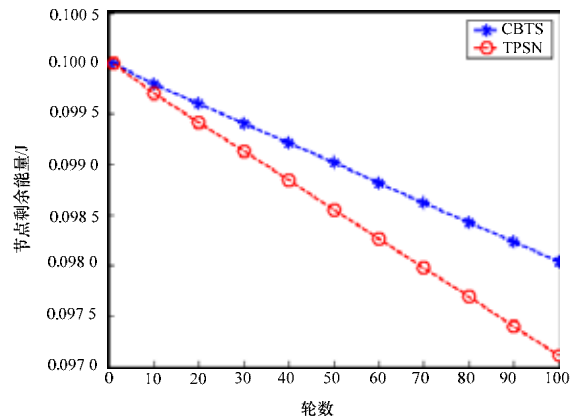


图 4 CBTS 与 TPSN 的剩余能量比较

可见随着同步执行的次数增加, CBTS 算法的节点剩余能量明显大于 TPSN 算法的节点剩余能量。这正是 CBTS 算法的优势所在。

5 结束语

本文提出一种节能的无线传感器网络分簇时间同步算法, 通过增加部分高性能的晶体振荡器节点, 并基于这些节点分簇, 减少了时间同步包的传输次数, 消除了多层同步带来的累积误差, 达到了降低节点的能耗, 提高了全网的生命周期。仿真结果表明, 该算法能满足一定的精度要求, 且有效地降低节点的能耗, 具有较高实用价值。

参考文献

- [1] Elson J, Estrin D. Time Synchronization for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of the IPDPS'01. San Francisco, USA: [s. n.], 2001.
- [2] Elson J, Estrin G L. Fine-grained Network Time Synchronization Using Reference Broadcasts[C]//Proceedings of the 5th Symposium on Operating Systems Design and Implementation. Boston, USA: [s. n.], 2002.
- [3] Ganerwal S, Kumar R, Srivastava M B. Timing-sync Protocol for Sensor Networks[C]//Proceeding of the 1st ACM Conf. on Embedded Networked Sensor Systems. [S. l.]: ACM Press, 2003.
- [4] Miklos M, Branislav K, Gyula S. The Flooding Time Synchronization Protocol[C]//Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore, Maryland, USA: [s. n.], 2004.

编辑 金胡考

(上接第 116 页)

- [3] Moon J, Wardi Y. Optimal Control of Processing Times in Single-stage Discrete Event Dynamic Systems with Blocking[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(6): 880-884.
- [4] Zhang Ping, Cassandras C. An Improved Forward Algorithm for Optimal Control of a Class of Hybrid Systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2002, 47(10): 1735-1739.

- [5] Cho Y, Cassandras C, Pepyne D. Forward Decomposition Algorithms for Optimal Control of a Class of Hybrid Systems[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2001, 11(15): 497-513.

编辑 金胡考