

一种低功耗无线传感器网络时间同步算法

肖琳 程利娟 王福豹

(西北工业大学宽带网络技术研究所 西安 710072)

(xiaol@nwpu.edu.cn)

A Low Cost Time Synchronization Algorithm for Wireless Sensor Networks

Xiao Lin, Cheng Lijuan, and Wang Fubao

(Institute of Broadband Network, Northwest Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract Tremendous advances in communication, embedded computation and sensor technology have occurred in the development of wireless sensor networks, which are made by sensors, microprocessor and wireless communication interface, and have integrated collecting, processing and communication all-in-one. Time synchronization is a fundamental service for both design and application of wireless sensor networks. However, the complexity, energy, cost and size conflicts between traditional algorithms, such as NTP and GPS, and WSN prohibit their use in WSN. Because of the cost, power and size constraints of individual nodes, there are many new challenges. Developing time synchronization methods suitable for wireless sensor networks have attracted wide attention. Recently, many new algorithms are presented. But most of them sacrifice a lot of messages or complex computing for a good precision, so that much energy is consumed and life time of the whole network is shortened. In order to reduce messages and save energy, a new simple and low cost time synchronization algorithm for wireless sensor networks is proposed. It combines unidirectional reference broadcast and pair-wise mechanism, so that only one node in broadcast domain needs time synchronization, and the messages for time synchronization are reduced greatly. Finally, the performance of this algorithm is simulated.

Key words wireless sensor networks; time synchronization; time synchronization mechanism; reference broadcast synchronization; pair-wise time synchronization

摘要 时间同步对无线传感器网络的应用至关重要,为提高同步精度,多数算法都以较多的消息交换或复杂的计算为代价来达到这一目的,因而能耗较大。为减少时间同步的消息交换开销,节约节点能量,提出了一种简单低功耗时间同步算法,该算法结合了单向广播同步机制和双向成对同步机制,有效利用网络中节点的广播信息,使网络中节点单跳广播域内只有一个下层节点与之进行双向成对同步,从而达到了减少消息开销和节约能量的目的。最后通过仿真验证了该算法的性能。

关键词 无线传感器网络;时间同步;时间同步机制;参照广播同步;成对同步

中图法分类号 TP301

时间同步是任何分布式系统的一个重要基础,也是无线传感器网络的一项基础支撑技术。在无线传感器网络的应用中,传感器节点采集的数据如果

没有空间和时间信息是无任何意义的。准确的时间同步是实现传感器网络自身协议的运行、数据融合、TDMA 调度、协同睡眠、定位等的基础^[1-4]。

传统的时间同步协议主要有 NTP(network time protocol)^[5]和 GPS(global positioning system)^[6]两种. NTP 协议是在 Internet 上广泛使用的协议达到了 10ms 的同步精度,但由于它只适用于结构相对稳定、链路很少失败的有线网络系统且消息开销较大而不适合传感器网络;GPS 系统能够以纳秒级的精度与世界标准时间 UTC 保持同步,但它需要配置固定的高成本接收器,同时在室内、森林或水下等有遮盖物的环境中无法使用.因此,它们都不适用于传感器网络.由于传感器节点受到成本、能量和体积的限制,使得无线传感器网络的时间同步遇到了很多新的挑战,研究适合传感器网络的时间同步方法得到国内外传感器网络研究领域的广泛关注.

近年来,经过各国学者的不懈努力至今已经提出了许多时间同步算法^[7-8].纵观这些算法主要可以分为以下 3 类^[9]:基于接收者-接收者(receiver-receiver)的同步算法、基于成对(pair-wise)同步的双向同步算法和基于发送者-接收者(sender-receiver)的单向同步算法. RBS^[1]是基于接收者-接收者的典型代表算法,该算法用“第三方广播”的思想让参照节点利用物理层广播周期性地向网络中其他节点发送参照广播,广播域中的节点用自己的本地时钟记录各自的包接收时间,并相互交换时间信息,因而进行同步.该方法完全排除了发送方对同步的影响,达到了较高的同步精度.但算法具有较大的消息开销,对于有 n 个节点的单跳网络,需要 $O(n^2)$ 的消息交换. TPSN^[2]是基于双向成对同步的,采用在 MAC 层进行时间标记的方法,减少了关键路径的长度,因而减小了传输延迟的不确定性,达到了较高的同步精度.但该算法每个下层节点都要与它的上层节点进行双向成对,消息开销较大. FTSP^[10]结合了 RBS 和 TPSN 的优点,通过对一个数据包标记多个时间戳,并用线性回归的方法来估计时钟偏差(skew)和偏移(offset),不仅排除了发送方延迟的影响,而且对报文中接收方的不确定延迟(如中断处理时间、字节对齐时间、硬件编码时间等)进行了有效估计,以缩短消息传输延迟的不确定性,使得同步精度在 Mica2 上达到 $1\mu\text{s}$. 但该算法收敛时间较长,且要求校准实际部署的硬件,因此这不是一般纯软件所能解决的解决办法^[11].

通过对无线传感器网络中已有的各种同步算法的分析与总结,本文结合单向广播同步机制和双向成对机制,对 TPSN 算法进行改进,设计了一种在满足一定精度要求的同时,低消息交换开销的低功耗时间同步算法.

1 时间同步算法设计

参照广播同步机制可以有效减少广播域内消息通信开销,双向成对同步机制采用简单的双向往返的方法测量成对节点间的时间偏移和传播延迟,两种机制各有所长.因此我们的算法 STSP 采用的是这两种机制的结合.

算法分两个阶段:

1) 发现及子节点收集阶段. 该阶段主要是通过泛洪广播的方法给网络中每个节点赋予一个层次号,并使每个节点通过信息的收集获得它的下层子节点号. 首先选取根节点(一般选 Sink 节点)并赋予层次号 0,然后由它开始广播分层消息,每个接收到该分层消息的节点取出消息包中的层次号,并判断自己的层次号,如果还没有层次号便将自己的层次号设为这个层次号加 1;如果已有层次号,且层次号比消息包中的层次号小 1,便将这个节点号加入到自己的下层邻节点表中. 重复这个过程直至所有节点都赋予一个层次号,至此整个网络形成了一个以第 0 层节点为根的层次树,且每层非叶子节点都有了自己广播域内下层节点号的信息.

2) 同步阶段. 该阶段的主要任务是从根节点开始逐层同步网络中的节点,使它们达到整体同步. 在该阶段,根节点随机从自己下层邻节点表中选取一个子节点作为响应节点,并广播同步消息. 如图 1 中,根节点 R 选取子节点 C 作为响应节点. 所有接收到该同步消息的节点都用自己的本地时间记录消息的接收时间,但只有同步包中指定的子节点 C 返回应答消息. 根节点 R 接收到应答消息后,用双向成对同步中计算节点时间偏移和传播延迟的方法(式(1)),计算出它和响应节点 C 之间时间偏移 δ ,以及消息往返延迟 d ,这样指定响应节点 C 接收到同步消息的时间 T_2 、根节点与之的时间偏移 δ 以及传播延迟 d ,就构成了一个三元数据组,然后,根节点 R 再广播一个包含该三元组的消息. 响应节点 C 接收到包含该三元组的消息后,根据时间偏移 δ 以及传播延迟 d 调整自己的时间. 广播域内其他节点(如 A 和 B)接收到该消息后,比较自己接收同步消息的时间 T'_2 和相应节点的接收时间 T_2 ,可得到 $\delta' = T_2 - T'_2$,最后矫正自己的时间为 $T = t + \delta + \delta'$, t 为节点的本地时间. 第 1 层节点与根节点同步后,各自选取自己广播域表中的子节点,重复以上同步过程,直至网络中所有节点都达到同步.

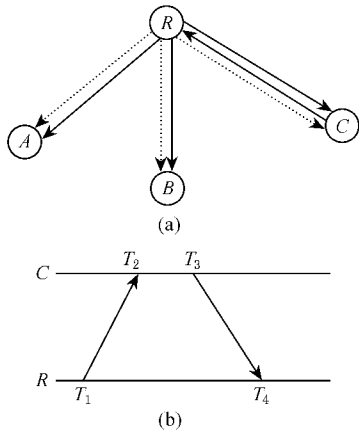


Fig. 1 Message exchange and time-stamping diagram. (a) message exchange diagram and (b) time-stamping diagram.

图1 算法消息交换及时间标记示意图。(a) 算法消息交换示意图 (b) 算法时间标记示意图

$$\delta = \frac{(T_2 - T_1) - (T_4 - T_3)}{2}$$

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

对于网络中新加入的节点,可以通过向周围节点发送广播的方式得到一个层次号,具体方法是新加入节点发送广播请求消息,所有接收到该请求消息的节点都返回一个它所在的层次号,新加入节点在收到应答消息后,比较它们的层次号,选层次号最小的加一作为自己的层次号,并把层次号最小的节点作为自己的父节点,用双向成对同步的方法与之进行同步。

2 算法性能仿真

为了检验和比较 STSP 算法的性能,采用 NS-2^[12] 仿真工具对算法进行仿真实验。NS-2 是由美国加州大学 Lawrence Berkeley 实验室开发的且被学术界广泛使用的一种网络模拟软件。

2.1 与 TPSN 算法的比较

设置仿真环境为 60m×60m 的正方形区域,随机部署 100 个节点,设置节点无线通信距离为 10m 进行仿真,结果如图 2 所示。

通过仿真可以看出,STSP 算法比 TPSN 的同步开销要小得多,这是因为在每个单跳内 STSP 算法仅需要 3 个消息交换的开销,而 TPSN 算法则需要 2 倍于节点数的开销。又因为网络中每个下层节点可能同时属于多个上层节点的子节点,即同时位

于多个上层节点的广播域内,因此两个算法在进行同步时,消息开销要比单独的单跳消息开销大。另外,从图 2(b)可以看出,STSP 算法的精度要低于 TPSN,这是因为 TPSN 算法中每个节点都与上层节点进行单独的同步,而 STSP 中则只有一个节点与上层节点进行同步,其他节点都是参照这个与上层节点同步的节点进行同步的,因而精度略低。

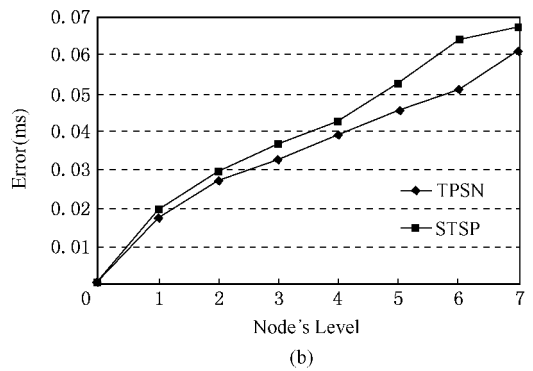
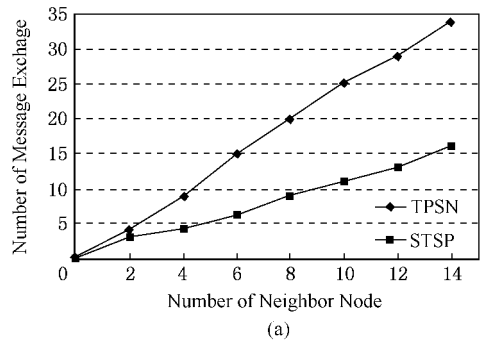


Fig. 2 The comparison of cost and precision of STSP and TPSN. (a) The comparison of cost STSP and TPSN and (b) The comparison of precision of STSP and TPSN.

图2 STSP 算法与 TPSN 同步开销和精度对比。(a) STSP 算法与 TPSN 同步开销对比 (b) STSP 与 TPSN 算法精度对比

2.2 STSP 算法性能分析

通过 3 个实验环境测试了 STSP 算法的性能,使用 100 个节点,节点的通信距离设置为 10m,在 40m×40m,50m×50m,60m×60m 区域里进行仿真。对每层的同步精度都采用取平均值的方法获得;另外在不同环境下层次数可能不一样,只计算了 3 种情况下共有的层次数之内的同步精度,具体结果如图 3 所示。

通过图 3 我们发现,节点密度不同,同步的精度也有一定的差异。在 40m×40m 情况下,节点密度较大,层次较少,节点属于多个上层节点的情形比较多,因此下层节点可能经过多于两次的同步,因此精度比后两种情况稍高。

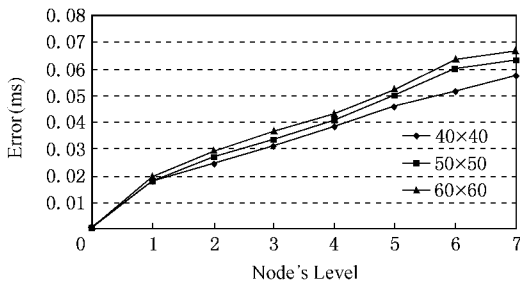


Fig. 3 The comparison of precision under different density.

图3 不同密度下的精度对比

在 $50\text{m} \times 50\text{m}$ 的区域分别布置了 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250 个节点对两个算法进行了仿真, 得出图 4, 从图中可以看到, 随着节点数的增多, STSP 算法的消息交换明显小于 TPSN, 这也正是新算法的优势所在。

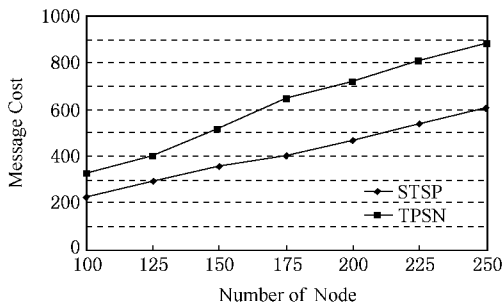


Fig. 4 Message cost along with the number of node.

图4 消息开销随节点数的增加的变化

通过仿真验证了新算法的优缺点. 与 TPSN 相比, 新算法大大降低了消息开销, 尤其是邻节点数越多时越明显. 在无线传感器网络中, 节点的通信开销是节点能量开销中最重要的部分, 如何节约节点的通信开销一直是节能所研究的重点, 而我们的算法就恰恰具有这样的优势. 在精度方面可能比 TPSN 略差, 但也可以满足多数无线传感器网络应用的需求。

3 结束语

时间同步作为无线传感器网络应用的一项支撑技术, 对无线传感器网络的设计和应用都是关键的. 但对于多数传感器网络应用, 精度要求并不是很高, 如何降低消息传输开销节约节点能量则更为重要. 本文就是针对这种情况提出了一种单向广播同步机制和双向成对机制相结合的简单低功耗时间同步算法 STSP. 与 TPSN 相比, 该算法在满足一定精度的前提下, 大大减少了消息交换开销, 节约了能量, 比

较适合精度要求不很高的密集网络. 仿真结果验证了该算法低消息交换开销和良好的同步精度的特点。

参 考 文 献

- [1] J Elson, L Girod, D Estrin. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[C]. In: Proc of the Fifth Symp on Operating systems Design and Implementation (OSDI2002). New York: ACM Press, 2002. 147-163
- [2] S Ganerwal, R Kumar, M B Srivastava. Timing-Sync Protocol for Sensor Networks[M]. New York: ACM Press, 2003. 138-149
- [3] S Ganerwal, R Kumar, S Adlakha, et al. Network-wide synchronization in sensor networks [OL]. <http://www.ee.ucla.edu/~ram>, 2002
- [4] J Elson, K Römer. Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization[C]. The First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-1), New Jersey, USA, 2002
- [5] D L Mills. Internet time synchronization: The network time protocol [J]. IEEE Trans on Communications, 1991, 39: 1482-1493
- [6] B Hofmann-Wellenhof, H Lichtenegger, J Collins. Global Positioning System: Theory and Practice [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1997
- [7] F Sivrikaya, B Yener. Time synchronization in sensor networks: A survey [J]. IEEE Networks, 2004, 18(4): 45-50
- [8] B Sundaraman, U Buy, A D Kshemkalyani. Clock synchronization in wireless sensor networks: A survey [J]. Ad-Hoc Networks, 2005, 3(3): 281-323
- [9] Kang Guanlin, Wang Fubao. Duan Weijun survey on time synchronization for wireless sensor networks [J]. Computer Automated Measurement & Control, 2005, 13(10): 1021-1023 (in Chinese)
(康冠林, 王福豹, 段渭军. 无线传感器网络时间同步综述 [J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(10): 1021-1023)
- [10] Branislav Kusy, Miklos Maroti. Flooding time synchronization in wireless sensor networks[C]. WCNC 2004, Atlanta, GA, 2004
- [11] Suyoung Yoon, Mihail L Sichertiu. Analysis and performance evaluation of a time synchronization protocol for wireless sensor networks[C]. The Int'l Conf on Telecommunication Systems, Modeling and Analysis (ICTSM 2005), 2005
- [12] The VINT Project. The UCB/LBNL/VINT Network Simulator ns2 [OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>, 2004



Xiao Lin, born in 1967. Engineer of the Northwestern Polytechnical University. Her main research interests include computer networks and wireless sensor networks.
肖琳, 1967年生, 工程师, 主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络等。



Cheng Lijuan, born in 1981. Since 2004, she has been a M. A. candidate in computing science from the Northwestern Polytechnical University. Her current research interests include wireless sensor networks.

程利娟, 1981年生, 硕士, 主要研究方向为无线传感器网络。



Wang Fubao, born in 1963. Ph. D. and professor of the Northwestern Polytechnical University. His main research interests include computer networks, streaming media, wireless sensor networks, etc.

王福豹, 1963年生, 博士, 教授, 主要研究方向为计算机网络、流媒体、传感器网络等。

Research Background

Time synchronization is a fundamental service for both design and application of wireless sensor networks. However, the complexity, energy, cost and size conflicts between traditional algorithms such as NTP, GPS and WSN prohibit their use in WSN. Because of the cost, power and size constraints of the individual nodes, there are many new challenges. Developing time synchronization methods suitable for wireless sensor networks have attracted wide attention.

Existing technologies of time synchronization are studied and classified. Some representative synchronization algorithms are studied deeply. Based on these, a novel simple and low cost time a synchronization algorithm, which is suitable for dense network, is presented. It combines unidirectional reference broadcast and pair-wise mechanism, so that only one node in broadcast domain needs time synchronization to it. Compared with TPSN, our algorithm makes good use of broadcast information, and reduces communication messages greatly. Simulation results show that it has a good precision and low message cost.

Our works supported by the National Natural Science Foundation of China under grant No. 60472074.

全国第 15 届计算机辅助设计与图形学(CAD/CG '2008)学术会议 征文通知

2008年7月22~24日 中国·大连

www.cadcg2008.lnnu.edu.cn cadcg2008@lnnu.edu.cn

由中国计算机学会主办、辽宁师范大学承办的全国第15届计算机辅助设计与图形学学术会议(CAD/CG '2008)将于2008年7月22日在中国大连举行。本次学术会议是中国计算机学会恢复学术活动30周年的纪念、也是计算机辅助设计与图形学专业委员会学术年会30周年纪念。

根据《中国计算机学会大事记》记载：“1978年10月，在桂林召开的CAD学术会议上酝酿学会恢复活动事宜”。1978年10月，在广西阳朔举行了我国首次计算机辅助设计学术会议，会议由四机部15所主办，这次会议成为中国计算机学会下的全国CAD/CG年会的开端，同时也是中国计算机学会恢复学术活动的标志。此后，“全国计算机辅助设计与图形学学术年会”每两年召开一次，到2008年已成功召开了15届全国会议。

本次会议内容包括中国计算机学会计算机辅助设计与图形学专业委员会恢复学术活动30周年纪念座谈、大会学术报告、计算机辅助设计与图形学热点问题专题研讨、最新成果和应用系统演示，并将邀请国内外学术界和产业界的著名专家到会作特邀报告。

会议录用的部分优秀论文将推荐至《计算机学报》、《计算机研究与发展》、《计算机辅助设计与图形学学报》、《工程图学学报》、《软件学报》(增刊)、《中国图象图形学报》、《系统仿真学报》发表。大会录用论文将正式结集出版。热诚欢迎一切从事计算机辅助设计与图形学研究、应用及软件开发的专家、学者和专业技术人员踊跃投稿。

会议论文主题包括(但不限于):

计算机辅助设计(CAD)	计算机辅助几何设计	几何造型与处理
计算机集成制造	虚拟设计与制造	网络化制造
电子设计自动化(EDA)	图形学基础理论与算法	科学计算可视化
虚拟现实多媒体技术	计算机动画	真实感图形
非真实感图形	数字媒体技术与数字内容处理	图形图像融合技术人机交互技术
工程图形及应用	计算机图形仿真及与计算机辅助设计与图形学的相关的领域	

主办单位:中国计算机学会

承办单位:辽宁师范大学(大连市黄河路850号 116029)

截稿日期:2008年4月20日 投稿邮箱:cadcg2008@lnnu.edu.cn

电话/传真:0411-82158874 联系人:孙晓鹏 博士