

基于统计的无线传感器网络时钟同步协议

杨 博^{1,2}, 廖明宏¹

(1 哈尔滨工业大学 计算机科学与技术学院, 哈尔滨 150001, E-mail: lia@hit.edu.cn; 2 石家庄陆军指挥学院, 石家庄 050084)

摘 要: 在 Arvind 提出的概率时钟同步算法基础上针对传感器网络进行了改进, 采用在线测量传感器节点间消息传输时延值的方法, 从根本上解决了传感器网络进行时钟同步时既要保证同步精度又要降低能耗和带宽消耗的矛盾. 针对不同网络拓扑结构设计了簇内时钟同步协议和全局时钟同步协议, 针对节点的事件触发工作模式设计了主动同步协议. 实验结果表明, 基于统计的时钟同步协议能够适应传感器网络的工作特性和需求.

关键词: 无线传感器网络; 传感器; 时钟同步

中图分类号: TP393.03

文献标识码: A

文章编号: 0367-6234(2007)01-0098-04

A statistic clock synchronization protocol for sensor networks

YANG Bo^{1,2}, LIAO Ming-hong¹

(1 School of Computer Science & Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; E-mail: lia@hit.edu.cn
2 Shijiazhuang Army Command College, Shijiazhuang 050084, China)

Abstract According to the characteristic of the wireless sensor networks, the probabilistic clock synchronization designed by Arvind is improved. By measuring the delay of the time stamp on line between sensors, the synchronization precision can be achieved and the energy and bandwidth cost can be reduced. According to different topologies, the cluster clock synchronization protocol and global ones are designed, and the initiative synchronization protocol is designed to fit the sensor's event-driven mode. The experiment result shows that these statistic protocols can meet the characteristic and requirement of the wireless sensor networks.

Key words wireless sensor networks; sensor; clock synchronization

目前, 无线传感器网络有多种时钟同步协议, 其中以 RBS (Reference Broadcast Synchronization)^[1]、Post-facto^[2]和 TPSN (Timing-Sync Protocol for Sensor Networks)^[3]为代表. RBS 和 TPSN 能够提供较高的同步精度, 但需要较高的通信消耗, 并且其通信消耗和参与同步的节点数量成正比, 在大规模的网络内性能受到较大制约. Post-facto 为事件发生后的同步方法, 但在多个事件同时发生时容易引起系统时钟的不稳定.

本文针对无线传感器网络工作特性提出了一组统计时钟同步协议 SCPS (Statistic Clock Proto-

col for Sensor Networks), 适用于大规模传感器网络的时钟同步.

1 统计时钟同步

时钟同步的基本步骤包括: 周期性的对节点的时钟值采样, 计算本地时钟和参考时钟的差值, 用得到的差值来修正本地时钟.

统计时钟同步就是采用抽样统计的方法计算本地时钟相对于参考时钟的修正值, 然后调整本地时钟使之和参考时钟保持一致的同步过程.

时钟同步中参与同步的节点间需要交换时钟信息, 其中每一次采样得到的两个节点的时钟差值为 d_i . 整个同步过程中的差值采样数据为流数据. 依据抽样分布定理, 可由其总体 d 服从的分布来得到其子样均值的分布. 由此, 依据抽样分布定理, 根据系统需求来确定采样空间大小、采样密度

收稿日期: 2005-03-09.

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60533110); 哈尔滨工业大学校级基金资助项目 (HIT200274).

作者简介: 杨 博 (1973-), 男, 博士研究生;

廖明宏 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师.

与同步精度间的关系以及和同步效率间的关系。

一般地, 节点间的时钟差值符合正态分布, 由抽样分布定理可知: 若总体 d 服从正态 $N(\alpha, \sigma)$, 则其子样 d_1, \dots, d_i 的均值 d 服从正态 $N(\alpha, \sigma/\sqrt{n})$ 。取子样空间为 n , 则时钟差值均值为

$$d = 1/n \sum_{i=1}^n d_i$$

并由此可以得到, 在给定同步算法精度要求为 ϵ_{max} 的情况下, 从节点和主节点间的同步精度小于 ϵ_{max} 的概率满足^[4]:

$$P[|\epsilon| \leq \epsilon_{max}] = \text{erf}\left[\frac{\sqrt{n}\epsilon_{max}}{\sqrt{2}\sigma_d}\right]$$

其中: ϵ 为算法的同步误差, n 为发送的消息包个数, ϵ_{max} 为同步误差的最大值, σ_d 为传输时延的均方差。则可得出任意两个从节点之间的钟差的最大值 d_{max} 为

$$d_{max} = 2(\epsilon_{max} + \rho(R_{syn} + \delta_{max} - \delta_{min}))$$

其中: ρ 为相对钟速差, R_{syn} 为一个同步过程花费的时间, δ 为消息包传输时延。

由上面可知, 应尽可能地缩短同步过程, 以减少节点间存在的钟速差带来的影响; 子样空间 n 越大, 则同步精度越高; 同时要减少消息包的传输时延。

2 无线传感器网络的特点

传感器网络的一个重要特点就是其有限的能源, 多数的感知节点采用一次性电池供电, 因此, 节能技术便成为了设计中的重要组成部分。传感器网络节能可采用以下几种方法: 减少节点间的通信量; 降低算法的时间复杂性; 减少系统的连续工作时间; 系统空闲时节点进入休眠状态等方法。其中, 减少节点间的通信量为节能的主要方法。无线传感器网络在组织形式上多采用组簇的方式降低网络复杂性来提高工作效率, 每个簇由簇头进行管理、中转数据和指令。

传感器网络由众多的传感器节点以及相关的辅助节点组成, 每个节点都有自己的物理时钟作为计时工具。在网络工作过程中, 由于各个节点工作环境的不同、工作特点的不同、工作时间的不同、以及节点类型的不同, 都会使得节点的物理时钟和参考时钟之间存在偏差。

本文的硬件和软件平台采用 Berkeley 设计的传感器节点 Mica2 和操作系统 TinyOS^[5]。Mica2 支持两个 16 位的高精度时钟计数器 Timer1 和 Timer3, 以 CPU 的主频为基准。TinyOS 将该计数

器扩展成为一个 32 位的计数器, 或者称为逻辑时钟, 其计时单位最小可为 $0.125 \mu s$ 。节点自身时钟的漂移在 $1 \mu s$ 左右, 最大钟差和传输时延值都在几百微秒左右。

在传递参考时钟信息的过程中存在通信时延, 该时延包括几个主要组成部分: 发送方通信协议消耗的时间、电台等待发送的时间、消息在信道上传输的时间、接受方电台接收的时间、以及接收方通信协议消耗的时间。

传感器网络中节点的可靠性和网络的差错率是不稳定的, 传感器网络的一个特点就是经常工作于恶劣环境中, 节点或者通信链路可能会经常出错, 消息传输时延也可能随着外界环境的变化而改变, 需要进行相应的容错处理。

实验表明, 传感器节点间传输时延值 δ 在测量中偶尔会出现偏差很大的值, 在一般环境中, 出现较大偏差的概率在万分之四以下, 通过过滤的方法去掉这些飞点, 处理后的数据符合正态分布 (见图 1)。本文采用在线测量传输时延值的方法得到时延值, 使得系统能够反映当前环境状态。每一次测量传输时延值的事件是相互独立的, 是一个独立完整的过程。

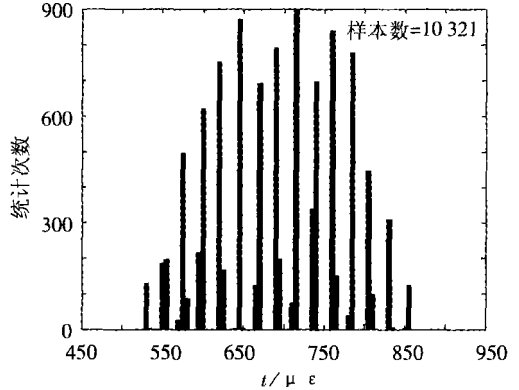


图 1 传输时延值的分布

3 统计时钟同步协议设计与实现

3.1 统计时钟同步协议

单向传送消息比双向交换消息携带的信息量降低了, 但是却能够一次覆盖多个节点。采用广播方式、单向传送同步消息的方法能够显著减少通信量而降低能耗。Arvind 提出的概率时钟同步方法 PCS (Probabilistic Clock Synchronization)^[4] 满足以上需求, 是一种适合于广播网络的同步方法。PCS 连续发送多个消息包来保证较高的同步精度。但是, 该方法还不能直接用在传感器网络中。原因主要有: 传感器网络经常处于恶劣环境中工作, 其每一个节点都可能出现突发故障, 其通信链

路也不能保证无差错,因而每个传感器节点和整个网络的状态随时处于不可信状态.针对这种情况,不能够采用固定不变的网络传递时延参数和节点时钟漂移参数.

本文设计并实现了统计时钟同步协议 SCPS,其主要特点为:

- 1)采用发送有多个独立的信息包组成的一组同步消息,计算当前状态的网络参数和时钟参数,提高同步精度;
- 2)采用单向广播的方式;
- 3)采用逐级向父节点同步的方式来完成一定范围内网络的时钟同步.
- 4)采用对数据进行过滤的方法,使得系统采样数据在处理后可以满足计算要求.

SCPS 同步协议针对无线传感器网络的工作特性又细分为几部分,包括传输时延值的测量、分簇组网模式下的簇内节点时钟同步、一定网络范围内的全局时钟同步,以及节点工作于事件触发工作模式时的主动时钟同步.

在网络初始化过程时以及在网络工作了一段时间后,协议需进行传输时延值的测量,计算得出相邻节点间同步消息数据传输所需的时间,作为同步计算中的修正值.

簇内时钟同步协议主要包括请求同步和广播同步消息两部分,当某个节点的同步请求定时器超时后向簇内的头节点发送同步请求消息,头节点收到同步请求后广播同步消息,连续发送多个同步消息,簇内的节点收到同步消息后根据传输时延值计算出和头节点时钟间的偏差值,修正本地时钟.

全局时钟同步协议主要包括设置级别、请求同步和广播同步消息 3 部分.将一定网络范围内的节点设置不同的级别,每个节点只和其上级节点保持同步,从而达到该范围内的时钟同步.

主动同步协议主要包括请求同步和广播同步消息两部分,适用于经常休眠的节点.当节点在有事件发生而被激活后,记录该事件,并在发送事件消息时与其上级节点进行同步,同时修正事件的时间,从而保证时间的一致性.

在协议的实现中有两个关键环节,一个是如何记录时间戳和传输时间戳,另一个是如何测量时间戳的传输时延值.

3.2 时间戳的记录与传输

TinyOS 中提供了 `SendCoordinator_startSymbol()` 和 `ReceiveCoordinator_startSymbol()` 接口,在同步头收发完成后被触发,来得到该节点对应的时

间戳.图 2 为消息包的传送时序图.

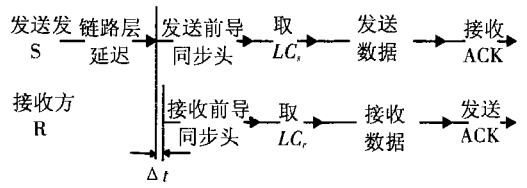


图 2 时间戳的记录

在图 2 中, LC_s 为发送方触发 `startSymbol()` 后记录的时间戳; LC_r 为接收方触发 `startSymbol()` 后记录的时间戳; Δt 为信号在媒体中传播的时间和网络的物理层处理信号的时延.设 T_{Delay} 为发送方和接收方记录时间戳间的偏差.

$$T_{Delay} = LC_s - LC_r + \Delta t$$

LC_s 和 LC_r 的对应事件为发送完前导同步头和接收到前导同步头,发送节点和接收节点各自用本地时钟记录 LC_s 和 LC_r . LC_s 和 LC_r 间的偏差主要部分是节点记录时间戳时引入的,而传送时延为传送同步头中最后一位数据的延时 Δt 该时延值在节点的覆盖范围内 $< 0.5 \mu s$ (150m 覆盖半径),可以在计算中忽略.

在同步过程中,节点 i 取本地时间 LC_i ,然后将 LC_i 加入同步消息包发送给节点 j ,节点 j 收到消息包后记录本地时间 LC_j ,这时,只要知道消息包传送的时延 T_{Trans} ,就可以得到节点 j 的时钟调整值 $T_{Adjust} = LC_j - (LC_i + T_{Trans})$.

3.3 在线测量传输时延值

时钟同步消息数据包传输时延值 δ 的组成部分包括:发送时间、传输时间和接收时间.其中发送时间和接收时间是造成节点间非确定性延时的主要因素^[6]. δ 值是由软件方法测量的,值中包含了消息包传输过程中各种不确定性因素,因而 δ 值的误差就是同步算法的误差, δ 值的组成部分包含了 δ 的期望值和测量时引入的误差值.

在传感器网络环境下, δ 值一般情况下是稳定的,但由于传感器网络的工作环境通常比较恶劣和多变,对 δ 值有一定的影响,且不可预知.所以需要动态测量 δ 值,尽可能地计算出当前状况下 δ 的近似期望值.

已知节点的通信覆盖范围在一个较小的区域内,可做如下假设:参与同步的主节点和不同的从节点间的消息传输时延的误差符合相同的概率分布,每次传输时延都是统计独立的.

测量节点间传输时间戳的时延采用远程读取时钟的方法,连续进行 n 个应答过程,对得到的 n 个 δ 值求平均值,将均值作为节点间消息传输时延.每个节点都要保存节点间的传输时延估算值

作为同步时的修正参数, 本文采用滑动窗口的方法处理测量时延值 δ 每次测量时采集多个值, 以其中值加上门限值作为过滤窗口, 过滤掉偶尔产生的飞点, 并将均值作为本次测量的结果. 由于测量时存在随机误差, 所以计算得到的最近历史数据的平均值为时延近似值, 实验表明近似值能够逼近期望值.

4 实验分析

在计算节点间钟差前, 需要测量节点间同步消息包记录时间戳的差值. 同步过程中上级节点间隔一段时间就连续发送 8 个消息包, 下级节点就会产生相应的 8 个时间戳对. 时间戳差值是变化的, 并且存在一些偏差很大的飞点, 通过过滤处理去除这些飞点, 然后用得到的时间戳差值减去传输时延值得到钟差近似值, 并将该近似值作为节点的时钟修正值. 实验中计算得到的节点间的钟差 (或称为修正值) 如图 3 所示.

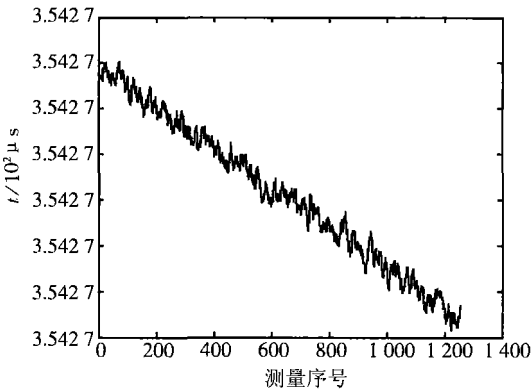


图 3 处理后的节点时间差 (修正值)

从图 3 中可以看出节点间的钟差存在趋势上的变化, 同时又存在着波动. 为了分析钟差波动的特性, 对钟差值求差分, 得到的结果如图 4 所示, 可以看出其分布符合正态分布的特征.

把修正值的差分作为评价同步稳定度的指标, 在这里稳定度通常是说其不稳定度. 考虑到测量传输时延值和测量节点间时间戳差值的独立性, 进行了多次实验, 通过计算得出同步稳定度小于 2×10^{-5} 的概率为 0.8609, 同时, 同步误差以 0.9965 的概率小于 $80 \mu s$.

5 结 语

传感器网络的时钟同步采用基于统计的单向发送同步消息的方法能够有效地降低能量消耗和

带宽消耗, 适合于应用在由大量节点组成的传感器网络中.

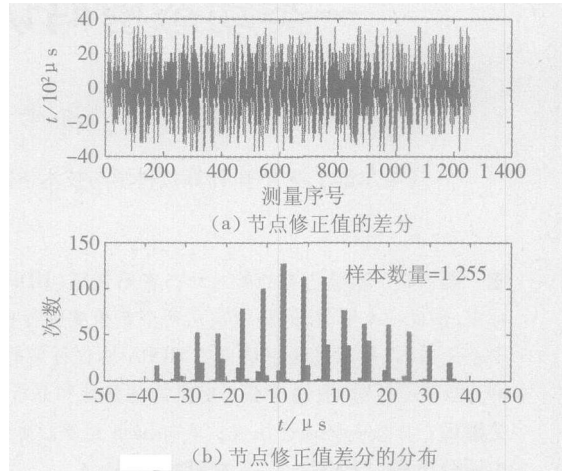


图 4 节点时钟修正值的差分及分布

参考文献:

- [1] ELSON J, GIROD L, ESTRIN D. Fine-Gained Network Time Synchronization using Reference Broadcasts [C] // In Proceedings of the Fifth Symposium on Operating Systems Design and Implementation, Boston, MA, USA: ACM Press, 2002: 147-163.
- [2] ELSON J, ESTRIN D. Time Synchronization for Wireless Sensor Networks [C] // In Proceedings of the 15th International Parallel and Distributed Processing Symposium, San Francisco, CA, USA: IEEE Computer Society, 2001: 1965-1970.
- [3] GANERWAL S, KUMAR R, SRIVASTAVA M B. Timing-Sync protocol for Sensor Networks [C] // In Proceedings of the first international conference on Embedded networked sensor systems, Los Angeles, California, USA: ACM Press, 2003: 138-149.
- [4] ARVIND K. Probabilistic clock synchronization in distributed systems [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 1994, 5(5): 474-487.
- [5] HILL J, SZEWCZYK R, WOO A, et al. System architecture directions for networked sensors [C] // In Proceedings of the ninth international conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, Cambridge, MA, USA: ACM Press, 2000: 93-104.
- [6] ELSON J, RÖMER K. Wireless sensor networks: a new regime for time synchronization [J]. Computer Communication Review, 2003, 33(1): 149-154.

(编辑 杨 波)