

一种基于 Ad hoc 网络测距的时钟同步协议*

沈 威¹, 许 娜²

(1. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 2. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

摘 要: Ad hoc 网络是一种特殊的无线移动通信系统, 具有无中心、多跳等特点。结合无线传感器网络时钟同步协议 RBS、TPSN 和有线网络 DOCSIS 协议, 提出了一种适合 Ad hoc 网络的时钟同步协议。先在 Ad hoc 网络上建立具有层次性的全网络结构后, 以发送广播时钟同步信号的方式实现全网络节点的时钟相对同步, 并通过周期性和突发性的双向测距实现和维护主从时钟节点之间精确的时间同步, 以满足实际应用的要求。仿真实验表明, 该时钟同步协议能满足不同时钟同步精度要求下的 Ad hoc 网络应用, 具有低功耗和高可靠性的特点。

关键词: 无线自组网; 电缆数据传输规范; 时钟同步; 测距

中图分类号: TP393

文献标识码: A

A time synchronization protocol based on Ad hoc ranging

SHEN Wei¹, XU Na²

(1. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Ad hoc network is a special kind of wireless mobile communication system, with no center, multi-hop and so on. This paper presents a time synchronization protocol which is suitable for Ad hoc networks, according to the time synchronization protocol for wireless sensor networks (RBS, TPSN) and DOCSIS for cable networks. Firstly, the system must establish a hierarchy of the whole network structure on Ad hoc network, and then send a broadcast time synchronization signal in order to achieve all the network nodes time synchronization. Through two-way periodic or sudden ranging, the system realizes and maintains the precision time synchronization between the master-slave nodes to meet the requirements of the practical applications. Simulation results show that the time synchronization protocol can meet the different time synchronization accuracy requirements in the Ad hoc network applications with low power consumption and high reliability.

Key words: Ad hoc; DOCSIS; time synchronization; ranging

Ad hoc 网络是一种特殊的无线移动通信网络。Ad hoc 网络的节点不仅具有一般移动终端的基本功能, 而且具有报文转发功能, 因此节点间的通信有时需要通过多跳来完成。网络中的各个节点通过分层的网络协议相互协调, 实现网络的自组织和运行。由于以上特点, Ad hoc 网络又被称为多跳无线网 (Multi-hop Wireless Network) 或自组织网络 (Self-organized Network)。

同所有的分布式系统一样, 时钟同步也是 Ad hoc 网络技术研究中的一个关键问题。因为网络节点内部的硬件时钟具有一定的误差, 所以节点的本地时间会存在偏差。然而, Ad hoc 网络的许多应用需要全网络中的节点

或一定范围内的部分节点具有高度的时间一致性, 因此 Ad hoc 网络需要进行时钟同步。现有的有线网络和无线网络上的时钟同步协议并不能完全满足 Ad hoc 网络应用的需要, 迫切需要进行进一步研究, 探索出适合 Ad hoc 网络的时钟同步方法。

1 相关研究

1.1 有线网络上的时钟同步方法

传统的时钟同步方法中最典型的是利用 GPS (Global Position System) 或 NTP^[1] 协议实现设备间的同步。Ad hoc 网络, 尤其是传感器网络的节点, 必须考虑移动终端的成本代价。GPS 装置价格昂贵, 并且在建筑物或水下, 其服务质量并不能得到很好的保证, 尤其在军事应用中, 利用 GPS 来获得无线网络节点的时钟同步是极

* 基金项目: 国家自然科学基金无线传感器网络在冶金工业监测中的应用 (50674010)

不可靠的。因此,在众多 Ad hoc 网络的应用中利用 GPS 获得时钟同步是不可取的。

NTP 协议假设网络中 2 个节点的时间请求、回复报文具有相同的时延,由于 Ad hoc 网络多跳的无线环境存在非对称链路、前向链路和反向链路,这些链路往往具有不同的时延,因此 NTP 协议不适合直接应用于 Ad hoc 网络;另外,NTP 协议需要在网络中配置时间服务器,Ad hoc 网络是一种移动自组织网络,没有中心节点,这也导致了 NTP 协议无法直接应用于 Ad hoc 的网络时钟同步。

1.2 无线传感器网络上的时钟同步协议

参考文献[2]提出了一种适合无线传感器网络的参考广播时钟同步协议(RBS),该协议利用了“第三方”的广播时钟同步信息来完成 2 个单跳节点的时钟同步。其基本思路是:在广播域内周期性地广播 1 个数据分组(不必做时间标记),所有接收到这个数据分组的接收方对该数据分组做时间标记。所有接收方互相交换它们的时间标记,并以此获得邻近节点的时钟。重复以上过程,所有节点不仅知道它们相互之间的相位偏移,而且知道它们相互之间的频率漂移率。所有节点都不调整它们的本地时钟,但要为每个邻近节点建立一个调整时钟所需要的参数表。仿真结果表明,在 Berkeley Motes 平台上 30 次同步后取平均所获得的同步精度为 $1.6 \mu\text{s}$ 。RBS 协议虽然可以获得比较高的同步精度,但其只能应用于单跳范围内节点间的时钟同步,将 RBS 协议扩展到多跳是该协议能否应用于 Ad hoc 网络的关键。

TPSN(Time-synchronization Protocol for Sensor Networks)^[3]是一种用于多跳传感器网络的时钟同步协议,该协议的目标是全网时钟同步。TPSN 包括两个阶段,第一阶段是拓扑发现阶段,或称为全网络同步阶段,目的是要建立一个分级的网络拓扑,其本质就是建立生成树。如果根节点能访问一个外部的高精度时钟,那么网络中的所有节点都与这个高精度的时钟同步。第二阶段为比对同步阶段,由时钟参考节点周期性地广播一个同步标志发起,等级为 1 的节点接收到标志后即和时钟参考节点同步,同步策略采用类似 NTP 的“two-way message exchange”,随后同步依照节点等级向外扩散,每个等级为 i 的节点向等级为 $i-1$ 的节点同步,最后完成全网节点与时钟参考节点的同步。

从直观上来看,RBS 只引入了传播时延和接收时延,应该具有更高的精度,但在参考文献[4]的实验环境下,发送时延和接入时延的不确定性比较小,并且多种不确定因素的作用可能相互抵消,TPSN 获得了优于 RBS 协议的精度。另外,RBS 协议完成一对节点的时钟同步需要 1 次报文广播和至少 2 次报文单播,TPSN 只需要 2 次报文单播,发送更少的报文,对于共享信道、数

据容易发生冲突的无线信道来说,具有更好的可扩展性。

2 基于 Ad hoc 网络测距的时钟同步方法

2.1 双向传播时延的计算方法

参考有线网络上的 DOCSIS 规范^[5]对测距过程的描述,本文提出一种基于时钟相对同步概念的可应用于 Ad hoc 网络的计算双向传播时延的方法。

Ad hoc 网络的测距过程分为两个部分:初始测距和周期性测距。初始测距又分为初始维护(initial maintain)和站维护(station maintain)。在初始测距过程中,邻近子层设备节点要获取准确的定时偏移,即基准时钟同步信号的发送方(主时钟节点)与某一特定的接收方(从时钟节点)之间传输数据的双向传播时延(RTD)。从时钟节点根据 RTD 提前发送数据的时间以补偿网络时延,使不同的从时钟节点所发送的数据到达主时钟节点的时间与主时钟节点在带宽分配报文(MAP)中要求的时间对齐。带宽分配报文是主时钟节点向从时钟节点发送的。双向传播时延的计算过程如图 1 所示^[6]。

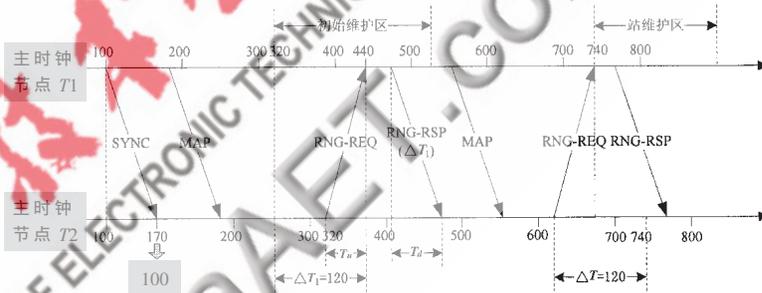


图 1 双向传播时延的计算过程

RTD 包括下行传输时延(从主时钟节点到从时钟节点)和上行传输时延(从从时钟节点到主时钟节点)。首先,从时钟节点从主时钟节点读取时间标记,获得当地时钟基准,然后根据 MAP 找到主时钟节点分配的初始维护区,发出初始测距请求(RNG-REQ)。由于从时钟节点与主时钟节点之间存在距离,该请求将延迟一段时间到达,假设到达时刻为 $T=440$ 。主时钟节点计算收到 RNG-REQ 的实际时刻与初始维护区起始时刻之差,在测距响应(RNG-RSP)中通过“定时调整”字段返回给从时钟节点。主时钟节点在发送 RNG-RSP 前还应该获得从时钟节点发送的确切频率、接收的实际功率等信息。主时钟节点在这些数据的基础上计算出校正数据,并在 RNG-RSP 中发送给从时钟节点。从时钟节点收到 RNG-RSP 后,根据下式计算收到第 n 个 RNG-RSP 后得到的定时偏移 t_n :

$$t_n = t_0 + \sum_{i=1}^n \Delta t_i \quad (1)$$

图 1 中初始维护使得从时钟节点的定时偏移调整为 $t_1=120$ 。在随后的站维护过程中,从时钟节点提前 t_1 发送 RNG-REQ,该数据分组在站维护区的起始时刻 $T=$

软件天地 Software Technology

740 到达主时钟节点。主时钟节点根据接收参数计算需要进行的附加微调,并通过轮询 RNG-RSP 返回给从时钟节点。从时钟节点根据式(1)继续调整定时偏移,直到主时钟节点指示测距过程成功。

2.2 全网络生成树的建立

建立全网络同步是从建立生成树开始的。首先,从根节点发出一个层发现报文(包含根节点的层变量 0)。根节点的所有单跳邻近节点为其自己分配的层号 (1) 加上层发现报文中的层变量,并接受根节点作为它们的父节点。然后第 1 层的节点发出它们自己的层发现报文,依此类推。同一层的每个节点选择一个随机延迟来避免过多的报文碰撞。一旦某个节点接收到第一个层发现报文,该报文的发出者就被作为接收方的父节点,而后来的层发现报文则被丢掉。节点找到它的父节点以后,就接收父节点周期性发出的时钟同步信号 SYNC,并校正自己的本地时钟,同时,节点本身也周期性地发出时钟同步信号,使它的子节点也保持同步。

由于报文碰撞或者在生成树建立以后某个节点才加入到网络中,因此有的节点可能没有接收到层发现报文。如果某节点 *i* 在一定的时间内没有接收到任何层发现报文,那么它就会向它的单跳邻近节点发出一个层发现请求报文,询问关于现在生成树的情况。之后,节点 *i* 会密切监听网络,收集在某个时间范围内的请求应答报文,然后在它的邻近节点中选择一个层变量最小的节点作为它的父节点。图 2 是节点 *i* 加入网络层次结构的过程示意图。

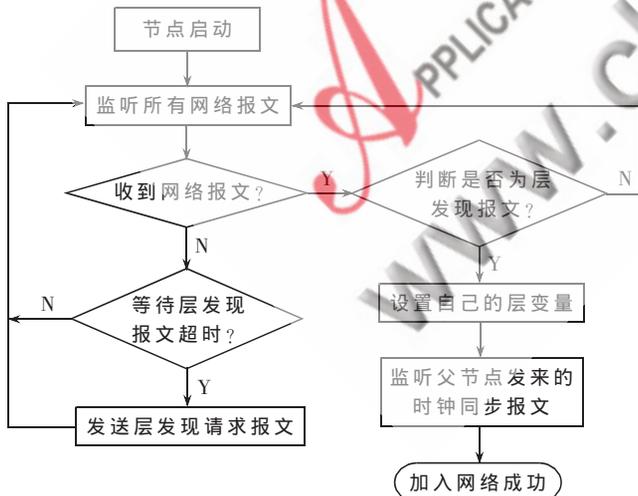


图 2 节点加入网络层次结构的过程图

2.3 测距时钟同步方法的设计实现

从时钟节点的初始测距要经历广播初始维护和单播站维护 2 个阶段。初始维护阶段调整从时钟节点的功率电平、上行信道中心频率和定时偏移等信息。站维护

阶段对上述参数进行微量调整。初始测距过程可以设计为 4 个状态:等待初始维护机会、等待测距响应、等待站维护机会和等待轮询测距响应。图 3 所示为该过程的有限状态机图。

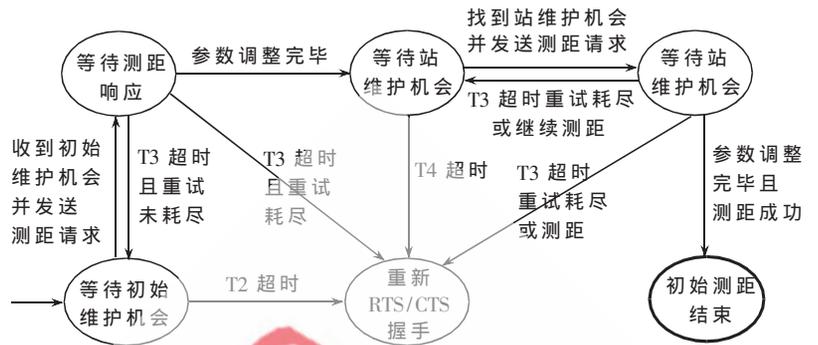


图 3 初始测距的有限状态机图

从时钟节点必须补偿物理层的传输时延,相当于将从时钟节点放在与主时钟节点相近的地方。因而系统将初始定时偏移设为内部固定的时延量,包括从 MAC 层到物理层的延迟等。初始测距期间发送第一个 RNG-REQ 时,根据初始定时偏移计算提前发送的时间。主时钟节点收到请求后计算定时偏移等参数的校正值,并通过 RNG-RSP 返回给从时钟节点。响应中的“测距状态”字段指出从时钟节点下一步的动作(继续、中断或测距成功)。站维护阶段的测距请求、响应步骤重复多次,直到从时钟节点得到含有测距成功的通知或主时钟节点放弃测距响应为止。在系统运行过程中,当来自于从时钟节点的数据的到达时间与主时钟节点分配的时间之间的误差超过一定限度时,主时钟节点可以向从时钟节点发送报文,要求进行突发性的测距。从时钟节点周期性地发送测距请求,一般来说,发送周期间隔会比较长。

为了避免主时钟节点一直没有响应而造成的从时钟节点无休止地等待状态,可以规定等待响应的最长时间,一旦超过这个时间,从时钟节点将认为主时钟节点没有收到它发送的测距请求报文或主时钟节点出现了故障。初始测距过程涉及到的超时情况包括:T2 等待广播测距机会超时,T3 等待测距响应超时,T4 等待单播测距机会超时。

3 仿真实验及分析

实验采用中科院自主设计的 GAINS-2 节点,该节点与 Mica2 节点兼容。GAINS-2 节点的微控制器采用 Atmega128L,射频芯片采用 CC1000。CC1000 是一款面向字节的无线芯片,支持时钟同步算法在 MAC 层标记时间戳。节点的操作系统采用无线传感器网络专用操作系统 TinyOS。实物测试中,为了采集到同一时刻多个节点的本地时钟信息,把需要同步节点和时钟基准节点控制器的外部中断引脚通过导线连接在一起,由需要同步节点触发外部中断引脚产生中断,并在中断处理程序中记录

采集时间点各个节点的时钟信息。

仿真环境为一个由 64 个节点组成的 Ad hoc 网络, 节点的编号为 1~64。分别使用了 1 号、21 号、41 号、61 号节点作为时间基准节点, 并随机变换节点在网络中的拓扑位置, 从多个角度对时钟同步算法、同步精度和稳定性进行测试。设同步周期为 30 s, 在同步完成后 5 s 采集时钟信息。这主要是考虑到 Ad hoc 网络节点的任务处理延迟, 如数据包的加密与解密、连续跟踪一个活动目标、连续高频率采集传感器数据等。图 4 所示为网络中各个节点在不同采集时刻的时钟同步精度统计数据。

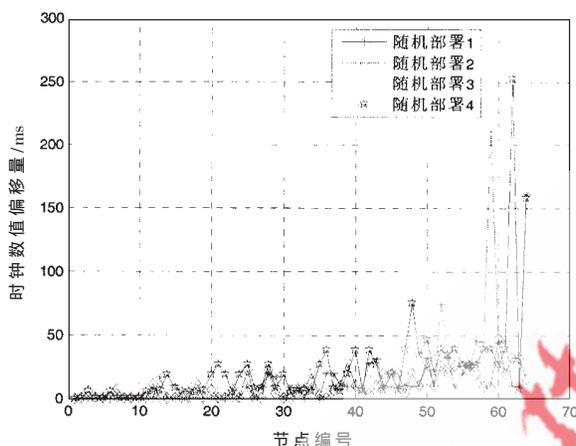


图 4 时钟同步精度统计数据

从图 4 的统计数据中可以发现, 64 个节点中的绝大多数节点在采集时刻都具有良好的时钟同步精度, 能够满足应用的要求。由于 Ad hoc 网络在实际应用中, 节点可能被随机散布在监控区域中, 因此系统应当允许有个别节点不能在规定时间内取得时钟同步, 这也是对系统健壮性的一个衡量指标。仿真实验中, 导致个别节点不能在规定时间内取得时钟同步的原因是节点位置较偏, 邻居节点数目较少, 以及实验中设置的 5% 的误码率和 10% 的丢包率。

本文提出了一种基于 Ad hoc 网络测距的时钟同步协议, 相比传统的时钟同步方法, 该协议建立系统相对同步只需要一次报文广播, 而 RBS 协议要求有至少两次的报单播; 在初始测距成功后, DOCSIS 规范只有周期性测距, 而本文引进了突发测距机制, 允许周期性测距的时间间隔更长。当双向传播时延突变时, 主时钟同步节点可以及时进行新一轮测距。仿真测试表明, 这种时钟同步方法能满足不同时钟同步精度下的 Ad hoc 网络的应用要求, 具有低功耗和高可靠性的特点。

参考文献

- [1] MILLS D L. Internet time synchronization: the network time protocol[J]. IEEE Trans Communication, 1991, 39(10): 1482-1493.
- [2] JERE MY E, LEWIS G, DEBORAH E. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts[A]. Proc 5th Symp Op.Sys Design and Implementation [C]. Boston, MA, 2002.
- [3] FIKRET S, BULENT Y. Time synchronization in sensor networks: a survey [J]. IEEE Network, 2004, 7(8): 45-50.
- [4] HILL J, CULLER D. A wireless embedded sensor architecture for system level optimization[R]. Tech Rep, UC Berkeley, 2001.
- [5] CableLabs. Data-over-cable service interface specifications radio frequency interface specification, SP-RFIV1.1-106-001215[S]. 2000: 82-85.
- [6] 王沁, 龙萍, 张晓彤, 等. 基于 DOCSIS 规范的测距机制分析与嵌入式实现[J]. 通信学报, 2006, 27(9): 96-101.

(收稿日期: 2010-01-20)

作者简介:

沈威, 男, 1978 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 网络信息系统, ICAI。

许娜, 女, 1981 年生, 工学博士, 主要研究方向: 嵌入式系统结构设计, 无线传感器网络。