

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802090

基于 TDMA 技术的无线传感器网络时间同步新方法

朱庆豹 施伟斌

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 时间同步技术对于无线传感器网络的正常工作以及运转效率来讲都至关重要,是不可或缺的一环。传统的时间同步算法主要针对于节点信息包传输过程中的时间延迟和节点时钟的偏移和漂移,但由于很多复杂因素的影响,这一类时间同步算法的同步精度都不是很高。对此,将时分多址(TDMA)技术用于无线传感器网络的时间同步,网关节点发送信标通知各节点时隙分配,并且利用了节点侦听使得那些不在网关通信半径内的节点也能获取到时隙的情况,各节点在自己分配得到的时隙内发送消息。最后将媒体访问控制(MAC)子层的 TDMA 协议与网络层汇聚树协议(CTP)结合,通过对丢包率的计算来分析所提出方法的效果。实验结果表明,应用了 TDMA 技术后,丢包率明显减小,说明了 TDMA 对时间同步有很好的效果。

关键词: 无线传感器网络;时间同步;时分多址;节点侦听;时隙;丢包率

中图分类号: TN014;TP393 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

New method of time synchronization for wireless sensor network using TDMA technology

Zhu Qingbao Shi Weibin

(College of Photoelectric Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Time synchronization technology is critical to the normal work and operational efficiency of wireless sensor networks. It's an indispensable part. The traditional time synchronization algorithm is mainly used for time delay during node packet transmission and offset and drift of the node clock. But due to the influence of many complicated factors, the synchronization accuracy is not very high. So this paper uses time division multiple access (TDMA) technology for time synchronization of wireless sensor networks. The gateway node sends a beacon to notify each node of the time slot allocation. Simultaneously, those nodes that are not within the communication radius of the gateway use node listening to obtain the time slot situation. Each node sends a message in its assigned slot. Finally, the TDMA protocol of the media access control (MAC) sub-layer is combined with tree cluster tree protocol (CTP) to analyze the effect of the proposed method by calculating the packet loss rate. The experimental results show that the packet loss rate decreases significantly after TDMA is applied, indicating that TDMA has a good effect on time synchronization.

Keywords: WSNs; time synchronization; time division multiple access (TDMA); node listening; time slot; packet loss rate

0 引言

无线传感器网络^[1](wireless sensor networks, WSNs)由部署在检测区域内的大量廉价微型传感器节点组成,这些节点在检测区域内以无线多跳方式自组织成网。由于传感器节点体积小、能耗低且能够感知和处理周围环境消息,很多学者已经开始针对无线传感器网络展开了一系列的研究,并且在智能家居、环境监测、老人健康等领域取得了突

破性的进展。

而时间同步^[2]是无线传感器网络各项工作得以正常开展的基础,节点的定位、监测数据的收发都离不开时间同步。并且 WSNs 其他应用服务的质量与节点间时间同步所能达到的精度呈正相关关系。

为了提高无线传感网节点时间同步的精度,本文在分析了前人提出的时间同步协议的基础上,分析了其中存在的问题,并且将时分多址(time division multiple access,

TDMA)技术引入到时间同步,利用了节点侦听和网关广播信息来分配时隙,达到另一种意义上的时间同步。

1 传统的时钟同步技术

1.1 传统网络的时钟同步技术

因特网时间同步机制(network time protocol,NTP)^[3]广泛应用于互联网,目前精度已经可达到微秒级。

NTP 机制的顶层时间服务器需要通过广播、卫星或调制解调器等手段与世界标准时间同步;而处于其他层的服务器是通过选择合适的同步源来实现同步的,这些同步源可能是上一层或者本层的时间服务器;客户机则选择一个或多个上一层时间服务器来实现与世界统一时间的同步。这种同步拓扑的缺陷在于离顶层时间服务器越远,同步精度将会越差。

因特网与无线传感器网络间的巨大差异是导致 NTP 不适合于无线传感器网络的主要原因。首先,无线传感器网络中的节点体积小,计算资源和存储资源都有限;然后,WSNs 的数据传输方式为无线传输,而因特网却主要采用有线传输方式。所以,传统网络的 NTP 同步机制并不适用于无线传感器网络。

1.2 WSNs 中的时间同步协议

传输延迟^[4]的不确定性是无线传感器网络时间同步的主要挑战。按照传统编程层次的划分,节点发送数据包到接收节点的过程中,其传输延迟主要由发送方应用层延迟(send time)、发送方媒体访问控制(MAC)层等待延迟(access time)、物理层传播延迟(propagation time)、接收方 MAC 层接收延迟(reception time)、接收方应用程序层延迟(receive time)组成。图 1 所示为数据包传输延迟的组成。尽可能排除或减少它们的不确定性是提高无线传感器网络时钟同步精度的重要途径。

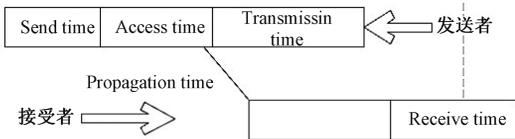


图 1 传输延迟的组成

最早的时间同步协议为参考广播同步(reference broadcast synchronization,RBS)协议。该协议利用了无线信道的广播特性^[5],一个节点向它的周围节点广播同步消息,每一个接收节点会记录下接收到该同步消息的本地时刻,然后这些节点中的两个会去交换记录下的接收时刻并计算差值,然后其中一个节点根据这个差值也就是时间误差去修改本地时钟,达到两个节点的时钟同步。但是受限于同步消息的传输范围,它不适用于长距离或长时间通信的同步。

随后有学者提出了 DMTS^[6](delay measurement time

synchronization)算法,该算法通过发送者与接收者之间的数据收发实现两个节点的实现同步。另外,有学者提出了另一种时间同步机制 TPSN^[7](time-sync protocol for sensor networks),该同步机制是基于双向报文传输,利用报文传输的对称性能获得比单向报文传输更高的同步精度。

其他的时间同步协议还包括 MTCTS^[8]同步协议、二阶一致性算法^[9]、GCTS^[10]同步机制、萤火虫^[11]同步算法等。

以上提出的时间同步协议在节点间时钟同步的过程中同步的精度主要受制于数据包传输过程中的传输延迟,各协议从不同的角度去减小延迟,但是由于信道竞争的不确定性,节点间的传输延迟仍然很难控制。应用这些协议所达到的时钟同步精度还没有达到满意的效果。

2 TDMA 引入时间同步

TDMA^[12]是 MAC 层的一项关键性技术,它是将时间划分为若干个帧,而每个帧又划分为等长的时间元,每个时间元就称为一个时隙。一个帧为 TDMA 的一个周期,为了减小能耗,一个周期分为两部分,活跃周期和睡眠周期。部署在监测区域的传感器节点只会在分配给自己的时隙内发送数据包。对一个节点而言,当它的时隙到来时,它将拥有对信道的独立占有权,只有它可以在这个时隙里发送数据。这样就避免了节点间由于信道竞争而引入的传输延迟,达到了各节点间的时隙同步,很好的提高了同步的精度。

2.1 TDMA 系统概述

本文所研究的无线传感器网络是在由 nesC 语言所编写的 TinyOS 操作系统^[13]下进行实验的。TDMA 系统由 6 大模块组成,如图 2 所示。时隙调度模块为整个 TDMA 的核心组件,它控制着传感器节点在各自的时隙内完成数据的发送;信标发送模块与通用时隙模块共同完成时隙的分配,信标发送模块实现网关节点在 0 时隙广播发送信标包,在网关节点通信半径范围内的节点收到信标包后,确定下一次时隙的开始时间;调用通用时隙模块的时钟触发事件,完成本地时钟的时隙确定。时隙发送模块与发送调度模块完成各个时隙内节点数据的发送。

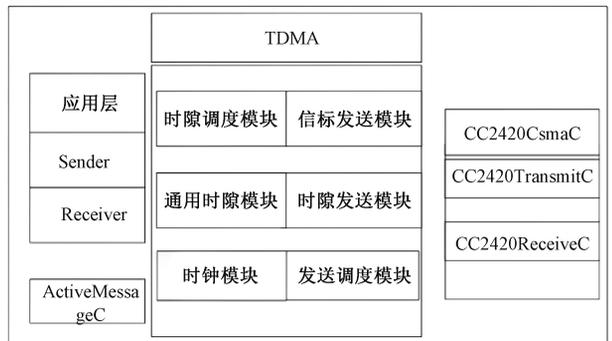


图 2 TDMA 系统

该 TDMA 系统的时隙分配^[14]规则如下:时隙编号从 0 开始,按照与编号相对应的节点 ID 依次分配给各节点,节点 ID 也就是节点的地址,当节点地址与时隙编号相等时,说明节点当前处于分配给自己的时隙,可以开始发送数据。

这样的系统虽然解决了节点发送数据时的访问冲突问题,但也仅限于网关节点通信半径范围内的传感器,0 时隙由网关占用发送信标包,而收到信标包的节点在自己的时隙里只能用来发送数据包,不足以允许其同时发送信标包通知那些不在网关通信范围的节点,它们无法收到网关的信标包,在当前的系统中无法获取自己的时隙,从而无法发送数据。

为了解决这一问题,本文在现有 TDMA 的基础上提出了利用节点侦听^[15]以达到全网时隙同步的目的。

2.2 节点侦听

在无线传感器网络中,节点能够侦听到邻居节点发送的数据包,如果不进行处理,在 MAC 层会对数据包进行双重判断,如果它的目的地址不是自身且传播方式不是广播,那么此数据包会被舍弃。因此,对于那些不在网关通信半径范围内的节点,利用侦听这一特性,需要新建一个节点侦听组件对数据包进行处理,处理的关键在于节点获取侦听包发送方地址,由于只在自己所属时隙发送数据,故可知当前所处时隙,进而可以在本地确定时隙。

由于网络中的所有节点都能够侦听,为了避免那些收到信标包的节点也去处理侦听包,为此提出了深度信息这一概念。它用来表示当前节点在时间同步系统中,相对于根节点的深度。初始值设为 FF,从根节点开始,根节点的深度为 0,根节点通信半径内的节点的深度为 1,根节点通信半径以外的节点,当侦听到邻居节点的消息中的深度小于初始值,则将收到消息中的深度+1,作为自己的深度。如此处理后,通信半径范围内的节点在侦听到数据包后都将不再处理,很好的避免了重复确定时隙的问题。

对于侦听节点,它能够侦听所有来自所属它通信半径内邻居节点的数据包,为了防止在一个同步周期内处理来自其他多个节点的信息包,需要设置一个判别位,初始值设置为 true,在一个周期里,当处理过侦听包后,立即将此值设置为 false,一个周期内都不会再做改变,只有在下一个周期开始的时候才会将值改为 true,由此进入了新一轮的时隙更新,进一步保证了节点一个周期只确定一次时隙。

考虑到节点侦听到数据包时自己的时隙已过,由于一个周期时隙更新一次,这样可能会出现节点无法发送数据的情况。所以在侦听组件中添加了一个变量 count,初始值设置为 10,在判别阶段,首先判别初始值是否等于 10,相等则继续判断,如果本地节点地址大于所侦听到的节点地址,按照之前提过的时隙分配规则,说明本地节点时隙已过,该周期内无法再发送数据。

此时将 count 值设置为 1,进而该节点 10 个周期后才会继续去更新时隙分配,在这 10 个周期中本地节点就能在

自己的时隙里发送数据。由于没有传输延迟,时隙不需要每个周期更新也能保持很高的精度。

2.3 引入节点侦听的 TDMA 系统

将侦听组件按照接口的连接关系加入 TDMA 系统,组成了具有节点侦听功能的时分多址系统。

在 WSNs 的网络协议栈中,在应用层发出数据包发送指令后,系统逐层向下调用发送接口,同时会启动 TDMA 系统。TDMA 系统功能如图 3 所示。首先网关节点开启定时器,以当前时间为时隙的起点,并以设置好的时隙长度定时触发。由于目前只有协调器了解了时隙分配,所以在第一个时隙中,网关节点会向周围节点广播数据包,数据包的内容不重要,只是为了通知其他节点当前所处的时隙,其他节点在收到这个数据包后,会计算好此次时隙的剩余时间,然后在剩余时间结束后启动本地节点的定时器,作为下一次时隙的起点,这样网关与其通信半径范围内的节点就达到了时隙同步。

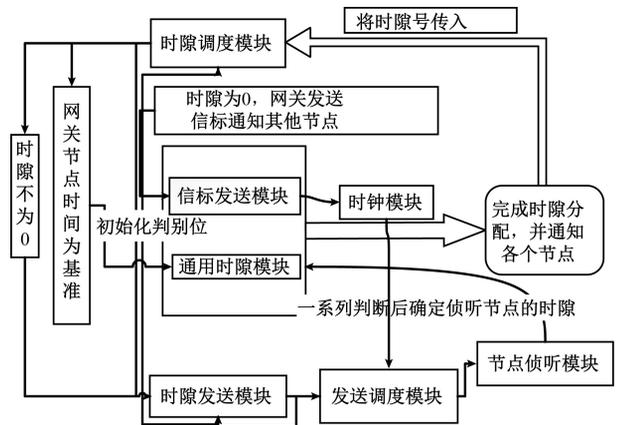


图 3 节点侦听 TDMA 系统功能

在后面的时隙里,这些已同步的节点会去判断,如果当前的时隙编号与节点的地址相同,在该时隙内,无线信道的使用权就归该节点所有,没有其他节点与其竞争,可以随意的发送数据而不用考虑传输延迟。对于那些不在通信范围内还没有开启定时器的节点而言,它们不知道当前所处的时隙,所以做不了任何发送的操作,但它们会处于随时侦听的状态。这些节点一旦侦听到其邻居节点在发送数据,便会开启处理工作。在发送数据节点所处时隙的剩余时间过后,侦听节点便开启定时器,这样就与其他节点达到了时隙同步。在一个周期内,节点侦听数据包只处理一次,一旦自己知道时隙后就不再处理。根据前面提到的,侦听节点随后加入 TDMA 系统,在自己的时隙内发送数据。

2.4 分析

整个 TDMA 系统实现了部署在检测区域里所有节点的时隙同步。与 WSNs 传统的时间同步协议相比,TDMA 时钟同步技术的领先之处在于无线信道的无竞争性。由于每一个时隙只有一个节点占有,时钟同步所面临的关键性

挑战——传输延迟便得到了很大的改善。节点在发送的时候,不需要信道空闲检测,也不需要排队退避,节点可以在时隙内任何想发送数据的时候使用信道,不用再去竞争了。

3 实 验

为了验证 TDMA 系统时钟同步的效果,本文在实验室对其进行了相关的实验研究,无线传感器网络节点总数设置为 29 个,随机分布在一片区域内。其中一个为网关节点,剩余的均为待同步节点,在检测区域内,网关向其通信范围内的节点发送信标,其他节点则利用上文中提出的节点侦听技术在其他节点发送数据的时候确定时隙,然后让各节点去发送数据通过检测软件实时检测数据包的收发情况,并对数据进行统计分析。传感器系统结构如图 4 所示。本文对检测区域内的传感器节点分别使用 CTP 协议与 CTP+TDMA 协议分别进行了测试,并且使用丢包率这一关键性指标来评测 TDMA 技术的改进效果。



图 4 传感器系统结构

首先使用串口调试助手利用 CTP 协议发送数据,如图 5 所示。



图 5 串口调试助手

使用数据包检测软件测试网络节点的丢包率,统计实验数据。然后将 TDMA 技术加入,继续重复之前操作,查

看改进效果。实验部分结果如表 1 和 2 所示,表 1 为单独 CTP 实验,表 2 为 CTP+TDMA。

表 1 CTP 协议部分节点丢包率

序号	节点 ID	丢包数量	丢包率/%	RSSI 平均值	降压
1	0x0002	9	17.345 678 21	-91	0
2	0x0003	7	13.569 841 01	-90	0
3	0x0004	11	21.447 124 54	-89	0
4	0x0006	9	17.345 678 21	-91	0
5	0x0007	45	47.368 421 05	-88	0
6	0x0008	8	15.235 415 64	-93	0
7	0x0009	10	19.141 145 87	-90	0

表 2 CTP 协议+TDMA 技术节点丢包率

序号	节点 ID	丢包数量	丢包率/%	RSSI 平均值	降压
1	0x0002	5	9.803 921 568	-90	0
2	0x0004	2	3.846 153 846	-88	0
3	0x0005	3	5.660 377 358	-93	0
4	0x0006	0	0	-90	0
5	0x0007	1	1.960 784 313	-89	0
6	0x0008	2	3.846 153 846	-90	0
7	0x001D	0	0	-91	0

从上面的实验结果可以看出,在没有应用到 TDMA 技术之前,检测区域内传感器节点发送的数据包丢失的比较多,甚至有些节点的数据包几乎没有发送成功。在加入了具有节点侦听功能的 TDMA 技术后,数据发送成功率大大增加,丢包数量明显减少。将这两种实验的丢包率做对比,绘制折线图,如图 6 所示。

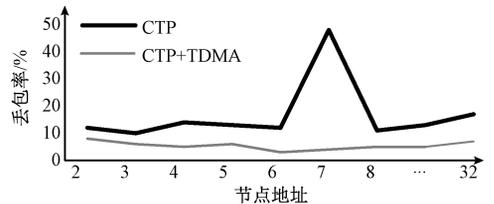


图 6 两种实验的丢包率对比

折线图很好的反映了两种实验丢包数量的差异,也显示了本文所提出的具有节点侦听功能的 TDMA 技术对于时钟同步的关键挑战-传输延迟有了很大的改进。如果只有网络层的 CTP 协议,节点的丢包数量都较多,丢包率较高,这是由于节点在发送数据包的过程中,各节点间时间不同步,传输延迟较大,节点在发送数据的时候需要竞争信道,且由于节点间没有一个统一的时间,很难准确地完成数

据发送,很多数据包因此丢失。在应用了具有节点侦听功能的 TDMA 技术以后,节点发送数据时的丢包率明显减小,数据包发送成功率增加,说明 TDMA 中的时隙分配技术在节点间无信道竞争访问的基础上实现了时隙同步,并且取得了很好的效果。而且在加入了节点侦听功能后,监测区域内的整个传感网络的时隙调度系统更加完备,保证了所有节点都能获取到自己的时隙,各节点无需竞争,传输延迟大大降低。整个 TDMA 拥有一个统一的时隙调度系统,数据包的发送能够比较顺利的进行,丢包率自然会减小。

4 结 论

本文首先分析了传统时间同步协议,分析这些协议存在的不足,并对无线传感器网络的时钟同步技术提出了一种新的方案,将 TDMA 引入了时间同步。网关节点划分和分配时隙,其他各节点通过获取网关信标包以及节点侦听获取各自的时隙,以达到时隙同步。然后节点在各自的时隙中发送数据,在同步的水平上达到了很高的精度,适合于无线传感器网络的时钟同步。

参考文献

- [1] 钱志鸿,王义君.面向物联网的无线传感器网络综述[J].电子与信息学报,2013,35(1):215-227.
- [2] 汪付强,曾鹏,张晓玲,等.无线传感器网络时间同步综述[J].计算机工程,2011,37(22):70-73.
- [3] 宋妍,朱爽.基于 NTP 的网络时间服务系统的研究[J].计算机工程与应用,2003,39(36):147-149,152.
- [4] 庞泳,李盛,巩庆超.无线传感网时间同步技术综述[J].计算机应用与软件,2016,33(12):1-5.
- [5] 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[J].通信学报,2008,29(6):82-86.
- [6] SU PING. Delay Measurement Time Synchronization for Wireless Sensor Networks [R]. Intel Research Berkeley Lab,2003.
- [7] 齐华,王恒,刘军.可变周期的基于贝叶斯估计的 TPSN 改进算法[J].传感技术学报,2013,26(3):407-410.
- [8] 陈珍萍,李德权,黄友锐,等.无线传感器网络混合触发一致性时间同步[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2193-2199.
- [9] 黄友锐,陈珍萍,李德权,等.无线传感器网络二阶一致性时间同步[J].电子与信息学报,2017,39(1):51-57.
- [10] 金彦亮,邓伟,方昌立.基于群一致性的大规模无线传感网时间同步[J].电子测量技术,2016,39(7):160-164.
- [11] 郝创博,宋萍,杨诚,等.多相位粒度萤火虫同步算法[J].电子与信息学报,2016,38(9):2208-2214.
- [12] XIN Y, LING W, JIAN X, et al. Energy efficiency TDMA/CSMA hybrid protocol with power control for WSN [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2018:1-7.
- [13] 李晶,王福豹,段渭军.无线传感器网络中 TinyOS 的研究[J].计算机测量与控制,2006,14(6):838-840.
- [14] 周伟.分簇无线传感器网络动态时隙分配 MAC 协议[J].电子科技,2017,30(9):126-129.
- [15] 陈德富,陶正苏,朱建平.一种自适应侦听的异步无线传感器网络 MAC 协议[J].电子与信息学报,2011,33(6):1290-1293.

作者简介

朱庆豹,工学硕士,主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:zykobeTmac@163.com