

无线传感器网络的 MAC 协议研究^{*}

柯 欣 孙利民

(中国科学院软件研究所 北京100080)

摘 要 随着无线通信和电子技术的进步,传感器网络在医疗、军事等领域内有着广泛的应用前景。介质访问控制(MAC)协议是一项构造底层基础网络结构的重要技术。在传感器网络中,它的主要功能是为数据传输建立连接以及在各网络节点间合理、高效地分配通信资源。本文说明了 MAC 协议的设计要点以及协议分类,并详细分析了现有的各种传感器网络 MAC 协议。

关键词 传感器网络,介质访问控制协议,时分复用,频分复用,码分复用,竞争机制

A Study of MAC Protocol in Wireless Sensor Networks

KE Xin SUN Li-Min

(Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract With advancement in wireless communications and electronics, the sensor networks can be used for various application areas, such as health, military and so on. The MAC protocol is an important technology for the creation of the network infrastructure. It achieves two goals in the sensor network, the first is the establishment of the links for data transfer; the second is to fairly and efficiently share communication resources between sensor nodes. This paper specifies the design and the classification of MAC protocol in sensor network, and explains recent protocols of each type in detail.

Keywords Sensor network, MAC, TDMA, FDMA, CDMA, Contention protocol

1 引言

在无线传感器网络系统中,数据链路层用于构建底层的基础网络结构,控制无线信道的合理使用。其中介质访问控制 MAC (medium access control) 协议主要用于为数据的传输建立连接以及在各节点间合理有效地分配网络通讯资源。

根据传感器网络的特点,设计 MAC 协议需要考虑以下三方面:1) 节省能源:传感器网络的节点一般是以微型电池供电。因节点数量大及放置环境等因素,电池通常难以充电或者不必要充电,所以要高效地使用电池。2) 可扩展性:对于节点数目、节点分布的密集程度和网络拓扑结构要具有可扩展性,以适应网络中节点个数、位置等变化。3) 其他:主要包括网络的公平性、实时性、网络的吞吐量、带宽的利用率等等。目前认为这三个方面的重要性依次递减,节约能量成为最主要考虑的问题。这些考虑与传统网络的 MAC 协议不同,使得已有的 MAC 协议并不适合于传感器网络。

在传感器网络中造成能量浪费有以下几个主要原因:数据碰撞产生的重传;节点接收并处理不必要数据的串音 (overhearing) 现象;控制消息过多;节点在不需收发数据时仍保持对信道的空闲侦听 (idle listen) 等。

由于上述原因,传感器网络 MAC 协议一般采用了“侦听/休眠”交替的信道侦听机制,节点空闲时自动转换为休眠状态,以减少空闲侦听。我们可以根据协议中为减少数据碰撞和串音现象而采用的不同方法,将 MAC 协议分为三类:1) 利用时分复用 (TDMA) 的方式为各节点分配独立固定的信道;2) 通过频分复用 (FDMA) 或者码分复用 (CDMA) 的方式,实现无冲突的强制信道分配;3) 通过竞争机制,保证节点随机使用信道并且不受其他节点的干扰。本文将对这三类方法的 MAC

协议进行分析,分别就节约能源、可扩展性和网络效率三个方面进行比较和总结。

2 基于 TDMA 方式的信道分配协议

TDMA 是实现固定信道分配简单而又比较成熟的方法,蓝牙 (Bluetooth) 就是采用基于 TDMA 的 MAC 协议。在传感器网络中 TDMA 实现的主要思想是为每个节点分配独立的时隙用于数据传输,从而解决信道碰撞问题。

TDMA 的一些特点很适合传感器网络的需要,比如节点在空闲时隙中可以转入休眠状态、数据传输时不需要过多的控制信息等。不过,TDMA 技术在网络的扩展性方面存在着缺陷,很难调整帧的长度和时隙的分配,不能很好地处理节点移动、节点失效等网络结构的拓扑变化。

2.1 基于分簇网络的 MAC 协议

文[1]给出了用于分簇的传感器网络 MAC 协议,它基于分簇结构的网络,簇内网关负责为节点分配时隙,同时也负责收集和处理簇内节点发来的数据,然后发送到外部。

该 MAC 协议将节点划分为四种状态:感应、转发、感应并转发、非活动。节点在感应状态时,收集数据并向其相邻节点发送;在转发状态时,接收其他节点发送的数据再转发给下一个节点;而感应并转发状态的节点则要完成上述两项功能;节点没有接收和发送数据时,就自动进入非活动状态。

由于传输数据、接收数据、转发数据以及侦听信道所消耗的能量各不相同,各节点在簇内所扮演的角色也不一样,因此簇内节点的状态随时都在变化。为了高效地使用网络(如让能量相对高的节点转发数据、及时发现新的节点等),协议将时间帧分为以下四个阶段。数据传输阶段:各节点在各自被分配的时隙内向网关发送数据;刷新阶段:周期性的,节点向网关

^{*} 本论文研究得到国家自然科学基金项目(基于能量高效的无线传感器网络协议的研究)资助。柯 欣 硕士研究生,研究方向是无线网络。孙利民 博士,研究员,主要研究方向为无线移动网络和宽带接入网,基于能量高效的无线传感器网络协议的研究。

报告其状态;刷新引起的重组阶段:紧跟在一个刷新阶段之后,网关根据簇内节点的情况重新分配时隙;事件触发的重组阶段:节点能量小于特定值、网络拓扑发生变化等都是需要重组的事件,如果有这些事件发生,网关就要重新分配时隙。

该 MAC 协议能够减少空闲侦听,避免信道冲突,也考虑了可扩展性,但是需要簇内网关节点和传感器节点严格的时钟同步,这对网关节点的处理能力有较高的要求。而且如何合理地选取网关,也是一个问题。

2.2 DEANA 协议

DEANA(Distributed Energy-Aware Node Activation)协议为每个节点分配了固定的时隙用于数据的传输,与传统的 TDMA 协议不同,在每个节点的数据传输时隙前加入了短控制时隙,用于通知相邻节点是否需要接收数据,如果不需要就进入休眠状态。如图1所示,DEANA 协议的时间帧由多个传输时隙组成。每个传输时隙,又细分为前部的“控制时隙”和后部的“数据传输时隙”。

该协议通过节点激活多路访问协议 NAMA(Node Activation Multiple Access, 见文[4])控制节点的状态转换。如果一个节点的一跳相邻节点中有数据需要发送,则该节点在控制时隙被设置为接收状态,如果被选为接收者,则在数据传输时隙中继续保持接收状态,否则转为休眠状态;如果节点的一跳相邻节点没有数据需要发送,那么该节点在整个传输时隙都进入休眠状态;如果节点自身有数据要发送,则进入发送状态,在控制时隙中声明接收的对象,在数据传输时隙中发送数据。

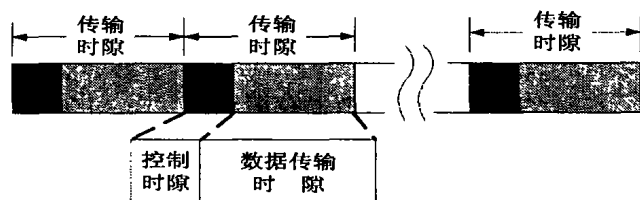


图1 DEANA 协议的时间帧分配

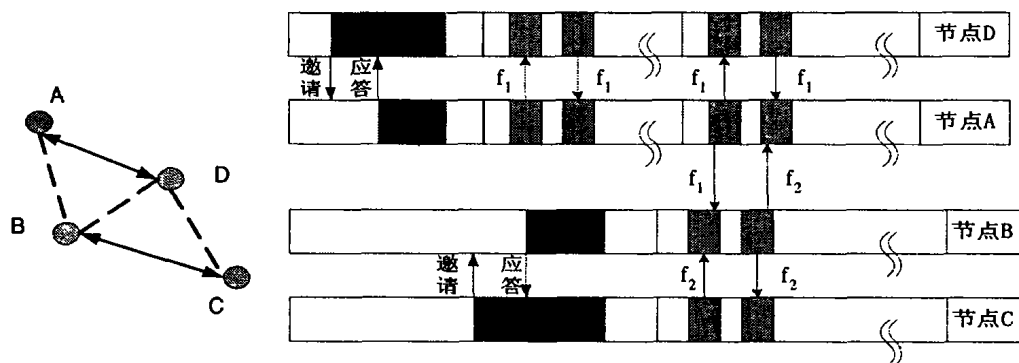


图2 建立链路的过程

SMACS 协议主要用于静止的节点之间连接的建立,而对于静止节点与运动节点之间的通讯,则需要通过 EAR 协议进行管理。其基本思想是运动节点侦听固定节点发出的“邀请”消息,根据消息的信号强度、节点 ID 号等信息决定是否建立连接。如果运动节点认为需要建立连接,则通过与对方交换信息分配一对通信时隙。

SMACS/EAR 协议不需要所有节点的时钟同步,只需要两个节点间保持相对的帧同步。但该协议不能完全避免碰撞,多个节点在协商过程中可能同时发出“邀请”消息或应答消息,从而出现冲突。在可扩展性方面,EAR 协议可以为变化慢

DEANA 协议在节点得知不需要接收数据时,进入休眠状态,从而能够解决串音的问题,延长节点的休眠时间。但是,它需要所有节点的时钟同步,可扩展性差。

3 基于 FDMA/CDMA 方式的信道分配协议

基于 TDMA 的 MAC 协议需要严格的时钟同步,为了避免这一点,人们利用 FDMA 或 CDMA 与 TDMA 结合的方法,为节点分配互不干扰的传输信道,避免数据冲突,从而降低时钟同步的要求。

3.1 SMACS/EAR 协议

SMACS/EAR 协议全称为“Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks/Eavesdrop And Register”,是一种结合了 TDMA 和 FDMA 的信道固定分配 MAC 协议。其基本思想是为每一对相邻节点建立一个特有的频率用于数据传输,并保证各对节点使用的频率相互间没有干扰,从而避免数据碰撞。

SMACS 协议用于建立链路,节点在启动的时候广播一个“邀请”消息,通知附近节点与本节点建立连接。接收到“邀请”消息的节点与发出“邀请”消息的节点交换信息,在二者之间分配一对时隙用于以后的通信。每对节点之间通信使用不同的频段,以避免相互间的干扰。如果一个节点收到多个相邻节点对其“邀请”信息的应答回复,则选择最先应答的节点建立连接。连接建立完成后,为了可扩展性,节点仍需要定时地发送“邀请”消息。

图2显示了 AD、BC 节点之间的链路建立过程。先启动的节点 A 向相邻节点发送“邀请”消息,收到 D 的应答后,与之协商分配一对专用的通信时隙,并以频率 f_1 相互通信。节点 B 和 C 之间也通过协商建立专用的通信时隙和通讯频率 f_2 。AD 之间的通信时隙与 BC 之间的虽然重叠,但是由于双方使用频率不同,因此不会相互干扰。同样相邻节点 AB、CD 之间也会通过协商建立相应的连接。

的移动节点提供持续的服务,但并不适用于拓扑结构变化较快的传感器网络。在网络效率方面,由于协议要求两两节点间使用不同的频率通信,固定节点还需要为移动节点预留可以通信的频率,因此网络需要有充足的带宽保证为每个节点建立可能的连接。但是每个节点的连接数无法事先预计,也很难动态调整,因此使得整个网络的带宽利用率不高。

3.2 基于 CDMA 方式的信道分配协议

CDMA 系统的基本原理是为每个用户分配了各自特定的地址码,利用公共的信道来传输信息。CDMA 系统的地址码相互具有正交性,因而在频率、时间和空间上都可以重叠。

在传感器网络中应用 CDMA 技术就是为每个传感器节点分配与其它节点正交的地址码。这样即使多个节点同时传输数据,相互间也不会干扰,从而解决了信道冲突的问题。

文[5]中介绍了一种基于 CDMA 方式的传感器网络 MAC 协议。它采用了一种 CDMA 的伪随机码分配算法,使得每个传感器节点与其所有两跳距离内节点的伪随机码都是正交的,从而避免节点之间的无线通信干扰。为了实现这种编码分配,需要在网络中建立一个公用信道,所有节点通过该信道接收其它节点的伪随机编码,调整和发布自己的编码。

该协议在传感器节点上采用链路侦听和数据收发两个独立的模块,其中链路侦听模块操作简单,只需使用简单低能耗的硬件。节点在不收发数据时让收发模块进入休眠状态,链路侦听模块一直保持侦听信道。如果发现其它节点需要向本节点发送数据,则将收发模块唤醒;如果节点需要发送数据,唤醒收发模块后,首先通过唤醒信道发送一个唤醒信号,将休眠的接收者唤醒,然后再传输数据。图3显示了这一过程。

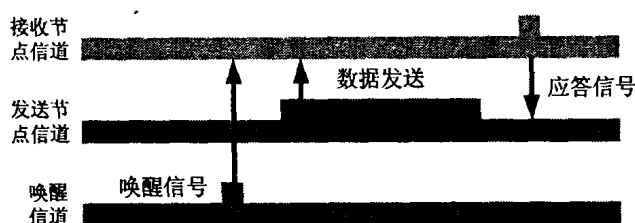


图3 向一个休眠节点发送数据的信号时序过程

基于 CDMA 方式的信道分配协议,不需要严格的时钟同步,也更适应网络拓扑结构的变化。不过,复杂的 CDMA 的编码解码过程,对于传感器节点的计算能力也是一个不小的考验。

4 基于竞争机制的随机访问信道协议

基于随机访问的 MAC 协议是一种按需使用信道的方式,基本思想是需要传输数据的节点竞争使用信道,产生碰撞后就后退重传。典型的基于随机访问的协议是 CSMA 方式的 MAC 协议,802.11 协议 DCF 工作模式使用的 CSMA/CA 协

议,可以作为基于随机访问协议的代表。

与 TDMA 方式的 MAC 协议相比,竞争机制的 MAC 协议具有更好的可扩展性,而且不需要考虑时钟同步的问题。不过,现有的竞争机制 MAC 协议都假设节点产生的网络流量是完全随机的,而传感器网络的流量具有很大的相关性和突发性。这使得多个相邻节点会同时竞争信道,从而产生较多的碰撞重传,因此它们不能直接使用在传感器网络中。

4.1 S-MAC 协议

S-MAC (Sensor-Medium Access Control) 协议是对 802.11 协议的改进,设计的主要目标是减少能量消耗,提供良好的扩展性。它针对传感器网络消耗能量的主要环节,采用以下三方面的技术措施减少能耗。

1. 周期性侦听和休眠 每个节点独立调度工作状态,周期性地转入休眠状态。节点苏醒后进行侦听,判断是否需要通信。为了便于通信,相邻节点之间应该尽量维持调度周期同步,同时每个节点需要维护一个调度表,保存的所有相邻节点的调度情况,在向相邻节点发送数据时唤醒自己。

每个节点定期广播自己的调度,使新介入节点可以与已有的相邻节点保持同步。如果一个节点处于两个不同调度区域的重合部分,则会收到两种不同的调度,节点应该选择先收到的调度周期。

2. 消息分割和突发传输 考虑到传感器网络的数据融合和无线信道的易出错特点,将一个长消息分割成几个短消息,利用 RTS/CTS 机制一次预约发送整个长消息的时间,然后突发性地发送由长消息分割成的多个短消息。每个短消息都需要一个应答(ACK),如果发送方对某一个短消息的应答没有收到,则立刻重传该短消息。

3. 避免接收不必要消息 采用类似于 802.11 的虚拟/物理载波监听机制,以及 RTS/CTS 的通告机制,不过节点在不收发信息时进入休眠状态。

总结 本文介绍了传感器网络 MAC 协议的设计要点,根据 MAC 协议处理信道冲突的不同的方法,将协议分成了基于 TDMA 方式,基于 FDMA/CDMA 方式以及基于竞争机制三类,并分别举例分析。表1给出了这几种协议的比较和总结。

表1 各类 MAC 协议的比较

协议名称	协议类型	节约能量	可扩展性	实现重点
分簇网络	TDMA	有效避免了数据碰撞,减少了串音	通过网关对网络变化进行重组	严格的时钟同步网关的选取
DENAN	TDMA	有效减少了空闲侦听,较少的控制消息	较差	严格的时钟同步
SMACS/EAR	FDMA&TDMA	避免了数据碰撞、减少了空闲侦听和串音,控制消息较多	适用于拓扑结构变化慢的网络	移动节点的通信足够的带宽
Distributed MAC	CDMA&TDMA	避免了数据碰撞、串音,减少空闲侦听	支持新节点介入引起的信道重组	正交的编码解码
S-MAC	竞争机制	有效减少了空闲侦听和串音	较好	减少数据碰撞

对于面向应用的传感器网络而言,设计出一种可以满足各方面要求的 MAC 协议是不现实的,应该针对不同应用的需求,灵活采用不同的方式,设计出合理的 MAC 协议。

参考文献

- Arisha K A, Youssef M A, Younis M F. Energy-Aware TDMA-Based MAC for Sensor. IMPACCT2002
- Sohrabi K, et al. Protocol for Self-Organization of a Wireless Sensor Network. IEEE Personal Communication, Oct. 2000. 16~27
- Rajendran V, Garcia-Luna-Aceves J J, Obraczka K. Energy-Effi-

cient Channel Access Scheduling For Power-Constrained Networks, wpmc02, Oct. 2002

- Bao L, GarciaLunaAceves J J. A new approach to channel access scheduling for ad hoc networks. In: The seventh annual Intl. Conf. on Mobile computing and networking, 2001. 210~221
- Guo C, Zhong L C, Rabaey J M. Low Power Distributed MAC for Ad Hoc Sensor Radio Networks. In: Proc. ACM GlobeCom, 2001. 2944~2948
- Ye W, Heidemann J, Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. in INFOCOM 2002, June 2002