

第 5 章 无线传感器网络通信与组网技术

5.1 无线传感器网络的体系结构与协议

5.1.1 无线传感器网络的体系结构

无线传感器网络需要根据用户对网络的需求设计适应自身特点的网络体系结构,为网络协议和算法的标准化提供统一的技术规范。设计无线传感器网络体系结构时需要考虑以下几方面。

1. 结点资源的有效利用

由于传感器结点的资源有限,所以怎样有效地管理和使用这些资源并最大限度地延长网络寿命是无线传感器网络研究面临的一个关键技术挑战,需要在体系结构的层面上给予系统性的考虑。

(1) 选择低功耗的硬件设备、设计低功耗的 MAC 协议和路由协议。

(2) 各功能模块间保持必要的同步,即同步休眠与唤醒。

(3) 从系统的角度设计能耗均衡的路由协议,而不是一味地追求低功耗的路由协议,这就需要体系结构提供跨层设计的便利。

(4) 由于传感器结点上的计算资源与存储资源有限,不适合进行复杂计算与大量数据的缓存,因此一些空间复杂度和时间复杂度高的协议与算法不适用于无线传感器网络。

(5) 随着无线通信技术的进步,带宽也在不断增加,例如超宽带技术支持近百兆的带宽。无线传感器网络在不远的将来可以胜任视频、音频传输,因此在体系结构设计时需要考虑这一趋势,不能只停留在简单的数据应用上。

2. 支持网内数据处理

传感器网络与传统网络有着不同的技术要求,前者以数据为中心(遵循“端到端”的边缘论思想),后者以传输数据为目的。传统网络的中间结点不实现任何与分组内容相关的功能,只是简单地用存储转发(Store and Forward)模式为用户传送分组。而无线传感器网络只实现分组传输功能是不够的,有时需要网内数据处理的支持(在中间结点上进行一定的聚合、过滤或压缩)同时减少分组传输,还能协助处理拥塞控制和流量控制。

3. 支持协议跨层设计

各个层次的研究人员为了节省能耗,提高传输效率,降低误码率等同一性能优化目标而进行协作将非常普遍。这种优化工作使网络体系中各个层次之间的耦合更加紧密,上层协议需要了解下层协议(不局限于相邻的下层)所提供的服务质量,而下层协议需得到上层协

议(不局限于相邻的上层)的建议和指导。作为对比,传统网络只是相邻层才可以进行消息交互的约定。虽然这种协议的跨层设计会增加体系结构设计的复杂度,但实践证明它是提高系统整体性能的有效方法。

4. 增强安全性

无线传感器网络采用无线通信方式,信道缺少必要的屏蔽和保护,更容易受到攻击和窃听,所以需要将无线传感器网络安全方面的考虑提升到一个重要的位置,设计一定的安全机制,确保所提供服务的安全性和可靠性。这些安全机制必须是自下而上地贯穿于体系结构的各个层次,除了类似于 IPSec(Internet Protocol Security)这种网络层的安全隧道之外,还需对结点身份标识、物理地址、控制信息(路由表等)提供必要的认证和审计机制来加强对使用网络资源的管理。

5. 支持多协议

互联网依赖统一的 IP 实现端到端通信,而无线传感器网络的形式与应用具有多样性,除了转发分组外,更重要的是负责以任务为中心的数据处理,这就需要多协议支持。例如在子网内部工作时,采用广播或者组播的方式,当接入外部的互联网时又需要屏蔽内部协议实现无缝信息交互的数据处理,这就需要多协议来支持。

6. 支持有效的资源发现机制

设计无线传感器网络时需要考虑提供定位监测信息的类型、覆盖地域的范围,并获得具体监测信息的访问接口。传感器资源发现又包括网络自组织、网络编址和路由等。由于拓扑网络的自动生成性,如果依据单一符号(IP 地址或者结点 ID)来编址则效率不高,因此可以考虑根据结点采集数据的多种属性来进行编址。

7. 支持可靠的低延迟通信

在各种类型的传感器网络结点的监测区域内,物理环境的各种参数动态变化是很快的,因此需要网络协议具有一定的实时性。

8. 支持容忍延迟的非面向连接的通信

由于无线传感器网络的应用需求不一样,有些任务(如海洋勘测、生态环境监测等),对实时性要求不高。有些应用随时可能出现拓扑动态变化,其移动性使结点保持长期、稳定的连通性较为困难,因此就出现了非面向连接的通信,它在连通性无法保持的状态下也能进行通信。

9. 开放性

近年来,无线传感器网络衍生出的水声传感器网络和无线地下传感器网络使无线传感器网络结构具备了充分的开放性,以包容已经出现或未来可能出现的新型同类网络。

5.1.2 无线传感器网络的协议栈

无线传感器网络的协议栈包含分层的网络通信协议、网络管理平台和应用支撑平台 3 部分,如图 5-1 所示。

1. 分层的网络通信协议

与传统的开放式互联参考模型(OSI)协议体系相似,无线传感器网络的协议栈共有物

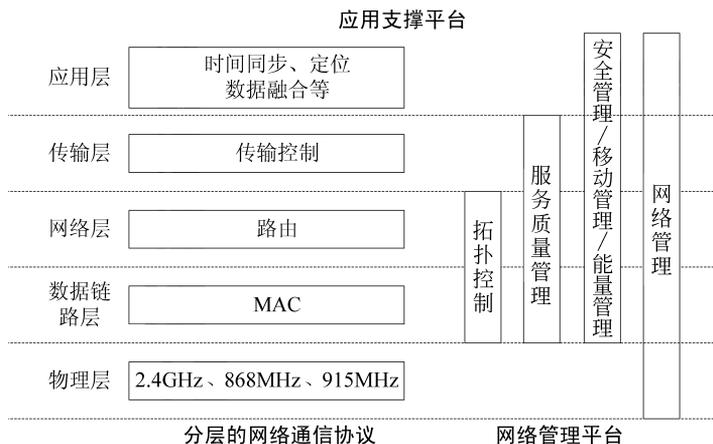


图 5-1 无线传感器网络协议栈体系结构

理层、数据链路层、网络层、传输层和应用层 5 层。

(1) 物理层负责数据的调制解调、信号的发送与接收。由于频率选择、信号探测和载波生成等由物理层负责,其设计的好坏直接关系到传感器结点的电路复杂度和能耗。

(2) 数据链路层负责数据成帧、帧检测、媒体访问和差错控制,决定了结点间无线信道的资源分配及信道的使用方式。它的作用是为了保证传感器结点之间尽量互不干扰地传输数据并当数据碰撞不可避免时能及时根据某种竞争判决算法解决处理。因此,它保障结点高效通信的关键协议之一。

(3) 网络层主要负责路由生成与路由选择。无线传感器网络属于多跳通信网络,网络路由要保证任意需要通信的结点之间可以建立并维护数据传输路径。无线传感器网络是一种具有自组织特性的网络,协议具有简单、自适应网络拓扑变化等特点。

(4) 传输层通常根据传感器网络的需求产生数据流,能控制数据流的传输,是保证无线传感器网络通信服务的重要组成部分。当网络内的数据要传输给卫星网络、移动通信网络、互联网等外部网络时,传输层就显得尤其重要。传输层是保证优质服务的重要基础。

(5) 应用层是一系列具有监测任务的应用软件的集合,为用户提供了一个易于操作的界面。

2. 网络管理平台

如图 5-1 所示,网络管理平台包含了网络管理、安全管理、移动管理、能量管理、服务质量管理、拓朴控制等功能,可完成结点自身的管理和用户对传感器网络的管理。

(1) 网络管理。网络管理的主要作用是将网络管理服务接口提供给使用者,使其可对网络进行维护和诊断,它的具体功能是对数据进行收集、处理、分析并适时处理故障。也就是说,网络管理可以根据需要平衡网络的任务流量,提高服务质量。

(2) 安全管理。由于传感器结点的随机部署、网络拓扑的动态性和无线信道的不稳定,传统安全机制无法在传感器网络中使用,因而需要采用扩频通信、接入认证/鉴别、数字水印和数据加密等技术设计新型的传感器网络安全机制。

(3) 移动管理。在某些传感器网络的应用环境中,结点可以移动,移动管理用来监测和控制结点的移动,维护到达汇聚结点的路由,还可以使传感器结点跟踪它的邻居。

(4) 能量管理。能量管理平台决定了传感器结点如何有效使用有限的能源。如图 5-1 所示,传感器的每个协议层都要采用相应的节能策略,并且向上提供能量分配接口。

(5) 服务质量管理。网络使用各种技术的前提首先是保证用户需求。服务质量管理在各协议层设计队列管理、优先级机制或者带宽预留等机制,并对特定应用的数据给予特别处理,是网络与用户之间以及网络上互相通信的用户之间关于信息传输与共享的质量约定。为了满足用户的要求,无线传感器网络必须能够为用户提供足够的资源,以用户可接受的性能指标工作。

(6) 拓扑控制。拓扑控制负责动态地维护和管理网络的拓扑结构,并配合其他支持技术共同提升网络协议的效率,节省能耗,延长网络的整体使用寿命。一个高效的数据转发拓扑结构,可以在网络覆盖率和连通率达标的情况下,合理选择主干结点,优化结点工作机制,对结点之间无用的通信链路进行剔除。主干结点的选择是指在满足连通度的前提下,暂时关闭一些结点的通信模块,使其进入休眠状态,以节省能耗。

3. 应用支撑平台

应用支撑平台是指建立在分层网络通信协议和网络管理技术的基础上,包括使用时间同步技术、定位技术、数据融合技术的一系列应用层软件,通过应用服务接口和网络管理接口为终端用户提供支持具体应用的软件平台。

(1) 时间同步是无线传感器网络系统的一个关键机制,准确的时间同步是保证网络自身协议运行、协同休眠及定位的基础。例如,在链路层采用时隙分配的 MAC 协议时,不准确的时间同步会导致结点无法使用无线信道。

(2) 定位技术是无线传感器网络的重要支撑技术,首先只有知道传感器结点在无线传感器网络中的位置信息才可以准确地判断已发生事件的范围,判断事态发展情况,以便做出合理反应;其次,无线传感器网络所使用的一些协议和算法也需要知道结点及周围结点的位置信息。无线传感器网络中使用的定位算法主要有三边测量法、三角测量法和极大似然估计法。

(3) 数据融合技术利用传感器结点的本地计算和存储能力融合数据、去除冗余,以减少不必要的分组在网络中的传输,降低功耗。同时,无线传感器网络也可以通过数据融合技术对多个传感器结点的数据进行汇总,提高信息的准确度。

5.2 物 理 层

物理层处于 OSI 参考模型的最底层,直接面向传输介质完成数据的发送和接收。在实际应用中,物理层决定了传感器结点的能耗、成本与体积大小。

在无线传感器网络中,物理层的主要技术包括介质选择、频段选择、调制技术及扩频技术等,即为网络 DTE 设备提供数据传输链路、传输数据及完成相应的管理职责。目前可以作为无线传感器网络物理层的标准主要有 IEEE 802.15.4 物理层标准和 IEEE 802.15.3a 超宽带技术(很少选择)。其中,IEEE 802.15.4 是无线传感器网络物理层的主流技术,而 IEEE 802.15.3a 定义的超宽带技术可作为一个高速率可行方案,供无线传感器网络物理层选择使用。

5.2.1 物理层概述

1. 物理层的功能

无线传感器网络物理层定义了物理无线信道和 MAC 子层之间的接口,提供物理层的数据和管理服务。物理层数据服务包括以下 5 方面的内容。

- (1) 激活和休眠射频芯片。
- (2) 信道能量检测(Energy Detect,ED)。
- (3) 检测接收数据包的链路质量指示(Link Quality Indication,LQI)。
- (4) 空闲信道评估(Clear Channel Assessment,CCA)。

(5) 收发数据。当上层有数据要传送时,物理层为其进行载波监听并反馈信道状态,从而尽量减少发生数据碰撞概率。若信道空闲,则上层调用物理层的发送命令,物理层就开始接收上层的数据分组并将其预处理成字节或比特流,而后按照移位方式经射频单元调制后发送到无线信道上。当射频单元检测到有发送给自己的数据时,就开始接收并将比特流预处理成字节,然后提交上层供其组装成分组数据。

这些功能通常由低功耗的射频收发芯片完成,例如采用 CC1100 射频芯片时,可以调用函数 `WsnPhy::CalculateCcaPower` 实现信道能量检测,返回此刻的剩余能量值;可以调用函数 `WsnPhy::IsCcaBusy` 对此刻的信道空闲进行评估,若信道闲则返回 `false`,若信道忙则返回 `true`;信号的发送和接收则可以通过调用接口函数 `WsnPhy::RequestToSend` 和 `WsnPhy::StartReceivePacket` 来实现。

2. 物理层的状态转移

无线传感器网络的物理层通常有接收状态、发送状态、空闲状态、休眠状态、信道检测状态 5 个状态,这 5 个状态之间的转移如图 5-2 所示。

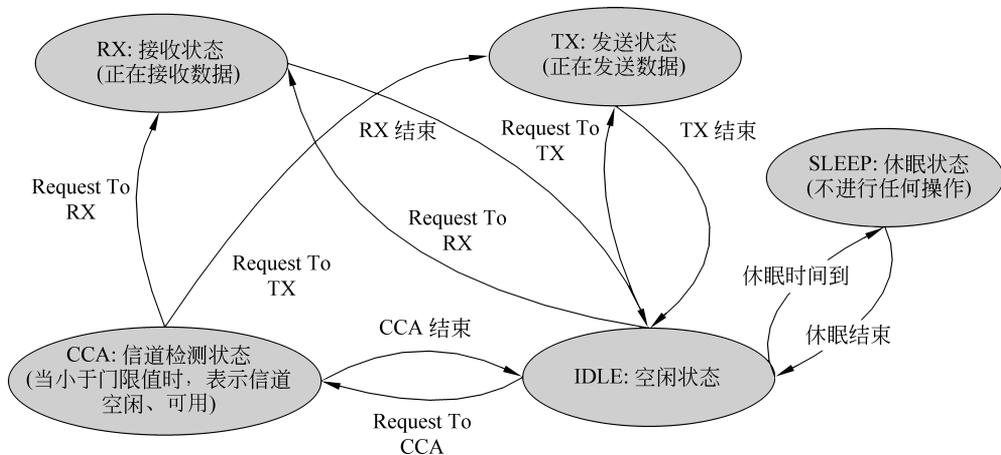


图 5-2 物理层状态转移示意图

3. 物理层的传输介质

传输介质是承载终端设备数据业务的通道。无线传感器网络的传输介质可以是无线电波、红外线或光波等。

1) 无线电波传输

无线电波是目前无线传感器网络的主流传输介质。无线传感器网络在选择频率时,一般选择无须注册的公用 ISM(Industrial Scientific Medical)频段;和传统的无线通信系统不同,无线传感器网络在进行信号调制时由于传感器结点能量受限,通常以节能和降低成本为主要设计指标。

2) 红外线传输

红外线可以作为无线传感器网络传输介质的选择且无须申请,它不受无线电波干扰,但对障碍物的透过性非常差,因此应用不多。

3) 光波传输

与红外线传输相似,光波传输也极易受障碍物的遮挡而造成通信过程中断,只能应用在一些特殊的场合中。例如在智慧微尘项目中,研究人员就开发了基于光波传输的无线传感网络。

5.2.2 物理层协议

1. 物理层频段

IEEE 802.15.4 协议是 ZigBee、WirelessHart、MiWi 等规范的基础,描述了低速率无线个人局域网的物理层和 MAC 层协议。IEEE 802.15.4 标准有两个可用的物理层:基于 2.4GHz 频段的“短距离”实现和 868/915MHz 频段的“长距离”实现。中国目前的工作频段是 2.4GHz。全球及部分地区 ZigBee 的工作频率范围如表 5-1 所示。

表 5-1 全球及部分地区 ZigBee 的工作频率范围

工作频率范围/MHz	频段类型	地区
868~868.6	ISM	欧洲
902~928		北美
2400~2483.5		全球

2. 2.4GHz 频段的物理层规范

2.4GHz 频段的物理层标准包括数据传输速率、扩展调制和无线通信规范等。

1) 数据传输速率

2.4GHz 频段的范围为 2.400~2.4835GHz,此频段数据传输速率为 250Mb/s。

2) 扩展调制

在 2.4GHz 物理层中,IEEE 802.15.4 协议使用的是 16 相位准正交调制技术。首先将数据信号的每个字节按 4 位划分并转换成符号数据,再将各个符号数据转换成一个 32 位的伪随机序列(PN 序列),挑选其中一个作为传输序列。参照需要连续传输的数据信息,把选择的 PN 序列组织起来,依据半正弦脉冲形式的 OQPSK 调制原理,把串接好的序列调制到载波信号上。

3) 无线通信规范

采用 2.4GHz 频段标准工作的设备必须满足发射功率谱密度、符号速率、接收机抗干扰性和接收机灵敏度等方面的通信规范。

(1) 发射功率谱密度。相对限度为 -20dB,绝对限度为 -30dBm。对于相对限度和绝

对限度,测量平均功率谱的分辨率都是 100kHz。

(2) 符号速率。由上面涉及的数据信号调制方式可得符号速率为 62 500 符号每秒,数据传输速率为 250kb/s,数据传输速率的精度大概是 40ppm。

(3) 接收机抗干扰性。2.4GHz 频段的接收机的抗干扰电平,相邻信道最小为 0dB,交替信道最小为 30dB。其中,判断邻近信道的标准必须在有用信道的旁边且距离原信道频率最近。

(4) 接收机灵敏度。对于技术设备,规定不论何种设备都能够达到 -85dBm 或者更高的灵敏度,例如 Freescale 公司的 MC13192 的接收机灵敏度为 -92dBm。

3. 868MHz/915MHz 频带的物理层规范

868MHz/915MHz 物理层标准规范包括数据传输速率、扩展调制、无线通信规范等。

1) 数据传输速率

868MHz/915MHz 物理层工作在 868MHz 的频带上时,其数据传输速率为 20kb/s;工作在 915MHz 频带上时,其数据传输速率为 40kb/s。

2) 扩展调制

868MHz/915MHz 物理层的码片调制方式采用带有二进制移相键控(BPSK)的直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)技术,符号数据的编码采用微分编码方式。

3) 无线通信规范

(1) 工作频率的范围。868MHz 的工作频段为 868.0~868.6MHz,带宽为 0.6MHz;915MHz 的工作频段为 902~928MHz,带宽为 8MHz。

(2) 915MHz 频带的功率谱发射密度。发射功率谱密度的相对限度为 -20dB,绝对限度为 -20dBm。

(3) 符号传输速率。在 IEEE 802.15.4 物理层标准协议中,868MHz 频带的符号传输速率为 20000 符号每秒($\pm 40\text{ppm}$),码片传输速率为 300000 码片每秒;915MHz 频带的符号传输速率是 40000 符号每秒($\pm 40\text{ppm}$),码片传输速率为 600 码片每秒。

(4) 接收机灵敏度。设备接收机的灵敏度最低为 -92dBm 或者更高。

4. 物理层的通用规范

1) 从发射状态到接收状态的转换时间

从发射状态到接收状态的转换时间应小于一个循环周期值,通常为 12 个符号时期。对于不同的厂家生产的芯片,实际的转换时间可能不同,例如美国 Freescale 公司 MC13192 的转换时间为 288 μs 。转换时间的大小是在空中接口端测量的,即从发送完最后一个符号到接收机已准备好接收下一个物理层数据包的时间。

2) 从接收状态到发射状态的转换时间

从接收状态到发射状态的转换时间应小于一个循环周期值,同样其也是在空中接口进行测量的,即从接收到的数据包的最后一个码元(或最后一个符号)到发射机已准备好发射确认结果的时间,而真正的发射开始时间将在 MAC 层协议标准中介绍。

3) 差错向量

发射机的调制精度由差错向量来决定。

4) 接收信号的中心频率误差

在 IEEE 802.15.4 标准中,接收信号的中心频率误差最大为 $\pm 40\text{ppm}$ 。

5) 发射功率和接收机最大误差电平

发射机的发射功率不得低于 -3dBm ,在保证设备能够正常工作的状态下,要想降低对其他设备和系统产生不利的干扰与影响,所有设备的发射功率都应尽可能小。

6) 接收机的能量检测

接收机的能量检测就是在对网络进行连接管理时,需要实施的一种信道检测。ED 的结果为从 $0x00\sim 0xFF$ 的 8 位的整型数。能量检测的最小值(0)表示接收功率小于接收机灵敏度的 10dB 。

7) 链路品质信息

链路品质信息用来表示所接收的数据包强度和品质。检测时,通常利用估计信噪比、ED 结果,或者将两者综合来完成。

在 IEEE 802.15.4 协议标准中,将所有接收的数据包完成 LQI 测量,测量的值为一个 8 位的整型数,大小为 $0x00\sim 0xFF$ 。最小值($0x00$)表征了接收机接收 IEEE 802.15.4 信号的最低品质,最大值($0xFF$)与最高品质对应,LQI 值在 $0x00\sim 0xFF$ 范围内平均分布。

8) 空闲信道评估

在 IEEE 802.15.4 协议的 PHY 标准中,有 3 种模式可以描述 CCA,可概括如下。

(1) CCA 策略 1: 简单判断信道的信号能量,若信号能量低于某一门限值就认为信道空闲。

(2) CCA 策略 2: 通过判断无线信号的特征,这个特征主要包括扩频信号特征和载波频率。如果 CCA 测得了一个带有 IEEE 802.15.4 标准特点的扩展调制信号,则报告一个忙的消息。

(3) CCA 策略 3: 前两种模式的综合,同时检测信号强度和信号特征,给出信道空闲判断。

5.3 数据链路层

数据链路层主要负责多路数据流、数据结构探测、媒体访问和误差控制,从而确保通信网络中可靠的点对点(Point-to-Point)与点对多点(Point-to-Multipoint)连接。在 OSI 模型中,数据链路层又可分为 MAC 层和 LLC 层(Logical Link Control layer,逻辑链路控制层)两个子层。虽然在无线传感器网络中,这两层不是特别明显,但是这两层提供的功能都不可或缺。

MAC 协议主要用于某个结点向其他一个或多个结点(多播或者广播)发送数据,进行信道接入控制等工作的协调。LLC 协议负责保证相邻结点之间可靠的无线通信。数据链路层处于网络协议栈软件的最底部,是数据帧在信道上发送和接收的直接控制者,其好坏直接决定了通信的性能。

5.3.1 MAC 层

多跳自组织无线传感器网络 MAC 层协议需要实现以下两个目标。

(1) 对于感知区域内密集布置结点的多跳无线通信,需要建立数据通信链接以获得基

本的网络基础设施。

(2) 为了使无线传感器结点公平、有效地共享通信资源,需要对共享媒体的访问进行管理,由于无线传感器网络特殊的资源约束和应用需求,常规无线网络的 MAC 协议对无线传感器网络是不适用的。例如,对基于基础架构的分隔式系统,MAC 协议的首要目标是提供高 QoS 和有效带宽,主要采用了专用的资源规划策略。这种访问方案对无线传感器是行不通的,这是因为无线传感器网络没有类似基站的中央控制代理。另外,无线传感器网络的能量有效性会影响网络寿命,因而节能是至关重要的。

无线传感器网络的 MAC 协议必须具有固定能量保护、移动性管理和失效恢复策略。现有的 MAC 解决方案主要包括以下 3 种访问方式。

1. CSMA/CA

和物理层紧密相连的 MAC 层大体遵循了 IEEE 802.15.4 标准。IEEE 802.15.4 标准采用的信道接入算法是带有冲突避免的载波侦听多路访问(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance,CSMA/CA)。

随机接入的特点是所有结点都可以根据自己的意愿随机发送信息。在无线网络中,如果两个或者更多的结点同时发送信息,就会在接收结点处产生无线信号冲突,导致数据帧不能正确解析。在一个局域网中,在同一个时间内只能有两个结点互相进行数据传输,因此所有想要传输数据的结点会通过 CSMA/CA 机制来竞争信道的使用权。

CSMA/CA 算法用于结点之间数据传输时的信道争用,此算法有 Nb、CW 和 BE 这 3 个重要的参数,分别由每个要传送数据的结点维护。

(1) Nb(Number of backoff,后退次数)。Nb 的初始值为 0,当结点有数据要传送时,经过一段后退时间后,发送 CCA(接收信号强度)检测,若检测到信道忙,则会再一次产生倒退时间,此时 Nb 值会加 1。在 IEEE 802.15.4 中,Nb 值最大可定义为 4,当信道在经过 4 次后退延迟后仍为忙,则放弃此次传送,以避免过大的开销。

(2) CW(Content Window length,碰撞窗口的长度)。后退延迟的单位是 baekoff,一个后退周期被定义为 20symbol 的时间。一个 symbol 为 $16\mu\text{s}$,CW 的初始值为 2,最大值为 31。CW 是 CSMA/CA 最重要的一个参数,它定义了后退延迟时间的最小单位。

(3) BE(Backoff Exponent,后退指数)。取值范围为 0~5,IEEE 802.15.4 推荐的默认值为 3,最大值为 5。在 CSMA/CA 中,如果第一次后退结束后检测到信道仍然为忙,则在下一次后退时,后退延迟将是前一段的 2 倍。这样做可以有效地避免网络拥塞。

2. 基于 TDMA 的媒体访问

因为无线电占空比减少,而且没有带来竞争的管理花费和冲突,所以从本质上来说,时分复用(Time Division Multiple Access,TDMA)访问方案比基于竞争的方案能节省更多能量。对于具有能量约束的无线传感器网络,MAC 方案应包括另一种形式的频分复用方案(Frequency Division Multiple Access,FDMA),空闲时必须关闭无线电来获得更大的能量节省。无线传感器网络的自组织媒体访问控制(Self-organizing Medium Access Control for Sensor networks,SMACS)就是这样一种基于时间槽的方案,各结点保持一个类似 TDMA 的超结构,结点安排不同时间槽与已知邻近结点通信。SMACS 在竞争阶段采用随机唤醒时序,并在空闲时间槽关闭无线电,从而实现了能量节省。

3. 基于混合 TDMA/FDMA 的媒体访问

这是一种完全基于 TDMA 的访问方案。单个无线传感器结点能获得全部通道,同时 FDMA 方案会分配每个结点的最小信号带宽。这种方式在访问能力与能耗之间进行了平衡。若传送结点消耗更多能量,则考虑采用 TDMA 方案,而当接收结点消耗更多能量时倾向于采用 FDMA。

5.3.2 差错控制

差错控制是数据链路层的一个重要任务,其目标是在允许一定差错水平的基础上,在传输信道上可靠地传输数据。实际的数据链路层在实际应用中传输数据的信道是不可靠的,即不能保证所传的数据不产生差错,因此逻辑链路控制层协议的一个重要功能就是对需要确认的数据进行确认。

1. ARQ

一般基于自动重传请求(Automatic Repeat Request, ARQ)的误差控制主要采用重新传送丢失的数据包或帧。如图 5-3 所示,假设结点 A 对结点 B 发送数据,结点 B 收到正确的数据后返回一个确认。为了区别各个不同的发送数据,发送方对数据进行了简单的编号,即序列号(Sequence Number, SN),接收方收到数据后,把序列号返回。

图 5-3(a)所示为数据帧在传输过程中不出差错时的情况。结点 B 在接收到结点 A 发的数据后,向结点 A 发送一个相应的确认帧 ACK。当主机 A 收到确认帧 ACK 后才能发送一个新的数据帧。

图 5-3(b)所示为数据帧在传输过程中出现了差错时的情况。由于在数据帧中加上了循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC),所以结点 B 很容易检验出收到的数据帧是否有差错。当发现差错时,结点 B 就直接把数据丢弃,而且在结点 A 发送数据时,会启动一个超时定时器,若到了超时定时器所设置的重发时间 t_{out} 而仍收不到结点 B 的任何应答帧,则结点 A 就重传前面所发送的没有确认的数据帧。

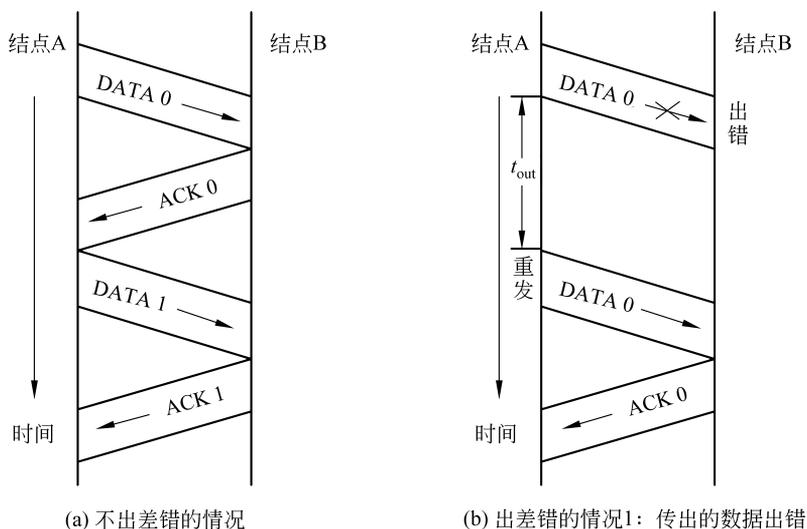


图 5-3 数据帧在链路上传输示意