

第3章

传感器网络的通信与组网技术

做到目视千里、耳听八方是人类长久的梦想,现代卫星技术的出现虽然使人们离这一目标前进了很多,但卫星高高在上,洞察全局在行,明察细微就勉为其难了。将大量的传感器结点部署到指定区域,数据通过无线电波传回监控中心,监控区域内的所有信息就会尽收观察者的眼中了。这就是人们对无线传感器网络技术应用的美好展望,它的实现依赖于可靠的数据传输方法,需要新型的网络通信技术。

通常传感器结点的通信覆盖范围只有几十米到几百米,人们要考虑如何在有限的通信能力条件下,完成探测数据的传输。无线通信是传感器网络的关键技术之一。

本章主要介绍传感器网络的通信与组网技术。通信部分位于无线传感器网络体系结构的最底层,包括物理层和 MAC 层两个子层,主要是解决如何实现数据的点到点或点到多点的传输问题,为上层组网提供通信服务,同时还需要满足传感器网络大规模、低成本、低功耗、鲁棒性等方面的要求。传感器网络的通信技术在下面分两节进行介绍,涉及物理层和 MAC 层的内容。

组网技术是通过无线传感器网络通信体系的上层协议实现的,以底层通信技术为基础,建立一个可靠且具有严格功耗预算的通信网络,向用户提供服务支持。传感器网络的组网技术包括网络层和传输层两部分内容。网络层负责数据的路由转发,传输层负责实现数据传输的服务质量保障。无线传感器网络的重要特点是网络规模大和结点携带不可更换的电源,组网技术必须依据它的下层协议,在资源消耗与网络服务性能之间进行折中,使设计方案切实可行。3.3 节主要介绍网络层的路由协议,并以定向扩散路由协议为例,阐述传感器网络路由协议设计的过程。

3.1 物 理 层

3.1.1

物理层概述

1. 物理层的基本概念

在计算机网络中物理层考虑的是怎样才能连接各种计算机的传输介质上传输数据的比特流。国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)对开放系统互联(Open System Interconnection, OSI)参考模型中物理层的定义如下:物理层为建立、维护和释放数据链路实体之间的二进制比特传输的物理连接,提供机械的、电气的、功能的

和规程性的特性。从定义可以看出,物理层的特点是负责在物理链接上传输二进制比特流,并提供为建立、维护和释放物理链接所需要的机械、电气、功能和规程的特性。

大家知道,现有无线网络中的物理设备和传输介质的种类非常多,而通信手段也有许多不同的方式。物理层的作用正是要尽可能地屏蔽掉这些差异,使其上面的数据链路层感觉不到这些差异,这样就可以使数据链路层只需要考虑如何完成本层的协议和服务,而不必考虑具体的网络传输介质是什么。用于物理层的协议也常称为物理层规程(procedure)。

在OSI参考模型中,物理层处于最底层,是整个开放系统的基础,向下直接与物理传输介质相连接。物理层的协议是各种网络设备进行互联时必须遵守的底层协议。设立物理层的目的是实现两个网络物理设备之间的二进制比特流的透明传输。它负责在主机之间传输数据位,为在物理介质上传输的比特流建立规则,以及需要何种传送技术在传输介质上发送数据。物理层对数据链路层屏蔽物理传输介质的特性,以便对高层协议有最大的透明性,但它定义了数据链路层所使用的访问方法^[27]。

物理层的主要功能如下:

(1) 为数据终端设备(Data Terminal Equipment, DTE)提供传送数据的通路。数据通路可以是一个物理介质,也可以是由多个物理介质连接而成的。一次完整的数据传输包括激活物理连接、传送数据和终止物理链接。所谓“激活物理链接”就是不管有多少物理介质参与,都需要将通信的两个数据终端设备连接起来,形成一条通路。

(2) 传输数据。物理层要形成适合传输需要的实体,为数据传输服务,保证数据能在物理层正确通过,并提供足够的带宽,以减少信道的拥塞。数据传输的方式能满足点到点、一点到多点、串行或并行、半双工或全双工、同步或异步传输的需要。

(3) 其他管理工作。物理层还负责其他一些管理工作,如信道状态评估、能量检测等。

通常具体的物理层协议是相当复杂的。这是因为物理链接的方式很多,例如可以是点到点的,也可以是多点连接或广播连接。另外,传输介质的种类也非常多,如架空明线、平衡电缆、同轴电缆、光纤、双绞线和无线信道等^[28]。

通常通信所用的互连设备是指数据终端设备和数据电路终端设备(Data Circuit Terminating Equipment, DCTE)间的互连设备。将具有一定数据处理能力和发送、接收数据能力的设备称为“数据终端设备”,也称为“物理设备”,如计算机、I/O设备终端等;介于数据终端设备和传输介质之间的数据通信设备或电路连接设备,称为“数据电路终端设备”,如调制解调器等。

在物理层通信过程中,数据终端设备和数据电路终端设备之间应该既有数据信息传输,也有控制信息传输,这就需要高度协调工作,要求定制出它们之间的接口标准。这些标准就是物理接口标准。

通常物理接口标准对物理接口的四个特性进行了描述,这四个特性的内容是指^[29]:

(1) 机械特性。它规定了物理链接时使用的可接插连接器的形状和尺寸、连接器中的引脚数量和排列情况等。

(2) 电气特性。它规定了在物理链接上传输二进制比特流时,线路上信号电平高低、阻抗以及阻抗匹配、传输速率与距离限制。

(3) 功能特性。它规定了物理接口上各条信号线的功能分配和确切定义。物理接口信号线一般分为数据线、控制线、定时线和地线。

(4) 规程特性。它定义了信号线进行二进制比特流传输时的一组操作过程,包括各信号线的工作规则和时序。

2. 无线通信物理层的主要技术

无线通信物理层的主要技术包括介质的选择、频段的选择、调制技术和扩频技术。

1) 介质和频段选择

无线通信的介质包括电磁波和声波。电磁波是最主要的无线通信介质,而声波一般仅用于水下的无线通信。根据波长的不同,电磁波分为无线电波、微波、红外线和光波等,其中无线电波在无线网络中使用最广泛。

无线电波容易产生,可以传播很远和穿过建筑物,因而广泛用于室内或室外的无线通信。无线电波是全方向传播信号的,它能向任意方向发送无线信号,所以发射方和接收方的装置在位置上不必要求很精确的对准。

无线电波的传播特性与频率相关。如果采用较低频率,则它能轻易地通过障碍物,但电能随着与信号源距离 r 的增大而急剧减小。如果采用高频传输,则它趋于直线传播,且受障碍物阻挡的影响。无线电波易受发动机和其他电子设备的干扰。另外,由于无线电波的传输距离较远,用户之间的相互串扰也是需要关注的问题,所以每个国家和地区都有关于无线频率管制方面的使用授权规定。

2) 调制技术

调制和解调技术是无线通信系统的关键技术之一。通常信号源的编码信息(即信源)含有直流分量和频率较低的频率分量,称为基带信号。基带信号往往不能作为传输信号,因而要将基带信号转换为相对基带频率而言频率非常高的带通信号,以便于进行信道传输。通常将带通信号称为已调信号,而基带信号称为调制信号。

调制技术通过改变高频载波的幅度、相位或频率,使其随着基带信号幅度的变化而变化。解调是将基带信号从载波中提取出来以便预定的接收者(信宿)处理和理解的过程。

调制对通信系统的有效性和可靠性有很大的影响,采用什么方法调制和解调往往在很大程度上决定着通信系统的质量。根据调制中采用的基带信号的类型,可以将调制分为模拟调制和数字调制。模拟调制是用模拟基带信号对高频载波的某一参量进行控制,使高频载波随着模拟基带信号的变化而变化。数字调制是用数字基带信号对高频载波的某一参量进行控制,使高频载波随着数字基带信号的变化而变化。目前通信系统都在由模拟制式向数字制式过渡,因此数字调制已经成为了主流的调制技术。

根据原始信号所控制参量的不同,调制分为幅度调制(Amplitude Modulation, AM)、频率调制(Frequency Modulation, FM)和相位调制(Phase Modulation, PM)。当数字调制信号为二进制矩形全占空脉冲序列时,由于该序列只存在“有电”和“无电”两种状态,因而可以采用电键控制,被称为键控信号,所以上述数字信号的调幅、调频、调相分别又被称为幅移键控(Amplitude Shift Keying, ASK)、频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)和相移键控(Phase Shift Keying, PSK)。

20世纪80年代以来,人们十分重视调制技术在无线通信系统中的应用,以寻求频谱利用率更高、频谱特性更好的数字调制方式。由于振幅键控信号的抗噪声性能不够理想,因而目前在无线通信中广泛应用的调制方法是频率键控和相位键控。

3) 扩频技术

扩频又称为扩展频谱,它的定义如下:扩频通信技术是一种信息传输方式,其信号所占有的频带宽度远大于所传信息必需的最小带宽;频带的扩展是通过一个独立的码序列来完成,用编码及调制的方法来实现,与所传信息数据无关;在接收端用同样的码进行相关同步接收、解扩和恢复所传信息数据。

扩频技术按照工作方式的不同,可以分为以下四种:直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)、跳频(Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS)、跳时(Time Hopping Spread Spectrum, THSS)和宽带线性调频扩频(chirp Spread Spectrum, chirp-SS, 简称切普扩频)。

扩频通信与一般无线通信系统相比,主要是在发射端增加了扩频调制,而在接收端增加了扩频解调。扩频技术的优点包括:易于重复使用频率,提高了无线频谱利用率;抗干扰性强,误码率低;隐蔽性好,对各种窄带通信系统的干扰很小;可以实现码分多址;抗多径干扰;能精确地定时和测距;适合数字话音和数据传输,以及开展多种通信业务;安装简便,易于维护。

3. 无线传感器网络物理层的特点

无线传感器网络作为无线通信网络中的一种类型,因此它包含了上述介绍的无线通信物理层技术的特点。它的物理层协议也涉及传输介质和频段的选择、调制、扩频技术,实现低能耗是无线传感器网络物理层的一项设计要求。

由于传感器网络的主要设计参数是成本和功耗,因而物理层的设计对整个网络的成功运行来说是至关重要的。如果采用了不适宜的调制方式、工作频带和编码方案,即使设计出的网络能够勉强完成预定的功能,也未必满足推广应用所需的成本和电池寿命方面的要求。

目前无线传感器网络的通信传输介质主要是无线电波、红外线和光波三种类型。无线电波的通信限制较少,通常人们选择“工业、科学和医疗”(Industrial, Scientific and Medical, ISM)频段。ISM频段的优点在于它是自由频段,无须注册,可选频谱范围大,实现起来灵活方便。ISM频段的缺点主要是功率受限,另外与现有多种无线通信应用存在相互干扰问题。

红外通信也无须注册,且受无线电设备的干扰较小,不足的是存在视距关系(Line of Sight, LoS)限制。光学介质传输不需要复杂的调制解调机制,传输功率小,但也同样存在视距限制。

尽管传感器网络可以通过其他方式实现通信,例如各种电磁波(如射频和红外)、声波,但无线电波是当前传感器网络的主流通信方式,在很多领域得到了广泛应用。

调制是无线通信系统的重要技术,它使得信号与信道匹配,增强电波的有效辐射,可以方便频率分配、减小信号干扰。扩频通信具有很强的抗干扰能力,可进行多址通信,安全性强,难以被敌方窃听。对于传感器网络来说,选择适当的调制解调和扩频机制是实现可靠通信传输的关键。

无线传感器网络的低能耗、低成本、微型化等特点,以及具体应用的特殊需求给物理层的设计提出了挑战,在设计时需要重点考虑以下问题:

(1) 调制机制。低能耗和低成本的特点要求调制机制尽量设计简单,使得能量消耗最

低。但是另一方面无线通信本身的不可靠性,传感器网络与现有无线设备之间的无线电干扰,以及具体应用的特殊需要使得调制机制必须具有较强的抗干扰能力。

(2) 与上层协议结合的跨层优化设计。物理层位于网络协议的最底层,是整个协议栈的基础。它的设计对各上层内容的跨层优化设计具有重要的影响,而跨层优化设计是传感器网络协议设计的主要内容。

(3) 硬件设计。在传感器网络的整个协议栈中,物理层与硬件的关系最为密切,微型化、低功耗、低成本的传感器单元、处理器单元和通信单元的有机集成是非常必要的。

3.1.2

传感器网络物理层的设计

1. 传输介质

目前无线传感器网络采用的主要传输介质包括无线电、红外线和光波等。

在无线电频率选择方面,ISM 频段是一个很好的选择。因为 ISM 频段在大多数国家属于无须注册的公用频段。表 3.1 列出了 ISM 应用中的可用频段。其中一些频率已经用于无绳电话系统和无线局域网。对于无线传感器网络来说,无线电接收机需要满足体积小、成本低和功率小的要求。

表 3.1 ISM 的可用频段

频 段	中 心 频 率	频 段	中 心 频 率
6765~6795kHz	6780kHz	2400~2500MHz	2450MHz
13 553~13 567kHz	13 560kHz	5725~5875MHz	5800MHz
26 957~27 283kHz	27 120kHz	24~24.25GHz	24.125GHz
40.66~40.0MHz	40.68MHz	61~61.5GHz	61.25GHz
433.05~434.79MHz	433.92MHz	122~123GHz	122.5GHz
902~928MHz	915MHz	244~246GHz	245GHz

使用 ISM 频段的主要优点是 ISM 是自由频段,可用频带宽,并且在全球范围内都具有可用性;同时也没有特定的标准,给设计适合无线传感器网络的节能策略带来了更多的灵活性。当然,选择 ISM 频段也存在一些使用上的问题,例如功率限制以及与现有的其他无线电应用之间存在相互干扰等。目前主流的传感器结点硬件是基于 RF 射频电路设计的。

无线传感器网络结点之间的另一种通信手段是红外技术。红外通信的优点是无须注册,并且抗干扰能力强。基于红外线的接收机成本更低,也很容易设计。目前很多便携式电脑、PDA 和移动电话都提供红外数据传输的标准接口。红外通信的主要缺点是穿透能力差,要求发送者和接收者之间存在视距关系。这导致了红外难以成为无线传感器网络的主流传输介质,而只能在一些特殊场合得到应用。

对于一些特殊场合的应用情况,传感器网络对通信传输介质可能有特别的要求。例如,舰船应用可能要求使用水性传输介质,例如能穿透水面的长波。复杂地形和战场应用会遇到信道不可靠和严重干扰等问题。另外,一些传感器结点的天线可能在高度和发射功率方面比不上周围的其他无线设备,为了保证这些低发射功率的传感器网络结点正常完成通信任务,要求所选择的传输介质能支持健壮的编码和调制机制。

2. 物理层帧结构

表 3.2 描述了无线传感器网络结点普遍使用的一种物理层帧结构。由于目前还没有形成标准化的物理层结构,所以在实际设计时都是在该物理层帧结构的基础上进行改进。

表 3.2 传感器网络物理层的帧结构

4 字节	1 字节	1 字节		可变长度
前导码	帧头	帧长度(7 比特)	保留位	PSDU
同步头		帧的长度,最大为 128 字节		PHY 负载

物理帧的第一个字段是前导码,字节数一般取 4,用于收发器进行码片或者符号的同步。第二个字段是帧头,长度通常为 1 字节,表示同步结束,数据包开始传输。帧头与前导码构成了同步头。

帧长度字段通常由一个字节的低 7 位表示,其值就是后续的物理层 PHY 负载的长度,因此它的后续 PHY 负载的长度不会超过 127 字节。

物理帧 PHY 的负载长度可变,称为物理服务数据单元(PHY Service Data Unite, PSDU),携带 PHY 数据包的数据,PSDU 域是物理层的载荷。

3. 物理层设计技术

物理层主要负责数据的硬件加密、调制解调、发送与接收,是决定传感器网络结点的体积、成本和能耗的关键环节。物理层的设计目标是以尽可能少的能量消耗获得较大的链路容量。为了确保网络运行的平稳性能,该层一般需要与 MAC 层进行密切交互。

物理层需要考虑编码调制技术、通信速率和通信频段等问题:

(1) 编码调制技术影响占用频率带宽、通信速率、收发机结构和功率等一系列的技术参数。比较常见的编码调制技术包括幅移键控、频移键控、相移键控和各种扩频技术。

(2) 提高数据传输速率可以减少数据收发的时间,对于节能具有意义,但需要同时考虑提高网络速度对误码的影响。一般用单个比特的收发能耗来定义数据传输对能量的效率,单比特能耗越小越好。

频段的选择需要非常慎重。由于无线传感器网络是面向应用的网络,所以针对不同应用应该在成本、功耗、体积等综合条件下进行优化选择。FCC 组织指出,2.4GHz 是在当前工艺技术条件下,综合功耗、成本、体积等指标表现效果较好的可选频段,并且是全球范围的自由开放波段。但问题是现阶段不同的无线设备如蓝牙、WLAN、微波炉电器和无绳电话等都采用这个频段的频率,因而这个频段可能造成的相互干扰最严重。

尽管目前无线传感器网络还没有定义物理层标准,但是很多研究机构设计的网络结点物理层基本都是在现有器件工艺水平上开展起来了。例如当前使用较多的 Mica2 结点,主要采用分离器件实现结点的物理层设计,可以选择 433MHz 或 868MHz 两个频段,调制方式采用简单的 FSK/ASK 方式。

在低速无线个域网(LR-PAN)的 802.15.4 标准中,定义的物理层是在 868MHz、915MHz、2.4GHz 三个载波频段收发数据。这三个频段都使用了直接序列扩频方式。

IEEE 802.15.4 标准非常适合无线传感器网络的特点,是传感器网络物理层协议标准的最有力竞争者之一。目前基于该标准的射频芯片也相继推出,例如 Chipcon 公司的 CC2420 无线通信芯片。

总的来看,针对无线传感器网络的特点,现有的物理层设计基本采用结构简单的调制方式,在频段选择上主要集中在 433~464MHz、902~928MHz 和 2.4~2.5GHz 的 ISM 波段。

3.2 MAC 协议

3.2.1

MAC 协议概述

无线频谱是无线通信的介质,这种广播介质属于稀缺资源。在无线传感器网络中,可能有多个结点设备同时接入信道,导致分组之间相互冲突,使接收方难以分辨出接收到的数据,从而浪费了信道资源,导致网络吞吐量下降。为了解决这些问题,就需要设计介质访问控制(Medium Access Control,MAC)协议。所谓 MAC 协议就是通过一组规则和过程来有效、有序和公平地使用共享介质^[1]。

在无线传感器网络中,MAC 协议决定着无线信道的使用方式,用来在传感器结点之间分配有限的无线通信资源,构建传感器网络系统的底层基础结构。MAC 协议处于传感器网络协议的底层部分,对网络性能有较大影响,是保证传感器网络高效通信的关键协议之一。

传感器结点的能量、存储、计算和通信带宽等资源有限,单个结点的功能比较弱,而传感器网络的丰富功能是由众多结点协作实现的。多点通信在局部范围需要 MAC 协议协调相互之间的无线信道分配,在设计传感器网络的 MAC 协议时,需要着重考虑以下几个问题:

(1) 节省能量。传感器网络的结点一般是以干电池、纽扣电池等提供能量,而且电池能量通常难以进行补充,为了保证传感器网络长时间的有效工作,MAC 协议在满足应用要求的前提下,应尽量节省使用结点的能量。

(2) 可扩展性。由于传感器结点数目、结点分布密度等在传感器网络生存过程中不断变化,结点位置也可能移动,还有新结点加入网络的问题,所以无线传感器网络的拓扑结构具有动态性。MAC 协议应具有可扩展性,以适应这种动态变化的拓扑结构。

(3) 网络效率。网络效率包括网络的公平性、实时性、网络吞吐量和带宽利用率等。

在上述的三个问题中,人们普遍认为它们的重要性依次递减。由于传感器结点本身不能自动补充能量或能量补充不足,节约能量成为传感器网络 MAC 协议设计的首要考虑因素。

在传统网络中,结点能够连续地获得能量供应,如在办公室里有稳定的电网供电,或者可以间断但及时地补充能量,如笔记本电脑和手机等。传统网络的拓扑结构相对稳定,网络的变化范围和变化频率都比较小。因此,传统网络的 MAC 协议重点考虑结点使用带宽的公平性,提高带宽的利用率和增加网络的实时性。由此可见,传感器网络的 MAC 协议与传统网络的 MAC 协议所注重的因素不同,这意味着传统网络的 MAC 协议不适用于传感器网络,需要设计适用于传感器网络的 MAC 协议。

通常网络结点无线通信模块的状态包括发送状态、接收状态、侦听状态和睡眠状态等。

单位时间内消耗的能量按照上述顺序依次减少：无线通信模块在发送状态消耗能量最多，在睡眠状态消耗能量最少，接收状态和侦听状态下的能量消耗稍小于发送状态。

基于上述原因，为了减少能量的消耗，传感器网络 MAC 协议通常采用“侦听/睡眠”交替的无线信道使用策略。当有数据收发时，结点开启动通信模块进行发送或侦听；如果没有数据需要收发，结点控制通信模块进入睡眠状态，从而减少空闲侦听造成的能量消耗。

为了使结点在无线模块睡眠时不错过发送给它的数据，或减少结点的过度侦听，邻居结点间需要协调它们的侦听和睡眠周期。如果采用基于竞争方式的 MAC 协议，要考虑发送数据产生碰撞的可能，根据信道使用的信息调整发送时机。当然，MAC 协议应该简单高效，避免协议本身开销大、消耗过多的能量。

目前无线传感器网络 MAC 协议可以按照下列条件进行分类：①采用分布式控制还是集中控制；②使用单一共享信道还是多个信道；③采用固定分配信道方式还是随机访问信道方式。

本书根据上述的第三种分类方法，将传感器网络的 MAC 协议分为以下三种。

① 时分复用无竞争接入方式。无线信道时分复用 (Time Division Multiple Access, TDMA) 方式给每个传感器结点分配固定的无线信道使用时段，避免结点之间相互干扰。

② 随机竞争接入方式。如果采用无线信道的随机竞争接入方式，结点在需要发送数据时随机使用无线信道，尽量减少结点间的干扰。典型的方法是采用载波侦听多路访问 (Carrier Sense Multiple Access, CSMA) 的 MAC 协议。

③ 竞争与固定分配相结合的接入方式。通过混合采用频分复用或者码分复用等方式，实现结点间无冲突的无线信道分配。

基于竞争的随机访问 MAC 协议采用按需使用信道的方式，它的基本思想是当结点需要发送数据时，通过竞争方式使用无线信道，如果发送的数据产生了碰撞，就按照某种策略重发数据，直到数据发送成功或放弃发送。

典型的基于竞争的随机访问 MAC 协议是载波侦听多路访问 (CSMA) 接入方式。在无线局域网 IEEE 802.11 MAC 协议的分布式协调工作模式中，就采用了带冲突避免的载波侦听多路访问 (CSMA with Collision Avoidance, CSMA/CA) 协议，它是基于竞争的无线网络 MAC 协议的典型代表。

所谓的 CSMA/CA 机制是指在信号传输之前，发射机先侦听介质中是否有同信道载波，若不存在，意味着信道空闲，将直接进入数据传输状态；若存在载波，则在随机退避一段时间后重新检测信道。这种介质访问控制层的方案简化了实现自组织网络应用的过程。

在 IEEE 802.11 MAC 协议基础上，人们设计出适用于传感器网络的多种 MAC 协议。下面首先介绍 IEEE 802.11 MAC 协议的内容，然后介绍一种适用于无线传感器网络的典型 MAC 协议。

3.2.2 IEEE 802.11 MAC 协议

IEEE 802.11 MAC 协议分为分布式协调功能 (Distributed Coordination Function, DCF) 和点协调功能 (Point Coordination Function, PCF) 两种访问控制方式，其中 DCF 方式

是 IEEE 802.11 协议的基本访问控制方式^[31]。

由于在无线信道中难以检测到信号的碰撞,因而只能采用随机退避的方式来减少数据碰撞的概率。在 DCF 工作方式下,结点在侦听到无线信道忙之后,采用 CSMA/CA 机制和随机退避时间,实现无线信道的共享。另外,所有定向通信都采用立即的主动确认(ACK 帧)机制,即如果没有收到 ACK 帧,则发送方会重传数据。

PCF 工作方式是基于优先级的无竞争访问方式。它通过访问接入点(Access Point, AP)来协调结点的数据收发,采用轮询方式查询当前哪些结点有数据发送的请求,并在必要时给予数据发送权。

在 DCF 工作方式下,载波侦听机制通过物理载波侦听和虚拟载波侦听来确定无线信道的状态。物理载波侦听由物理层提供,虚拟载波侦听由 MAC 层提供。如图 3.1 所示,如果结点 A 希望向结点 B 发送数据,结点 C 在 A 的无线通信范围内,结点 D 在结点 B 的无线通信范围内,但不在结点 A 的无线通信范围内。结点 A 首先向结点 B 发送一个请求帧(Request-To-Send, RTS),结点 B 返回一个清除帧(Clean-To-Send, CTS)进行应答。这两个帧都有一个字段表示这次数据交换需要的时间长度,称为网络分配矢量(Network Allocation Vector, NAV),其他帧的 MAC 头也会携带这一信息。结点 C 和 D 在侦听到这个信息后,就不再发送任何数据,直到这次数据交换完成为止。NAV 可看作一个计数器,以均匀速率递减计数到零。当计数器为零时,虚拟载波侦听指示信道为空闲状态,否则,指示信道为忙状态。



图 3.1 CSMA/CA 的虚拟载波侦听示例

IEEE 802.11 MAC 协议规定了三种基本帧间间隔(InterFrame Space, IFS),用来提供访问无线信道的优先级。这三种帧间间隔如下。

(1) SIFS(short IFS): 最短帧间间隔。使用 SIFS 帧的优先级最高,用于需要立即响应的服务,如 ACK 帧、CTS 帧和控制帧等。

(2) PIFS(PCF IFS): PCF 方式下结点使用的帧间间隔,用来获得在无竞争访问周期启动时访问信道的优先权。

(3) DIFS(DCF IFS): DCF 方式下结点使用的帧间间隔,用来发送数据帧和管理帧。

根据 CSMA/CA 协议,当结点要传输一个分组时,它首先侦听信道状态。如果信道空闲,而且经过一个帧间间隔时间 DIFS 后,信道仍然空闲,则站点立即开始发送信息。如果信道忙,则站点始终侦听信道,直到信道的空闲时间超过 DIFS。当信道最终空闲下来的时候,结点进一步使用二进制退避算法,进入退避状态来避免发生碰撞。图 3.2 描述了这种 CSMA/CA 的基本访问机制。

随机退避时间按下面公式进行计算:

$$\text{退避时间} = \text{Random}() \times a\text{Slottime} \quad (3.1)$$

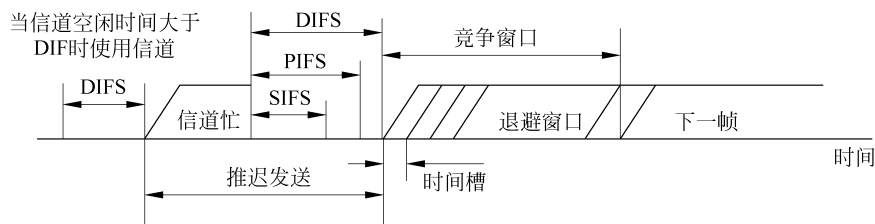


图 3.2 CSMA/CA 的基本访问机制

其中, $\text{Random}()$ 是在竞争窗口 $[0, CW]$ 内均匀分布的伪随机整数; CW 是整数随机数, 它的数值位于标准规定的 aCW_{\min} 和 aCW_{\max} 之间; $aSlottime$ 是一个时槽时间, 包括发射启动时间、介质传播时延、检测信道的响应时间等。

网络结点在进入退避状态时, 启动一个退避计时器, 当计时达到退避时间后结束退避状态。在退避状态下, 只有当检测到信道空闲时才进行计时。如果信道忙, 退避计时器中止计时, 直到检测到信道空闲时间大于 DIFS 后才继续计时。当多个结点推迟且进入随机退避时, 利用随机函数选择最小退避时间的结点作为竞争优胜者。具体的退避机制示例如图 3.3 所示。

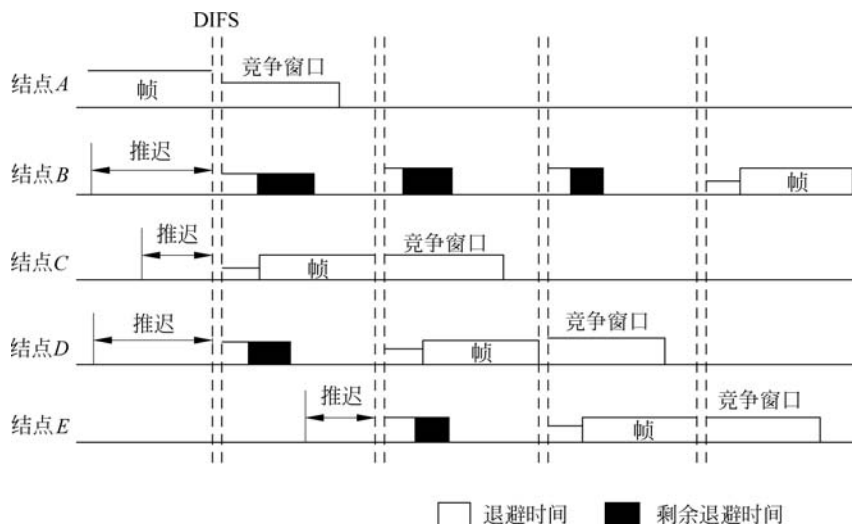


图 3.3 802.11 MAC 协议的退避机制示例

802.11 MAC 协议通过立即主动确认机制和预留机制来提高性能, 如图 3.4 所示。在主动确认机制中, 当目标结点收到一个发送给它的有效数据帧 (DATA) 时, 必须向源结点发送一个应答帧 (ACK), 确认数据已被正确接收到。为了保证目标结点在发送 ACK 过程中不与其他结点发生冲突, 目标结点使用 SIFS 帧间隔。主动确认机制只能用于有明确目标地址的帧, 不能用于组播和广播报文传输。

为了减少结点间使用共享无线信道的碰撞概率, 预留机制要求源和目的结点在发送数据帧之前交换简短的控制帧, 即发送请求帧 RTS 和清除帧 CTS。在 RTS (或 CTS) 帧开始到 ACK 帧结束的这段时间内, 信道将一直被这次数据交换过程所占用。RTS 帧和 CTS 帧

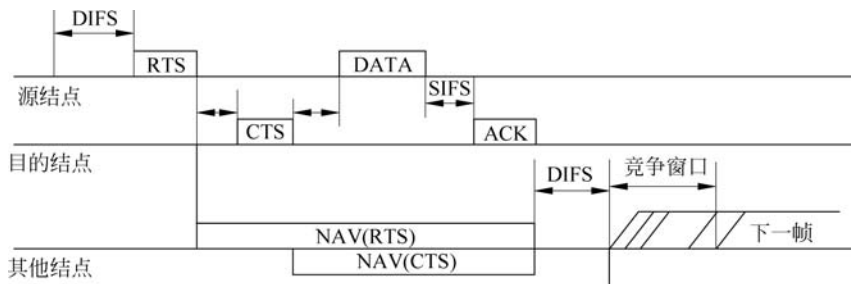


图 3.4 802.11 MAC 协议的应答与预留机制

包含有关这段时间长度的信息。每个结点维护一个定时器,记录网络分配向量 NAV,指示信道被占用的剩余时间。一旦收到 RTS 帧或 CTS 帧,所有结点必须更新它们的 NAV 值。只有在 NAV 减至零,结点才能发送信息。通过这种方式 RTS 帧和 CTS 帧为结点的数据传输预留信道。

3.2.3

典型 MAC 协议: S-MAC 协议

这里介绍一种适用于无线传感器网络的比较典型的 MAC 协议,即 S-MAC 协议 (Sensor MAC)。这种协议是在 802.11 MAC 协议的基础上,针对传感器网络的节省能量需求而提出的。S-MAC 协议的适用条件是传感器网络的数据传输量不大,网络内部能够进行数据的处理和融合以减少数据通信量,网络能容忍一定程度的通信延迟。它的设计目标是提供良好的扩展性,减少结点能耗^[32]。

人们经过大量实验和理论分析,总结出通常无线传感器网络的无效能耗主要来源于如下四种原因。

(1) 空闲侦听。如果 MAC 协议采用竞争方式使用共享的无线信道,结点在发送数据的过程中,可能引起多个结点之间发送的数据产生碰撞,这就需要重传发送。由于结点不知道它的邻居结点在何时会向自己发送数据,因而射频通信模块始终处于接收状态,从而消耗无用的能量。

(2) 数据冲突。由于邻居结点同时向同一结点发送多个数据帧,信号相互干扰,导致接收方无法准确接收,重发数据行为造成了能量浪费。

(3) 串扰。网络结点会接收和处理无关的数据,这种串音现象造成结点的无线接收模块和处理器模块消耗较多的能量。

(4) 控制开销。控制报文不传送有效数据,消耗了结点能量。如果控制消息过多,将消耗较多的网络能量。

针对碰撞重传、串音、空闲侦听和控制消息等可能造成较多能耗的因素,S-MAC 协议采用以下机制:周期性侦听/睡眠的低占空比工作方式,控制结点尽可能处于睡眠状态来降低结点能量的消耗;邻居结点通过协商的一致性睡眠调度机制形成虚拟簇,减少结点的空闲侦听时间;通过流量自适应的侦听机制,减少消息在网络中的传输延迟;采用带内信令来减少重传和避免侦听不必要的的数据;通过消息分割和突发传递机制来减少控制消息的开销

和消息的传递延迟。

下面详细描述 S-MAC 协议采用的主要机制。

1. 周期性侦听和睡眠机制

S-MAC 协议将时间分为帧,帧长度由应用程序决定。帧内分侦听工作阶段和睡眠阶段。侦听/睡眠阶段的持续时间要根据应用情况进行调整。当结点处于睡眠阶段时,关闭无线电波,以节省能量。当然结点需要缓存这期间收到的数据,以便工作阶段集中发送。

为了减少能量消耗,结点要尽量处于低功耗的睡眠状态。每个结点独立地调度它的工作状态,周期性地转入睡眠状态,在苏醒后侦听信道,判断是否需要发送或接收数据。为了便于相互通信,相邻结点之间应该尽量维持睡眠/侦听调度周期的同步。

每个结点用 SYNC 消息通告自己的调度信息,同时维护一个调度表,保存所有相邻结点的调度信息。当结点启动工作时,首先侦听一段固定长度的时间,如果在这段侦听时间内收到其他结点的调度信息,则将其调度周期设置为与邻居结点相同,并在等待一段随机时间后广播它的调度信息。当结点收到多个邻居结点的不同调度信息时,可以选择第一个收到的调度信息,并记录收到的所有调度信息。如果结点在这段侦听时间内没有收到其他结点的调度信息,则产生自己的调度周期并广播。

在结点产生和通告自己的调度之后,如果收到邻居的不同调度,下面分两种情况进行处理:①如果没有收到过与自己调度相同的其他邻居的通告,则采纳邻居的调度,丢弃自己生成的调度;②如果结点已经收到过与自己调度相同的其他邻居的通告,则在调度表中记录该调度信息,以便能够与非同步的相邻结点进行通信。

具有相同调度的结点形成一个所谓的虚拟簇,边界结点记录两个或多个调度。如果传感器网络的部署范围较广,可能形成众多不同的虚拟簇,使得 S-MAC 协议具有良好的可扩展性。

为了适应新加入结点,每个结点要定期广播自己的调度信息,使新结点可以与已经存在的相邻结点保持同步。如果结点同时收到两种不同的调度,如图 3.5 所示的处于两个不同调度区域重合部分的结点,那么这个结点可以选择先收到的调度,并记录另一个调度信息。

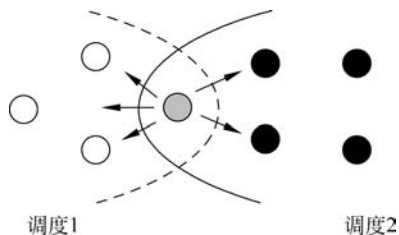


图 3.5 S-MAC 协议的虚拟簇示例

2. 流量自适应侦听机制

传感器网络通常采用多跳通信进行组网,而结点的周期性睡眠会导致通信延迟的累加。S-MAC 协议采用了流量自适应的侦听机制,减少通信延迟的累加效应。

流量自适应侦听机制的基本思想是在一次通信过程中,通信结点的邻居在通信结束后

不立即进入睡眠状态,而是保持侦听一段时间。如果结点在这段时间内接收到 RTS 分组,则可以立刻接收数据,无须等到下一次调度侦听周期,从而减少了数据分组的传输延迟。如果在这段时间内没有接收到 RTS 分组,则转入睡眠状态直到下一次调度侦听周期。

3. 冲突和串音避免机制

为了减少冲突和避免串音,S-MAC 协议采用了与 802.11 MAC 协议类似的虚拟和物理载波侦听机制,以及 RTS/CTS 握手交互机制。两者的区别在于当邻居结点处于通信过程时,执行 S-MAC 协议的结点进入睡眠状态。

每个结点在传输数据时,都要经历 RTS/CTS/DATA/ACK 的通信过程(广播包除外)。在传输的每个分组中,都有一个阈值表示剩余通信过程需要持续的时间长度。源和目的结点的邻居在侦听期间侦听到分组时,记录这个时间长度值,同时进入睡眠状态。通信过程记录的剩余时间随着时间不断减少。当剩余时间减至零时,若结点仍处于侦听周期,就会被唤醒;否则,结点处于睡眠状态直到下一个调度的侦听周期。

每个结点在发送数据时,都要先进行载波侦听。只有虚拟或物理载波侦听表示无线信道空闲时,才可以竞争通信过程。

4. 消息传递机制

S-MAC 协议采用了消息传递机制,可以很好地支持长消息的发送。由于无线信道的传输差错与消息长度成正比,短消息传输成功的概率要大于长消息。消息传递机制根据这一原理,将长消息分为若干个短消息,采用一次 RTS/CTS 交互的握手机制预约这个长消息发送的时间,集中连续发送全部短消息。这样既可以减少控制报文的开销,又可以提高消息发送的成功率。

相对于 IEEE 802.11 MAC 协议的消息传递机制来说,S-MAC 协议的不同之处如图 3.6 所示。图中 S-MAC 协议的 RTS/CTS 控制消息和数据消息携带的时间是整个长消息传输的剩余时间。其他结点只要接收到一个消息,就能够知道整个长消息的剩余时间,然后进入睡眠状态直至长消息发送完成。

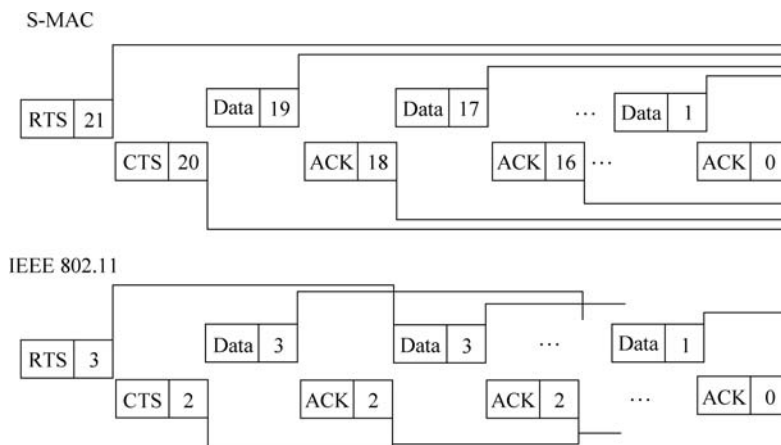


图 3.6 S-MAC 与 IEEE 802.11 MAC 协议的突发分组传送

IEEE 802.11 MAC 协议考虑了网络的公平性,RTS/CTS 只预约下一个发送短消息的时间,其他结点在每个短消息发送完成后都不必醒来进入侦听状态。只要发送方没有收到某个短消息的应答,连接就会断开,其他结点就可以开始竞争信道的使用权。

3.3 路由协议

3.3.1

路由协议概述

路由选择(routing)是指互连网络选择从源结点向目的结点传输信息的行为,并且信息至少通过一个中间结点。路由协议负责将数据分组从源结点通过网络转发到目的结点,它包括两个功能:①寻找源结点和目的结点间的优化路径;②将数据分组沿着优化路径正确转发。

由于 Ad Hoc、无线局域网等传统无线网络的首要目标,是提供高质量服务和网络带宽使用的公平高效。这些网络路由协议的主要任务是寻找源结点到目的结点间通信延迟小的路径,同时提高整个网络的利用率,避免产生通信堵塞,并均衡网络流量。通常能量消耗问题不是这类网络考虑的重点。

但是在无线传感器网络中,结点能量有限且一般没有能量补充,因而路由协议的设计需要考虑高效利用能量。另外,由于传感器网络结点数目往往很大,结点只能获取局部的拓扑结构信息,路由协议要在局部网络协议的基础上,选择合适的路径^[33]。

传感器网络作为一种自组织的动态网络,没有基站支撑,由于结点失效、新结点加入,导致网络拓扑结构的动态性,需要自动愈合。多跳自组织的网络路由协议是传感器网络的关键技术之一。

传感器网络具有很强的应用相关性,不同应用的路由协议反映的特点有所不同,不存在“应万变”的某种通用路由协议。另外,传感器网络的路由机制还经常与数据融合技术联系在一起,通过减少通信量来节省能量。因此,传统的无线网络路由协议并不适用于无线传感器网络。

与传统网络的路由协议相比,无线传感器网络的路由协议具有以下特点:

(1) 能量优先。传统路由协议在选择最优路径时,很少考虑结点的能量消耗问题。由于无线传感器网络的结点能量有限,延长整个网络的生存期是传感器网络路由协议设计的重要目标,因而需要考虑结点的能量消耗和网络能量均衡使用的问题。

(2) 基于局部拓扑信息。传感器网络为了节省通信能量,通常采用多跳的通信方式,而有限的结点存储资源和计算资源,使得结点不能存储大量的路由信息。在结点只能获取局部拓扑信息和资源有限的情况下,如何实现简单、高效的路由机制,是传感器网络运行的一个基本问题。

(3) 以数据为中心。传统的路由协议通常以地址作为结点的标识和路由的依据,而传感器网络的结点是随机部署的,人们所关注的是监测区域的感知数据,而不是具体哪个结点获取的信息,网络运行不依赖于全网唯一的标识。传感器网络通常包含多个传感器结点到少数汇聚结点的数据流,它是以数据为中心形成探测信息的转发路径。

(4) 应用相关。传感器网络的应用环境千差万别,导致数据通信模式会有所不同,没有统一的路由机制可以适合于所有的应用问题,这是传感器网络应用相关性的一个具体体现。设计人员需要针对每一个具体应用的需求,设计实现或者移植与之适应的特定路由机制。

针对传感器网络路由机制的上述特点,在根据具体应用设计路由协议时,必须满足如下要求:

(1) 能量高效。传感器网络路由协议不仅要选择能量消耗小的传输路径,而且要从整个网络的角度考虑,选择使整个网络能量消耗均衡的路由。传感器结点的资源有限,传感器网络的路由机制要能够简单而且高效地实现信息传输。

(2) 可扩展性。在无线传感器网络中,由于覆盖区域范围不同,造成网络规模大小不一样,而且由于结点失败、新结点加入和结点移动等因素,都会使得网络拓扑结构动态发生变化,这就要求路由机制具有可扩展性,能够适应网络结构的变化。

(3) 稳健性。能量耗尽或环境因素会导致传感器结点的失效,周围环境也影响无线链路的通信质量,另外无线链路本身也存在一些缺陷,传感器网络的这些不可靠特性希望在路由机制方面具有一定的容错能力,使得网络运行具有较好的稳健性。

(4) 快速收敛性。传感器网络的拓扑结构动态变化,结点能量和通信带宽等资源有限,因此要求路由机制能够快速收敛,以适应网络拓扑的动态变化,同时减少通信协议的开销,提高信息传输的效率。

针对不同的传感器网络应用,研究人员提出了不同的路由协议。我们从各种应用的角度出发,将路由协议分为四类。这四种类型的路由协议分别介绍如下:

(1) 能量感知路由协议。高效利用网络能量是传感器网络路由协议的一个显著特征。为了强调高效利用能量的重要性,这里将它们划分为能量感知路由协议。能量感知的路由协议从数据传输的能量消耗出发,讨论最少能量消耗和最长网络生存期等问题。

(2) 基于查询的路由协议。在诸如环境检测、战场评估等应用中,需要不断查询传感器结点采集的数据。在汇聚结点(查询结点)发出任务查询命令,传感器网络的终端探测结点向监控中心报告采集的数据。在这类监控和检测的应用问题中,通信流量主要是查询结点和传感器探测结点之间的命令和数据传输,同时传感器探测结点的采集信息通常要进行数据融合,通过减少通信流量来节省能量,即数据融合技术与路由协议的设计相结合。

(3) 地理位置路由协议。在诸如目标跟踪的应用问题中,往往需要唤醒距离被跟踪目标最近的传感器结点,以便得到关于目标的精确位置等相关信息。在这类与坐标位置有关的应用问题中,通常需要知道目的结点的精确或者大致地理位置。把结点的位置信息作为路由选择的依据,不仅能够完成结点的路由选择功能,还可以降低系统专门维护路由协议的能耗。

(4) 可靠的路由协议。传感器网络的某些应用对通信的服务质量有较高要求,可能在可靠性和实时性等方面有特别要求。例如,采用视频传感器进行战场环境监测时,希望传输的视频图像能够尽可能的流畅些。但传感器网络的无线链路稳定性一般难以保证,通信信道质量比较低,网络拓扑变化频繁,要满足用户的某些方面的服务质量指标,需要考虑可靠的路由协议设计技术。

3.3.2

典型路由协议：定向扩散路由

定向扩散(Directed Diffusion, DD)路由协议是一种基于查询的路由机制。扩散结点通过兴趣信息发出查询任务,采用洪泛方式传播兴趣信息到整个区域或部分区域内的所有传感器结点。兴趣信息用来表示查询的任务,表达了网络用户对监测区域内感兴趣的具体内容,例如监测区域内的温度、湿度和光照等数据。在兴趣信息的传播过程中,协议将逐跳地在每个传感器结点上建立反向的从数据源到汇聚结点的数据传输梯度,传感器探测结点将采集到的数据沿着梯度方向传送给汇聚结点^[34]。

定向扩散路由机制可以分为周期性的兴趣扩散、梯度建立和路径加强三个阶段,图 3.7 显示了这三个阶段的数据传播途径和方向的示例。

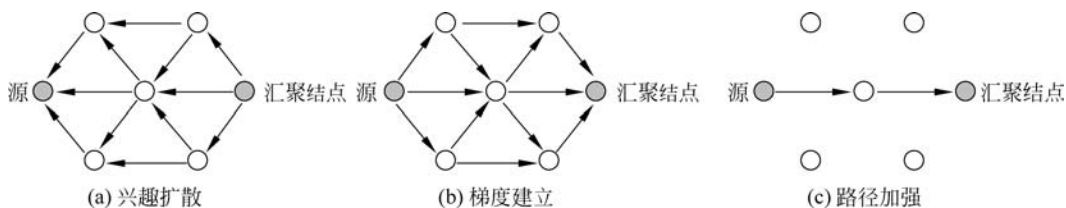


图 3.7 定向扩散路由机制的示例

1. 兴趣扩散阶段

在路由协议的兴趣扩散阶段,汇聚结点周期性地向邻居结点广播兴趣消息。兴趣消息中含有任务类型、目标区域、数据发送速率、时间戳等参数。每个结点在本地保存一个兴趣列表,对于每一个兴趣内容,列表中都有一个表项记录发来该兴趣消息的邻居结点、数据发送速率和时间戳等任务相关信息,以建立该结点向汇聚结点传递数据的梯度关系。每个兴趣可能对应多个邻居结点,每个邻居结点对应一个梯度信息。

通过定义不同的梯度相关参数,可以适应不同的应用需求。每个表项还有一个字段用来表示该表项的有效时间值,超过这个时间后,结点将删除这个表项。当结点收到邻居的兴趣消息时,首先检查兴趣列表中是否存有参数类型与收到兴趣相同的表项,而且对应的发送结点是该邻居结点。

如果有对应的表项,就更新表项的有效时间值;如果只是参数类型相同,但不包含发送该兴趣消息的邻居结点,就在相应表项中添加这个邻居结点;对于其他情况,则需要建立一个新表项来记录这个新的兴趣。如果收到的兴趣消息和结点刚刚转发的兴趣消息一样,为了避免消息循环,则丢弃该信息,否则转发收到的兴趣消息。

2. 梯度建立阶段

当传感器探测结点采集到与兴趣匹配的数据时,把数据发送到梯度上的邻居结点,并按照梯度上的数据传输速率,设定传感器模块采集数据的速率。由于可能从多个邻居结点收到兴趣消息,结点向多个邻居发送数据,汇聚结点可能收到经过多个路径的相同数据。

中间结点收到其他结点转发的数据后,首先查询兴趣列表的表项。如果没有匹配的兴趣表项,就丢弃数据。如果存在相应的兴趣表项,则检查与这个兴趣对应的数据缓冲池,数据缓冲池用来保存最近转发的数据。

如果在数据缓冲池中存在与接收到的数据匹配的副本,说明已经转发过这个数据,为避免出现传输环路而丢弃这个数据;否则,检查该兴趣表项中的邻居结点信息。

如果设置的邻居结点数据发送速率大于等于接收的数据速率,则全部转发接收的数据;如果记录的邻居结点数据发送速率小于接收的数据速率,则按照比例转发。对于转发的数据,数据缓冲池保留一个副本,并记录转发时间。

3. 路径加强阶段

定向扩散路由机制通过正向加强机制来建立优化路径,并根据网络拓扑的变化来修改数据转发的梯度关系。兴趣扩散阶段是为了建立源结点到汇聚结点的数据传输路径,数据源结点以较低速率来采集和发送数据,称这个阶段建立的梯度为探测梯度。

汇聚结点在收到从源结点发来的数据后,启动建立到源结点的加强路径,后续数据将沿着加强路径、以较高的数据速率进行传输。我们将加强后的梯度称为数据梯度。

假设以数据传输延迟作为路径加强的标准,汇聚结点选择首先发来最新数据的邻居结点作为加强路径的下一跳结点,向该邻居结点发送路径加强消息。路径加强消息中包含新设定的较高发送数据速率值。邻居结点收到消息后,经过分析确定该消息描述的是一个已有的兴趣,只是增加了数据发送速率,则断定这是一条路径加强消息,从而更新相应兴趣表项的到邻居结点的发送数据速率。同时,按照同样的规则选择加强路径的下一跳邻居结点。

路径加强的标准不是唯一的,可以选择在一定时间内发送数据最多的结点作为路径加强的下一跳结点,也可以选择数据传输最稳定的结点作为路径加强的下一跳结点。位于加强路径上的结点如果发现下一跳结点的发送数据速率明显减小,或者收到来自其他结点的新位置估计,推断加强路径的下一跳结点失效,就需要使用上述的路径加强机制重新确定下一跳结点。

综上所述,定向扩散路由是一种经典的以数据为中心的路由协议。汇聚结点根据不同应用需求定义不同的任务类型、目标区域等参数的兴趣消息,通过网络中广播兴趣消息启动路由建立过程。中间传感器结点通过兴趣表建立从数据源到汇聚结点的数据传输梯度,自动形成数据传输的多条路径。按照路径优化的标准,定向扩散路由使用路径加强机制生成一条优化的数据传输路径。为了动态适应结点失效、拓扑变化等情况,定向扩散路由周期性进行兴趣扩散、数据传播和路径加强三个阶段的操作。

当然,定向扩散路由在路由建立时需要一个兴趣扩散的洪泛传播,在能量和时间方面开销较大,尤其是当底层 MAC 协议采用休眠机制时,有时可能造成兴趣建立的不一致,因而在网络设计时需要注意避免这些问题。

思考题

- (1) 目前无线传感器网络的通信传输介质有哪些类型? 它们各有什么特点?
- (2) 无线网络通信系统为什么要进行调制和解调? 调制有哪些方法?

- (3) 在设计传感器网络的物理层时,需要着重考虑哪些问题?
- (4) 试描述无线传感器网络的物理层帧结构。
- (5) 当前传感器网络的无线通信主要选择哪些频段?
- (6) 根据信道使用方式的不同,传感器网络的 MAC 协议可以分为哪几种类型?
- (7) 设计基于竞争的 MAC 协议的基本思想是什么?
- (8) 试写(画)出 CSMA/CA 的基本访问机制,并说明随机退避时间的计算方法。
- (9) IEEE 802.11 MAC 协议有哪两种访问控制方式? 每种方式是如何工作的?
- (10) 通常有哪些原因导致传感器网络产生无效能耗?
- (11) 叙述无线传感器网络 S-MAC 协议的主要特点和实现机制。
- (12) 简述路由选择的主要功能。
- (13) 无线传感器网络的路由协议具有哪些特点?
- (14) 常见的传感器网络路由协议有哪些类型? 并说明各种类型路由协议的主要特点。
- (15) 如何设计传感器网络的定向扩散路由协议?