

国际标准化组织(ISO)对开放系统互连(OSI)参考模型中的物理层作了以下定义:物理层是在物理传输介质之间为比特流传输所需物理连接而建立、维护和释放数据链路实体之间的数据传输的物理连接提供机械的、电气的、功能的和规程的特性。在无线传感器网络中,物理层是数据传输的最底层,向下直接与传输介质相连,物理层协议是各种网络设备进行互联时必须遵循的底层协议。本章主要介绍无线传感器网络物理层相关的无线通信基础理论及当前典型的短距离无线通信技术,涉及无线通信系统的基本概念、无线电波与无线信道、信号的调制解调、信道编码、扩频通信等问题。



视频

3.1 物理层概述

物理层是无线传感器网络(WSN)数据传输的最底层,主要负责传输介质、频段的选择,数据的调制和解调及数据的发送和接收,物理层的设计是决定 WSN 节点体积、成本、能耗以及 WSN 协议性能的关键因素。无线电传输是目前无线传感器网络采用的主流传输方式,在频段选择方面,ISM 频段属于非授权频段,没有特定的标准,使用方便灵活,因而备受青睐。与无线电传输相比,红外线、光波传输的调制、解调机制和接收机电路简单,且传输功耗小,不过它们难以穿透非透明物体,只能在特定场景的 WSN 系统中使用。如声波和超声波等其他频段的通信,主要应用在水下等特殊环境中。事实上,根据应用环境的不同,无线传感器网络可同时采用多种方式作为通信手段。

3.1.1 物理层特性

物理层是 TCP/IP 网络模型的而第一层(最底层),是整个通信系统的基础,正如高速公路和街道是汽车通行的基础一样。物理层为设备之间的数据通信提供传输介质及互联设备,为数据传输提供可靠的环境。

物理层的首要功能是为数据端设备提供传送数据的通路,其次是传输数据。要完成这两个功能,物理层规定了如何建立、维护和拆除物理链路。

在图 3-1-1 所示的计算机网络模型中,物理层规定了信号如何发送、如何接收、什么样的信号代表什么含义,应该使用什么样的传输介质和什么样的接口等。

信号的传输离不开传输介质,而传输介质两端必然有接口用于发送和接收信号。因此,规定各种传输介质和接口与传输信号相关的一些特性也是物理层的主要任务之一。

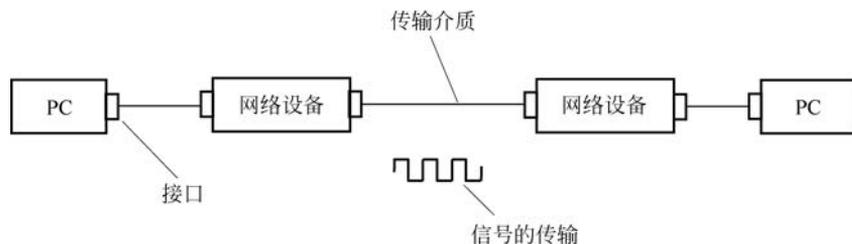


图 3-1-1 计算机网络模型

(1) 机械特性。机械特性也叫物理特性,指通信实体间硬件连接接口的机械特点,如接口所用接线器的形状和尺寸、引线数目和排列、固定和锁定装置等。这很像平时常见的各种规格的电源插头,其尺寸有严格的规定。

(2) 电气特性。电气特性规定了在物理连接上,导线的电气连接及有关电路的特性,一般包括接收器和发送器电路特性的说明、信号的识别、最大传输速率的说明、与互连电缆相关的规则、发送器的输出阻抗、接收器的输入阻抗等电气参数等。

(3) 功能特性。功能特性指物理接口各条信号线的用途,包括接口线功能的规定方法、接口信号线的功能分类(分为数据信号线、控制信号线、定时信号线和接地线4类)。

(4) 规程特性。规程特性指利用接口传输比特流的全过程及各项用于传输的事件发生的合法顺序,包括事件的执行顺序和数据传输方式,即在物理连接建立、维持和交换信息时,DTE/DCE 双方在各自电路上的动作序列。

(5) 链路特性。无线传感器网络性能的优劣和无线信道的好坏是密不可分的。与传统的有线信道不同,无线网络接收器与发射器之间信号的传播路径是随机的,而且是非常复杂、难以分析的,数据包在传输过程中会遇到路径损耗、噪声干扰、多径效应、邻居节点干扰等情况,从而造成数据包的丢失。

1. 路径损耗

在无线传感器网络中,发送节点发送的信号在传播过程中能量并不是恒定的,而是随着距离的增大而衰减,这个过程称为路径损耗。典型的能耗衰减与距离的关系为

$$E = k \times d^n \quad (3-1-1)$$

式中, k 为常量, n 的取值范围为 $2 < n < 4$,其大小一般与多个因素有关,如信号的载频或传播的环境等。如果传感器节点散播在离地面很近的区域时,则会受到很多障碍物的干扰,此时就需要增大 n 的值。此外,无线发射天线的选择也会对信号产生一定影响。经常使用的路径损耗模型有自由空间传播模型、地面双向反射模型、对数距离路径损耗模型以及其他模型。

2. 多径效应

多径效应是指由无线信道中的多径传输现象所引起的干涉延时效应。无线信号在传输的过程中,经过周围物体或地面的反射后,会通过多条不同的路径到达接收端,接收端收到的信号是多个信号叠加在一起的,这些信号由于传输路径的不同、延迟的不同以及路径损耗的不同,它们的相位和幅度也就不同。这些信号混合在一起,会引起信号的衰落。就点对点通信链路来讲,多径效应会导致无线链路上数据包的损坏或丢失。

多径效应与信号所处的环境紧密相关,在无线传感器网络中,节点位置发生变化或环境的变化都会改变信号的接收强度。不仅是动态网络中存在多径效应,而且在静态网络中,由于环境的影响,多径效应仍然存在。

3. 噪声干扰

在无线信号的传输过程中,接收端收到的不仅仅是包含信息的有用信号,还可能收到不含任何信息的无用信号,这些无用信号称为噪声。噪声的来源可能是自然界(俗称自然噪声),也可能是人为干扰(俗称人为噪声),还有可能是来自芯片内部的热噪声。

接收端正确收到信号的前提是到达接收端信号的信噪比要高于所设定的信噪比阈值,当功率设为定值时,接收端信噪比会随着噪声功率的增大而降低,信号校验的准确性会降低,数据包丢失的概率也会增大。

4. 邻居节点干扰

在无线传感器网络的实际应用中,节点部署的密度通常都很大,当网络中某个节点对数据进行发送时,其他节点也有可能在同频率上进行数据的传输,在这种情况下,信号就会产生叠加,将这种不同于噪声干扰的现象称为邻居节点干扰。由于无线电信号采用的编码方式基本相同,所以这种干扰对信号的准确性会产生很大的影响。为了避免上述干扰,研究者们根据无线传感器网络的协议特点提出了载波侦听多路访问机制(Carrier Sense Multiple Access, CSMA)。它是一种介质访问控制协议,目的是使网络中的节点都能够独立地接收和发送数据。当一个节点准备发送数据时,首先要进行载波侦听来确定当前信道是否空闲,只有信道空闲时,才能进行数据的传输,这种控制协议原理比较简单,实现起来比较容易,可以有效地降低节点间的干扰。

5. 链路的非对称性

在无线传感器网络中,由于节点所处的环境和性能基本相同,因此往往会认为链路是对称的。但事实上并非如此,图 3-1-2 所示是一个点对点的链路示意图,这里可以用包接收率来量化链路特性, P_1 代表节点 A 向节点 B 发送数据时,节点 B 的包接收率; P_2 代表节点 B 向节点 A 发送数据时,节点 A 的包接收率。一般来说,当 $|P_1 - P_2| \geq 0.25$ 时,就会认为这两个链路之间是非对称性的。此外,多径效应也可能会使链路之间的衰减存在差异。

链路的非对称性不仅会对上层协议的性能造成很大的影响,而且会使整个网络的通信变得很不可靠,大大降低了网络的性能。

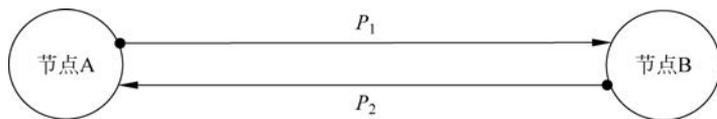


图 3-1-2 无线链路传播示意图

3.1.2 物理层设计要求

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。物理层设计的一些非常重要的问题如下:

- (1) 低功耗问题。

- (2) 低发射功率和小传播范围。
- (3) 低占空系数问题。
- (4) 相对较低的数据率(一般来说每秒几十或几百 kb)。
- (5) 较低的实现复杂度和较低的成本。
- (6) 较小的移动程度。

无线传感器网络的物理层设计面临以下挑战:

1. 成本

低成本是无线传感器网络节点设计的基本要求。只有低成本,才能将节点大量地布置到目标区域内,表现出无线传感器网络的各种优点。物理层的设计直接影响到整个网络的硬件成本。节点最大限度地集成化设计、减少分立元件是降低成本的主要手段。

随着 CMOS 工艺技术的发展,数字单元基本已完全可以基于 CMOS 工艺实现,并且体积也越来越小;但是模拟部分,尤其是射频单元的集成化设计仍需占用很大的芯片面积,所以靠近天线的数字化射频收发机的研究是降低当前通信前端电路成本的主要途径。

2. 功耗

无线传感器网络推荐使用免许可证频段 ISM。在物理层技术选择方面,环境的信号传播特性、物理层技术的能耗是设计的关键问题。传感器网络的典型信道属于近地面信道,其传播损耗因子较大,且天线高度距离地面越近,其损耗因子就越大,这是物理层设计的不利因素。然而无线传感器网络的某些内在特征也有利于设计的方面,如高密度部署的无线传感器网络具有分集特性,可以用来克服阴影效应和路径损耗。

3.2 无线电波与无线信道

3.2.1 无线电波的传播特性

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、红外波、毫米波和光波等,其中无线电波在无线网络中使用最广泛。

目前,无线传感网络的通信传输介质主要是无线电波和红外线,其特点如下:

(1) 无线电波容易产生,可以传播很远,可以穿过建筑物,因而广泛用于室内外无线通信。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地对准。

(2) 红外通信的优点是无须注册,并且抗干扰能力强。其缺点是穿透能力差,要求发送者和接收者之间存在视距关系。这导致了红外线难以成为无线传感器网络的主流传输介质,而只能用在一些特殊场合。

电波传播方式有如下 4 种:

(1) 直射传播。在自由空间中,电波沿直线传播而不被吸收,也不发生反射、折射和散射等现象而直接到达接收点的传播方式。

(2) 反射(reflection)。当电磁波遇到比波长大得多的物体时发生反射,反射发生于地球表面、建筑物和墙壁表面。

(3) 散射(scattering)。当波穿行的介质中存在小于波长的物体,并且单位体积内阻挡

体的个数巨大时,发生散射。散射波产生于粗糙表面、小物体或其他不规则物体。

(4) 绕射(diffraction)。当接收机和发射机之间的无线传播被尖锐的边缘阻挡时,发生绕射。

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,但电波能量随着与信号源距离 r 的增大而急剧减小,大致为 $1/r^3$ 。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。

频率的选择是影响无线传感器网络性能、成本的一个重要参数。考虑到无线传感器网络低成本的要求,“工业、科学和医疗”(Industrial, Scientific and Medical, ISM)波段无疑是首要的选择。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。其缺点是功率受限,与现有无线通信应用存在相互干扰问题。尽管传感器网络可以通过其他方式实现通信,如各种电磁波(如射频和红外)、声波,但无线电波仍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。

ISM 波段在高频和特高频的频率范围上都有分布,但信号在不同的频度上传播特性、功率消耗以及对器件性能和天线要求却是有很大区别,如表 3-2-1 所示。例如,在 ISM 13.5MHz,如果采用 $\lambda/4$ 对偶天线,天线长度为 5.6m,显然要求这么长的天线很不适合小体积的无线传感器网络节点,对于 ISM2.4GHz,其采用 $\lambda/4$ 对偶天线,天线长度为 3.1cm,高的频率就可以将节点做得很小,也有利于天线的 MEMS 集成。但是从功耗的角度分析会发现,在传输相同的有效距离时,载波频率越高消耗能量越多,这是因为高频率载波对频率合成器的要求也就越高,在射频前端发射机中频率合成器可以说是其主要的功耗模块,并且根据自由空间无线传输损耗理论可知,波长越短其传输损耗越大,也就意味着高频率需要更大的发射功率来保证一定的传输距离。

表 3-2-1 ISM 波段一些频率及说明

频 段	说 明
13.553~15.567MHz	电感耦合,RFID 使用
26.957~27.283MHz	电感耦合,在特别应用中采用
40.66~40.70MHz	用于遥测和遥控,不适用 RFID
433~464MHz	反射散射耦合,少量 RFID 使用
902~928MHz	反射散射耦合,已有多个应用系统(中国铁路)
2.4~2.5GHz	反射散射耦合,多个系统采用
5.725~5.875GHz	反射散射耦合,少量 RFID 使用
24~24.25GHz	用于移动信号传感器,也用于传输数据的无线电定向系统,没有射频识别系统工作

另外,从节点的物理层集成化的角度来考虑,虽然当前的 CMOS 工艺已经成为主流,但是对大电感的集成化还是一个非常大的挑战,随着深亚微米工艺的进展,更高的频率更易于电感的集成化设计,这对于未来节点的完全 SoC 设计是有利的,所以频段的选择是一个非常慎重的问题。由于无线传感器网络是一种面向应用的网络,所以针对不同的实际应用,综

合成本、功耗、体积的条件下进行一个最优选择。美国联邦通信委员会(FCC)给出了2.4GHz是当前工艺条件下,将功耗需求、成本、体积等折中较好的一个频段,并且是全球的ISM波段,但是这个频段也是现阶段不同应用设备可能造成相互干扰最严重的频段,因为蓝牙、WLAN、微波炉设备、无线电话等都采用该频段的频率。

目前,很多研究机构设计的无线传感器网络节点物理层基本上都是在现有的器件工艺水平上展开的,基本上采用结构简单的幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)以及最小频移键控(MSK)调制方式,在频段的选择上都集中在433~464MHz、902~928MHz及2.4~2.5GHz的ISM波段。

提高数据传输速率可以减少数据收发时间,对于节能有一定的好处,但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,但比特能耗越小越好。

3.2.2 无线信道的传播模型

信道是信号传输的通道。通信信道包括有线信道和无线信道。有线信道包括同轴电缆、光纤等。无线信道是无线通信发送端和接收端之间通路的形象说法,它以电磁波的形式在空间传播。无线传感器网络物理层主要采用无线信道。

3.2.2.1 自由空间信道

无线电波在自由空间的传播称为自由空间传播,其模型的特点是均匀无损耗的无限大空间、各向同性、电导率为0,相对介电常数和相对磁导率为1。无线电波在自由空间不存在电波的反射、折射、绕射、色散和吸收等现象,电波的传播速率等于真空中的光速 C 。

电波在传播过程中的衰减称为传播损耗,自由空间传播损耗的本质:球面波在传播过程中,随着传播距离增大,球面单位面积上的能量减小了。接收天线的有效截面积一定,故接收天线所捕获的信号功率减小。自由空间信道是一种理想的无线信道,它是无阻挡、无衰落、非时变的自由空间传播信道,如图3-2-1所示。

自由空间信道模型,假定A点是信号的发射源,B点是接收机, d 是发射源与接收机之间的距离,信号发射源的天线辐射功率为 P_t 。在距离发射源A点 d 处的接收机B点的空间上任意点(相当于面积为 $4\pi d^2$ 的球面的单位面积)的发射功率密度为 P_0 :

$$P_0 = \frac{P_t}{4\pi d^2} (\text{W/m}^2) \quad (3-2-1)$$

式中, $P_t/P_0 = 4\pi d^2$,称为传播因子。

在实际无线通信系统中,真正的全向性天线是不存在的,实际天线都带有方向性,一般用天线的增益 G 来表示。如发射天线在某方向的增益为 G_1 ,则在该方向的功率密度增加 G_1 倍。在图3-2-1中,相距A点 d 处单位面积接收功率可表示为 $\frac{P_t G_1}{4\pi d^2} (\text{W/m}^2)$ 。

对于接收天线,增益可以理解为天线接收定向电波功率的能力,接收天线的增益 G_2 与有效面积 A_e 和工作的电磁波长 λ 有关,接收天线增益与天线有效面积 A_e 的关系为

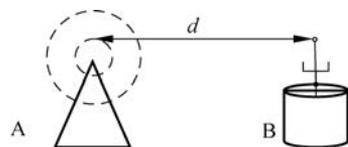


图 3-2-1 自由空间信道模型

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_2}{4\pi} \quad (3-2-2)$$

则与发射机相距 d 的接收机接收到的信号载波功率为

$$P_r = \frac{P_t G_1 A_e}{4\pi d^2} (\text{W}) \quad (3-2-3)$$

将式(3-2-1)代入式(3-2-3)得

$$P_r = \frac{P_t G_1 \lambda^2 G_2}{4\pi d^2 \cdot 4\pi} = \frac{P_t G_1 G_2}{(4\pi d/\lambda)^2} (\text{W}) \quad (3-2-4)$$

令 $L_{fs} = (4\pi d/\lambda)^2$, 则式(3-2-4)变形为

$$P_r = \frac{P_t G_1 G_2}{L_{fs}} (\text{W}) \quad (3-2-5)$$

这就是著名的 Friis 传输公式,它表明了接收天线的接收功率和发射天线的发射功率之间的关系。其中, L_{fs} 称为自由空间传播损耗,只与 λ 和 d 有关。考虑到电磁波在空间传播时,空间并不是理想的,例如气候因素的影响。假设由气候影响带来的损耗为 L_a ,此时接收天线的接收功率可以表示为

$$P_r = \frac{P_t G_1 G_2}{L_a L_{fs}} (\text{W}) \quad (3-2-6)$$

收、发天线之间的损耗 L 可以表示为

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{L_a L_{fs}}{G_1 G_2} \quad (3-2-7)$$

3.2.2.2 多径信道

多径传播是指无线电波在传播时,通过两个以上不同长度的路径到达接收点,接收天线信号是不同路径的电磁强度之和,如图 3-2-2 所示。

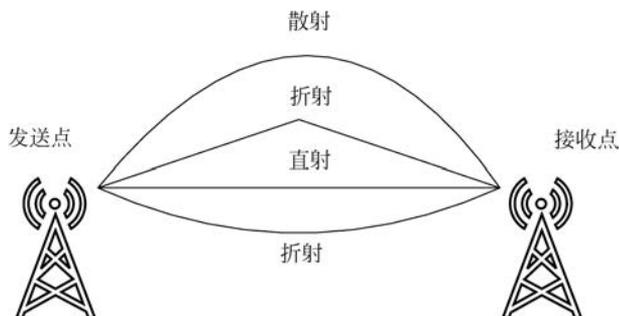


图 3-2-2 多径传输示意图

在无线通信领域,多径是指无线电信号传输过程中会遇到障碍物的阻挡,从发射天线经过几个路径抵达接收天线的传播现象(这种现象多出现在分米波、厘米波和毫米波段),例如楼房或者高大的建筑物、山丘等,对电波产生反射、折射或者衍射等,如图 3-2-3 所示。

对于无线传感器网络来说,其通信大都是短距离、低功耗传输,且一般离地面较近,所以对于一般的场景(如走廊),可以认为它主要存在 3 种路径,即障碍物的反射、直射以及地面反射。

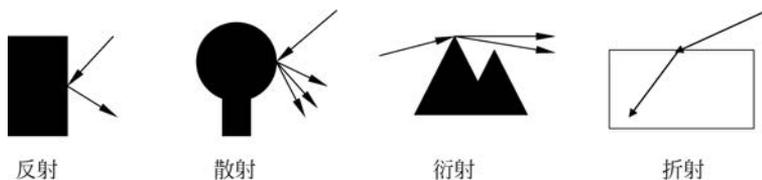


图 3-2-3 造成多径传播的原因

因为多径传播的不同路径到达的电磁波射线相位不一致,引起信号在信道中传输时变形,导致接收信号呈衰落状态,使信号产生误码,所以在设计无线传感器网络物理层时要考虑信号的多径衰落。

3.2.2.3 加性噪声信道

加性噪声一般指热噪声(导体中自由电子的热运动)、散弹噪声(真空管中电子的起伏发射和半导体中载流子的起伏变化),它们与信号之间的关系是相加的,不管有没有信号,噪声都存在。加性噪声独立于有用信号,但始终干扰有用信号,不可避免地对无线通信信道造成影响。

信道中的加性噪声一般来源于以下 3 方面:

(1) 人为噪声。人类活动造成的其他信号源,例如,外台信号、开关接触噪声、工业的点火辐射即荧光灯干扰等。

(2) 自然噪声。自然界存在的各种电磁波源,例如,闪电、大气中的电暴、银河系噪声及其他各种宇宙噪声等。

(3) 内部噪声。系统设备本身产生的各种噪声,例如,在电阻类的导体中自由电子的热运动和散弹噪声及电源噪声等。

最简单的加性噪声信道数学模型如图 3-2-4 所示。这是目前通信系统分析和设计中主要应用的信道模型,其中 $s(t)$ 为传输信号, $n(t)$ 为噪声, a 为信道中的衰减因子,接收到的信号为

$$r(t) = as(t) + n(t) \quad (3-2-8)$$

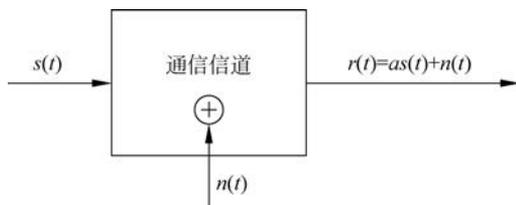


图 3-2-4 加性噪声信道数学模型

3.2.2.4 实际环境信道

实际环境中的无线信道往往比较复杂,除了自由空间损耗还伴有多径、障碍物的阻挡引起的衰落。考虑到 Friis 方程主要针对远距离理想无线通信网络、ZigBee 等短距离通信,工程上往往采用改进的 Friis 方程来表示实际接收到的信号强度,即

$$P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)^2 \left(\frac{d_0}{d} \right)^n G_1 G_2 \quad (3-2-9)$$

式中, d_0 为参考距离, 短距离通信般取 1m; n 的取值与传输环境有关。

对于较为复杂的环境还需要进行精确的测试才能获得准确的信道模型。研究者通过实际测量获得了 4 种不同环境与距离的路径损耗变化, 即在 $1\text{m} \leq d < 10\text{m}$ 时 n 取 2, 在 $10\text{m} \leq d < 20\text{m}$ 时 n 取 3, 在 $20\text{m} \leq d < 40\text{m}$ 时 n 取 6, 在 $d \geq 40\text{m}$ 时 n 取 12。

$$L = L_{fs} + \begin{cases} 20\lg d, & 1\text{m} \leq d < 10\text{m} \\ 20 + 30\lg \frac{d}{10}, & 10\text{m} \leq d < 20\text{m} \\ 29 + 60\lg \frac{d}{20}, & 20\text{m} \leq d < 40\text{m} \\ 47 + 120\lg \frac{d}{40}, & d \geq 40\text{m} \end{cases} \quad (3-2-10)$$



视频

3.3 物理层主要技术

编码调制技术影响占用频率带宽、通信速率、收/发机结构、功率等技术参数。常见的编码调制技术包括窄带调制技术[如幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)]和各种扩频调制技术[如跳频(FHSS)、直接序列扩频(DSSS)等]及无载波的超宽带 UWB 调制技术。扩频通信的工作原理是在发送端将传送的信息用伪随机码调制, 实现频谱扩展后再传输; 接收端则采用相同的编码进行解调及相关处理, 恢复原始信息数据。与传统的窄带通信方式相比, 扩频通信具有抗干扰、抗噪声、功率频谱低、保密性、隐蔽性和低截获概率等特点; 超宽带 UWB 调制技术是一种无须载波的调制技术, 其超低功耗和易于集成的特点较适合短距离通信的 WSN 应用。但是 UWB 需要较长的捕获时间, 即需要较长的前导码, 这将降低信号的隐蔽性, 所以需要 MAC 层更好地协作。

3.3.1 信号调制与解调

因为是无线网络, 传输介质自然要选电磁波。不过, 源信号要依靠电磁波传输必须通过调制技术变成高频信号, 当抵达接收端时, 再通过解调技术还原成原始信号。调制与解调是为了能够在可容忍的天线长度内实现远距离的无线信息传输。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。它们的区别在于调制信号所用的基带信号的模式不同(一个为模拟, 一个为数字)。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。

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频率非常高的带通信号, 以便进行信道传输。通常将带通信号称为已调信号, 而基带信号称为调制信号。调制与解调是通过射频前端的调制解调器实现的。

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主流的调制

技术。

3.3.1.1 模拟调制

模拟调制作用的实质是把各种信号的频谱搬移,使它们互不重叠地占据不同的频率范围,即信号分别依托于不同频率的载波,接收机可以分离出所需频率的信号,避免互相干扰。

模拟调制的目的是:

- (1) 信道传输频率特征的需要。
- (2) 实现信道复用。
- (3) 改善系统的抗噪声性能,或通过调制来提高系统频带的利用率。

采用不同的调制技术对系统性能将产生很大的影响。

以一个简单的正弦波 $S(t)$ 为例:

$$S(t) = A(t) \sin[2\pi f(t) + Q(t)] \quad (3-3-1)$$

式中,正弦波 $S(t)$ 为载波,基于正弦波的调制技术即对其参数幅度 $A(t)$ 、频率 $f(t)$ 和相位 $Q(t)$ 进行相应的调整,分别对应调制方式的幅度调制(Amplitude Modulation, AM)、频率调制(Frequency Modulation, FM)和相位调制(Phase Modulation, PM)。它们的已调波也就分别称为调幅波、调频波和调相波,如图 3-3-1 所示。由于模拟调制自身的功耗较大且抗干扰能力及灵活性差,正在逐步被数字调制技术替代。但是当前模拟调制技术在上下变频处理中起着无可代替的作用。

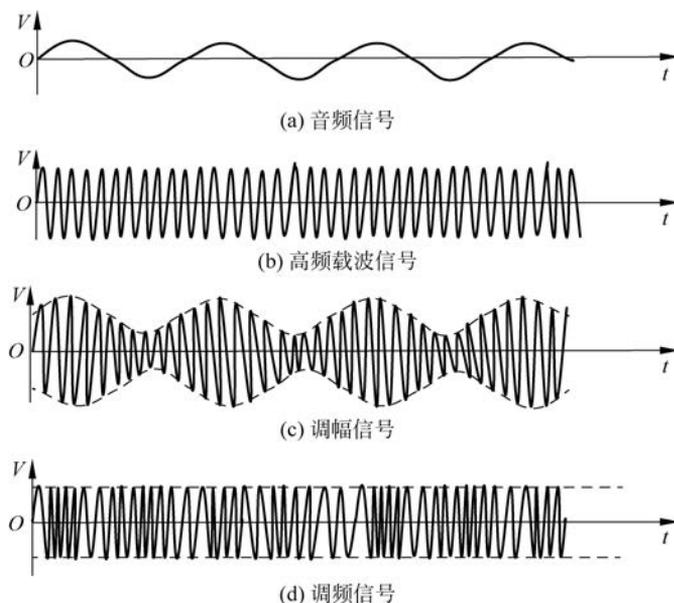


图 3-3-1 模拟信号调制图

3.3.1.2 数字调制

数字调制就是将数字信号变成适合信道传输的波形,调制信号为数字基带信号。调制的方法主要是通过改变幅度相位或者频率来传送信息。用数字信号来进行调幅、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)。每种类型又有很多不同的具体形

式,如基于 ASK 变形的正交载波调制技术、单边带技术、残留边带技术和部分响应技术等,基于 FSK 的 CPFSK(连续相位)与 NCPFSK(非连续相位调制)以及基于 PSK 的多相 PSK 调制等。

调制的基本原理是用数字信号对载波的不同参量进行调制,即

$$S(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (3-3-2)$$

载波 $S(t)$ 的参量包括幅度 A 、频率 ω 和初相位 φ ,调制就是要使 A 、 ω 或 φ 随数字基带信号的变化而变化。其中,ASK 调制方式是用载波的两个不同振幅表示 0 和 1;FSK 调制方式是用载波的两个不同频率表示 0 和 1;PSK 调制方式是用载波的起始相位变化表示 0 和 1。如图 3-3-2 所示为二进制数字信号的调制图。

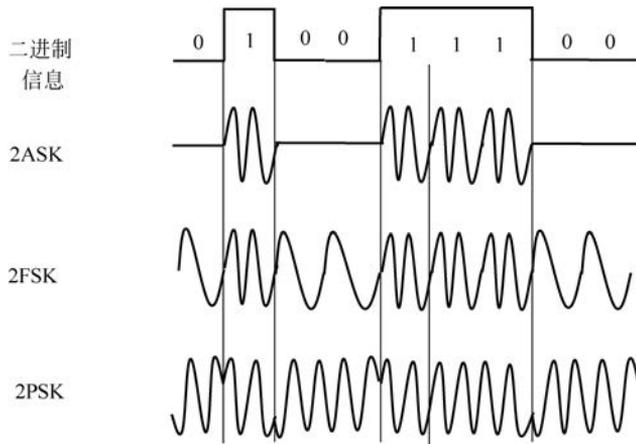


图 3-3-2 二进制数字信号调制图

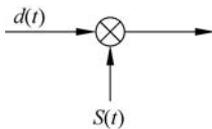


图 3-3-3 ASK 调制电路结构图

1. ASK 调制

ASK 调制电路结构图如图 3-3-3 所示,其中 $S(t)$ 为载波, $d(t)$ 为数字信号。这种调制方式优点是结构简单、易于实现、对带宽的要求低。其缺点是抗干扰能力差。

ASK 的调制波形即为载波 $S(t)$ 与数字信号 $d(t)$ 的乘积,其调制波形图如图 3-3-4 所示。

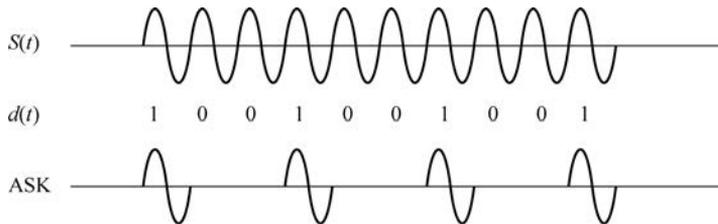


图 3-3-4 ASK 调制波形图

2. FSK 调制

FSK 是信息传输中使用较早的一种调制方式。它的主要优点是实现起来较容易,抗噪声与抗衰减的性能比较好,因此在中低速数据传输中得到了广泛的应用。其相比于 ASK

需要更大的带宽。

FSK 是利用两个不同 F_1 和 F_2 的振荡源(即载波 F_1 和载波 F_2)来实现频率调制,具体实现如下:

$$e_o(t) = \sum a_n g(t - nT_s) \cdot \cos\omega_1 t + \sum a_n g(t - nT_s) \cdot \cos\omega_2 t \quad (3-3-3)$$

式中, $F_1 = \sum a_n g(t - nT_s) \cdot \cos\omega_1 t$, $F_2 = \sum a_n g(t - nT_s) \cdot \cos\omega_2 t$ 。

以 2FSK(二进制 FSK)调制为例,用数字信号的 1 和 0 分别控制两个独立的振部源交替输出。2FSK 信号的产生原理框图如图 3-3-5 所示,其调制波形图如图 3-3-6 所示,其中 $d(t)$ 为数字信号。

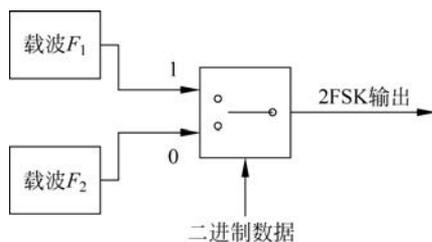


图 3-3-5 2FSK 信号产生原理框图

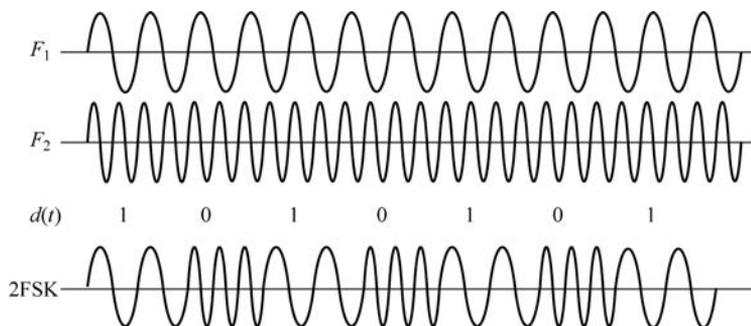


图 3-3-6 2FSK 调制波形图

3. PSK 调制

PSK 相移键控调制技术(调相技术)在数据传输中,尤其是在中速和中高速(2400~4800b/s)的数传机中得到了广泛的应用。相移键控有很好的抗干扰性,在有衰落的信道中也能获得很好的效果。

在 PSK 调制时,载波的相位随调制信号状态的不同而改变。如果两个频率相同的载波同时开始振荡,这两个频率同时达到正最大值、零值和负最大值,此时它们处于“同相”状态;如果一个达到正最大值时,另一个达到负最大值,则称为“反相”。一般把 360° 作为信号振荡的一个周期。如果一个波和另一个波在同一时刻相比相差半个周期,此时两个波的相位差为 180° ,即反相。当传输数字信号时,0 控制发同相相位,1 控制发反相相位。以 2PSK(二进制 PSK)调制为例,载波相位只有 0 和 π 两种取值,分别对应调制信号的 0 和 1。传送信号 1 时,发起始相位为 m 的载波;当传送信号 0 时,发起始相位为 0 的载波。2PSK 的调制原理如图 3-3-7 所示,调制波形图如图 3-3-8 所示,其中 $d(t)$ 为数字信号。

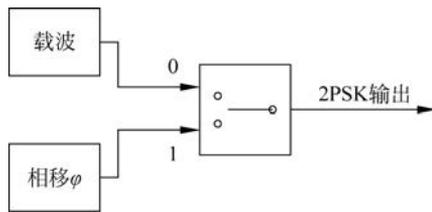


图 3-3-7 2PSK 的调制原理

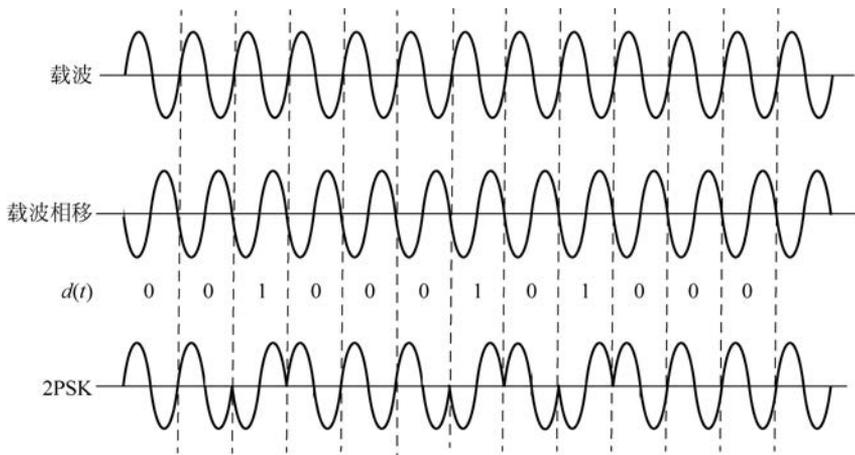


图 3-3-8 2PSK 调制波形图

3 种调制解调方式性能的比较如表 3-3-1 所示,表中的数据表示不同标准下的技术评级,1 代表最差,5 代表最好。

表 3-3-1 调制性能比较

分 类	窄 带	扩 频	UWB
成本	3	4	3
功耗	2	5	4
低传输范围和低速率	3	5	4
抗干扰能力	1	5	4
抗背景噪声能力	2	5	2
同步难易度	3	2	2
频谱利用率	2	4	5
多播能力	1	3	4

3.3.2 信道编码

使用信道编码器的主要目的是产生一个数据序列,这个数据序列必须对噪声具有很强的鲁棒性,并提供错误检测和前向纠错机制。对于简单和廉价的收发器来说,前向纠错机制是昂贵的,因此,信道编码仅提供错误检测机制。

物理信道限制了信号传输量和速率,如图 3-3-9 所示。

根据香农定理,一个信道的无差错传输能力定义为

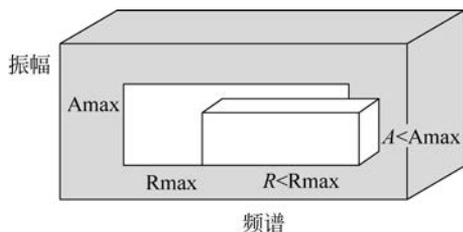


图 3-3-9 物理信道对信号传输量和速率的限制

$$C = B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (3-3-4)$$

其中, C 是信道容量(以每秒的比特数表示), B 是信道带宽(赫兹), S 是整个带宽上的平均信号功率(以瓦特表示), N 是整个带宽上的平均噪声功率(以瓦特表示)。

式(3-3-4)说明,如果要保证发送的数据没有错误,其传输速率不能超出信道容量的可承受范围,这也表明了信噪比(SNR)是如何提高信道的容量的。式(3-3-4)还揭示了在传输过程中为什么会出现差错的两个不相关的原因:

(1) 如果信号的传输速率超出信道容量的可承受范围,那么信息将会丢失。这样的错误在信息论里被称为疑义度(equivocation),它具有负偏差的特点。

(2) 如果信号掺杂了很多不相关的噪声,信息将会丢失。

一个随机的信道模型有助于量化这两种误差源的影响。

假设一个输入序列 x_l , 有 j 个不同的值, 即 $x_l \in X(x_1, x_2, \dots, x_j)$, 在物理信道进行传输。令 $P(x_l)$ 表示 $P(X=x_l)$, 这个信道的输出可以解码为由 k 个值组成的 $y_m \in Y(y_1, y_2, \dots, y_k)$ 。令 $P(y_m)$ 表示 $P(Y=y_m)$ 。在 t_i 时刻, 信道由输入信号 x_i 产生输出 y_i 。

假设信道传输的数据失真, 可以把这个失真过程(传输概率)模型化为一个随机过程:

$$P(y_m | x_l) = P(Y=y_m | X=x_l) \quad (3-3-5)$$

这里, $l=1, 2, \dots, j$; $m=1, 2, \dots, k$ 。

在下面对信道随机过程特性的分析中, 假设以下条件成立:

- 信道是离散的, 即 X 和 Y 是一组有限的符号集。
- 信道是固定的, 即 $P(y_m | x_l)$ 独立于时间 t_i 。
- 信道是无记忆的, 即 $P(y_m | x_l)$ 与先前的输入输出数据相互独立。

一种描述传输失真的方法是使用信道矩阵 P_C , 即

$$P_C = \begin{pmatrix} P(y_1 | x_1) & P(y_2 | x_1) & \cdots & P(y_k | x_1) \\ P(y_1 | x_2) & P(y_2 | x_2) & \cdots & P(y_k | x_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P(y_1 | x_j) & P(y_2 | x_j) & \cdots & P(y_k | x_j) \end{pmatrix} \quad (3-3-6)$$

这里, 有

$$\sum_{m=1}^k P(y_m | x_j) = 1, \quad \forall j \quad (3-3-7)$$

从而得

$$P(y_m) = \sum_{l=1}^j P(y_m | x_l) \cdot P(x_l) \quad (3-3-8)$$

3.3.2.1 信道类型

1. 二元对称信道

二元对称信道(BSC)是一种能够传输二进制位(0和1)的信道。这个信道能够以概率 p 正确地传输一个比特信息(不管传送的是0还是1),传输错误的概率则是 $1-p$ (即把1变成了0,0变成了1)。图3-3-10描述了这个信道模型。

差错与无差错传输的条件概率分别表示成:

$$P(y_0 | x_0) = P(y_1 | x_1) = 1 - p \quad (3-3-9)$$

$$P(y_1 | x_0) = P(y_0 | x_1) = p \quad (3-3-10)$$

因此,二元对称信道的信道矩阵可表示成:

$$P_{\text{BSC}} = \begin{pmatrix} 1-p & p \\ p & 1-p \end{pmatrix} \quad (3-3-11)$$

2. 二元删除信道

在一个二元删除信道(BEC)中,无法保证传输的比特流都能被接收到(无论有否差错)。因此这种信道被描述为二元输入和三元输出信道。信息丢失的概率是 p ,无差错接收的概率是 $1-p$,在删除信道中产生错误的概率是0,图3-3-11显示了一个二元删除信道。

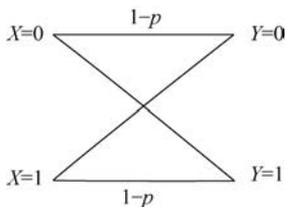


图 3-3-10 二元对称信道模型

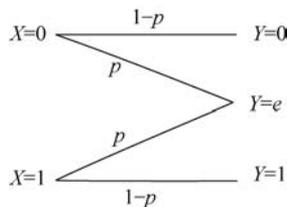


图 3-3-11 二元删除信道模型

二元删除信道的信道矩阵可表示如下:

$$P_{\text{BEC}} = \begin{pmatrix} 1-p & p & 0 \\ 0 & p & 1-p \end{pmatrix} \quad (3-3-12)$$

式(3-3-12)说明一个比特的信息或者以 $P(1|1) = P(0|0) = 1-p$ 的概率成功传输,或者以概率 p 在信道中丢失。传输1时收到0的概率是0;反之亦然。

3.3.2.2 信道内的信息传输

给定输入信息 $X: (X, \xrightarrow{P_x}, H(x))$ 、信道矩阵 P_C 和输出信息 $Y: (Y, \xrightarrow{P_y}, H(Y))$ 则可以描述不相关度和疑义度的影响以及信息在信道中无差错传输的百分比,它被称为信息传输量或者互信息。

1. 不相关性(Irrelevance)

由于噪声干扰而引入信道中传输的信息内容被定义为条件信息内涵 $I(y|x)$ 。如果 x 已知,则可以求出 y 的信息内容。这个条件即为

$$H(y|x) = E_y [I(y|x)] = \sum_{y \in Y} P(y|x) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P(y|x)} \right) \quad (3-3-13)$$

其中, $P(y|x)$ 可以从信道矩阵 \mathbf{P}_C 中得出。对于所有输入信号 $x \in X$, 得到平均条件熵为:

$$H(Y|X) = E_x[H(Y|x)] = \sum_{x \in X} P(x) \cdot \sum_{y \in Y} P(y|x) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P(y|x)} \right) \quad (3-3-14)$$

式(3-3-14)等价于

$$H(Y|X) = E_x[H(Y|x)] = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(y|x) \cdot P(x) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P(y|x)} \right) \quad (3-3-15)$$

由贝叶斯公式, 化简得到

$$p(x, y) = P(y|x) \cdot P(x) \quad (3-3-16)$$

从式(3-3-15)可以看出, 一个好的信道编码器应该能够减少不相关熵。

2. 疑义度(Equivocation)

由于信道固有的限制, 信息内容可能会丢失。信息内容可以通过在输出 y 已知的情况下观察输入 x 来得到:

$$H(Y|X) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x|y) \cdot P(x) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P(x|y)} \right) \quad (3-3-17)$$

再次使用贝叶斯条件概率公式, 可得

$$p(x, y) = \frac{P(y|x) \cdot P(x)}{P(y)} = \frac{P(y|x) \cdot P(x)}{\sum_{x \in X} P(y|x) \cdot P(x)} \quad (3-3-18)$$

式(3-3-18)的条件概率也称为推理概率或者后验概率。因此, 疑义度有时也称作估计熵。一个好的信道编码方案应具有较高的估计概率, 这可以通过在道编码过程中引入冗余来实现。

3. 信息传输量(Transformation)

信息传输量 $I(X; Y)$ 定义为在克服信道的限制下所能到达目的地的信息传输量。给定信息源的熵 $H(X)$ 和疑义度 $H(X|Y)$, 信息传输量表示为:

$$I(X; Y) = H(X) - H(X|Y) \quad (3-3-19)$$

对式(3-3-17)进一步展开得

$$\sum_{x \in X} P(x) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P(x)} \right) - \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} P(x|y) \cdot \log_2 \left(\frac{1}{P(x|y)} \right) \quad (3-3-20)$$

整理得

$$H(Y) - H(Y|X) = I(Y; X) \quad (3-3-21)$$

不相关性、疑义度和信息传输量的关系见图 3-3-12。

4. 检错和纠错

除了提高信道的信息传输量外, 识别和纠正在传输过程中的错误信息也是非常重要的。通过发送特殊类型的字符可以识别出错误。如果一个信道解码器识别到了未知码字, 它就会纠错或者请求发送器重发, 称为自动重传请求 ARQ。理论上, 一个解码器只能纠正 m 个错误 (m 取决于码字的大小)。前向纠错可以通过发送 n 位的信息和 r 位的控制信息来完成。但是, 前向纠错会降低信息的传输速度。

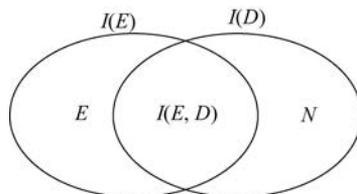


图 3-3-12 不相关性、疑义度和信息传输量

3.3.3 扩频通信

信号仅经过调制是不行的,还需要进行扩频。扩频就是将待传输数据进行频谱扩展的技术,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。扩频通信是将待传送的信息数据经伪随机编码扩频处理后,再将频谱扩展了的宽带信号在信道上进行传输;接收端则采用相同的编码序列进行解调及相关处理,恢复出原始信息数据。典型的扩频收发机结构如图 3-3-13 所示。

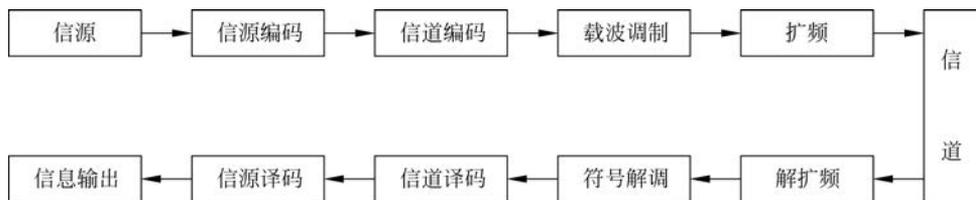


图 3-3-13 扩频收发机结构图

扩频通信的理论基础是从信息论和抗干扰理论的基本公式中引申而来的,如信息论中的香农公式见式(3-3-4)。在给定的传输速率 C 不变的条件下,频带宽度 B 和信噪比(SNR)是可以互换的,即通过增加频带宽度的方法,在较低的信噪比 SNR 下传输信息。

扩频通信相比于窄带通信方式,主要特点包括以下两点:

- (1) 信息的频谱在扩展后形成宽带进行传输。
- (2) 信息的频谱经过相关处理后恢复成窄带信息数据。

由于这两大特点,使扩频通信具有以下优点:抗干扰、抗噪声、抗多径干扰、保密性好、功率谱密度低、具有隐藏性和低的截获概率、可多址复用和任意选址以及易于高精度测量等。

按照扩展频谱的方式不同,现有的扩频通信系统可以分为以下几类,直接序列扩频和跳频扩频是使用最广的两种方式。

(1) 直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)工作方式,简称直扩(DS)方式。

(2) 跳变频率(Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS)工作方式,简称跳频(FH)方式。

(3) 跳变时间(Time Hopping Spread Spectrum, THSS)工作方式,简称跳时(TH)方式。

(4) 宽带线性调频(Chirp Modulation Spread Spectrum, Chirp-SS)工作方式,简称 Chirp 方式。

(5) 混合方式,即在几种基本扩频方式的基础上组合起来构成各种混合方式,如 DS/FH、DS/TH、DS/FH/TH。

扩频技术的优点在于易于重复使用频率,提高了无线频谱利用率;抗干扰性强;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;适合数字语音和数据传输,以及开展多种通信业务;安装简便,易于维护。

3.4 天线

天线是发送和接收电磁波的通信组件,是一种能量转换器(transducer)。天线是双向的:发送时,发射机产生的高频振荡能量,经过发射天线变为带有能量的电磁波,并向预定方向辐射,通过介质传播到达接收天线;接收时,接收天线将接收到的电磁波能量变为高频振荡能量送入接收机,完成无线电波传输的全过程。天线系统的发送和接收过程如图 3-4-1 所示。天线作为数据出入无线设备的通道,在传感器网络的通信过程中起着重要作用,天线及其相关电路往往也是影响整个节点能否高度集成的重要因素。

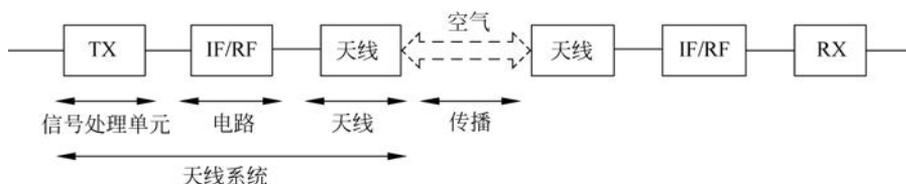


图 3-4-1 天线系统的发送和接收过程

天线的性能会对通信设备的无线通信能力、组网模式等产生重要的影响。一般来说,传感器网络对天线有以下要求:

- (1) 对于尺寸有一定的限制,并要符合极化要求;
- (2) 实现输入阻抗匹配要求,及信道频带宽度要求;
- (3) 优化传输性能和辐射效率,实现节能、高效;
- (4) 满足低成本、可靠工作等要求。

天线是一种无源器件,本身并没有增加所辐射信号的能量,只是通过天线振子的组合改变其馈电方式。全向天线是将能量按照 360° 的水平辐射模式均匀辐射出去,便于安装和管理。定向天线是将能量集中到某一特定方向上,相应地在其他方向上减小能量强度,大大节省能量在无效方向上的损耗,适用于远距离定向通信。

一般情况下,传感器网络难以利用高增益的定向天线,因为定向天线需要特殊的对准而不易实施。传感器网络首选全向天线,使得节点在各个方向上进行有效的通信。传感器网络所用的天线在体积、能耗效率、成本方面有一定的限制。常用的线状天线包括单极(monopole)天线、偶极(dipole)天线、环形(loop)天线、鞭状(whip)天线、螺旋状(helix)天线等。其他常用的还有槽状(slot)天线、微带(microstrip)天线等。表 3-4-1 分析了 PCB 天线、线型天线、芯片天线等常用天线的特性。

表 3-4-1 近距离通信中常用天线及特性

天线类型		优势	劣势
PCB 天线		成本极低,适合 868MHz 以上频率,高频时尺寸小,有较多的标准化天线设计方案可供使用	低频时尺寸大,不适合 433MHz 以下频率
线型 天线	偶极天线	非常便宜,增益高	低频时尺寸大,不适合 433MHz 以下频率

续表

天线类型		优势	劣势
线型 天线	鞭状天线	性能好,易于采购标准的天线模块	成本高,很难适应许多应用
	环形天线	便宜,不易手动调整	增益差,窄带,工作频率难以调整
	平面螺旋天线	尺寸比鞭状天线小,工作频谱宽	难以设计馈电
	立体螺旋天线	定向性好,增益高	机械构造,体积大,容易受到附近的物体影响而导致失谐
微带天线		制造成本低,适于大量生产;重量轻、体积小、制面薄;易于实现双频工作	工作频带窄;损耗大,增益低;大多微带天线只在半空间辐射;端射性能差;功率容量低;低频时尺寸大,不适合 433MHz 以下频率;性能受 PCB 设计影响大
芯片天线/陶瓷天线		尺寸小;独立组件,不易受环境因素影响;易于采购标准的天线模块	成本稍高,性能一般;易受到 PCB 尺寸、厚度、形状等因素影响;低频时尺寸大,不适合低于 433MHz 的频率
槽状天线		设计简单,鲁棒	低频时尺寸大,不适合 433MHz 以下频率

上述天线均为单体(single-element)天线,若将多个相同的天线依特定距离置于一号线或一个平面上,即可形成线性天线阵列(linear antenna array)或平面天线阵列(planar antenna array)。智能天线是利用波束转换和自适应阵列方式将波束对准目标方向,并能按需调整波束宽度,实现系统资源的优化利用,获得较高的系统性能增益,将同样的数据发送到同样的距离,所需的发射功率要小得多。传感器网络中引入智能天线能够提高增益和信噪比,降低误码率,从而改善吞吐量、延迟和其他重要的无线网络性能参数,增加网络覆盖和容量,扩展传输距离。此外,使用智能天线可以显著减少节点的功率消耗,并因此增加网络的生命周期。

3.5 短距离无线通信技术

3.5.1 超宽带技术



视频

超宽带技术(Ultra Wide Band, UWB)是一种无载波通信技术,采用纳秒至皮秒级的脉冲进行通信,所占频谱非常宽,频段范围是 3.1~10.6GHz,并且传输时,该技术发射功率极低。虽然 UWB 技术的传输范围在 10m 内,但速度能达到每秒几百兆位至几吉位。UWB 技术最初用于军用雷达应用中,只在美国军方使用,现在该技术已被准许在民用领域使用。

超宽带无线通信技术是近年来备受青睐的短距离无线通信技术,是一种可实现短距离高速信息传输的技术,主要应用于无线 USB 和音频/视频传输。由于其具有高传输速率、非常高的时间和空间分辨率、低功耗、保密性好、低成本及易于集成等特点,被认为是未来短距离高速通信最具潜力的技术之一。

美国联邦通信委员会(FCC)对 UWB 的定义为:信号带宽大于 500Hz,或带宽与中心频率之比大于 25%的带宽为超宽带。信号带宽和中心频率之比表达式为

$$f_c = \frac{f_H - f_L}{\frac{f_H + f_L}{2}} = 2 \times \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (3-5-1)$$

式中, f_c 为带宽与中心频率之比, f_H 为系统最高频率, f_L 为系统最低频率。FCC 还规定, UWB 无线通信的频率范围是 3.1~10.6GHz。

UWB 的收发机与传统的无线收发机相比结构相对简单。UWB 发射机直接发送纳秒级脉冲来传输数据而不需要使用载波电路, 经调制后的数据与“伪随机码产生器”生成的伪随机码一起送入“可编程时延电路”, “可编程时延电路”产生的时延控制“脉冲信号发生器”的发送时刻。UWB 发射机框图如图 3-5-1 所示。

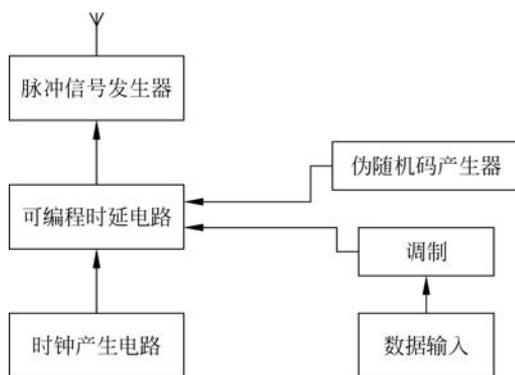


图 3-5-1 UWB 发射机框图

在接收端采用相关器进行接收, 如图 3-5-2 所示为 UWB 接收机框图, 其中虚线部分为相关器。相关器由乘法器、积分器和取样/保持 3 部分电路组成。

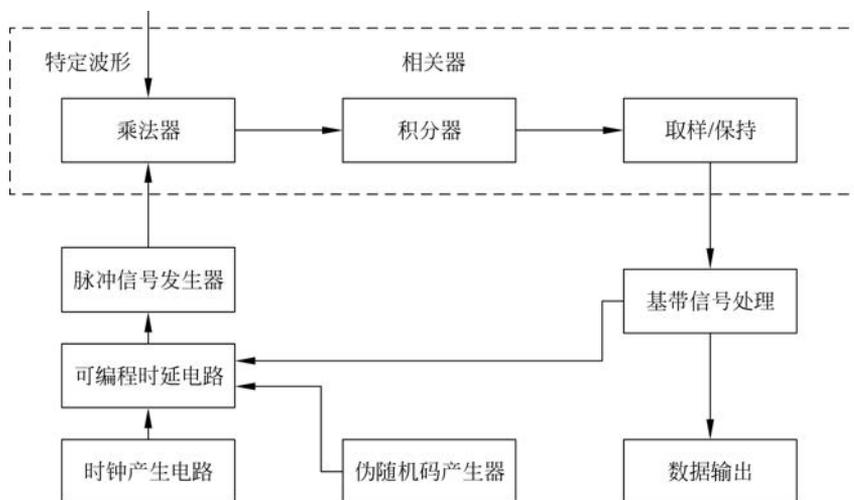


图 3-5-2 UWB 接收机框图

相关器用特定的模板波形与接收到的射频信号相乘, 再积分得到一个直流输出电压, 接收机的基带信号处理器从取样/保持电路中解调数据, 基带信号处理器的输出控制可编程时延电路, 为可编程时延电路提供定时跟踪信号, 保证相关器正确解调出数据。

与传统的窄带收发信机相比,UWB技术具有以下优点:

(1) 占有频带宽,传输速率高。UWB使用的带宽在1 GHz以上,数据传输率高,目前在10m范围内其传输速率可以达到420Mb/s。

(2) 保密性好。UWB保密性表现在两方面:一方面是采用跳时扩频,接收机只有已知发送端扩频码才能解出发射数据;另一方面是系统的发射功率谱密度极低,对于一般的通信系统,UWB信号相当于白噪声信号,用传统的接收机无法接收。

(3) 抗多径衰落。UWB每次发射的脉冲时间短,当发射波来时已经接收完毕,因此抗多径衰落能力较强。

(4) 无载波通信,功耗低,收发设备简单。采用纳秒级脉冲宽度的周期性非正弦高斯短脉冲信号传输信息,通信设备使用小于1 mW的发射功率就能实现通信,不需要上、下变频器,功率放大器和混频器,接收端无须中频处理,因此相对于传统的窄带信号来说简化了收发设备。



视频

3.5.2 ZigBee 技术

3.5.2.1 ZigBee 的基本概况

ZigBee一词源自蜜蜂群在发现花粉位置时,通过 ZigZag 形舞蹈来告知同伴,达到交换信息的目的,可以说这是一种小功物通过简捷的方式实现“无线”的沟通。ZigBee技术是一种面向自动化和无线控制的低速率、低功耗、低复杂度、低价格的无线网络方案。在 ZigBee 方案被提出一段时间后,IEEE 802.15.4 工作组也开始了一种低速率无线通信标准的制定工作。最终 ZigBee 联盟和 IEEE 802.15.4 工作组决定合作共同制定一种通信协议标准,该协议标准被命名为 ZigBee。

ZigBee 的通信速率要求低于蓝牙,并由电池供电为设备提供无线通信功能,同时希望在不更换电池并且不充电的情况下能正常工作几个月甚至几年。ZigBee 支持 Mesh 网络拓扑结构,网络规模可以比蓝牙设备大得多。ZigBee 无线设备工作在公共频段上(全球为 2.4GHz,美国为 915MHz,欧洲为 868MHz),传输距离为 10~75m,具体数值取决于射频环境以及特定应用条件下传输功耗。ZigBee 的通信速率在 2.4GHz 时为 250kb/s,在 915MHz 时为 40kb/s,在 868MHz 时为 20kb/s。

ZigBee 和 IEEE 802.15.4 两者之间的区别和联系如下:

- (1) ZigBee 完整、充分地利用了 IEEE 802.15.4 定义的功能强大的物理特性优点。
- (2) ZigBee 增加了逻辑网络和应用软件。
- (3) ZigBee 基于 IEEE 802.15.4 射频标准,同时 ZigBee 联盟通过与 IEEE 紧密工作来确保一个集成的、完整的市场解决方案。
- (4) IEEE 802.15.4 工作组主要负责制定物理层和 MAC 层标准,而 ZigBee 负责网络层、安全层以及应用层的开发。

ZigBee 和 IEEE 802.11b 的区别如表 3-5-1 所示。

表 3-5-1 ZigBee 和 IEEE 802.11b 的比较

	ZigBee	IEEE 802.11b
单点覆盖距离	50~300m	100~300m
传输速度	250kb/s	11Mb/s

续表

	ZigBee	IEEE 802.11b
编程难度	高	低
硬件复杂性	简单	复杂
频段	868MHz~2.4GHz	2.4GHz
成本	低	高
电池寿命	数年	数小时
网络节点数	65000	50

3.5.2.2 ZigBee的技术特点

ZigBee的底层技术基于IEEE 802.15.4,即其物理层和介质访问控制层直接使用了IEEE 802.15.4的定义。IEEE 802.15.4规范是一种经济、高效、低数据速率($<250\text{kb/s}$)、工作在2.4GHz与868MHz/915MHz的无线技术,用于个人区域网和对等网络,它是ZigBee应用层和网络层协议的基础。ZigBee技术的主要特点如下:

(1) 低功耗。节点在非工作模式时可休眠,模式切换延时短,且技术协议中对电池使用作了优化。在低功耗待机模式下,两节5号干电池可支持1个节点工作6~24个月,甚至更长,这是ZigBee的突出优势。

(2) 低成本。通过大幅简化协议(不到蓝牙的1/10),降低了对通信控制器的要求。按预测分析,以8051的8位微控制器测算,全功能的主节点需要32KB代码,子功能节点至少需要4KB代码,而且ZigBee免协议专利费。

(3) 低速率。ZigBee的工作速率为20~250kb/s,分别提供250kb/s(2.4GHz)、40kb/s(915MHz)和20kb/s(868MHz)的原始数据吞吐率,以满足低速率传输数据的应用需求。

(4) 近距离。传输范围一般介于10~100m,在增加发射功率后,亦可增加到1~3km。这指的是邻居节点间的距离。如果通过路由和多跳通信链路,传输距离将可以更远。

(5) 短时延。ZigBee的响应速度较快,一般从睡眠转入工作状态只需15ms,节点连接进入网络只需30ms,进一步节省了电能。

(6) 高容量。ZigBee可采用星状、片状和网状网络结构,由一个主节点管理若干子节点,一个主节点最多可管理254个子节点;同时主节点还可由上一层网络节点管理,最多可组成65000个节点的大网,非常适合大面积传感器网络的布建需求。

(7) 高安全性。ZigBee提供了三级安全模式:一是无安全设定;二是使用访问控制清单(Access Control List, ACL)防止非法获取数据;三是采用高级加密标准(AES 128)的对称密码,以灵活确定其安全属性。

(8) 自组织、自配置。协议中加入了关联和分离功能,协调器能自动建立网络,节点设备可随时加入和退出,是一种自组织、自配置的组网模式。

(9) 免执照频段。ZigBee使用工业科学医疗(ISM)频段,美国为915MHz,欧洲为868MHz,其他地区为2.4GHz。此3个频带物理层并不相同,其各自信道带宽也不同,分别为0.6MHz、2MHz和5MHz,且分别有1个、10个和16个信道。这3个频带的扩频和调制方式亦有区别,扩频都使用直接序列扩频(DSSS),但从比特到码片的变换差别较大。调制方式都采用调相技术,但868MHz和915MHz频段采用的是BPSK,而2.4GHz频段采用的是OQPSK。

3.5.2.3 ZigBee 的协议框架

相对于常见的无线通信标准,ZigBee 协议比较紧凑、简单,ZigBee 协议栈的体系结构主要由物理层、MAC 层、网络层和应用层组成,如图 3-5-3 所示。其中,物理层和 MAC 层采用 IEEE 802.15.4 协议标准,而网络层和应用层则由 ZigBee 国际联盟制定,各层之间均有数据服务接口和管理实体接口。下面对各层协议的功能进行简单的介绍。



图 3-5-3 ZigBee 协议框架

(1) 应用层定义了各种类型的应用业务,是协议栈的最上层用户。

(2) 应用汇聚层负责把不同的应用映射到 ZigBee 网络层上,包括安全与鉴权、多个业务数据流的汇聚、设备发现和业务发现。

(3) 网络层的功能包括拓扑管理、MAC 管理、路由管理和安全管理。

(4) 数据链路层又可分为逻辑链路控制子层(LLC)和介质访问控制子层(MAC)。IEEE 802.15.4 的 LLC 子层与 IEEE 802.2 的相同,其功能包括传输可靠性保障、数据包的分段与重组、数据包的顺序传输。IEEE 802.15.4 MAC 子层通过 SSCS(Service-Specific Convergence Sublayer)协议能支持多种 LLC 标准,其功能包括设备间无线链路的建立、维护和拆除,确认模式的帧传送与接收,信道接入控制、帧校验、预留时隙管理和广播信息管理。

(5) 物理层采用直接序列扩频技术,定义了 3 种频率等级。

3.5.2.4 ZigBee 的组网方式

数据传输的路径为动态路由,即网络中数据传输的路径并不是预先设定的,而是传输数据前通过对网络当时可利用的所有路径进行搜索,分析它们的位置关系以及远近,然后选择其中一条路径进行数据传输。在网络管理软件中,路径的选择使用的是“梯度法”,即先选择路径最近的一条通道进行传输,如传输不成功,再使用另外一条稍远一点的通路进行传输,以此类推,直到数据送达目的地为止。在实际工业现场,预先确定的传输路径随时都可能发生变化,或者因各种原因路径被中断了,或者过于繁忙不能进行及时传送。动态路由结合网状拓扑结构,可以很好地解决这个问题,从而保证数据的可靠传输。ZigBee 组网方式,包括星状网、网状网、簇状网 3 种组网方式,如图 3-5-4 所示。

1. ZigBee 网络设备的功能

ZigBee 技术采用的是自组织组网方式。在通信范围内,节点通过彼此自动寻找,很快就可以形成一个互联互通的 ZigBee 网络。另外,由于节点的移动,彼此间的联络还会发生变化。因而,节点还可以通过重新寻找通信对象,确定彼此间的联络,对原有网络进行刷新,重新构建新的 ZigBee 网络。在组网中有 3 种不同类型的设备,分别为协调器、路由器和终端节点。

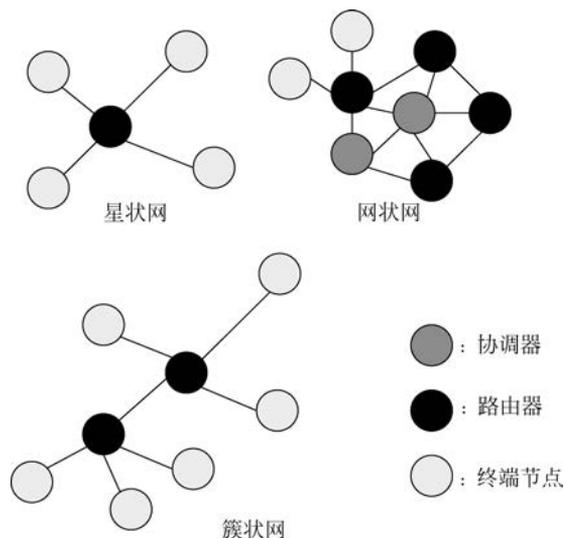


图 3-5-4 ZigBee 组网方式

(1) 协调器(Coordinator): 选择一个频道和 PAN ID(Personal Area Network,即个域网,每个个域网都有一个独立的 ID 号,称为 PAN ID)组建网络;允许路由和终端节点加入这个网络;对网络中的数据进行路由;通常是常电供电,一般不进入睡眠模式;可以为睡眠的终端节点保留数据,供它被唤醒后获取。

(2) 路由器(Router): 在进行数据收发之前,路由器必须首先加入一个 ZigBee 网络;加入网络后,允许路由和终端节点加入;它们加入网络后,可以对网络中的数据进行路由;路由器必须一直供电,不能进入睡眠模式;通常,可以为睡眠的终端节点保留数据,供它被唤醒后获取。

(3) 终端节点(End-Device): 在进行数据收发之前,必须首先加入一个 ZigBee 网络;不允许其他设备加入;必须通过其父节点收发数据,不能对网络中的数据进行路由;可由电池供电,可进入睡眠模式。

协调器在选择频道和 PAN ID 组建网络后,其功能相当于一个路由器。协调器或者路由器均允许其他设备加入网络,并为其路由数据。终端节点通过协调器或者某个路由器加入网络后,便成为其“子节点”,对应的路由器或者协调器即成为“父节点”。由于终端节点可以进入睡眠模式,其父节点便有义务为其保留其他节点发来的数据,直至其醒来并将此数据取走。

2. 寻址

PAN ID 就是指个域网 ID,或称作为网络编号,用于区分不同的 ZigBee 网络。协调器就是通过选择网络信道及 PAN ID 来启动一个无线网络的,网络建立后,PAN ID 作为网络的唯一标志,不能与其他网络相同。PAN ID 的有效范围为 $0\sim 0x3FFF$ 。

每个 ZigBee 设备有两种不同的地址类型:16 位短地址和 64 位 IEEE 地址。其中 64 位 IEEE 地址是全球唯一的地址,在设备的整个生命周期内都将保持不变,它由 IEEE 组织分配,在芯片出厂时已经写入芯片中,并且不能修改。而 16 位短地址是在设备加入一个 ZigBee 网络时分配的,它只在这个网络中唯一,用于网络内数据收发时的地址识别。但由于 16 位短地址有时并不稳定,网络结构会发生改变,所以在某些情况下必须以 64 位 IEEE

地址作为通信的目标地址,以保证数据送达。

最新的 ZigBee Pro 的协议栈中规定了地址分配方法:对于协调器来说,短地址始终为 0x0000,而其他设备的短地址是随机生成的。当一个设备加入网络之后,它从其父节点获取一个随机地址,然后向整个网络广播一个包含其短地址和 IEEE 地址的“设备声明”。如果另外一个设备收到此广播后,发现收到的地址与自己的地址相同,它将发出一个“地址冲突”的广播信息。有地址冲突的设备将全部重新更换地址,然后重复上述过程,直至整个网络中无地址冲突。

路由器短地址在其第一次上电时,由其父节点成功分配一次之后,保存在内部 Flash 中,以后无论如何开关机都将保持不变。用户可以选择一个协调器加 n 个路由器的方式来组成一个无“低功耗”需求的网络,进行“无线透传”等应用,简单地使用短地址即可保证数据送至正确的设备。

终端节点可实现 ZigBee 的“自组织”“自愈”功能。每次打开终端节点的电源,它将自动检查其附近的路由器/协调器与它连接的信号质量,并选择信号质量最好的路由为其父节点加入网络。在加入网络之后,它将周期性地发送数据请求,若其父节点没有对其请求进行响应,并且重试几次后仍无响应,则判定为父节点丢失,此时终端节点将重复上述过程,重新寻找父节点并加入网络。

3. 数据发送方式

ZigBee 模块的数据发送方式有单播和广播两种。

在单播方式下,数据由源设备发出,直接或者经过几级中转后发送至目的地址。加入 ZigBee 网络的所有设备之间都可以进行单播传输,可用 16 位短地址或者 64 位长地址进行寻址,具体路由关系由协调器或路由器进行维护、查询。

广播方式是由一个设备发送信息至整个 ZigBee 网络的所有设备,其目标短地址使用 0xFFFF,广播数据发送至所有设备,包括睡眠节点。另外,0xFFFD 与 0xFFFC 也可以作为广播地址。其中,0xFFFD 广播数据发送至正在睡眠的所有设备,0xFFFC 广播数据发送至所有协调器和路由器。

3.5.2.5 模块参数

一般地,ZigBee 模块包含了所有外围电路和完整协议栈,可以内置 Chip 或外置 SMA 天线,通信距离为 100~1200m,还包含了 ADC、DAC、比较器、多个 I/O、I²C 等接口,与用户的产品相对接。在软件上,ZigBee 模块包含了完整的 ZigBee 协议栈,以及在自己的 PC 上的配置工具,采用串口与用户产品进行通信,且可以对模块的发射功率、信道等网络拓扑参数进行配置。设计者不需要考虑模块中程序是如何运行的,用户只需要将自己的数据通过串口发送到模块里,然后模块会自动将数据用无线发送出去,并按照预先配置好的网络结构和网络中的目的地址节点进行收发通信,接收模块会进行数据校验,如数据无误即通过串口送出。大多数用户应用 ZigBee 技术都会有自己的数据处理方式,以致每个节点设备都会拥有自己的 CPU 以便对数据进行处理,所以仍可以把模块当成一种已经集成射频、协议和程序的“芯片”。

如图 3-5-5 所示为 CC2430 芯片的内部结构。天线接收的射频信号经过低噪声放大器处理后,中频信号只有 2MHz,此混合信号经过滤波、放大、A/D 变换、自动增益控制、数字解调和解扩,最终恢复出传输的正确数据。

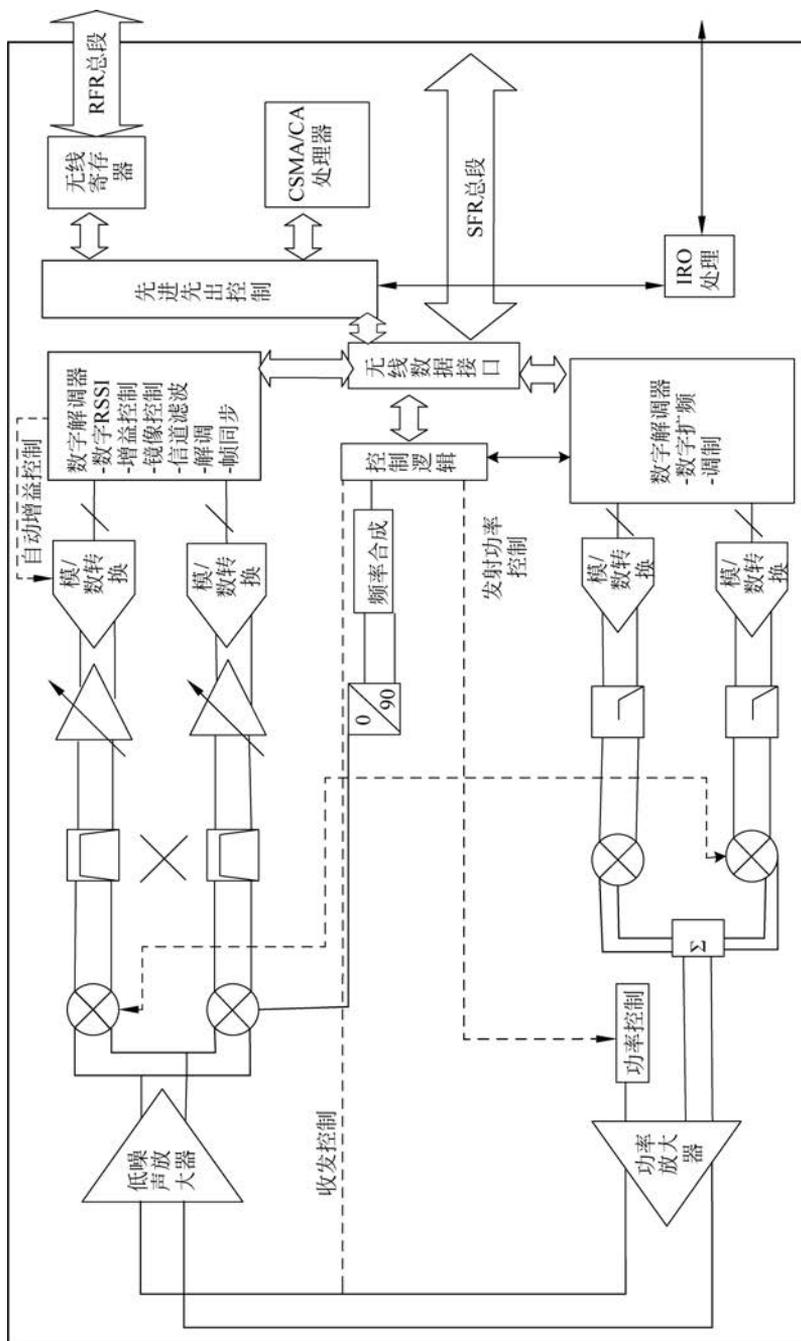


图 3-5-5 CC2430 芯片的内部结构

发射机部分采用直接上变频架构。要发送的数据先被送入 128 字节的发送缓存器中, 头帧和起始帧是通过硬件自动产生的。根据 IEEE 802.15.4 标准, 所要发送的数据流的每 4 个比特被 32 码片的扩频序列扩频后送到 D/A 变换器。然后, 经过低通滤波和上变频的混频后的射频信号最终被调制到 2.4GHz, 再经过放大后经发射天线发射出去。

3.5.3 蓝牙技术

3.5.3.1 蓝牙的基本概况

蓝牙(Bluetooth)技术是 1998 年由瑞典爱立信公司提出的一种全球性的短距离无线通信标准, 起初的目的是取代手机与其附件的一切电缆连接, 实现更方便的无线通信。蓝牙技术是一种典型的短距离无线通信技术, 传输的距离为 10m 左右, 工作于 2.4GHz 的 ISM 频段, 传输速率在最新的版本中可达到 10Mb/s。蓝牙支持点对点、点对多点的连接, 可方便灵活地实现安全可靠、快速的语音及数据业务的无线传输。但由于其通信范围和网络容量的限制, 一个蓝牙设备不能和超过 7 个蓝牙设备进行通信, 因此在很大程度上限制了蓝牙技术在无线传感器网络中的应用。

蓝牙技术是由一个叫作蓝牙特别兴趣小组(Special Interest Group, SIG)的组织来维护。该组织成立于 1998 年, 其成员包括爱立信、IBM、Intel、东芝和 Nokia 等国际通信巨头。在蓝牙通信中, 蓝牙设备有两种可能的角色, 分别为主设备和从设备, 同一个蓝牙设备可以在这两种角色之间转换。在任意时刻, 主设备可以向从设备中的任意一个发送信息, 也可以用广播方式实现同时向多个从设备发送信息。截至 2010 年 7 月, 蓝牙特别兴趣小组共推出 6 个版本(V. 1, V. 2, V2. 0, V2. 1, V3. 0, V4. 0), 根据通信距离不同可将每个版本再分为 Class A(1)/Class B(2)。蓝牙的通信距离也提高到 100m 以上, 通信速率达到 24Mb/s。广泛使用在移动设备(手机、PDA)、个人计算机与 GPS 设备、医疗设备以及无线外围设备等各种不同的领域, 计算机配套有蓝牙耳机、蓝牙鼠标、蓝牙键盘等, 如图 3-5-6 所示。



图 3-5-6 蓝牙技术的应用领域

但是, 蓝牙技术发展并不顺利, 仅在耳机、鼠标、车载语音系统等小范围内取得了成功。究其原因, 从市场来看, 主要有芯片价格高、模块小型化安装成本高、天线设计和组装困难、

全面测量难等问题；从技术上来看，蓝牙技术的建立连接时间长、功耗高、安全性不高等。正当蓝牙技术已经快要被人们遗忘的时候，智能手机的快速普及拯救了蓝牙技术，它已经是智能手机和平板计算机标准配置的功能。尤其是蓝牙 V4.0 的出现，蓝牙技术在功耗、安全性、连接性等方面有了巨大的提升。智能手机的外设和应用是未来的发展趋势，在运动、健身、健康和医疗领域存在着极为广阔的应用前景，而蓝牙技术作为连接手机和外设的标准，一定会有爆炸性的市场机会。

目前，智能手机外设是一个新的研究热点，如运动巨头 Nike 公司推出的 FuelBand 腕带、MIT 学生发明的 Amiigo 智能腕带等。以 Amiigo 为例，如图 3-5-7 所示，它可以记录和测量日常生活中的运动量（如跑步赶上公交车、从超市拎回大包小包等日常生活用品中随时随地获得的运动量），以此激励人们生活得更有活力。

智能腕带 Amiigo 测量的时间、卡路里、步数、体温等数据可以通过蓝牙技术传送到智能手机上。用户打开 iPhone 或者 Android 智能手机的 Amiigo 应用，便可以了解到自己的身体状况、运动量以及与目标的差距，用户还可以社区的形式与好友进行分享。



图 3-5-7 Amiigo 智能腕带

3.5.3.2 蓝牙 4.0 技术

蓝牙 4.0 技术是蓝牙发展史上一次重大的革新。

1. 相关规范

蓝牙 4.0 是蓝牙技术从诞生至今唯一的一个综合协议规范，它还提出了低功耗蓝牙、经典蓝牙和高速蓝牙 3 种模式。经典蓝牙和高速蓝牙都只是对旧有蓝牙版本的延续和强化，高速蓝牙主攻数据交换与传输；经典蓝牙则以信息沟通、设备连接为重点；低功耗蓝牙，以不需占用太多带宽的设备连接为主。这 3 种协议规范能够互相组合搭配，从而实现更广泛的应用模式。蓝牙 4.0 把蓝牙的传输距离提升到 100m 以上（低功耗模式条件下），而且通过单一的接口让应用系统自己挑选技术使用，而不是让消费者进行设备互联时还要手动选择各项设备的连接模式，这一人性化的功能显然沿袭了蓝牙关注可用性和实际体验的设计思路。表 3-5-2 给出了低功耗蓝牙与经典蓝牙在相关规范方面的区别。

表 3-5-2 低功耗蓝牙与经典蓝牙在相关规范方面的区别

技术规范	经典蓝牙	低功耗蓝牙
无线电频率/GHz	2.4	2.4
传输距离/m	10	≤100
空中数据速率/(Mb/s)	1~3	1
应用吞吐量/(Mb/s)	0.7~2.1	0.2
安全	64/128b 及自定义的应用层	128bit AES 及自定义的应用层
鲁棒性	自动适应快速跳频, FEC, ACK	自动适应快速跳频
发送数据的总时间/ms	100	<6
政府监管	全球	全球
认证机构	蓝牙技术联盟	蓝牙技术联盟

续表

技术规范	经典蓝牙	低功耗蓝牙
语音能力	有	没有
网络拓扑	分散网(Scatternet)	星状网
耗电量	100%(作为参考)	1%~50%(视使用情况)
运行的最大功耗	<30mA	≤15mA(最高运行为 15mA)
发现服务	有	有
主要用途	手机、游戏机、耳机、汽车和 PC 等	手机、游戏机、PC、手表、体育健身、医疗保健、汽车、家用电器

低功耗蓝牙的前身其实是 Nokia 开发的 Wibree 技术。该技术本是一项专为移动设备开发的极低功耗的移动无线通信技术,在被 SIG 接纳并规范化之后重新命名为(Bluetooth Low Energy 即低功耗蓝牙)。由于该技术专为极低电池量的装置而设计,仅通过普通纽扣电池供电便可确保正常使用长达一年,因此在包括医疗、工业控制、无线键盘、鼠标、单音耳机、无线遥控器等设备领域都得到了广泛应用。譬如装有计步器的运动鞋、装有脉搏量测的运动手环等,就可以通过低功耗蓝牙技术将监控信息传送到记录器(可能是手表或是 PDA)上,而不需像标准蓝牙设备一般需要常常充电。它易与其他蓝牙技术整合,既可补足蓝牙技术在无线个人区域网络(PAN)的应用,也能加强该技术为小型设备提供无线连接的能力。

2. 应用模式

如果说 Wibree 的超低功耗奠定了一个技术上的基础,蓝牙 4.0 便拓展成为一种全新的应用模式。因为低功耗蓝牙提供了持久的无线连接且有效扩大了相关应用产品的射程,在各种传感器和终端设备上采集到的信息通过低功耗蓝牙传送到计算机、手表、移动电话等具备计算和处理能力的主机设备中,再通过 GPRS、3G、经典/高速模式蓝牙或 WLAN 等传统无线网络应用与相应的 Web 服务关联,从而从根本上解决当前传统网络应用在模式上的局限性和交互手段匮乏、数据来源少、实时性差等问题。

根据 SIG 发布的蓝牙 4.0 核心规范白皮书,蓝牙 4.0 低功耗模式有双模式和单模式两种。单模式蓝牙的技术特点通过低功率无线电波传输数据,其本质是一种支持设备短距离通信(一般是 10m 之内)的无线电技术。其标准是 IEEE 802.15,工作在 2.402~2.480GHz 频率范围,基础带宽为 1Mb/s。与 Wi-Fi、WiMAX 等用于局域、城域的无线网络规范不同的是,Bluetooth 所定义的应用范围更小一些,它将应用锁定在一个以个人为单位的人域网(PAN)领域,也就是个人起居活动 10m 范围之内。该区域容纳了包括音频、互联网、移动通信、文件传输等在内的非常多样化的应用取向,加上强调自动化和易操作性,因此蓝牙在这一领域里很快得到了普及。因为低功耗蓝牙在应用模式上的革命性提升,对于将催生的应用模式完全无法进行预估,因此它将拓展出的应用市场绝不会是一个成熟的利基市场,而将是一片真正意义上的新领域。

3. 协议架构

因为蓝牙所用的频带仍处于应用繁多的 2.4GHz 无线电频率范围附近,为达到最大限度地避免设备间的相互干扰的目的,设计人员从蓝牙的实际应用出发,将信号功率设计得非常微弱,仅为手机信号的数千分之一,这样设备间的距离就只能保持在约 10m 范围内,从而避免了和移动电话、电视机等设备间的相互干扰。

统蓝牙功能组件,从而改善传统蓝牙设备的数据传输效能。如图 3-5-9 所示为蓝牙低功耗技术的双模式应用和整合情况,图 3-5-9(a)为蓝牙低功耗技术的双模式应用功能逻辑拓扑图,图 3-5-9(b)为通过整合原有蓝牙技术的射频降低了升级成本。



图 3-5-9 蓝牙低功耗技术的双模式应用和整合情况

4. 高速连接的实现

低功耗蓝牙省电的原因主要体现在待机功耗的减少、高速连接的实现和峰值功率的降低 3 个方面,与传统蓝牙技术采用 16~32 个频道进行广播相比,低功耗蓝牙仅使用了 3 个广播通道,且每次广播时射频的开启时间也由传统的 22.5ms 减少到 0.6~1.2ms,降低了由广播数据导致的待机功耗,此外,低功耗蓝牙用深度睡眠状态来替换传统蓝牙的空闲状态。在深度睡眠状态下,主机长时间处于超低的负载循环(Duty Cycle)状态,只在需要运作时由控制器来启动,因主机较控制器消耗更多的能源,因此这样的设计也节省了更多的能源。在深度睡眠状态下,协议针对此通信模式进行了优化,数据发送间隔时间也增加到 0.5~4s,传感器类应用程序发送的数据量较平常要少很多,而且所有连接均采用先进的嗅探性次额定功能模式,因此此时的射频能耗几乎可以忽略不计。

低功耗蓝牙高速连接的实现主要分成以下 5 个步骤:

- 第一步,通过扫描,试图发现新设备。
- 第二步,确认发现的设备没有处于锁定状况。
- 第三步,发送 IP 地址。
- 第四步,收到并解读待配对设备发送过来的数据。
- 第五步,建立并保存连接。

按照传统的蓝牙协议规范,若某一蓝牙设备正在进行广播,则它不会响应当前正在进行的设备扫描,而低功耗蓝牙协议规范则允许正在进行广播的设备连接到正在扫描的设备上,这就有效避免了重复扫描。而通过对连接机制的改善,低功耗蓝牙下的设备连接建立过程

已可控制在 3ms 内完成,同时能以应用程序迅速启动连接器,并以数毫秒的传输速度完成经认可的数据传递,并立即关闭连接。而传统蓝牙协议下即使只是建立链路层连接都需要 100ms,L2CAP(逻辑链路控制与适应协议)层的连接建立时间则更长。

低功耗蓝牙协议还对拓扑结构进行了优化,通过在每个从设备及每个数据包上使用 32 位的存取地址,能够让数十亿个设备同时连接,此技术不但将传统蓝牙一对一的连接进行了优化,同时也利用星状拓扑来完成一对多点的连接,在连接和断线切换频繁的应用场景下,数据能够在网状拓扑之间移动,但不至于为了维持此网络而显得过于复杂,这也有效减轻了连接复杂度,减少了连接建立的时间,降低了峰值功率。低功耗蓝牙对数据包长度进行了更加严格的定义,支持超短(8~27B)数据封包,并使用了随机射频参数,增加了 GSKF 调制索引,这些指数最大限度地减小了数据收发的复杂性。此外,低功耗蓝牙还通过增加调变指数,并采用 24 位的 CRC(循环冗余检查)确保封包在受干扰时具有更大的稳定度,低功耗蓝牙的射程增加至 100m 以上。以上措施结合蓝牙传统的跳频原理,有效降低了峰值功率。

3.5.3.3 蓝牙(Bluetooth)模块

蓝牙信号的收发采用蓝牙模块实现。蓝牙模块是一种集成了蓝牙功能的 PCBA 板,是指集成蓝牙功能的芯片基本电路集合,由芯片、PCB 板、外围器件构成。如表 3-5-3 所示为蓝牙模块的分类。对于最终用户而言,蓝牙模块是半成品,而蓝牙适配器是成品,蓝牙适配器(也称 dongle)为 USB Dongle,主要用于传输数据,也有串口 Dongle;针对特殊用户,还有语音 Dongle 等。

表 3-5-3 蓝牙模块的分类

分类方法	类型
标准	1.2、2.0、2.1、4.0、4.1
传输内容	数据蓝牙模块、语音蓝牙模块
芯片设计	BGA 封装外置 Flash 版本、QFN 封装外接 EEPROM 版本
芯片厂商	BroadCom 蓝牙模块、Dell 蓝牙模块、CSR 蓝牙模块
用途	数据蓝牙模块、串行蓝牙模块、语音蓝牙模块、车载蓝牙模块
功率	CLASS1、CLASS2、CLASS3

一般地,应用蓝牙模块设计时,协议包括软硬件、中间件的实现,如图 3-5-10 所示。硬件包含片内数字无线处理器(Digital Radio Processor,DRP)、数控振荡器、片内射频收发开关切换、内置 ARM 嵌入式处理器等。接收信号时,收发开关置为收状态,射频信号从天线接收后,经过蓝牙收发器直接传输到基带信号处理器。

基带信号处理包括下变频和采样,采用零中频结构。数字信号存储在 RAM(容量为 32KB)中,供 ARM 处理器调用和处理,ARM 将处理后的数据从编码接口输出到其他设备。信号发送过程是信号接收的逆过程。此外,硬件还包括时钟和电源管理模块以及多个通用 I/O 口,供不同的外设使用。主机接口可以提供双工的通用串口,可以方便地与 PC 的 RS-232 通信,也可以与 DSP 的缓冲串口通信。

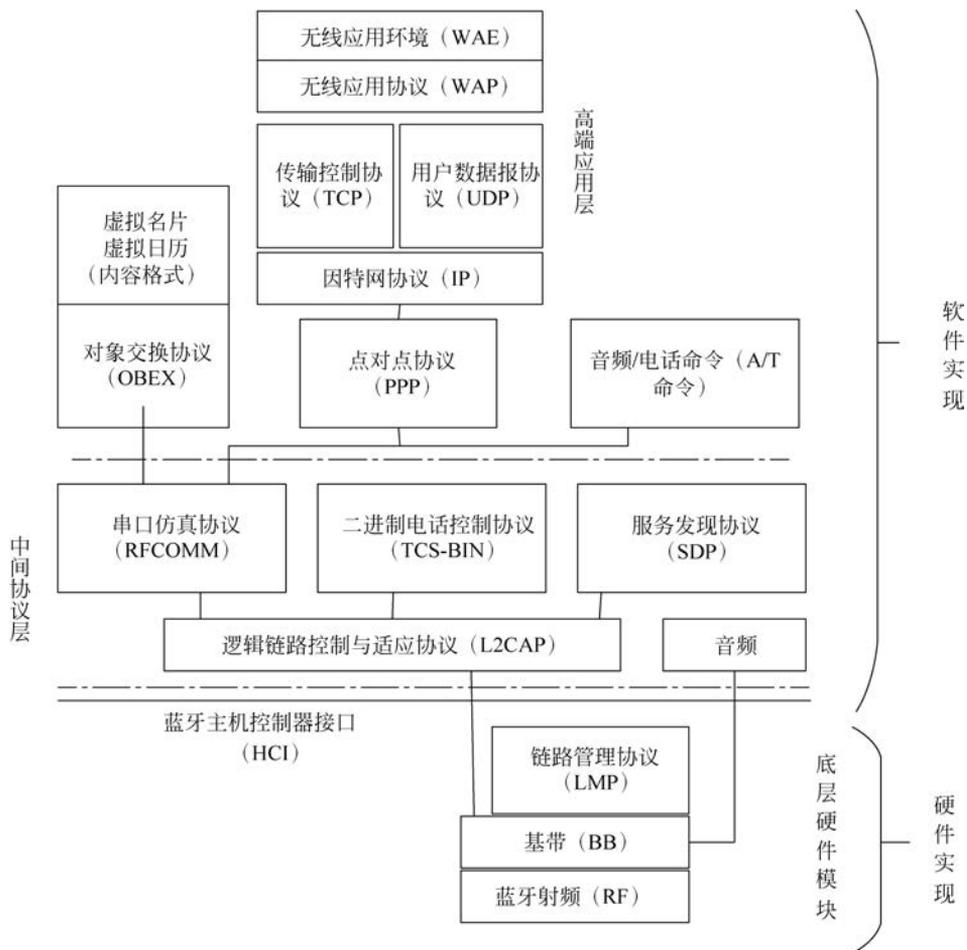


图 3-5-10 蓝牙模块设计时协议实现的内容

3.5.4 Wi-Fi 技术

Wi-Fi (Wireless Fidelity, 无线保真技术) 其实就是 IEEE 802.11b 的别称, 是无线局域网联盟的一个商标, 目的是改善基于 IEEE 802.11 协议的无线产品之间的互通性。因此, 现在基于 IEEE 802.11 协议的无线局域网统称为 Wi-Fi 网络。Wi-Fi 网络是以太网的一种无线扩展, 具有部署方便、构建快速和灵活的特点, 能够与现有的有线网络无缝连接, 不需要额外的接入设备。Wi-Fi 的工作频段在 ISM 2.4GHz 频带上。Wi-Fi 的主要特点是高速率, IEEE 802.11 标准从最初的 1Mb/s 和 2Mb/s 传输速率的技术发展到目前广泛使用的 IEEE 802.11g 协议, 其最大数据传输率为 54Mb/s。

IEEE 802.11 支持带宽的自动调节, 在信号不好或信道受到干扰的情况下, 网络带宽可在 11Mb/s、5.5Mb/s、2Mb/s 和 1Mb/s 间变化。通信距离远也是 Wi-Fi 的一大优势, 其通信距离在空旷的室外能达到 300m, 在室内也能达到 100m, 在监测区域能有效减少设备的使用, 降低成本。在 Wi-Fi 刚面市时, 价格比较贵, 不同制造商的设备兼容性差、安全性不理想, 使用不是十分广泛。但随着研究的不断深入, IEEE 802.11 协议更加完善, 硬件制造技

术更加成熟,这些问题逐步得到了解决。近年来,Wi-Fi 芯片广泛应用在 PDA、移动电话和其他便携式设备中。随着各国政府对无线基础设施的大力建设,在无线传感器网络中应用 Wi-Fi 技术已具备了相应的条件。

3.5.4.1 Wi-Fi 的基本概况

从 20 世纪 90 年代开始,个人计算机、手持设备(如 PDA、手机)等终端产品快速进入人们的生活,这促使了无线网络技术的诞生和发展。无线网络技术是由澳大利亚研究机构 CSIRO 在 20 世纪 90 年代发明,并于 1996 年在美国成功申请了无线网技术专利。其发明者为悉尼大学工程系毕业生 John O'Sullivan 领导的一群由悉尼大学工程系毕业生组成的研究小组。

3.5.4.2 技术特点

Wi-Fi 模块是基于 IEEE 802.11b 标准的无线局域网设备。Wi-Fi 已成为当今无线上网的主要方式。一般架设无线网络的基本配备就是无线网卡及一台“无线访问接入点(Access Point, AP)”或桥接器,如此便能以无线的模式利用既有的有线架构来分享网络资源。如果只是几台计算机构成的对等网,也可不要 AP,只需每台计算机配备无线网卡,得到授权后,无须增加端口,就可以以共享方式上网。Wi-Fi 模块的主要技术特点如下:

(1) 更宽的带宽。IEEE802.11n 标准将数据速率提高到千兆每秒或几千兆每秒,可以适应不同的功能和设备,收发装置支持 3 或 4 个数据流,发送和接收数据可以使用 2 或 3 个天线组合,数据速率可以分别达到 450Mb/s 和 600Mb/s。利用 600Mb/s 物理层数据速率,可以实现高速无线骨干网,将这些高端节点连接起来形成类似互联网的具有冗余能力的 Wi-Fi 网络。

(2) 更强的射频信号。IEEE 802.11n 标准规定了无线芯片的特殊性能,包括低密度奇偶校验码、提高纠错能力、发射波束形成、空间时分组编码等,这些物理层技术将使 Wi-Fi 功能更强大,在给定范围内数据传输速率更高,传输距离更长。

(3) 功耗更低。嵌入式无线数据通信技术的引入使 Wi-Fi 在功耗管理方面得到控制,设备带有一个 IP 软件堆栈,使之具备其他射频技术所没有的功能。

(4) 高安全性。IEEE 802.11w 标准规定了 Wi-Fi 无线管理帧,确定安全策略与用户关联,而不是与端口关联,切断和拒绝服务攻击、侵犯隐私、刺探等破坏性攻击的影响,使无线链路更安全地工作。

3.5.4.3 工作方式

Wi-Fi 模块为串口或 TTL 电平转 Wi-Fi 通信的一种传输转换产品,UART-Wi-Fi 模块是基于 UART 接口的符合 Wi-Fi 无线网络标准的嵌入式模块,内置无线网络协议 IEEE 802.11 协议栈以及 TCP/IP 协议栈,能够实现用户串口或 TTL 电平数据到无线网络之间的转换。

Wi-Fi 模块可分为以下 3 类:

(1) 通用 Wi-Fi 模块。例如手机、笔记本、平板电脑上的 USBorSDIO 接口模块,Wi-Fi 协议栈和驱动是在 Andriod、Windows、iOS 的系统里,需要非常强大的 CPU 来完成应用。

(2) 路由器 Wi-Fi 模块。典型的产品是家用路由器,其协议和驱动是借助于拥有强大 Flash 和 RAM 资源的芯片及 Linux 操作系统实现的。

(3) 嵌入式 Wi-Fi 模块。32 位单片机,内置 Wi-Fi 驱动和协议,接口为一般的 MCU 接

口(如 UART 等),适用于各类智能家居或智能硬件单品。现在很多厂家已经尝试将 Wi-Fi 模块加入电视、空调等设备中,以搭建无线家居智能系统,让家电厂家快速方便地实现自身产品的网络化、智能化,并与更多的其他电器实现互联互通。

如图 3-5-11 所示为 Wi-Fi 模块典型系统内部结构图。Wi-Fi 模块拓扑形式包括基于 AP 组建的基础无线网络(Infra 也称为基础网)和基于自组网的无线网络(Ad Hoc 也称为自组网)两种类型。基础网以 AP 为整个网络的中心,所有的通信都通过 AP 来转发完成。自组网是一种松散的结构,网络中所有的 STA(每一个连接到无线网络中的终端)都可以直接通信。

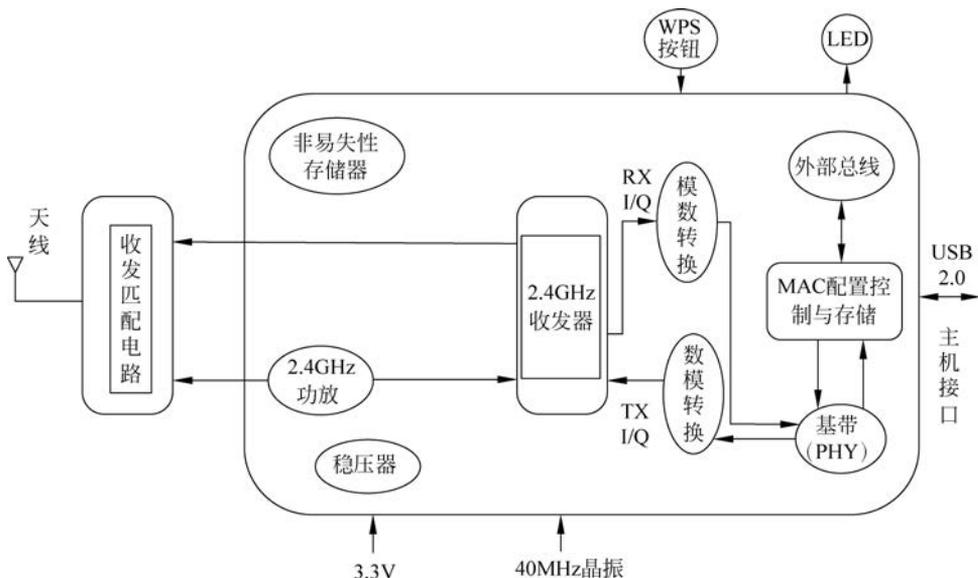


图 3-5-11 Wi-Fi 模块典型系统内部结构图

Wi-Fi 模块支持多种无线网络加密方式,能充分保证用户数据的安全传输。Wi-Fi 模块通过指定信道号的方式来进行快速联网。在联网过程中,首先对当前的所有信道自动进行一次扫描,以搜索准备连接的目的 AP 创建的(或 Ad Hoc)网络;其次设置工作信道的参数,在已知目的网络所在信道的条件下,直接指定模块的工作信道,从而达到加快联网速度的目的;最后,Wi-Fi 模块绑定目的网络地址,再通过无线漫游扩大一个无线网络的覆盖范围。

Wi-Fi 模块的工作方式有以下两类:

(1) 主动型串口设备联网。由设备主动发起连接,并与后台服务器进行数据交互(上传或下载)的方式。例如,典型的主动型设备中的无线 POS 机,在每次刷卡交易完成后即开始连接后台服务器,并上传交易数据。

(2) 被动型串口设备联网。在系统中所有设备一直处于被动地等待连接状态,仅由后台服务器主动发起与设备的连接,并进行请求或下载数据的方式。例如,在某些无线传感器网络中,每个传感器终端始终实时地在采集数据,但是采集到的数据并没有马上上传,而是暂时保存在设备中。而后台服务器则周期性地每隔一段时间主动连接设备,并请求上传或下载数据。

3.5.4.4 Wi-Fi 协议

无线局域网 Wi-Fi 可以通过一个或多个体积很小的接入点为一定区域内(家庭、校园、餐厅、机场等)的众多用户提供互联网访问服务。在 IEEE 为无线局域网制定 IEEE 802.11 规范之前,存在许多不同的无线局域网标准。多种不同标准的缺点是用户在 A 区域(如餐厅)上网需要在计算机上安装一种类型的网卡,当回到 B 区域(如办公室)时则需要为计算机更换另一种类型的网卡。除了浪费时间和增加硬件成本外,在不同协议覆盖重叠区域内,无线信号的干扰降低了网络访问的性能。因此,为了规范和统一无线局域网的行为,从 20 世纪 90 年代至今,IEEE 制定了一系列 802.11 协议。

不同的 IEEE 802.11 的差异主要体现在使用频段、调制模式、信道差分等物理层技术上,如表 3-5-4 所示。IEEE 802.11 中典型的使用频段有两个:一是 2.4~2.485GHz 公共频段,二是 5.1~5.8GHz 高频频段。由于 2.4~2.485GHz 是公共频段,微波炉、无绳电话和无线传感网也使用这个频段,因此信号噪声和干扰可能会稍大。5.1~5.8GHz 高频段主要受制于非视线传输和多径传播效应,一般用于室内环境中,其覆盖范围要稍小。不同的调制模式决定了不同的传输带宽,在噪声较高或无线连接较弱的环境中,可通过减小对每个信号区间内的信息量来保证无误传输。

表 3-5-4 无线局域网 Wi-Fi 的 IEEE 802.11 对比

IEEE 802.11	发布时间	频宽/GHz	最大传输速率/(Mb/s)	调制模式
IEEE 802.11—1997	1997 年 6 月	2.4~2.485	2	DSSS
IEEE 802.11a	1999 年 9 月	5.1~5.8	54	OFDM
IEEE 802.11b	1999 年 9 月	2.4~2.485	11	DSSS
IEEE 802.11g	2003 年 6 月	2.4~2.485	54	DSSS 或 OFDM
IEEE 802.11n	2009 年 10 月	2.4~2.485 或 5.1~5.8	100	OFDM

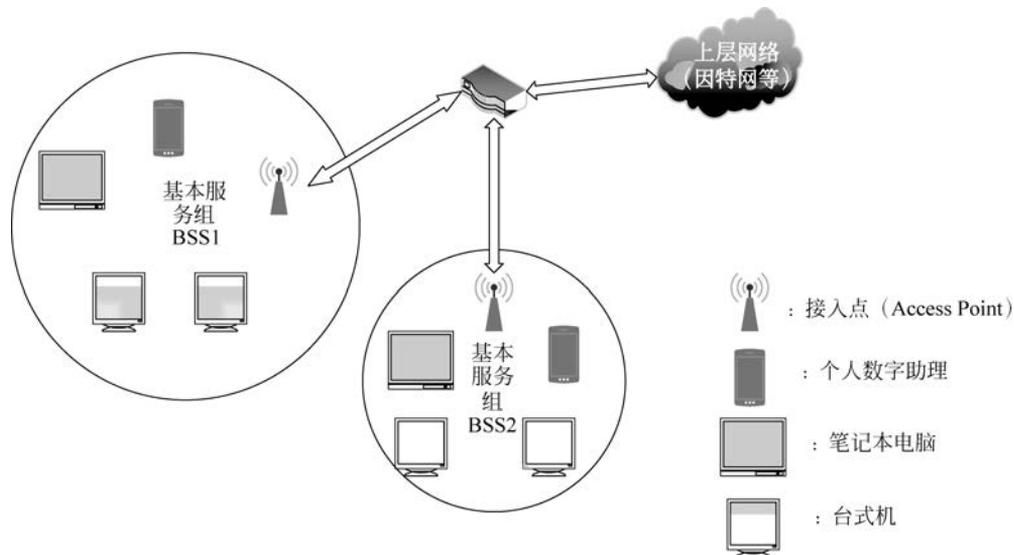
最初 IEEE 制定的 802.11 采用直接序列扩频(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS)技术,使用 2.4~2.485GHz 频段,可支持传输速率为 1Mb/s 和 2Mb/s。IEEE 802.11a 协议采用正交频分多路复用(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)技术,使用 5.1~5.8 GHz 相对较高的频段,传输速率可达到 54Mb/s。由于 IEEE 802.11a 使用高频频段,其室内覆盖范围要略小。使用 2.4~2.485GHz 频段,传输速率可达到 1Mb/s。IEEE 802.11g 采用了与 IEEE 802.11a 相同的 OFDM 技术,保持了其 54Mb/s 的最大传输速率。同时,IEEE 802.11g 使用和 IEEE 802.11b 相同的 2.4~2.485GHz 频段,并且兼容 IEEE 802.11b 的设备,但兼容 IEEE 802.11b 设备会降低 IEEE 802.11g 网络的传输带宽。IEEE 802.11n 除了采用 OFDM 技术外,还采用了多天多输入-多输出技术,其传输速率可达到 100Mb/s。同时,IEEE 802.11n 可选择使用 2.4~2.485GHz 和 5.1~5.8GHz 两个频段。

尽管在物理层使用的技术有很大差异,但这一系列 IEEE 802.11 的上层架构和链路访问协议是相同的。例如,MAC 层都使用带冲突预防的载波侦听多路访问(CSMA/CA)技术,数据链路层数据帧结构相同以及它们都支持基站和自组织两种组网模式。

1. IEEE 802.11 架构

在 802.11 的架构中,最重要的组成部分是由一个基站(在 IEEE 802.11 中被称为接入

点)和多个无线网络用户组成的基本服务组(Basic Service Set,BSS),如图 3-5-12 所示,每个圆形的区域表示一个基本服务组。每个接入点通过有线网络互联设备(交换机或者路由器)连入上层公共网络中。无线路由器将接入点和路由器两者的功能结合为一体。在一个家庭中,可能有笔记本电脑、台式机、掌上电脑等多种无线网络设备,而往往网络运营商只为每个家庭提供一条有线宽带连接。这时按照 IEEE 802.11 的架构,将无线路由器通过有线连接方式与宽带网络相连,家庭中所有的无线网络设备都可通过它访问上层网络。



在 IEEE 802.11 中,每个无线网络用户都需要与一个接入点相关联才能获取上层网络的数据。那么,接入点有哪些参数呢?以 IEEE 802.11b/g 协议为例,每个接入点的管理者都会为其指定一个或多个服务集标识符(Service Set Identifier,SSID)。同时,接入点管理者会为其指定一个频段作为通信信道。IEEE 802.11b/g 使用 2.4~2.485GHz 频段传输数据,对于这 85MHz 的频宽,IEEE 802.11b/g 会将其分为 11 个部分相互重叠的信道。例如,信道 1、6 和 11 是 3 条互不重叠的信道,如果在一间教室内有 3 个接入点,则 IEEE 802.11b/g 信道分配模式可以保证这 3 个接入点之间的信号互不干扰。但如果有多于 3 个的接入点,如存在一个使用信道 9 的接入点,则会对使用信道 6 和信道 11 的接入点造成干扰。

对于特定无线网络用户来说,其所在位置可能被多个 Wi-Fi 接入点覆盖,通常它只能选择其中之一建立连接并交换数据。那么,无线网络用户是如何与特定 Wi-Fi 接入点建立关联的呢?首先,每个接入点会周期性地向周围广播识别帧,其中包含了接入点的 MAC 地址和 SSID。其次,无线网络用户通过一段时间内收集的识别帧信息确定可提供服务的接入点的集合。最后,无线网络用户向其中一个接入点发送关联请求从而建立连接。这里还存在如下一个问题:无线网络用户如何从设备选择接入点集合中选择最优的接入点作为关联点?这种策略在 IEEE 802.11 协议中并没有明文规定,它是由 IEEE 802.11 协议的硬件制造商或者无线网络管理软件开发者决定的。一种常见的做法是将通信链路质量最好的接入点作为关联接入点,但可能存在的问题就是:假定在相邻的两个教室 A 和 B 中各有一个接

入点,且教室 A 中无线网络用户数量远多于教室 B 中的数量,由于无线信号强度衰减特性,教室 A 中的用户只会与教室 A 中的接入点关联,但是众多用户与教室 A 的接入点关联降低了每个用户的带宽,反而可能不如与信号强度稍差但关联用户较少的教室 B 的接入点关联。

上面建立关联的方式称为被动扫描模式。另一种模式是主动扫描模式,其工作原理如下:当无线网络用户寻找潜在可提供服务的接入点时,它主动向周围广播一个探测帧;收到探测帧的接入点进行响应,返回一个回应帧;然后无线网络用户再根据所有回应帧的信息选取一个接入点关联。

IEEE 802.11 协议的另一种架构模式是自组织网络,在这种模式下不需要类似基站的基础设施,每个无线网络用户既是数据交互的终端也作为数据传输过程中的路由。由于没有一个类似基站这样集中收发数据的管理者,每条数据传输路径是当数据传输需求出现时动态形成的。这种网络架构可结合基站式架构,用于无线设备相对集中且有线 Wi-Fi 接入点无法覆盖整个区域的情况。例如,在一个大会议室中,无线网络用户可能达到数百上千人,可以在会议室的四角各放置一个接入点,这样部分用户可直接通过接入点访问上层网络,更多的用户通过自组织网络相互连接起来,间接通过其他用户的中继访问网络。

2. IEEE 802.11 介质访问控制协议

由于每个 Wi-Fi 接入点都可能会关联多个无线网络用户,并且在一定区域内可能存在多个接入点,因此两个或更多用户可能在同一时间使用相同的信道传输数据。此时由于无线连接会相互干扰,更容易导致数据包的丢失,因此需要多用户信道访问协议来控制用户对信道的访问。IEEE 802.11 协议中使用带冲突避免的载波侦听多路访问(CSMA/CA)协议。CSMA 是指用户在发送数据之前先侦听信道,若信道被占用,则不发送数据。CSMA/CA 是指即使侦听到信道为空,也为了避免冲突而等待一小段随机时间后再发送数据帧。虽然以太网介质访问控制协议也使用了 CSMA 技术,但其细节与 IEEE 802.11 协议的介质访问控制协议还有很大差异。首先,由于无线信号干扰问题,造成数据传输出错概率较大,因此 IEEE 802.11 协议要求建立数据链路层确认/重传机制。然而,以太网中有线连接的传输出错概率较小,并没有强制要求数据链路层建立确认/重传机制。另外,以太网使用带冲突检测的载波监听多路访问(CSMA/CD)协议。其原理如下:当用户监听到信道为空时立即发送数据,并且在发送数据的同时监听信道,若此时它检测到和其他用户的数据传输信号发生了冲突,则立即停止传输并随机等待一小段时间后重新传输。

IEEE 802.11 协议使用 CSMA/CA 而不使用 CSMA/CD 主要有以下两个原因:

(1) 冲突帧需要全双工(发送数据的同时也可以接收数据)的信道。而对于无线传输信号来说,发送信号的能量往往远高于接收信号的能量,建立能侦测冲突的硬件代价是很高的。

(2) 即使无线信道是全双工的,但是由于无线信号衰减特性和隐藏终端问题,硬件还是不能侦听到全部可能的冲突。

在 IEEE 802.11 协议中,一旦无线网络用户开始传输数据帧,直到整个帧传输完成,传输过程才会停止。在多用户访问环境中,由于无法使用 CSMA/CD 机制,所以无计划地传输整个帧带来的冲突会导致整体传输性能的下降。尤其当数据帧的长度相对较长时,冲突的概率会极大地增加。为了降低传输冲突的概率,IEEE 802.11 协议采用的 CSMA/CA 机

制采取了一系列尽量避免冲突的措施。

IEEE 802.11 介质访问控制协议提供了一种可选的机制来消除“隐藏终端”问题。如图 3-5-13 所示,有两个无线网络用户 A、B 和一个基站。用户 A、B 都在接入点的信号覆盖范围内,但两个用户都位于彼此的信号覆盖范围之外,因此它们是典型的“隐藏终端”关系。当用户 A 传输数据时,由于用户 B 无法侦听到 A 的传输信号,根据 CSMA/CA 机制,当 B 侦测到当前信道空闲时,等待 DIFS(Distributed Inter-Frame Space)后也开始传输数据。如果此时 A 仍未结束其传输过程,就会造成在接入点处的信号冲突。

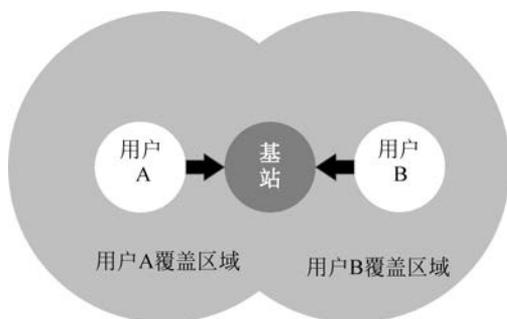


图 3-5-13 “隐藏终端”现象

为了消除隐藏终端的影响,IEEE 802.11 允许某个用户使用控制帧 RTS 和 CTS 在传输数据帧之前和接入点通信,令接入点只为其保留信道的使用权。如图 3-5-14 所示,当传输端有数据帧要发送时,它先向接入点发送 RTS 帧,RTS 中包含了传输数据帧和确认帧总共可能需要的时间。当接入点收到传输端的 RTS 帧时,它等待 SIFS(Short Inter-Frame Space)后广播一个 CTS 帧作为回应。CTS 帧的作用有两个:一是为传输端提供信道的使用权;二是防止其他用户在传输端发送数据和接收确认帧这段时间内进行传输。

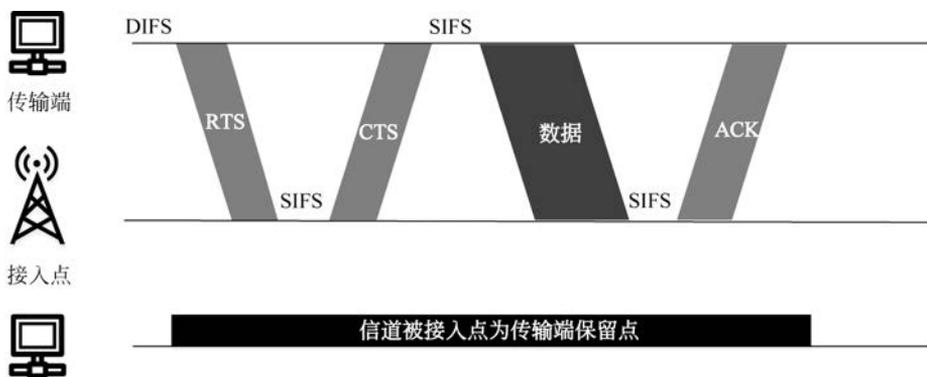


图 3-5-14 RTS 和 CTS 控制帧示意图

使用 RTS 和 CTS 帧从以下两方面提升了无线传输的性能:

(1) 由于无线网络用户在传输数据之前需要与接入点通信,使其只为当前用户保留信道的使用权,在这段时间内其他任何与接入点相关联的用户都不会与接入点进行数据交换,从而消除了隐藏终端问题。

(2) 由于 RTS 和 CTS 帧的长度非常短,所以即使 RTS 和 CTS 有冲突发生,其代价也

非常小。一旦 RTS 和 CTS 成功传达,数据帧和确认帧的传输就不会再有冲突发生。

虽然使用 RTS 和 CTS 帧可以减少冲突,但与此同时也会增加传输延时和降低信道利用率,因此 RTS 和 CTS 机制往往被用于冲突概率发生较高的情境中。例如,无线网络用户每次都需要传输较长的数据帧,每个数据帧的传输时间较长,增加了冲突发生的概率。

3.5.5 红外通信技术

红外通信技术(IrDA)是一种无线通信方式,可以进行无线数据的传输。红外通信技术适用于低成本、跨平台、点对点高速数据连接,尤其是嵌入式系统。红外通信技术主要应用于设备互联,还可用于信息网关。设备互联后可完成不同设备内文件与信息的交换。信息网关负责连接信息终端和互联网。红外通信技术已被全球范围内的众多软硬件厂商所支持和采用,目前主流的软件和硬件平台均提供对它的支持,红外通信技术已被广泛应用在移动计算设备和移动通信设备中。红外传输是一种点对点的无线传输方式,近距离传输,且需要对准方向,红外传输路径中间不能有障碍物,几乎无法控制信息传输的速度。

红外数据传输使用的传播介质为红外线。红外线是波长为 750 nm~1mm 的电磁波,是人眼看不到的光线。红外数据传输一般采用红外波段内的近红外线,波长为 0.75~25 μ m。红外数据协会成立后,为保证不同厂商的红外产品能获得最佳的通信效果,限定所用红外波长为 850~900nm。红外线接口的标准是由 IrDA(Infrared Data Association,红外线数据协会)制定的,是一种利用红外线进行点对点通信的技术,是第一个实现无线个人局域网的技术。目前它的软硬件技术都很成熟,在小型移动设备(如 PDA、手机)上广泛使用。事实上,当今每一个出厂的 PDA 及许多手机、笔记本电脑、打印机等产品都支持红外数据传输。

红外数据传输的主要优点是无须申请频率的使用权,因而红外通信成本低廉。同时,它还具有移动通信所需的体积小、功耗低、连接方便、简单易用的特点。由于数据传输率较高,因此红外数据传输适于传输大容量的文件和多媒体数据。此外,红外线发射角度较小,传输上安全性高。红外数据传输的不足之处在于它是一种视距传输,两个相互通信的设备之间必须对准,中间不能被其他物体阻隔,因而该技术只能用于两台设备之间的连接。如图 3-5-15 所示为红外数据传输的基本模型,如图 3-5-16 所示为 IrDA 器件类型。

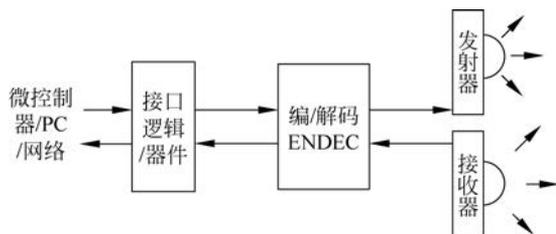


图 3-5-15 红外数据传输的基本模型

IrDA 标准主要分为两种类型,即 IrDA Data 和 IrDA Control,其中,IrDA Data 主要用于与其他设备交换数据;IrDA Control 主要用于与人机接口设备交互,如键盘、鼠标器等。

IrDA Data 标准已有 6 个版本,如表 3-5-5 所示。在这 6 个标准中,AIR(Advanced InfraRed)是 IrDA 针对蓝牙技术的竞争发布的一个多点连接红外线规范,其优点是传输距离



图 3-5-16 IrDA 器件类型

和发射/接收角度的改进,在 4Mb/s 通信速率下其传输距离可以达到 4m,在更低速率下其传输距离可以达到 8m。AIR 规范的发射接收角度为 120° 。更重要的是它支持多点连接,其他的 IrDA 规范都只支持点对点连接。红外接口主要用于便携设备,这类设备通常对功耗要求很高,为了降低设备的功耗,IrDA 发布了低功耗的 IrDA1.2 和 IrDA1.3,但同时缩短了传输距离,传输距离为 0.2~0.3m。

表 3-5-5 IrDA Data 标准

	IrDA1.0SIR	IrDA1.1SIR	AIR	IrDA1.2	IrDA1.3	IrDA1.4VFID
最高速率/(kb/s)	115.2	4000	4000/250	115.2	4000	16000
通信距离/m	1	1	4/8	0.2~0.3(与连接设备有关)		1
发射与接收角度	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 120^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 15^\circ$
连接方式	点对点	点对点	多点对多点	点对点	点对点	点对点
设备数/个	2	2	10	2	2	2

3.5.6 LORA 技术

LORA 是一种基于扩频技术的无线传输技术,是低功率广域网(LPWAN)通信技术中的一种,最早是由美国 Semtech 公司采用和推广的。LORA 为用户提供了一种简单的能实现远距离、低功耗无线通信手段。目前,LORA 主要在 ISM 频段运行,主要包括 433MHz、868MHz、915MHz 等。

1. LORA 无线技术网络构成

LORA 网络主要由终端(可内置 LORA 模块)、网关(或称基站)、Server 和云服务 4 部分组成,应用数据可双向传输。

2. LORAWAN 协议介绍

LORAWAN 是 LORA 联盟发布的一个基于 MAC 层协议的低功耗广域网通信协议。

LORAWAN 定义了网络的通信协议和系统架构,而 LORA 物理层能够使长距离通信

链路成为可能。LORAWAN 自下而上设计,为电池寿命、容量、距离和成本而优化了 LPWAN(低功耗广域网)。LORAWAN 对于不同地区给出了规范概要,以及在 LPWAN 空间竞争的不同技术的高级比较。

3. LORAWAN 网络拓扑

LORAWAN 网络拓扑如图 3-5-17 所示。LORAWAN 网络是一个典型的无线网络网络拓扑结构,在这个网络架构中,LORA 网关负责数据汇总,连接终端设备和后端云端数据服务器。网关与服务器间 TCP/IP 网络进行连接。所有的节点与网关间均是双向通信,考虑到电池供电的场合,终端节点一般处于休眠状态,当有数据要发送时唤醒终端节点,然后进行数据发送。因此,使用 LORA 技术,能够以低发射功率获得更远的传输距离。

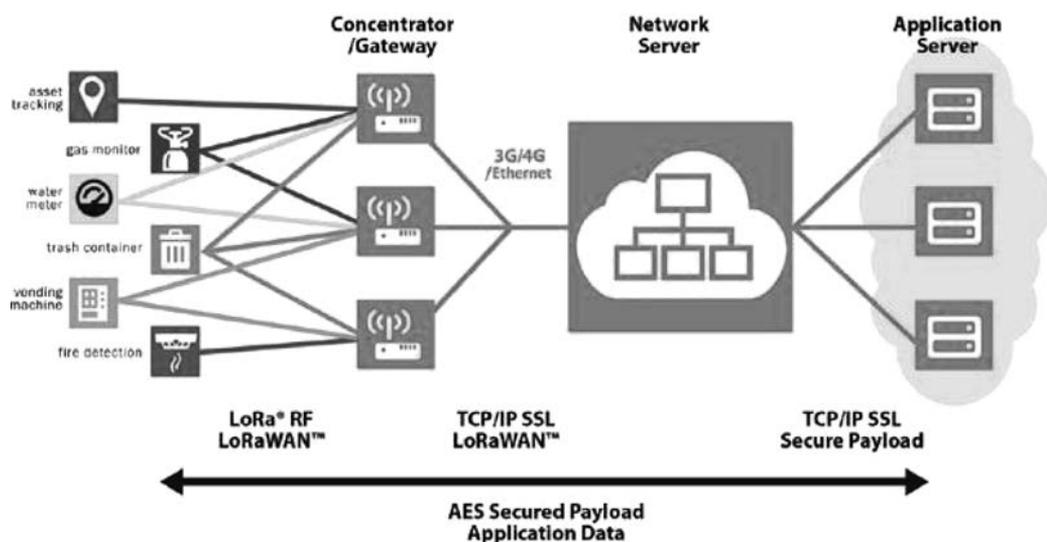


图 3-5-17 LORAWAN 网络拓扑

4. LORA 特性

传输距离: 城镇可达 2~5km, 郊区可达 15km。

工作频率: ISM 频段包括 433MHz、868MHz、915MHz 等。

标准: IEEE 802.15.4g。

调制方式: 基于扩频技术,线性调制扩频(CSS)的一个变种,具有前向纠错(FEC)能力, Semtech 公司私有专利技术。

容量: 一个 LORA 网关可以连接上千上万个 LORA 节点。

电池寿命: 长达 10 年。

安全: AES128 加密。

传输速率: 几百到几十 kb/s, 速率越低传输距离越长, 这很像一个人挑东西, 挑得多走不太远, 挑得少可以走远一些。

5. LORA 关键参数

(1) 扩频因子(Spreading Factor, SF): LORA 采用多个信息码片来代表有效负载信息的每个位, 扩频信息的发送速度称为符号速率(R_s), 而码片速率与标称的 R_s 比值即为扩频因子, 表示了每个信息位发送的符号数量。

(2) 编码率(Coding Rate, CR): 编码率(或信息率)是数据流中有效部分(非冗余)的比例。LORA 采用循环纠错编码进行前向错误的检测与纠错。在存在干扰的情况下,前向纠错能有效提高链路的可靠性。由此,编码率(抗干扰性能)可以随着信道条件的变化而变化。

(3) 信号带宽(Bandwidth, BW): 信道带宽是限定允许通过该信道的信号下限频率和上限频率,可以理解为一个频率通带。例如,一个信道允许的通带为 1.5~15kHz,则其带宽为 13.5kHz。

在 LORA 中,增加 BW,可以提高有效数据速率以缩短传输时间,但是以牺牲部分接收灵敏度为代价。

习题 3

1. 简述物理层的特性。
2. 物理层设计需要考虑哪几个方面?
3. 无线信道的传播模型有哪些?
4. 简述信号调制和解调的含义,说明数字调制的方式有哪些。
5. 简述天线的作用,以及发送和接收的过程。
6. 分析 Wi-Fi 模块的技术特点、模块分类和工作方式。
7. 分析 ZigBee 网络中的设备类型及功能。
8. 阐述不同短距离通信技术的特点和应用领域。