

物联网工程专业系列教材

# 物联网通信技术

主 编 张翼英 史艳翠  
副主编 梁 琨 张素香



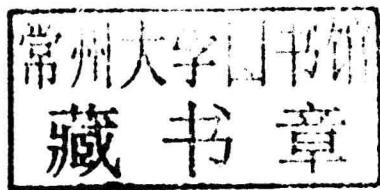
中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

物联网工程专业系列教材

# 物联网通信技术

主 编 张翼英 史艳翠

副主编 梁 琨 张素香



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

本书介绍了物联网中不同通信距离需求下涉及的各种通信技术及技术原理,并给出物联网通信技术的典型应用。全书共7章:第1章介绍物联网通信的基础知识,包括使用的传输介质、调制技术、复用技术、多址技术和双工技术等;第2章介绍短距离无线通信技术,主要包括蓝牙、ZigBee、RFID、WSN等技术;第3章详细介绍移动通信技术,包括1G~5G所涉及的关键技术;第4章介绍适合物联网远距离通信的低功耗广域网通信技术,包括LoRa、SigFox、NB-IoT和eMTC等;第5章介绍卫星通信系统、全球定位系统、北斗卫星导航系统以及天地一体化的相关知识;第6章详细介绍PDH、SDH和OTN等光纤通信技术;第7章介绍物联网通信技术的典型应用。

本书适合作为高等院校物联网专业及相关专业学生的教材和参考书,也适合作为物联网技术相关研究人员、企事业单位相关专业人员进行物联网工作的重要参考资料。

本书配有电子教案,读者可以从中国水利水电出版社网站以及万水书苑免费下载,网址为:<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>或<http://www.wsbookshow.com>。

## 图书在版编目(CIP)数据

物联网通信技术 / 张翼英, 史艳翠主编. — 北京 :  
中国水利水电出版社, 2018. 1  
物联网工程专业系列教材  
ISBN 978-7-5170-6207-3

I. ①物… II. ①张… ②史… III. ①互联网络—应用—高等学校—教材②智能技术—应用—高等学校—教材  
IV. ①TP393.4②TP18

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第326290号

策划编辑: 石永峰      责任编辑: 高 辉      封面设计: 李 佳

书 名	物联网工程专业系列教材 物联网通信技术
作 者	WULIANWANG TONGXIN JISHU 主 编 张翼英 史艳翠 副主编 梁 琨 张素香
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a> E-mail: <a href="mailto:mchannel@263.net">mchannel@263.net</a> (万水) <a href="mailto:sales@waterpub.com.cn">sales@waterpub.com.cn</a> 电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	三河航远印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14印张 344千字
版 次	2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	32.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换  
版权所有·侵权必究

# 前 言

物联网通过部署大量感知设备实现对物理世界的感知和控制，同时将分布在不同地点的感知点通过各种通信技术实现互联互通，并随时随地以任意方式通过任意终端为用户提供智能服务。物联网将人与人之间的通信扩展为人与人、人与物、物与物之间的通信。在感知层，物联网借助各类传感器、标签、RFID、二维码等实现数据的采集，并利用短距离通信技术（如蓝牙、ZigBee、UWB等）将数据通过网关节点传输到核心网。核心网通过新兴的低功耗广域网和 OPC UA 等互联互通技术实现无线通信网、因特网、移动通信网、固定电话网、卫星通信网等异构网络安全高效的融合，完成数据的远距离传输。在应用层，通过大数据、云计算、边缘计算、数据仓库、分布式存储等技术进行数据建模、分析、优化，实现多源异构数据的深度开发，为用户提供随时随地的智能服务。

通信技术在物联网应用中起着桥梁作用，不同环境下，不同应用对通信性能有不同的需求。例如，在传感网中首要目标是节能，从而会延迟整个网络的生命周期，所以通信距离不能过长；而传送网则要完成主干网之间的通信，对传输速率有更高的要求。因此，物联网需要针对不同应用和不同环境选择合适的传输介质、编码技术、调制技术、双工技术、多址技术、扩频技术和加密技术等。另外，为了保证有效可靠地传输信息，还需要设计合理的 MAC 协议和路由协议。

本书汇集了十余名物联网相关专业的博士和专家，结合各自在物联网通信技术领域的理论研究和实践，从物联网通信距离出发全方位阐述了物联网涉及的短距离通信技术、中长距离通信技术和远距离通信技术，并在最后介绍了物联网通信技术的典型应用。

第 1 章介绍物联网通信的基础知识，包括使用的传输介质、调制技术、复用技术、多址技术和双工技术等。

第 2 章介绍短距离无线通信技术，主要对蓝牙、ZigBee、RFID、WSN 等技术的特点、关键技术以及应用场合进行详细介绍。

第 3 章介绍移动通信技术，主要对第一代移动通信技术、第二代移动通信技术、第三代移动通信技术、第四代移动通信技术进行详细阐述，同时对第五代移动通信技术涉及的关键技术及发展作了详细介绍。

第 4 章介绍远距离通信技术，即低功耗广域网通信技术，包括低功耗广域网的特点，LoRa、SigFox、NB-IoT 和 eMTC 通信技术的特点、实现原理及应用。

第 5 章介绍卫星通信技术，主要包括卫星通信系统的组成和分类，典型的卫星移动通信系统，全球定位系统，北斗卫星导航系统，天地一体化系统等。

第 6 章详细介绍 PDH、SDH 和 OTN 等光纤通信技术。

第 7 章介绍物联网通信技术的典型应用，包括烟草智能配送系统、多表一体化系统、智能楼宇系统和停车场智能车牌识别系统。

本书由张翼英、史艳翠任主编，梁琨、张素香任副主编。张翼英负责全书统筹工作并参与全部章节编写，张翼英、史艳翠对全书进行了审校。

具体编写分工如下：第1章由张爱华编写，第2章由梁琨、侯琳、于洋编写，第3章由张二青、杨成月编写，第4章由刘亚坤、何业慎编写，第5章由史艳翠、梁琨编写，第6章由张素香、邹维福编写，第7章由张茜、梁琨、樊丽霞、张翼飞编写。

同时，感谢中国水利水电出版社在本书出版过程中给予的大力支持，感谢石永峰编辑的帮助。

希望本书能够对关心物联网技术和产业发展的各级领导和行业监管部门、高校师生，以及产业链相关各领域的从业人员、投融资人士等读者有所裨益，能够为我国物联网产业的发展添砖加瓦。由于笔者水平及时间所限、各位编者编写风格各异，书中难免有不足之处，恳请专家和读者批评指正。

编者

2017年10月

# 目 录

前言

第 1 章 物联网通信技术概述	1	第 2 章 短距离无线通信技术	24
1.1 通信网的基本概念	1	2.1 蓝牙技术	24
1.1.1 通信网的定义及组成	1	2.1.1 蓝牙技术的特点	24
1.1.2 通信网的类型	2	2.1.2 蓝牙地址及协议栈	25
1.1.3 通信网的拓扑结构	3	2.1.3 蓝牙技术的应用	27
1.2 传输介质	4	2.2 ZigBee 技术	28
1.2.1 有线传输介质	4	2.2.1 ZigBee 技术的特点	28
1.2.2 无线传输介质	6	2.2.2 ZigBee 网络的组成	29
1.3 调制技术	7	2.2.3 ZigBee 组网通信方式	31
1.3.1 模拟调制	8	2.2.4 ZigBee 技术的应用	32
1.3.2 数字调制	12	2.3 RFID 技术	32
1.4 复用技术	15	2.3.1 RFID 简介	32
1.4.1 频分复用 (FDM)	16	2.3.2 RFID 系统的组成	33
1.4.2 正交频分复用 (OFDM)	16	2.3.3 RFID 系统的分类	34
1.4.3 时分复用 (TDM)	17	2.3.4 读写器	35
1.4.4 波分复用 (WDM)	17	2.3.5 电子标签	36
1.5 多址技术	18	2.3.6 RFID 技术的应用	36
1.5.1 时分多址 (TDMA)	18	2.4 NFC 技术	38
1.5.2 频分多址 (FDMA)	19	2.4.1 NFC 技术概述	38
1.5.3 正交频分多址 (OFDMA)	19	2.4.2 NFC 中的连接与传输技术	39
1.5.4 码分多址 (CDMA)	19	2.4.3 NFC 技术的应用	40
1.6 双工技术	19	2.5 UWB 技术	41
1.6.1 单工技术	19	2.5.1 UWB 的定义	42
1.6.2 半双工技术	20	2.5.2 UWB 技术的特点	42
1.6.3 全双工技术	20	2.5.3 UWB 的实现方式	43
1.7 通信技术分类	20	2.5.4 UWB 技术的应用	44
1.7.1 短距离无线通信技术	21	2.6 WiFi 技术	46
1.7.2 移动通信技术	21	2.6.1 WiFi 技术的特点	47
1.7.3 低功耗广域网通信技术	21	2.6.2 IEEE802.11 标准中的物理层	47
1.7.4 卫星通信技术	22	2.6.3 IEEE 802.11 标准中的 MAC 子层	50
1.7.5 光纤通信技术	22	2.7 LiFi 技术	52
小结	22	2.7.1 LiFi 技术概述	52
习题	22	2.7.2 LiFi 技术原理	53

2.7.3 产品优势	54	4.2.1 LoRa 无线通信设计原理	97
2.8 M2M 技术	54	4.2.2 LoRa 终端工作模式	100
2.8.1 M2M 技术的定义	54	4.2.3 LoRa 应用分析	101
2.8.2 M2M 系统构成	55	4.3 SigFox 无线通信技术	105
2.8.3 M2M 高层系统架构	56	4.3.1 SigFox 简介	105
2.8.4 M2M 技术的应用	58	4.3.2 SigFox 应用情况	106
2.9 WSN 技术	61	4.4 NB-IoT 无线通信技术	107
2.9.1 WSN 的组成	61	4.4.1 NB-IoT 技术发展	107
2.9.2 WSN 的特点	63	4.4.2 NB-IoT 简介	108
2.9.3 WSN 的关键技术	64	4.4.3 NB-IoT 特性	109
2.9.4 WSN 技术的应用	65	4.4.4 NB-IoT 推广应用	112
小结	65	4.5 eMTC 无线通信技术	115
习题	65	4.5.1 eMTC 简介	115
<b>第 3 章 移动通信技术</b>	67	4.5.2 eMTC 特性	116
3.1 移动通信系统发展概述	67	4.5.3 eMTC 应用情况	116
3.2 第一代移动通信系统	70	小结	116
3.3 第二代移动通信系统	71	习题	117
3.3.1 GSM	72	<b>第 5 章 卫星通信技术</b>	118
3.3.2 GPRS	74	5.1 卫星通信系统	119
3.3.3 N-CDMA	75	5.1.1 卫星通信系统的组成	120
3.4 第三代移动通信系统	77	5.1.2 卫星通信系统的分类	122
3.4.1 WCDMA 技术	77	5.2 卫星移动通信技术	123
3.4.2 CDMA 2000 技术	79	5.2.1 卫星移动通信系统的相关技术	125
3.4.3 TD-SCDMA 技术	81	5.2.2 低轨道 (LEO) 卫星移动通信系统	127
3.5 第四代移动通信系统	85	5.2.3 中轨道 (MEO) 卫星通信系统	133
3.5.1 OFDM 技术	87	5.2.4 高轨道 (GEO) 卫星通信系统	135
3.5.2 智能天线技术	88	5.2.5 卫星移动通信的应用	138
3.5.3 无线链路增强技术	89	5.3 全球定位系统	139
3.5.4 软件无线电 (SDR) 技术	89	5.3.1 GPS 的组成	139
3.5.5 多用户检测技术	90	5.3.2 GPS 的应用	140
3.6 第五代移动通信系统	90	5.4 中国北斗卫星导航系统	142
3.6.1 场景和需求	91	5.4.1 “北斗”的简介	142
3.6.2 网络架构	92	5.4.2 “北斗”的应用	144
3.6.3 关键技术	93	5.5 天地一体化	148
小结	94	5.5.1 天地一体化网络的特征	150
习题	94	5.5.2 天地一体化网络主要问题分析	151
<b>第 4 章 低功耗广域网通信技术</b>	95	小结	152
4.1 低功耗广域网的特点	95	习题	152
4.2 LoRa 无线通信技术	96	<b>第 6 章 光纤通信技术</b>	153

6.1 传输网技术发展历程	154	7.1.1 烟草物流配送需求	186
6.2 PDH 技术	155	7.1.2 烟草智能配送系统架构	187
6.3 SDH 技术	156	7.1.3 烟草智能配送应用效果	191
6.3.1 SDH 简介	157	7.2 多表一体化系统	192
6.3.2 SDH 帧结构	159	7.2.1 多表一体化采集需求	192
6.3.3 SDH 的复用结构和步骤	161	7.2.2 多表一体化采集系统架构	193
6.3.4 映射、定位和复用的概念	162	7.2.3 多表一体化采集应用效果	199
6.3.5 SDH 设备保护方式	166	7.3 智能楼宇系统	201
6.4 OTN 技术	172	7.3.1 智能楼宇自动监控系统概述	201
6.4.1 WDM 技术	173	7.3.2 智能楼宇自动监控系统需求	202
6.4.2 OTN 技术与 SDH 技术比较	175	7.3.3 系统设计方案	203
6.4.3 OTN 体系	175	7.4 停车场智能车牌识别系统	208
6.4.4 OTN 帧结构	176	7.4.1 停车场车牌识别系统需求	208
6.4.5 OTN 保护与应用	179	7.4.2 停车场车牌识别系统架构	209
6.4.6 OTN 应用与未来	183	7.4.3 智能停车场收费系统	211
小结	185	小结	213
习题	185	习题	213
<b>第 7 章 物联网通信技术的典型应用</b>	<b>186</b>	<b>参考文献</b>	<b>214</b>
7.1 烟草智能配送应用	186		



# 第1章 物联网通信技术概述



通信在物联网中起着桥梁的作用，它能将分布在各处的物体互联起来。离开了通信这个基础，物联网也就无从谈起。本章主要介绍通信网的定义、组成和类型等基本概念，还会介绍通信中常用的传输介质和使用的调制技术、复用技术、多址技术及双工技术，最后介绍通信技术的主要分类。

本章我们将学习以下内容：

- 通信网的基本概念
- 传输介质
- 调制技术
- 复用技术
- 多址技术
- 双工技术

在物联网中，通信技术起着桥梁的作用，将分布在各处的物体互联起来，实现真正意义上的“物联”。离开了通信，物联网设备无法接入到网络中来，物联网感知的大量信息无法进行有效的交换和共享，那么基于这些数据信息而产生的物联网应用也就无从谈起。

通信的实质是信息的有效传递。通信过程中，既要保证信息传递的有效性，又要保证信息传递的可靠性。有效性是指信道传递信息速度的快慢，可靠性是指信道传输信息的准确程度。物联网通信包含了几乎现有的所有通信技术。然而鉴于物联网的泛在化特征，并且物联网设备一般包括嵌入式和传感器两类，因此物联网通信中无线通信的使用场景比较多。

## 1.1 通信网的基本概念

通信是由一台设备向另一台设备传递信息。为了实现通信功能，需要将若干用户终端通过传输系统连接起来。这样的通信节点和传输链路就构成了通信网。

### 1.1.1 通信网的定义及组成

#### 1. 通信网的定义

由一定数量的节点和连接节点的传输系统有机组合到一起，以实现两个或多个节点间数据传输的系统称为通信网。这些节点可以是终端用户，可以是中间的交换设备，也可以是物联网中的任意一个接入者。传输系统是信息传输的通道，可以是有线或者无线信道。鉴于物联网的特点，物联网通信中使用较多的是诸如 ZigBee（紫蜂）、RFID（Radio Frequency

Identification, 射频识别)、Bluetooth (蓝牙) 以及 WiFi (Wireless Fidelity, 无线保真) 这样的无线通信技术。

## 2. 通信网的组成

通信网包括软件和硬件两大部分, 软件包括网络协议、路由方案等, 硬件包括终端设备、传输系统和交换设备。此处主要介绍通信网的硬件。

终端设备是通信网最外围的设备, 包括计算机、手机、电话机以及物联网中负责数据采集和数据转换等功能的传感设备。物联网的终端设备从使用场合划分包括固定终端、移动终端和手持终端。

传输系统是传输光、电信号的通道, 也是将通信网中各节点连接起来的媒介。按传输媒体的不同, 传输系统分为以电磁波沿某种有形媒质的传播来实现信号传递的有线传输系统和以电磁波在空中的传播来实现信号传递的无线传输系统。

交换设备是通信网的核心, 完成接入交换节点链路的汇集、转接接续和分配, 实现一个用户与他所要求的另一个或多个用户之间路由选择的连接。

### 1.1.2 通信网的类型

通信网按照不同的分类方法有不同的划分, 下面将分别介绍。

#### 1. 按传输介质划分

按照传输介质划分, 通信网可以分为有线通信网和无线通信网。有线通信网是指以导线、光纤、电缆等导向性传输媒体为介质的通信网, 进一步可分为载波通信网与光纤通信网等。无线通信网是指传输介质为自由空间, 例如无线电波、红外线、激光等无线方式, 常见的形式有微波通信网、短波通信网、移动通信网与卫星通信网等。

#### 2. 按业务类型划分

按业务类型可分为电报网、电话网、数据网和因特网等。电报网还可分为有线电报网与无线电报网; 电话网可再分为固定电话网、移动电话网与长途电话网; 数据网可分为窄带数据网和宽带数据网。

#### 3. 按覆盖范围划分

按照覆盖范围划分, 通常分为广域网、城域网和局域网。计算机网络中通常采用这种划分方法, 根据目前网络的发展, 一些文献也将个人网归为这个分类。

局域网是指覆盖范围在几十米到几千米的网络, 通常覆盖一座建筑物, 办公室、校园网等均属于局域网。

城域网是指传输覆盖区以城市为主, 分布区域一般从十几千米到几十千米, 介于广域网与局域网之间, 地理范围局限于城市的宽带通信网络。它以高速、大容量宽带方式实现城域内局域网的互联和用户的宽带接入业务, 例如电信运营商在各城市建立的宽带骨干网。

广域网是指传输覆盖区为省、国家甚至全球, 分布从几百千米到几万千米, 采用大容量长途传输技术, 把各个城域网连接起来的通信网络, 例如全球最大的广域网——因特网。

#### 4. 按属性划分

按属性分类可分为公用网和专用网。

公用网是由电信部门经营和管理的固定或无线网络, 通过公用用户网络接口连接各专用网和用户终端。“公用”的意思就是所有愿意按电信公司的规定缴纳费用的人都可以使用这种

网络,例如目前常用的公用电话网和公用数据网。

专用网是指某个部门、某个行业为各自的特殊业务工作需要而建造的网络。这种网络只为拥有者提供服务,不对外提供服务。由于它的网络规模比公用网要小,而且有的也不需要计费管理规程,因此很多新的网络设备和技术也往往先在专用网中使用,通常也能够提供高质量的多媒体业务和高速数据传输服务。专用网一般用于一些保密性要求较高的部门的网络,比如企业内部专用网、军队专用网,尤其是涉及国家机密的部门更需要使用专用网。

其实还可以按照拓扑结构、交换方式、信号等进行划分,有兴趣的读者可以查阅相关资料,在此不再一一介绍。

### 1.1.3 通信网的拓扑结构

在通信网中,所谓拓扑结构是指通信网中各个节点之间互相连接的方式。基本的拓扑结构有:网状、星型、树型、总线型、环型等,各拓扑结构如图 1.1 所示。

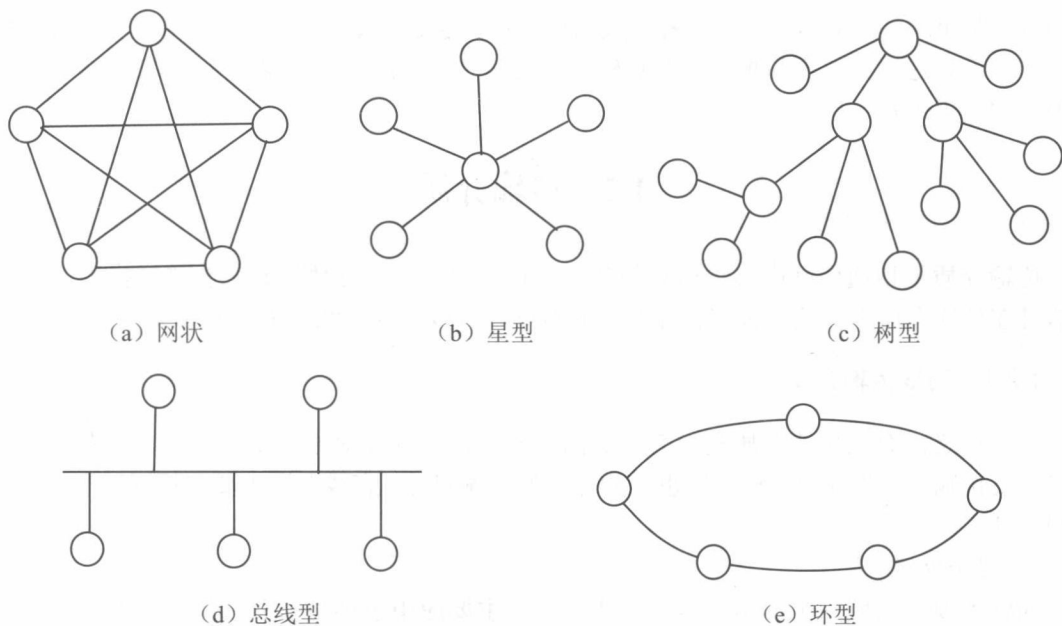


图 1.1 通信网的拓扑结构

#### 1. 网状

网状网如果采用全互连的方式(即网内任意节点间均有直达线路连接),则具有  $N$  个节点就有  $N(N-1)/2$  条传输链路。这种连接方式线路冗余度大、网络可靠性高,但是线路利用率低、网络成本高,网络扩充也不方便。每增加一个节点,就需要增加  $N$  条线路。因此,这种方式比较适合于节点数目较少且对可靠性要求比较高的场合当中。

#### 2. 星型

星型网如同星状,以一点为中心向四周辐射,因此也称辐射网。中央节点分别与四周的节点连接,因此具有  $N$  个节点的星型网需要  $N-1$  条链路。与网状网相比,星型网降低了传输链路的成本,提高了线路的利用率。但是星型网过度依赖于中央节点,一旦中央节点发生故障

或者转接能力不足,就会使全网的通信受到影响。这种方式适合于传输链路费用高于转接设备、可靠性要求相对不高的场合,以降低成本。

### 3. 树型

树型网可以看作星型网的扩展,是由多个纵向层次的星型网连接而成。树型网络总长度短,成本较低,易于故障隔离,节点易于扩充。但是树型网络复杂,网络中各个节点对根节点依赖性较大。这种拓扑结构主要用于用户接入网或用户线路网中。

### 4. 总线型

总线型网中所有节点都连接到一条称作总线的公共传输线上,任何时候只允许一个用户使用总线发送或接收数据。这种方式需要的传输链路少,节点间通信无需任何转接节点,增加或删除节点很方便。但是网络服务性能稳定性差,网络中接入的节点数目不宜过多,网络覆盖范围也较小。

### 5. 环型

环型网中所有节点首尾相连,组成一个环。具有  $N$  个节点的环型网有  $N$  段传输链路。环型网可以是单向环或者双向环。这种方式结构简单、容易实现,双向自愈环结构可以对网络进行保护。但是这种方式不易扩充,节点较多时转接时延无法控制。现在的 SDH 光传输系统组网中经常采用这种结构。

## 1.2 传输介质

传输介质是指通信网中传输信息的载体,任何数据在实际传输时都会被转换为电信号或光信号在传输介质中传输。根据传输介质的特征,可以分为有线传输介质和无线传输介质。

### 1.2.1 有线传输介质

顾名思义,有线传输介质是指有形的固体介质,电磁波信号可以在传输过程中沿着这种有形介质传输,因此有线传输介质也称为导引型传输媒体。有线介质主要包括同轴电缆、双绞线和光纤。

#### 1. 同轴电缆

同轴电缆是局域网中常用的传输介质之一,主要应用于环型和总线型等小型局域网中。同轴电缆以硬铜线为芯,外面包裹绝缘层以及网状编织的外导体屏蔽层,最外层是绝缘的护套,因此得名同轴电缆。同轴电缆结构如图 1.2 所示。

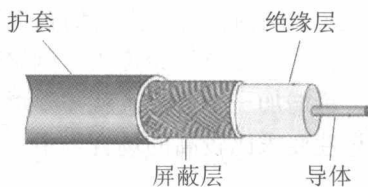


图 1.2 同轴电缆结构示意图

根据电缆使用频带的不同,同轴电缆可以分为基带同轴电缆和宽带同轴电缆。计算机网络中使用的电缆是基带同轴电缆,而有线电视网络中使用的电缆是宽带同轴电缆。同轴电缆抗

干扰性较好,在计算机网络发展初期曾被广泛使用,但是随着技术的进步,逐渐被双绞线、光纤等替代。

## 2. 双绞线

双绞线是一种常用的传输介质,在家庭、学校、办公场所等局域网中非常常见。其设计最初是用于语音信号传输,将电话连接到电话交换机。

把两根互相绝缘的铜导线并排放在一起,按照规定的方法两两绞合在一起就构成了双绞线,这种绞合的方法可以显著降低天线效应(既可以发射传输的信号,也容易受外界信号干扰)。为了提高双绞线的抗电磁干扰能力,可以在双绞线的外层再用金属丝编织屏蔽层。根据是否进行屏蔽可以将双绞线分为屏蔽双绞线(Shielded Twisted Pair, STP)和非屏蔽双绞线(Unshielded Twisted Pair, UTP)。它们的结构如图 1.3 所示。

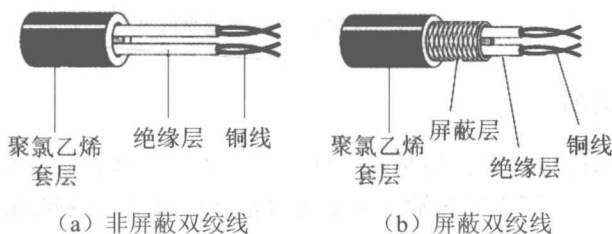


图 1.3 双绞线结构示意图

屏蔽双绞线的屏蔽层可以有效减少辐射,提高抗干扰能力,但是价格相对较高,安装比非屏蔽双绞线困难,仅在特定领域或者有特殊需求时使用。

## 3. 光纤

光纤是一种很细的可以用来传输光信号的有线传输介质。光纤由纤芯、封套和外套三部分构成,其中纤芯是由两种折射率不同的石英玻璃材料制成,外套一般由塑料制成。光纤的物理结构如图 1.4 所示。

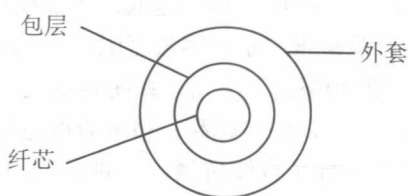


图 1.4 光纤结构示意图

根据光纤传输数据模式的不同,可以分为单模光纤和多模光纤。如果存在多条不同入射角度的光线进入光纤,即允许多个光传导模式同时通过光纤,则这种光纤称为多模光纤。由于光脉冲在通过多模光纤时会逐渐展宽,造成失真,因此多模光纤主要用于短距离低速传输,比如接入网和局域网中。单模光纤纤芯直径非常小,任何时候只允许光信号以一种模式通过纤芯,传输距离更长、带宽更宽,但是制造成本较高。单模光纤和多模光纤如图 1.5 所示。

与其他有线传输介质相比,光纤的通信容量非常大,传输损耗小、距离长,抗干扰性能好,而且保密性也非常好,体积小、重量轻。因此目前被广泛应用于因特网、电信网和有线电视网的主干网络中。

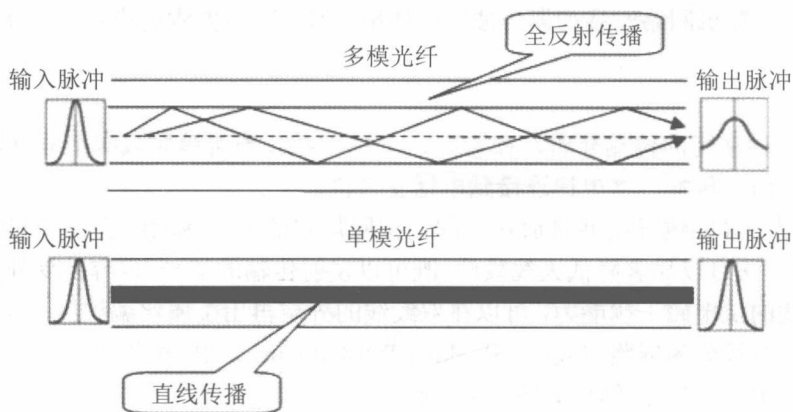


图 1.5 单模光纤与多模光纤

### 1.2.2 无线传输介质

有线传输介质使用比较广泛，但是在一些场景当中，有线传输介质的施工很不方便，或者施工的代价比较高。而利用无线传输介质则可以很好地解决这些问题。比如旧楼宇施工布线极不方便，价格也不便宜，但是借助于 WiFi 则可以很方便地连网。

无线传输介质是指利用各种波长的电磁波充当传输媒体的传输介质。目前使用较多的无线传输介质主要包括无线电波、微波、红外线、蓝牙、激光等。

#### 1. 无线电波

无线电波是指在自由空间（包括空气和真空）传播的射频频段的电磁波，是一种能量的传播形式，其频率范围在  $3\text{Hz}\sim 3000\text{GHz}$  之间。无线电技术是通过无线电波传播声音或其他信号的技术。

无线电波包括超长波、长波、中波、短波、超短波、微波等，波长越长，频率越低。在不同波段内的无线电波具有不同的传播特性。频率越低，传播损耗越小，覆盖距离越远，绕射能力也越强。但是低频段的频率资源紧张，系统容量有限，因此低频段的无线电波主要应用于广播、电视、寻呼等系统。高频段的频率资源丰富，系统容量大。但是频率越高，传播损耗越大，覆盖距离越近，绕射能力越弱。另外，频率越高，技术难度也越大，系统的成本相应提高。

无线电波传播有两种方式：一种是直线传播，一种是利用大气中电离层的反射传播。

#### 2. 微波

微波是指频率范围在  $300\text{MHz}\sim 300\text{GHz}$  的电磁波，是一种定向传播的电磁波，主要是直线传播。传统的微波通信系统主要有两种：地面微波和卫星微波。

由于微波为直线传播，而地球为曲面，因此地面微波的传输距离有限，并且两个终端之间不能有大障碍物。如果需要增加传输距离，可以在两个终端之间增加中继站。地面微波对外界的干扰比较敏感。

常用的卫星通信是在地球站之间利用位于大约 36000 千米高空的地球同步卫星作为中继站的一种微波通信。卫星接收来自地面的电磁波信号后，再通过使用不同频率以广播方式将信号发回地面，由地面工作站接收信号。这种通信传输距离远，能够跨越山川、陆地和海洋，但由于传输距离远，因此会有一定的传播时延，而且发射同步卫星本身费用较高。卫星通信技术

广泛应用于以车辆动态位置为基础的交通监控、调度、导航等服务。

地面微波和卫星微波在传输信号过程中都容易受到不良天气影响，抗干扰性较差。

### 3. 红外线

红外线 (Infrared) 是波长介于微波与可见光之间的电磁波，波长在  $760\text{ nm}\sim 1\text{ mm}$  之间，是比红光长的非可见光。红外线作为局域网的一种传输方式，最大的优点就是不受无线电波的干扰，而且不易被人发现和截获，保密性好。但是红外线传输距离有限，容易受太阳光的干扰，而且两个通信终端之间不能有障碍物。IrDA 是一种利用红外线进行点对点通信的技术。和现在手机上的蓝牙一样，以前的手机（比如诺基亚）上就自带红外通信功能，只要两个手机同时开启红外功能且它们之间没有障碍物就可以通过该功能实现数据的传输。

### 4. 蓝牙

蓝牙是为人们所熟悉的一种通信方式，比如蓝牙耳机。它是一种支持点对点、点对多点连接的近距离通信手段。蓝牙工作在  $2.4\text{ GHz}$  的 ISM 频段。蓝牙设备成本低、体积小、功率低，可以被集成到任何数字设备之中，并且具有很好的抗干扰能力。

### 5. 激光

除了光纤可以用光进行信息的传递外，激光束也可以用于在空中传输数据。要想利用激光进行通信至少需要两个激光站，每个站点都具有发送和接收数据的能力，这点和微波通信是相似的。激光设备一般安装在固定装置上，并与天线相对应。激光束沿直线传播，不能穿过建筑物或山脉，但是可以穿越云层。

物联网的关键技术之一就是传输技术，包括移动通信网、互联网、无线网络、卫星通信和短距离无线通信等。因此本节所介绍的各种传输介质是通信的基础，尤其是诸如蓝牙、ZigBee、WiFi、IrDA 等短距离无线通信在物联网中发挥着举足轻重的作用。

## 1.3 调制技术

通信过程中，信源产生信号。但是直接由信源产生的信号包含直流分量和低频分量，不适合远距离无线传输，因此需要将信源产生的基带信号转换为适合在当前信道传输的信号，这个过程就是调制。基带信号称为调制信号，经过调制的信号称为已调信号。当然，在发送端需要调制过程，对应在接收端需要再将信号还原为基带信号，这个过程称为解调。生活中常见的“猫”（调制解调器）的英文单词 Modem 其实就是调制解调两个单词合成的缩略词。

调制的目的除了将基带信号转换为适合在当前信道传输的信号外，还包括以下几个方面：

(1) 提高无线通信时天线的辐射效率。对无线传输信号而言，信号需要通过发射天线发送出去，并且发射天线的尺寸至少为发射信号波长的  $1/10$ ，但是基带信号频率较低，波长较长，因此如果直接发射会使得发射天线太长，难以实现。

(2) 实现多路复用。传输信道的频带较宽，可以同时传输多个频率范围的信号，因此通过调制可以把基带信号搬移到不同的频率上去，从而实现多路复用，提高信道利用率。

(3) 扩展信号的带宽，提高系统的抗干扰能力和抗衰减能力，还可以实现传输带宽与信噪比之间的互换。

按照调制信号的信号形式，调制可以分为模拟调制和数字调制。模拟调制用模拟信号调制载波来得到已调信号；数字调制用数字信号调制载波来得到已调信号。模拟调制比较直观，



而且容易实现,但是抗干扰能力和保密性差一些。数字调制相对来说要求的技术和设备复杂一些,但是抗干扰能力和保密性都比较好。

### 1.3.1 模拟调制

模拟调制使用模拟信号对载波的振幅、频率或相位进行调制,不同的调制方法会使已调信号的频谱结构与原基带信号的频谱结构有不同的差别。如果已调信号的频谱结构与调制信号的频谱结构相同,或者说已调信号的频谱只是调制信号的频谱沿频率轴平移,这种调制就称为线性调制,又称幅度调制。幅度调制是用调制信号去控制高频载波的振幅,使其按调制信号的规律变化的过程。其模型是用调制信号和载波进行相乘。对于幅度调制信号,在波形上,它的幅度随基带信号的规律变化;在频谱结构上,它的频谱完全是基带信号频谱结构在频域内的简单搬移。

如果已调信号的频谱结构与调制信号的频谱结构大不相同,除了频谱搬移外,还产生了新的频率成分,则这种调制称为非线性调制。非线性调制是将调制信号附加到载波的相角上,使载波的频率和相位随调制信号而变,故又称角度调制。与幅度调制相比,角度调制最突出的优势是具有较高的抗噪声性能。

线性调制包括振幅调制(Amplitude Modulation, AM)、双边带调制(Double Side Band, DSB)、单边带调制(Single Side Band, SSB)和残留边带调制(Vestigial Side Band, VSB)。非线性调制包括频率调制(Frequency Modulation, FM)和相位调制(Phase Modulation, PM),这两种调制方法属于角度调制。

#### 1. 振幅调制(AM)

调幅(AM)是使已调信号的包络与基带信号的变化成比例。幅度调制的数学模型如图 1.6 所示。其中: $m(t)$ 表示调制信号,均值为 0; $A_0$ 为常数,表示叠加的直流分量; $\omega_c$ 为载波角频率; $S_m(t)$ 为已调信号,是振幅调制信号,简称调幅信号。幅度调制信号的时域波形如图 1.7 所示。

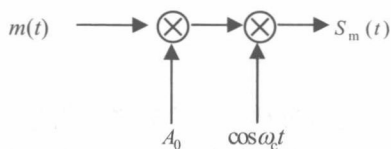


图 1.6 幅度调制数学模型

由调幅信号的波形不难看出,调制信号包络的形状和调制信号的波形一样,因此在接收端可以通过包络检波法(属于非相干解调)恢复出原来的信号。该方法实现起来非常简单,但它只适用于包含有载波的普通调幅信号。当然,也可以使用相干解调(也叫做同步检测)的方法,但是这种方法需要在接收端使用与发送端同频同相的本地载波进行相乘,然后通过低通滤波器滤除高频分量得到原信号。由于需要与发送端同频同相的相干载波,故接收电路比较复杂,因此这种方法实现起来比较困难。

对幅度调制的信号进行频谱分析可以发现,调幅信号的频谱由上边带、下边带和载频分量三个部分组成,其中上边带的频谱结构与原调制信号的频谱结构相同,下边带是上边带的镜像。AM 信号的总功率也同样包括载波功率和边带功率两部分。但只有边带功率与调制信号有关,载波分量并不携带信息,却占据了大部分功率。把有用功率(用于传输有用信息的边带功率)占信号总功率的比例称为调制效率,AM 调制的调制效率最高只有 1/3,功率利用率低。

对幅度调制的信号进行频谱分析可以发现,调幅信号的频谱由上边带、下边带和载频分量三个部分组成,其中上边带的频谱结构与原调制信号的频谱结构相同,下边带是上边带的镜像。AM 信号的总功率也同样包括载波功率和边带功率两部分。但只有边带功率与调制信号有关,载波分量并不携带信息,却占据了大部分功率。把有用功率(用于传输有用信息的边带功率)占信号总功率的比例称为调制效率,AM 调制的调制效率最高只有 1/3,功率利用率低。

AM 信号带宽是基带信号带宽的两倍。



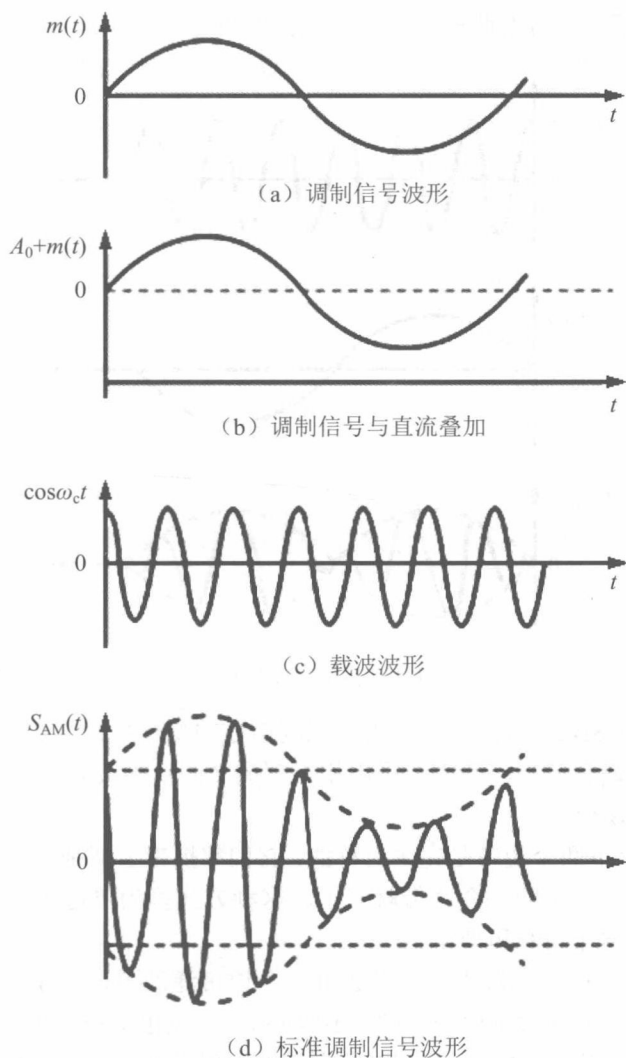


图 1.7 AM 时域波形

## 2. 双边带调制 (DSB)

如果调制信号  $m(t)$  没有直流分量, 则输出信号中没有载频分量。这时已调信号的频谱中只有上边带和下边带而没有载频分量, 因此称其为双边带调制。DSB 调制数学模型如图 1.8 所示, DSB 时域波形如图 1.9 所示。

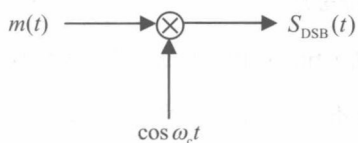


图 1.8 DSB 调制数学模型

由于发送 DSB 信号时并不需要发送载波信号, 因此节省了载波的发射功率, 调制效率可