

第3章

认识物联网网络层技术

本章介绍

网络是物联网最重要的基础设施之一，物联网和现有网络有何异同？无线网络在物联网中扮演什么角色？通过对本章的学习，读者将对上述问题有更清楚的理解。网络层在物联网三层架构模型中连接感知层和应用层，起到强大的纽带作用，高效、稳定、及时、安全地传输上下层的数据。本章着重介绍了典型短距离无线通信技术、典型长距离无线通信技术的基本概念和应用，探讨了各种通信技术在物联网的应用。

任务安排

- 任务1 典型短距离无线通信技术
- 任务2 典型长距离无线通信技术

任务1 典型短距离无线通信技术

任务描述

小王在学习了物联网的基本知识后，经常考虑一件事，物联网在感知层获得了物理世界的基本信息后，如何传输到客户端呢？各个物联网设备之间如何传递信息呢？老师对小王的主动思考能力表示赞许，并告诉他，这些都属于物联网通信方面的知识，需要进一步学习和了解相关的通信技术。在本任务中，我们将学习典型的短距离无线通信技术。

任务目标

知识目标

- ◇ 了解短距离无线通信技术的定义

- ◇ 了解常见短距离无线通信技术的定义
- ◇ 理解常见短距离无线通信技术的原理
- ◇ 理解不同短距离通信技术之间的通信方式

能力目标

- ◇ 能发现生活中短距离无线通信技术的应用
- ◇ 能够解释短距离无线通信技术的通信方式
- ◇ 能够解释不同短距离通信技术之间的区别

素质目标

- ◇ 培养主动观察的意识
- ◇ 培养独立思考的能力
- ◇ 培养积极沟通的习惯
- ◇ 培养团队合作精神
- ◇ 激发科技兴国的爱国热情
- ◇ 激发科技报国的爱国情怀

→ 知识准备

引导案例——智能家居中的短距离无线通信技术

随着经济社会的发展和科技的不断进步，人们越来越追求高安全度、高舒适度的生活环境和智能化、多样性的信息服务。为了满足人们的这些需求，智能家居应运而生。人们在尽享住宅高安全度、高舒适度的同时，对住宅网络化、智能化信息服务提出了新的要求，顺应此种趋势，多种短距离无线通信技术各自发挥特长，目前常用的物联网短距离无线通信技术有 Wi-Fi 技术、蓝牙技术、ZigBee 技术等。

3.1.1 Wi-Fi 技术

2022 年，共享 Wi-Fi “火”了。简单来讲，共享 Wi-Fi 就是将 Wi-Fi 账号和密码生成一个二维码，微信扫码即可自动连接 Wi-Fi。

它的应用场景一般为各类店铺，如餐饮、娱乐、休闲、住宿等类型的店铺，只要有顾客的地方，店家只需要贴一张 Wi-Fi 二维码贴纸，便可为顾客提供 Wi-Fi 服务，不但能方便顾客，而且能方便店家，大大提升用户消费体验感和店铺的运营效率。

只要有顾客需要使用 Wi-Fi，就会有共享 Wi-Fi 的需求，而在人人都使用智能手机的时代，只要是店铺就会有需求。据相关机构初步统计和预测，共享 Wi-Fi 的市场规模可达亿元级别。

1. Wi-Fi 的定义

Wi-Fi (Wireless Fidelity, 无线保真) 是一种允许电子设备连接到一个无线局域网 (Wireless LAN, WLAN) 的技术, 通常指符合 IEEE 802.11b 标准的网络产品, 使用 2.4G UHF 或 5G SHF ISM 射频频段。

Wi-Fi 可以将个人计算机、手持设备（PDA、手机等）等终端以无线方式互相连接。Wi-Fi 连接到无线局域网通常是有密码保护的，但是也可以是开放的。

通常人们会把 Wi-Fi 及 IEEE 802.11 混为一谈，甚至把 Wi-Fi 等同于无线网络。但实际上 Wi-Fi 是一个无线通信技术的品牌，由 Wi-Fi 联盟（Wi-Fi Alliance）持有，Wi-Fi 用于改善基于 IEEE 802.11 标准的无线网络产品之间的互通性，保障使用该商标的产品之间可以互相合作。因此，Wi-Fi 可以看作 IEEE 802.11 协议的具体实现，但现在人们逐渐习惯用 Wi-Fi 来称呼 IEEE 802.11 协议，其已经成为 IEEE 802.11 协议的代名词。

2. Wi-Fi 的历史沿革

1999 年，Wireless Ethernet Compatibility Alliance（WECA）成立，后来 WECA 更名为 Wi-Fi 联盟，现总部设在美国得克萨斯州，成员单位超过 300 个。

2000 年，Wi-Fi 联盟启动 Wi-Fi 认证计划，对 WLAN 产品进行 IEEE 802.11 兼容性认证测试。

2007 年，Wi-Fi 联盟启动 IEEE 802.11n draft2 认证测试。

Wi-Fi4（IEEE 802.11n）、Wi-Fi5（IEEE 802.11ac）、Wi-Fi6（IEEE 802.11ax）、Wi-Fi6E（IEEE 802.11ax）分别于 2009 年、2013 年、2019 年、2021 年发布。

2022 年，各厂商相继推出 Wi-Fi7 产品和解决方案。

2023 年 2 月底，国内对 Wi-Fi7 启动认证，厂商通过 Wi-Fi7 技术标准认证后，其产品就能上市。

Wi-Fi 系列协议的发展及演进情况如表 3-1 所示。

表 3-1 Wi-Fi 系列协议的发展及演进情况

	首个	Wi-Fi1	Wi-Fi2	Wi-Fi3	Wi-Fi4	Wi-Fi5	Wi-Fi6	Wi-Fi6E	Wi-Fi7
标准	IEEE 802.11 Prime	IEEE 802.11b	IEEE 802.11a	IEEE 802.11g	IEEE 802.11n	IEEE 802.11ac	IEEE 802.11ax	IEEE 802.11ax	IEEE 802.11be
发布时间（年）	1997	1999	1999	2003	2009	2013	2019	2021	2023
最大速率（bit/s）	1M 或 2M	11M	54M	54M	600M	6.928G	9.6G	9.6G	46G
工作频段（GHz）	2.4	2.4	5	2.4	2.4/5	5	2.4/5	2.4/5/6	2.4/5/6
安全	WPA	WPA	WPA	WPA	WPA2	WPA2	WPA3	WPA3	WPA3
MIMO	—	—	—	—	4×4MIMO	4×4MIMO DLMU-MIMO	8×8UL/DL MU-MIMO	8×8UL/DL MU-MIMO	16×16MU- MIMO
调制方式	DSSS/ FHSS	DSSS	OFDM	DSSS/ OFDM	64QAM/ OFDM	256QAM/ OFDM	1024QAM/ OFDMA	1024QAM/ OFDMA	4096QAM/ OFDMA
无交叠信道	—	3 个	12 个	3 个	13 个	13 个	13 个	13 个	16 个
信道带宽（MHz）	20	20	20	20	20/40	20/40/80/80+ 80/160	20/40/80/80+ 80/160	20/40/80/80+ 80/160	160+160/320
兼容性	—	通过认证 可互通	不兼容 802.11b/g	兼容 802.11b	向下兼容 802.11a/b/g	向下兼容 802.11a/n	向下兼容 802.11a/n/ac	向下兼容 802.11a/n/ac	向下兼容

2021年,全球Wi-Fi热点市场总规模达到252.28亿元。2022年,全球有近180亿台Wi-Fi设备投入使用,年出货量超过44亿台。到2023年,将有近6.28亿个公共Wi-Fi热点,其中十分之一配备了基于IEEE 802.11ax的Wi-Fi6。预计在2021—2027年期间,Wi-Fi热点市场总规模将以12.6%的复合年增长率稳步增长,2027年全球Wi-Fi热点市场总规模将达到514.17亿元。

3. Wi-Fi 的特点

自1997年IEEE发布了第一个无线网络规范IEEE 802.11开始,无线网络因其独特的优势迅猛发展起来。Wi-Fi技术的特性进一步提高了无线网络的发展速度。Wi-Fi技术的主要特点如下。

① 无线电波的覆盖范围广。基于蓝牙技术的无线电波的覆盖半径为15m左右,而基于Wi-Fi技术的无线电波的覆盖半径为100m左右,可以实现整栋大楼的无线通信,Wi-Fi6的传输距离可达300~400m。

② 数据传输速率高。虽然Wi-Fi技术的无线通信质量和数据安全性能比蓝牙差一些,但其数据传输速率非常高,IEEE 802.11b可以达到11Mbit/s,IEEE 802.11ax即Wi-Fi6的最大数据传输速率可达9.6Gbit/s,Wi-Fi7的最大数据传输速率可达46Gbit/s。

③ 无须布线,节省了布线的成本。

④ 发射功率低,对人体辐射小。IEEE 802.11规定的发射功率不能超过100mW,实际发射功率为60~70mW,对人体的辐射小。

⑤ 组网方式简单,容易实现。一般只需一个无线网卡及一个无线访问节点就可组成一个Wi-Fi无线网络。

Wi-Fi技术在应用中也存在一定的问题,Wi-Fi的无线通信质量不是很好,数据安全性能比蓝牙差一些,传输质量有待改善,由于Wi-Fi的工作频段为2.4GHz的开放频段,因此其也容易受到其他设备的干扰。

4. Wi-Fi 的系统构成

(1) 基本结构。

Wi-Fi网络架构主要包括以下六部分。

① 站点(Station):网络最基本的组成部分。

② 基本服务集(Basic Service Set, BSS):网络最基本的服务单元,站点可以动态地连接到BSS中。

③ 分配系统(Distribution System, DS):用于连接不同的基本服务集。

④ 接入点(Access Point, AP):既有普通站点的身份,又有接入分配系统的功能。

⑤ 扩展服务集(Extended Service Set, ESS):由分配系统和基本服务集组合而成。

⑥ 关口(Portal):用于将无线局域网和有线局域网或其他网络联系起来。

(2) 工作原理。

Wi-Fi的设置需要一个AP和一个或一个以上的客户端(Client)。AP每100ms将SSID(Service Set Identifier,服务集标识符)经由信号台封包广播一次,信号台封包的传输速率是1Mbit/s,并且长度相当短,所以这个广播动作对网络效能的影响不大。因为Wi-Fi规定

的最低传输速率是 1Mbit/s，所以所有的客户端都能收到这个 SSID 广播封包，客户端可以借此决定是否要和这一个 SSID 广播封包的 AP 连接。使用者可以设置要连接到哪一个 AP，Wi-Fi 总是对客户端开放其连接标准，并支持漫游的。

(3) 网络拓扑。

能互相进行无线通信的站点组成一个 BSS，BSS 是 Wi-Fi 网络的基本单元。Wi-Fi 网络有如下 3 种常见拓扑结构。

① 集中式拓扑结构。

集中式拓扑结构如图 3-1 (a) 所示，由无线 AP 提供网络连接和通信中继，AP 的作用相当于蜂窝移动通信网中的基站。在此拓扑结构的网络中，各站点不能直接通信，需由 AP 转发。

② 分布式拓扑结构。

分布式拓扑结构如图 3-1 (b) 所示，在没有预先设置基础通信设施的环境中，网络中没有 AP 设备，各个无线站点间彼此直接进行通信，构成一种独立 BSS (IBSS)，该网络模式也称为自组织网 (AD HOC) 模式。

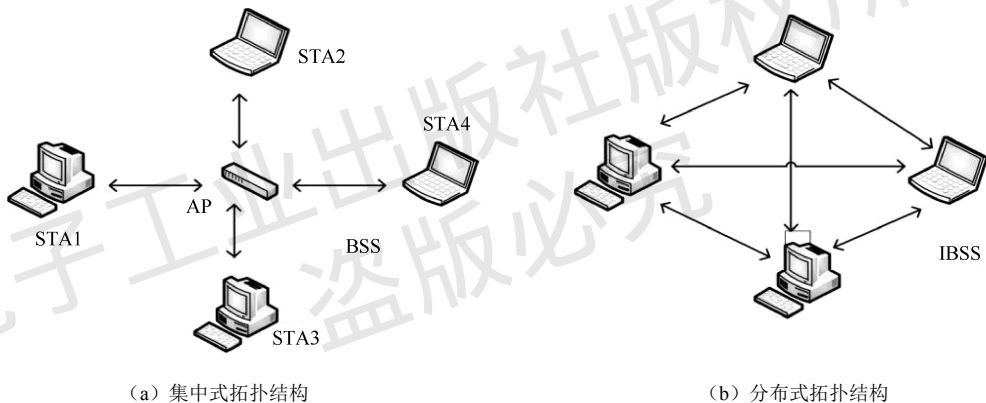


图 3-1 Wi-Fi 网络的拓扑结构

③ 复合式拓扑结构。

在实际应用中，经常需要 BSS 间进行通信，Wi-Fi 网络通过 ESS 组建复合式网络来解决此问题。ESS 是由多个 BSS 通过分布式系统相互连接起来的，每个 BSS 都分配了一个 BSS ID 作为标识。ESS 是一种复合型网络，在 BSS 内部采用集中式拓扑结构，BSS 之间采用分布式拓扑结构。

5. Wi-Fi 的典型应用

Wi-Fi 作为有线联网方式的重要补充和延伸，已逐渐成为计算机网络中一个至关重要的组成部分，被广泛应用于金融证券、教育、大型企业、工矿港口、政府机关、酒店、机场、军队等。其产品主要包括无线 AP、无线网卡、无线路由器、无线网关、无线网桥等。

(1) 无线接入互联网。

Wi-Fi 技术作为组建无线网络的主流技术，为各种终端提供无线的宽带互联网接入，是移动互联网的主要实现方式。如图 3-2 所示，通过 Wi-Fi 可以支持手机、PDA、计算机等终端无线接入互联网。

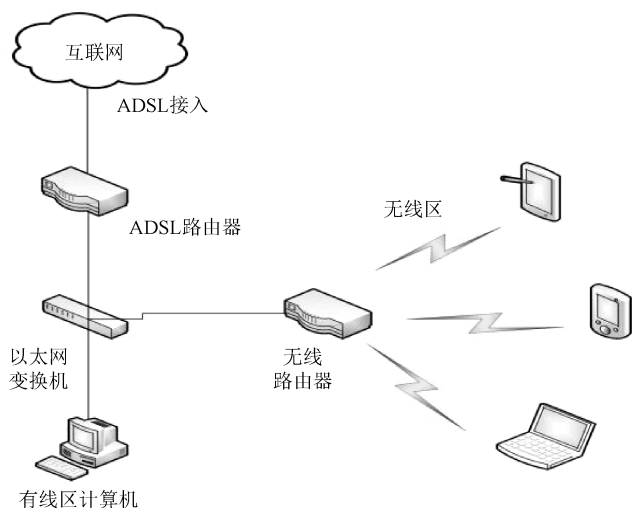


图 3-2 Wi-Fi 无线接入互联网示意图

(2) 无线信息公用网。

Wi-Fi 技术作为无线接入和网络互联方式，配以网关和服务器设备，可以组建无线信息公用网，如图 3-3 所示。

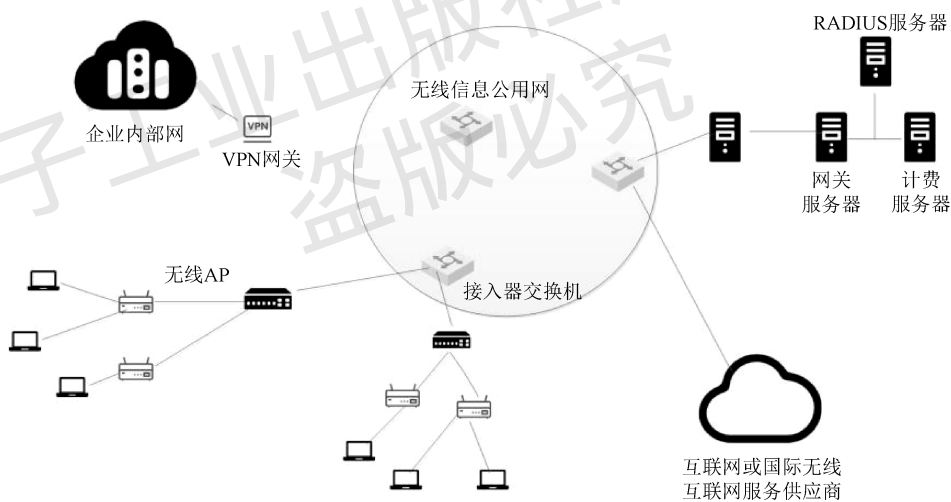


图 3-3 Wi-Fi 无线信息公用网示意图

(3) 热点覆盖。

Wi-Fi 技术作为无线接入和网络互联方式，配以 AP、交换机，可以完成热点覆盖，如图 3-4 所示。

(4) 在矿井中应用。

Wi-Fi 设备的功率较小，符合矿井的安全要求，可用于矿井环境，并且可以改变矿井中无线通信长久以来一直徘徊在窄频范围的现状，使无线通信方式在矿井中得到更多的运用，如图 3-5 所示。

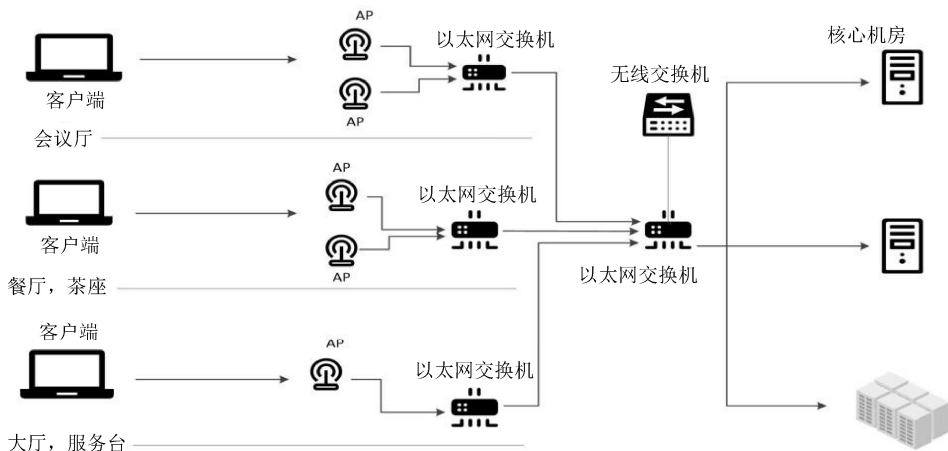


图 3-4 Wi-Fi 热点覆盖示意图

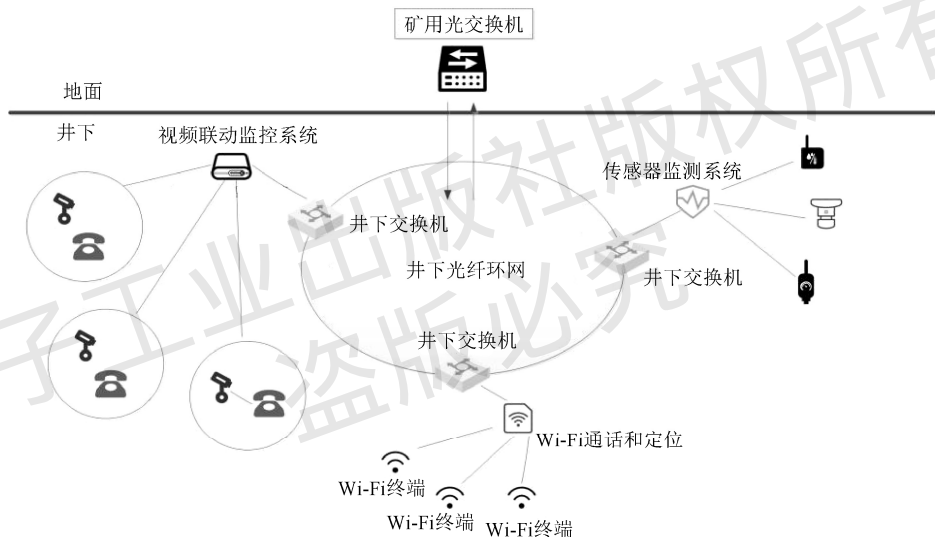


图 3-5 Wi-Fi 在矿井中的应用示意图

(5) Wi-Fi6 应用现状。

① Wi-Fi6 产品已逐渐成为主流，2023 年支持 Wi-Fi6 标准的芯片在 Wi-Fi 芯片总出货量中的占比将达到 90%。

② 新型应用场景将日益增多，Wi-Fi 技术在 VR、AR、超高清视频等新型高速率应用场景中具有高适用性，预计针对此类应用的 Wi-Fi 芯片在未来 5 年内将不断增多。

③ 物联网占比将逐步提升，在手机、平板计算机、笔记本计算机等消费电子终端出货量逐步下滑的背景下，Wi-Fi 技术将加快渗透至智能家居、智能制造等物联网应用场景中。

④ Wi-Fi6 将与 5G 技术形成互补共存关系，Wi-Fi6 与 5G 技术是通信领域的两大前沿技术，两种技术具有高速率、低时延等优势，均可用于物联网、VR、超高清视频等应用领域，这两项技术将逐步形成互补共存关系。

(6) Wi-Fi7 典型应用场景。

Wi-Fi7 引入的新功能将大大提高数据传输速率并提供更低的时延，而这些优势将更有

助于新应用的发展, Wi-Fi7 的典型应用场景有视频流、视频/语音会议、无线游戏、实时协作、云/边缘计算、工业物联网、沉浸式 AR/VR、互动远程医疗。

3.1.2 蓝牙技术

1. 蓝牙的概念

蓝牙技术是一种短距离无线通信技术, 它最初的目标是取代现有的掌上计算机、手机等各种数字设备上的有线电缆连接。利用蓝牙技术能构建无线网络, 简化手机、笔记本电脑、掌上计算机、无线耳机、相关外围设备等众多设备之间及其与互联网之间的通信, 使网络最终不再受到地域与线路的限制, 从而实现真正的随身上网与资料互换。

2. 蓝牙的应用

看一看你身边的蓝牙设备有多少。蓝牙几乎可以被集成到任何数据设备之中, 而不局限于最初诞生时的计算机外围设备, 蓝牙技术的应用场景十分多, 它能广泛用于各种短距离通信环境, 特别是对数据传输速率要求不高的移动设备和便携设备。

以下是蓝牙技术的一些具体应用场景。

(1) 数据共享。

无论是手机、计算机、PDA、打印机, 还是智能音箱等都可以利用蓝牙技术来共享数据, 操作方便。如手机在完成照片拍摄之后, 可以直接将照片通过蓝牙传入具备蓝牙功能的打印机中进行打印; 又如手机可以连接到蓝牙智能音箱播放音乐。

(2) 无绳桌面。

将桌面/笔记本电脑无线连接到打印机、扫描仪、键盘、鼠标和 LAN 上。

(3) 无线免提。

使蓝牙耳机与手机等设备相连, 将双手解放出来完成更重要的任务; 进入汽车后, 将手机与车载蓝牙相连, 在驾驶汽车时使用蓝牙接听电话, 安全驾驶更有保障。

(4) 同步资料。

无论是在办公室还是在家里, 用户的笔记本电脑、手机或 PDA 都可通过蓝牙产品及相应程序, 与其他设备同步, 内部信息永葆最新。当然, E-mail 也可以实时接收并同步输入计算机, 而且 E-mail 可以在飞机上完成, 下机后自动发出。

(5) 互联网接入。

内置蓝牙芯片的笔记本电脑或掌上计算机, 可以通过蓝牙连接到蓝牙功能已打开的手机上, 从而使用手机端的蜂窝移动通信网进行上网冲浪。

3. 蓝牙的起源

蓝牙是由瑞典爱立信、芬兰诺基亚、日本东芝、美国 IBM 和 Intel 等五家著名厂商, 于 1998 年 5 月在联合开展的一项旨在实现网络中各类数据及语音设备互联的计划中提出的。1999 年下半年, 著名的 IT 界巨头微软、摩托罗拉、3Com、朗讯与蓝牙特别兴趣小组的五家公司共同成立了蓝牙技术推广组织, 从而在全球范围内掀起了一股蓝牙热。蓝牙技术在短短时间内, 以迅雷不及掩耳之势席卷了世界各个角落。

4. 蓝牙的特点

蓝牙技术联盟在制定蓝牙规范之初，就建立了全球统一的目标，向全球发布，工作频段为全球统一开放的 2.4GHz 的 ISM 频段。蓝牙技术具有开放性高、成本低、功耗低、体积小、点对多点连接、语音与数据混合传输、抗干扰能力强，以及强调移动性和易用性应用环境等特点。

蓝牙是一种短距离无线通信技术，传输距离是 10~30m，在加入额外的功率放大器后，可以扩展到 100m，蓝牙 5.3 的理论最大传输距离可达 300m，不过条件较苛刻。

蓝牙可以保证较高的数据传输速率，蓝牙 1.0 的数据传输速率为 723.1kbit/s，蓝牙 5.3 的数据传输速率可达 48Mbit/s。

蓝牙支持实时语音传输和各种速率的数据传输，可单独或同时传输。当仅传输语音时，蓝牙设备最多可同时支持 3 路全双工的语音通信，辅助的基带硬件可以支持 4 个或者更多的语音信道。

蓝牙工作在 2.4GHz 的 ISM 频段，使用扩频和快速跳频（1600 跳/秒）技术。与其他工作在相同频段的系统相比，蓝牙跳频更快，数据包更短，从而更加稳定，即使在噪声环境中也可以正确无误地工作，还有利于保证安全性。另外，蓝牙还采用循环冗余校验（CRC）、前向纠错方式（FEC）及自动重传请求（ARQ）技术，以确保通信的可靠性，同时降低与其他电子产品和无线电系统的干扰。

蓝牙可根据需要支持点到点和点到多点的无线连接。采用无线方式可将若干蓝牙设备连成一个微微网（Piconet），多个微微网又可互联成分散网（Scatternet），形成灵活的多重微微网的拓扑结构，从而实现各类设备之间的快速通信。

每个收发机配置了符合 IEEE 802 标准的 48 位地址，任意蓝牙设备都可根据 IEEE 802 标准得到一个唯一的 48 位设备地址码 BD_ADDR。在 BD_ADDR 基础上，使用一些性能良好的算法可获得各种保密码和安全码，从而保证了设备识别码（ID）在全球的唯一性，以及通信过程中的安全性和保密性。

5. 蓝牙的呼叫过程

蓝牙主设备发起呼叫，首先进行查找，找出周围处于可被查找状态的蓝牙设备，此时从设备需要处于可被查找状态。

主设备找到从设备后，与从设备进行配对，此时需要输入从设备的 PIN 码，一般蓝牙耳机默认为 1234 或 0000，立体声蓝牙耳机默认为 8888，也有的设备不需要输入 PIN 码。

配对完成后，从设备会记录主设备的信任信息，此时主设备即可向从设备发起呼叫，根据应用不同，可以是 ACL 数据链路呼叫，也可以是 SCO 语音链路呼叫，已配对的设备在下次呼叫时，不再需要重新配对。

在已配对的设备中，作为从设备的蓝牙耳机也可以发起建链请求，但进行数据通信的蓝牙模块一般不发起呼叫。

链路建立成功后，主、从设备之间即可进行双向的数据或语音通信。在通信状态下，主、从设备都可以发起断链请求，断开蓝牙链路。

6. 蓝牙的组网

若干蓝牙设备可以组成网络使用。蓝牙既可以“点到点”，又可以“点到多点”进行无线连接。蓝牙网络的拓扑结构有两种形式，即微微网和分散网，如图 3-6 所示，它们均是无基站的组网方式。

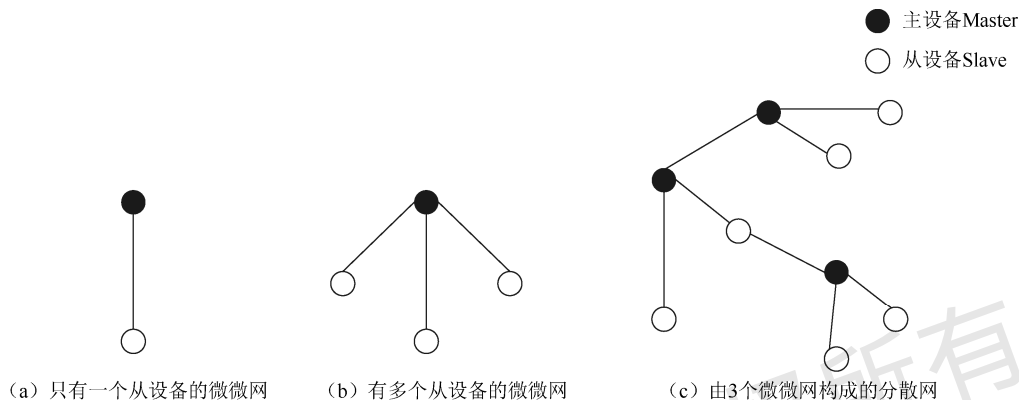


图 3-6 蓝牙网络的拓扑结构

(1) 微微网。

蓝牙中的基本联网单元是微微网，也称为主从网络，如图 3-6 (a)、图 3-6 (b) 所示，它由 1 台主设备和 1~7 台活跃的从设备组成。每个蓝牙设备都有自己的设备地址码 (BD_ADDR) 和活动成员地址码 (AD_ADDR)。组网过程中首先发起呼叫的蓝牙设备叫作主设备 (Master)，其余的称为从设备 (Slave)。在一个微微网中，主设备只能有一个。从设备仅可与主设备进行通信，并且只可以在主设备授予权限时进行通信。从设备之间不能直接通信，必须经过主设备才行。在同一微微网中，所有用户均用同一跳频序列同步，主设备确定此微微网中的跳频序列和时序。在一个互联的分布式网络中，一个节点设备可同时存在于多个微微网中，但不能在两个微微网中同时处于激活状态。

(2) 分散网。

分散网又称为散射网。在同一个区域内可能有多个微微网，一个微微网中的主设备也可以从属于另一个微微网，作为另一个微微网中的从设备，作为 2 个或 2 个以上微微网成员的蓝牙设备就成了网桥。网桥最多可以作为一个微微网的主设备，但可以作为多个微微网的从设备。多个微微网互联形成的网络称为分散网。图 3-6 (c) 所示为由 3 个微微网构成的分散网。

蓝牙分散网是自组织网的一种特例，其最大特点是可以无基站支持，每个移动终端的地位是平等的，并可独立进行分组转发的决策，其建网灵活性、多跳性、拓扑结构动态变化和分布式控制等特点是构建分散网的基础。

3.1.3 ZigBee 技术

1. ZigBee 的概念

ZigBee (中文称为蜂舞协议) 是一种短距离、结构简单、功耗低、数据传输速率低、

成本低和可靠性高的双向无线网络通信技术。

ZigBee 联盟成立于 2001 年 8 月。ZigBee 联盟采用了 IEEE 802.15.4 作为物理层和媒体接入层规范，并在此基础上制定了数据链路层（DLL）、网络层（NWK）和应用编程接口（API）规范，形成了 IEEE 802.15.4（ZigBee）技术标准。

ZigBee 功能示意图如图 3-7 所示，控制器通过收发器完成数据的无线发送和接收。ZigBee 工作在免授权的频段上，在 2.4GHz（全球流行）、868MHz（欧洲流行）和 915MHz（美国流行）3 个频段上，分别具有最高 250kbit/s、20kbit/s 和 40kbit/s 的数据传输速率，它的传输距离在 10~75m 的范围内，最大可达到 300~400m。

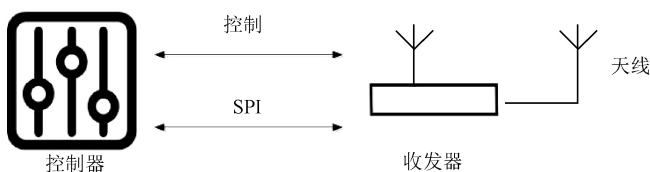


图 3-7 ZigBee 功能示意图

2. ZigBee 的应用

由于 ZigBee 具有功耗极低、系统简单、成本低、等待时间短和数据传输速率低的特点，因此非常适合有大量终端设备的网络，尤其适用于自动控制领域及组建短距离低速无线个人局域网（Low Rate-Wireless Personal Area Network, LR-WPAN），如楼宇自动化、工业监视及控制、计算机外围设备、互动玩具、医疗设备、消费性电子产品、家庭无线网络、无线传感器网络、无线门控系统和无线停车场计费系统等。

通常符合以下条件之一的应用，就可以考虑采用 ZigBee 技术：

- ① 设备成本很低，传输的数据量很小。
- ② 设备体积很小，不便放置较大的充电电池或电源模块。
- ③ 没有充足的电力支持，只能使用一次性电池。
- ④ 无法做到或者很难做到频繁地更换电池或者反复地充电。
- ⑤ 需要较大范围的通信覆盖，网络中的设备非常多，但仅仅用于监测或控制。

3. ZigBee 的特点

ZigBee 具有如下特点。

① 功耗极低：由于 ZigBee 的数据传输速率低，发射功率仅为 1mW，而且采用了休眠模式，功耗低，因此 ZigBee 设备非常省电。据估算，ZigBee 设备仅靠两节 5 号电池就可以维持长达 6 个月到 2 年的使用时间。

② 成本低：简单的协议和小的存储空间大大降低了 ZigBee 的成本，目前 ZigBee 芯片的成本为 2~3 美元，并且 ZigBee 协议是免专利费的。ZigBee 技术的成本是同类产品的几分之一甚至十分之一。

③ 时延短：通信时延和休眠激活的时延都非常短，典型的搜索设备时延为 30ms，休眠激活的时延是 15ms，活动设备信道接入的时延为 15ms。因此，ZigBee 技术适用于对时延要求苛刻的无线控制应用（工业控制场景等）。

④ 网络容量大：一个星形结构的 ZigBee 网络最多可以容纳 254 个从设备和 1 个主设备，一个区域内可以同时存在最多 100 个 ZigBee 网络，而且网络组成灵活。

⑤ 可靠性高：ZigBee 采取了碰撞避免策略，同时为需要固定带宽的通信业务预留了专用时隙，避开了发送数据的竞争和冲突。媒体访问控制层采用了完全确认的数据传输模式，发送的每个数据包都必须等待接收方的确认信息，如果传输过程中出现问题可以重发。

⑥ 安全性高：ZigBee 提供了基于 CRC 的数据包完整性检查功能，支持鉴权和认证，采用了 AES-128 加密算法，各个应用可以灵活确定其安全性。

⑦ 工作频段灵活：ZigBee 使用的频段分别为 2.4GHz（全球）、868MHz（欧洲）及 915 MHz（美国），均为免授权频段。

4. ZigBee 的网络拓扑结构

ZigBee 的体系结构以开放系统互联（Open Systems Interconnection, OSI）7 层模型为基础，但它只定义了和实际应用功能相关的层，如图 3-8 所示。它采用了 IEEE 802.15.4-2003 标准制定的两个层：物理层和媒体接入控制层作为 ZigBee 协议的物理层和媒体访问控制层，ZigBee 联盟在此基础上建立了它的网络层和应用层框架。

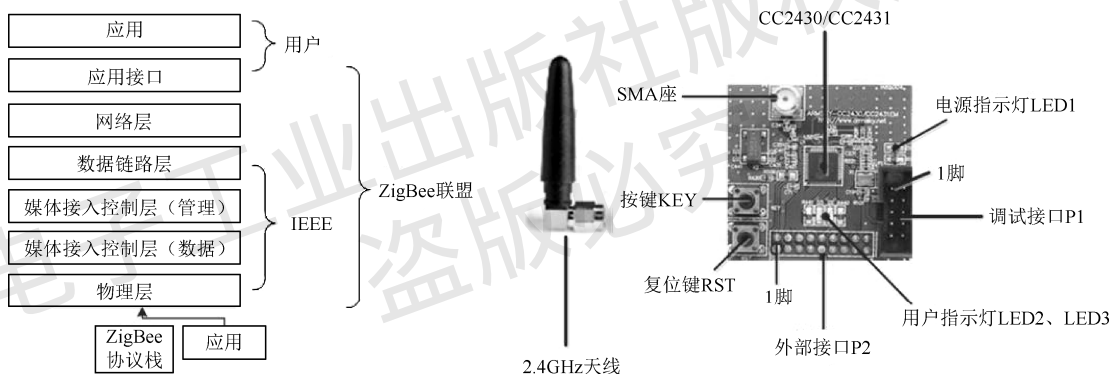


图 3-8 ZigBee 体系结构及模块示意图

利用 ZigBee 技术组成的无线个域网（Wireless Personal Area Network, WPAN）是一种 LR-WPAN。LR-WPAN 中可同时存在两种不同类型的设备：一种是具有完整功能的设备（Full Function Device, FFD）；另一种是具有简化功能的设备（Reduced Function Device, RFD）。

LR-WPAN 采用主从结构，一个网络由一个协调器（Coordinator）和最多可达 65535 个从设备组成。协调器必须是 FFD，它负责管理和维护网络，包括路由、安全性、节点的附着与离开等。一个网络只需要一个协调器，其他终端设备可以是 RFD，也可以是 FFD。一个网络中要求至少有一个 FFD 作为 PAN（Personal Area Network，个人域网）主协调器。

在网络中，FFD 通常有 3 种工作状态：①作为 PAN 主协调器；②作为一个协调器；③作为一个终端设备。一个 FFD 可以同时和多个 RFD 或多个其他的 FFD 通信，而对于一个 RFD 来说，它只能和一个 FFD 通信。RFD 的应用非常简单、容易实现，就好像一个电灯的开关或者一个红外线传感器，由于 RFD 不需要发送大量的数据，并且一次只能和一个 FFD 连接通信，因此，RFD 仅需要使用较少的资源和较小的存储空间，其占用的存储空间仅约为

4 KB，RFID 的价格要比 FFD 低得多，因此网络的整体成本比较低。这样，就可以非常容易地组建一个低成本和低功耗的无线通信网络，ZigBee 非常适合有大量终端设备的网络，如传感器网络、楼宇自动化等。

这种 LR-WPAN 的结构简单、成本低廉，具有有限的功率和灵活的吞吐量。LR-WPAN 的主要目标是实现安装容易、数据传输可靠、短距离通信、低成本及低功耗，并拥有一个简单而灵活的通信网络协议。

5. ZigBee 协议模型

ZigBee 协议模型如图 3-9 所示。



图 3-9 ZigBee 协议模型

(1) 物理层。

物理层的特征是启动和关闭无线收发器、信道能量检测、链路质量指示、信道选择、清除信道评估 (CCA)，以及通过物理媒体对数据包进行发送和接收。

① ZigBee 的工作频段。

众所周知，蓝牙技术在世界多数国家都采用统一的频段，即 2.4GHz 的 ISM 频段，调制采用快速跳频扩频技术。而 ZigBee 不同，不同的国家和地区为其提供的工作频段不同，ZigBee 所使用的工作频段主要为 868MHz、915MHz 和 2.4GHz 频段，各个频段的频率范围如表 3-2 所示。

由于各个国家和地区采用的工作频段不同，为提高数据传输速率，IEEE 802.15.4 标准对于不同的频段，规定了不同的调制方式，因而在不同的工作频段上，其数据传输速率也不同。

表 3-2 各个频段的频率范围

频段	频率范围/MHz	频段类型	国家和地区
868MHz	868~868.6	ISM	欧洲
9.5MHz	902~928	ISM	美国
2.4GHz	2400~2483.5	ISM	全球

通常情况下，ZigBee 不能同时兼容这 3 个工作频段，在选择 ZigBee 设备时，应根据当地无线电管理委员会的规定，购买符合当地所允许使用频段条件的设备，我国规定 ZigBee 的工作频段为 2.4 GHz。

② 发射功率。

ZigBee 的发射功率有严格的限制，其最大发射功率应该遵守所在国家制定的规范，通常情况下，ZigBee 的发射功率为 0~+10dBm，通信距离通常为 10 m，可扩大到约 300 m，其发射功率可根据需要，通过设置相应的服务原语进行控制。

(2) 媒体访问控制层。

媒体访问控制层提供了两种类型的服务：通过媒体访问控制层管理实体服务接入点 (MLME SAP) 向媒体访问控制层数据和媒体访问控制层管理提供服务。媒体访问控制层数据服务可以通过物理层数据服务发送和接收媒体访问控制层协议数据单元 (MPDU)。

媒体访问控制层的具体特征：信标管理、信道接入、时隙管理、发送确认帧、发送连接及断开连接请求。除此之外，媒体访问控制层还为应用合适的安全机制提供了一些方法。

(3) 网络层。

ZigBee 网络层 (安全层) 主要用于 ZigBee 的 LR-WPAN 组网连接、数据管理及网络安全等。

ZigBee 网络层的主要功能包括设备连接和断开网络时所采用的机制，以及在帧信息传输过程中所采用的安全性机制。此外，还包括设备之间的路由发现、路由维护和转交。并且，网络层还完成对一跳 (One Hop) 邻居设备的发现和相关节点信息的存储。一个 ZigBee 协调器 (ZigBee Coordinator) 创建一个新的网络，为新加入的设备分配短地址等。

ZigBee 网络层支持星型、树型和网状拓扑结构。在星型拓扑结构中，整个网络由一个称为 ZigBee 协调器的设备来控制。ZigBee 协调器负责发起和维持网络正常工作，保持与网络终端设备通信。在网状和树型拓扑结构中，ZigBee 协调器负责启动网络及选择关键的网络参数，同时可以使用路由器来扩展网络结构。在树型网络中，路由器采用分级路由策略来传送数据和控制信息。树型网络可以采用基于信标的方式进行通信。在网状网络中，设备之间使用完全对等的通信方式，路由器不发送通信信标。

(4) 应用层。

ZigBee 应用层包括：应用支持层、ZigBee 设备对象、应用程序框架。

应用支持层的功能包括维持绑定表及在绑定的设备之间传送消息。所谓绑定，就是基于两台设备的服务和需求将它们相匹配地连接起来。

ZigBee 设备对象的功能包括定义设备在网络中的角色 (ZigBee 协调器或终端设备)，发起或响应绑定请求，在网络设备之间建立安全机制。ZigBee 设备对象还负责发现网络中的设备，并且决定向它们提供哪种应用服务。

应用程序框架主要为 ZigBee 的实际应用提供一些应用框架模型等，以便实现对 ZigBee 技术的开发应用。在不同的应用场景下，其应用框架不同。从目前来看，不同厂商提供的应用框架是有差异的，应根据具体应用情况和所选择的产品来综合考虑其应用框架结构。

3.1.4 UWB 技术

近年来，超宽带 (Ultra-WideBand, UWB) 无线通信成为短距离、高速无线网络最热门的物理层技术之一，它利用超宽带的无线电波进行高速无线通信。超宽带的传输把调制

信息的过程放在一个非常宽的频段上进行，而且以这一过程所持续的时间来决定带宽所占据的频率范围。

1. UWB 的产生与发展

在 1989 年之前，UWB 这一术语并不常用，在信号的带宽和频谱结构方面也没有明确的规定。1989 年，美国国防部高级研究计划局（DARPA）首先采用 UWB 这一术语，并规定：若信号在 -20dB 处的绝对带宽大于 1.5GHz 或相对带宽大于 25% ，则该信号为超宽带信号。此后，UWB 这个术语就被沿用下来。为探索 UWB 应用于民用领域的可行性，自 1998 年起，美国联邦通信委员会（FCC）开始在产业界广泛征求意见，美国 NTIA 等通信团体对此提交了 800 多份意见书。

2002 年 2 月，FCC 批准 UWB 进入民用领域，并对 UWB 重新进行了定义，规定 UWB 信号为相对带宽大于 20% 或在 -10dB 处的绝对带宽大于 500MHz 的无线电信号。UWB 系统的具体应用可分为成像系统、车载雷达系统、通信与测量系统 3 大类。根据 FCC Part 15 的规定，UWB 系统可使用的频段为 $3.1\sim 10.6\text{GHz}$ 。为保护现有系统（GPRS、移动蜂窝系统、WLAN 等）不被 UWB 系统干扰，针对室内、室外不同应用，对 UWB 系统的辐射谱密度进行了严格限制，规定 UWB 系统的最高辐射谱密度为 -41.3dBm/MHz 。当前，人们所说的 UWB 是指 FCC 给出的新定义。

自 2002 年起至今，新技术和系统方案不断涌现，在产品方面，Time-Domain、XSI、Freescale、Intel 等公司纷纷推出 UWB 芯片组，UWB 天线技术也日趋成熟。当前，UWB 技术已成为短距离、高速无线连接最具竞争力的网络层技术。IEEE 已经将 UWB 纳入其 IEEE 802 系列无线标准，正在加紧制定基于 UWB 的高速 WPAN 标准 IEEE 802.15.3a 和 LR-WPAN 标准 IEEE 802.15.4a。以 Intel 公司为首的无线 USB 促进组织制定的基于 UWB 的 WUSB 2.0 标准即将出台。无线 1393 联盟也在加紧制定基于 UWB 的无线标准。可以预见，在未来的几年中，UWB 将成为在 WPAN、无线家庭网络、无线传感器网络等短距离无线通信网络中占据主导地位的物理层技术之一。

2. UWB 的应用

同一个 UWB 设备可以实现通信、雷达和定位三大功能，因此 UWB 有很多应用。目前，UWB 主要应用于通信、雷达和精确定位等领域。在通信领域，UWB 可以提供高速的无线通信。在雷达领域，UWB 雷达具有高分辨率，当前的隐身技术采用的是隐身涂料和隐身特殊结构，但都只在一个不大的频段内有效，在超宽带内，目标就会原形毕露。另外，UWB 信号具有很强的穿透能力，能穿透树叶、土地、混凝土、水体等介质。在精确定位领域，UWB 可以提供很高的定位精度，使用极微弱的同步脉冲可以辨别出隐藏物体或墙体后运动着的物体，定位的误差只有 $1\sim 2\text{cm}$ 。

目前，与 UWB 相关的潜在应用领域包括以下几个方面。

(1) UWB 在 PAN 中的应用。

UWB 可以在限定的范围（如 4m ）内以很高的数据传输速率（如 480Mbit/s ）、很低的功率（ $200\mu\text{W}$ ）传输信息，其比蓝牙的性能好很多。UWB 能够提供快速的无线外设访问来传输照片、视频，因此 UWB 特别适合用于 PAN。通过 UWB 可以在家里和办公室里方便

地以无线的方式将摄像机中的内容下载到计算机进行编辑，然后送到 TV 中浏览，轻松地以无线的方式实现 PDA、手机与计算机之间的数据同步，装载游戏和音频/视频文件到 PDA，使音频文件在 MP3 播放器与多媒体计算机之间传送等，如图 3-10 所示。

(2) UWB 在智能交通信息中的应用。

由于 UWB 可以实现 100~500Mbit/s 的数据传输速率，所以可以利用 UWB 建立智能交通管理系统，由若干站台装置和车载装置组成无线通信网，两种装置之间利用 UWB 进行通信，实现各种功能。

例如，将公路上的信息（路况、建筑物、天气预报等）发送给路过汽车内的司机，从而使行车更加安全、方便，也可实现不停车的自动收费、对汽车的定位搜索和速度测量等，如图 3-11 所示。

利用 UWB 的定位和搜索能力，可以制造出防碰撞和防障碍物的雷达，装载了这种雷达的汽车会非常容易驾驶。当汽车的前方、后方、侧方有障碍物时，该雷达会提醒司机，在停车的时候，这种基于 UWB 的雷达是司机强有力的助手。

(3) UWB 在无线传感器网络中的应用。

根据 UWB 低成本、低功耗的特点，可以将 UWB 应用于无线传感器网络。在大多数的应用中，传感器被用在特定的场所，传感器通过无线的方式而不是有线的方式传输数据特别方便。作为无线传感器网络的通信技术，它必须是低成本的；同时它应该是低功耗的，以免频繁地更换电池。UWB 是无线传感器网络通信技术最合适的候选者。



图 3-10 利用 UWB 构造智能家庭网络

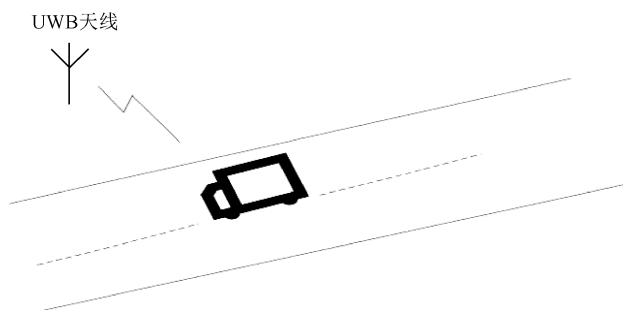


图 3-11 利用 UWB 实现公路信息服务

(4) UWB 在成像系统中的应用。

由于 UWB 具有良好的穿透墙、楼层的能力，所以 UWB 可以应用于成像系统。利用 UWB 技术，可以制造出穿墙雷达、穿地雷达。穿墙雷达可以用在战场上和警察的防暴行动中，定位墙后和角落的敌人；穿地雷达可以用来探测矿产，在地震或其他灾难发生后搜寻幸存者。基于 UWB 的成像系统也可以用于避免使用 X 射线的医学系统。

(5) UWB 在军事中的应用。

在军事方面，UWB 可用来实现战术/战略无线多跳网络电台，服务于战场自组织网络通信；也可用来实现非视距 UWB 电台，完成海军舰艇通信；还可以用于飞机内部通信，如有效取代含有电缆的头盔。图 3-12 所示为空中防撞预警系统及空中飞行器与地面的 UWB 数据传输示意图。

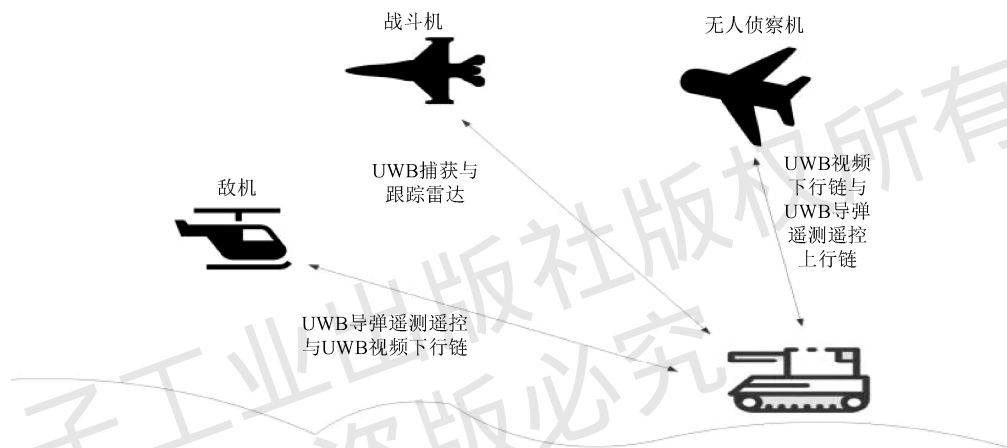


图 3-12 空中防撞预警系统及空中飞行器与地面的 UWB 数据传输示意图

基于 UWB 的潜在应用很多，可以相信，随着对 UWB 的深入研究，UWB 的应用潜力会不断得到激发。

3. UWB 的特点

UWB 系统相对于窄带通信系统有许多明显的优势，其特点如下。

(1) 带宽极宽，数据传输速率高。

UWB 工作频率在 3.1~10.6GHz 之间，使用的带宽在 1 GHz 以上，高达几吉赫兹，系统容量大，其数据传输速率一般可以达到几十到几百兆比特每秒，有望高于蓝牙 100 倍，也可高于 Wi-Fi 和 Wi-Fi2。

(2) 抗干扰性能好。

一方面，UWB 系统采用跳时扩频信号，使系统具有较大的处理增益。在发射信号时，将微弱的无线电脉冲信号分散在极宽的频段中，输出功率甚至低于普通设备产生的噪声功率。在接收信号时，将信号能量还原出来，在解扩过程中产生扩频增益。在同等码速条件下，UWB 系统比 IEEE 802.11a、IEEE 802.11b 和蓝牙的抗干扰性能更好。

另一方面，UWB 系统采用跳时序列，能够抗多径衰落。其每次发射脉冲的时间很短，在反射波到达之前，直射波的发射和接收已经完成，因此，反射波与直射波重叠并导致信号衰落的概率非常小。

(3) 耗电少，设备成本低。

因 UWB 不使用载波，只发出瞬时脉冲电波，即直接按照“0”或“1”发送出去，并且只有在需要时才发送瞬时脉冲电波，不需要混频器和本地振荡器、功率放大器等，所以耗电少，设备成本低。

(4) 保密性好。

UWB 系统采用跳时扩频信号，接收机只有在已知发送端扩频码的情况下，才能解出发射数据，而且系统的发射功率谱密度极低，传统的接收机无法接收，所以 UWB 系统的保密性非常好。

(5) 发射功率非常小。

UWB 设备用小于 1mW 的发射功率就能实现通信，低发射功率大大延长了电池的持续工作时间。而且由于其发射功率小，电磁波辐射对人体的影响和对其他无线通信系统的干扰都很小。

(6) UWB 的主要问题。

UWB 的主要问题是系统占用的带宽很大，可能会干扰现有的其他无线通信系统。

另外，虽然 UWB 系统的平均发射功率很低，但由于它的脉冲持续时间很短，其瞬时峰值功率可能会很大，这可能会影响到民航等系统的正常工作。

3.1.5 典型短距离无线通信技术对比

目前发展比较成熟的几大短距离无线通信技术主要有前面介绍的 Wi-Fi 技术、蓝牙技术、ZigBee 技术、UWB 技术，这几种通信技术或着眼于距离的扩充性，或符合某些单一应用的特殊要求，或建立竞争技术的差异优化等，但没有一种技术完美到可以满足所有的要求。表 3-3 所示为几种常用短距离通信技术的对比。

表 3-3 几种常用短距离通信技术的对比

技术名称	Wi-Fi 技术	蓝牙技术	ZigBee 技术	UWB 技术
系统资源	1MB+	250KB+	4~32KB	较大
网络大小	32	7	225/65000	100 左右
数据传输速率 (kbit/s)	11000+	723.1+	20~250	最高达 10^6
传输距离 (m)	1~100	1~10+	1~100+	$10\sim 50\times 10^3$
电池寿命 (天)	0.5~5	1~7	100~1000+	大于 100
特点	速度快、灵活性强	价格便宜、方便	可靠、功耗极低、价格便宜	成本低、功耗超低 (小于 1mW)
应用重点	Web、E-mail、图像	电缆替代品	监测和控制	定位、成像、军事

任务实施

请画出常用短距离无线通信技术的思维导图，并举一个短距离无线通信技术的应用案例进行说明。

任务评价

本任务的任务评价表如表 3-4 所示。

表 3-4 任务 1 的任务评价表

评估细则	分值(分)	得分(分)
思维导图全面、精准	40	
短距离无线通信应用案例典型、恰当	20	
叙述条理性强、表达准确	15	
语言浅显易懂	15	
对方能理解、接受你的叙述	10	

任务 2 典型长距离无线通信技术

任务描述

小王在学习了物联网中的短距离无线通信技术基本知识后，经常考虑一件事，有些物联网中的设备相距非常遥远，该如何通信呢？例如，当重庆的用户去北京出差，通过什么样的通信方式能知道家里面设备的工作情况呢？老师对小王的持续思考能力表示赞许，并告诉他，这些都属于本任务我们要学习的知识——长距离无线通信技术。

任务目标

随着智慧城市、大数据、物联网时代的到来，无线通信将实现万物连接，预计未来全球物联网连接数将达到千亿级别。为满足越来越多远距离物联网设备的连接需求，需要用到长距离无线通信技术，蜂窝移动通信网的发展及低功耗广域网（Low Power Wide Area Network, LPWAN）的出现为物联网的应用提供了便捷的路径。在本任务中，我们将学习移动通信技术、LPWAN 技术。

知识目标

- ◇ 了解长距离无线通信技术的概念
- ◇ 理解长距离无线通信技术的应用领域
- ◇ 理解短距离无线通信技术和长距离无线通信技术的关系

能力目标

- ◇ 能发现生活中长距离无线通信技术的应用
- ◇ 能够解释长距离无线通信的工作原理
- ◇ 能够辨别物联网与各种网络在应用上的区别与联系

素质目标

- ◇ 树立主动观察的意识
- ◇ 培养独立思考的能力

- ◇ 培养积极沟通的习惯
- ◇ 培养团队合作精神
- ◇ 激发科技兴国的爱国热情
- ◇ 激发科技报国的爱国情怀

➔ 知识准备

引导案例——智能家居中的长距离无线通信技术

如图 3-13 所示,智能家居中有许多设备,这些设备有些需要短距离控制,有些需要长距离控制,本章任务 1 中介绍了物联网中的短距离无线通信技术;在本任务中,我们将学习典型的长距离无线通信技术及其在物联网中的应用。

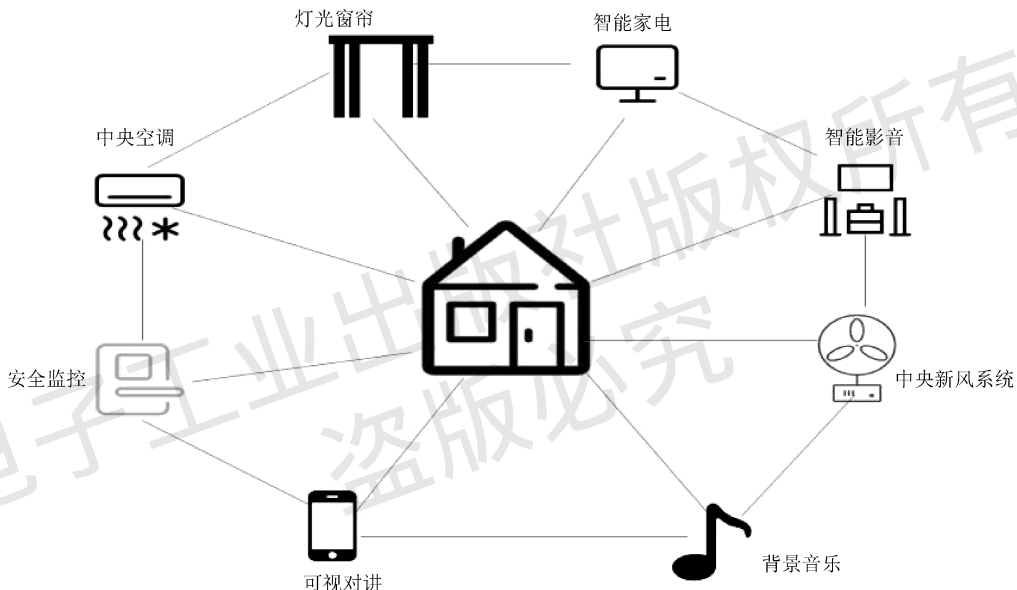


图 3-13 智能家居

3.2.1 移动通信技术

移动通信指通信双方或至少一方处于移动状态进行信息交流的通信。例如,固定体与移动体(汽车、轮船、飞机等)之间的通信,移动体与移动体之间的通信。这里所说的信息交换,不仅指语音通信,还包括数据、传真、图像、视频等通信业务。

1. 移动通信的特点

移动通信具有以下特点。

- (1) 无线电波的传播条件恶劣,多径效应及信号衰落明显。
- (2) 存在多普勒频移现象。

多普勒频移是指当移动台以恒定的速率沿某一方向移动时,由于传播路程差的原因,会造成相位和频率的变化,通常将这种变化称为多普勒频移。移动台的移动速度越快,无线电波的入射角越小,多普勒频移就越严重。

- (3) 在强干扰情况下工作。主要干扰有人为干扰、互调干扰、邻道干扰、同频干扰等。
- (4) 采用各种频谱和无线信道有效利用技术，如压缩频段、缩小信道间隔、多信道共用等。
- (5) 采用越区切换及漫游访问等跟踪交换技术。
- (6) 移动台需体积小、轻便、低功耗和操作方便。同时，需在震动、高温、低温等恶劣的环境条件下能稳定、可靠地工作。

2. 移动通信系统的分类

移动通信系统的类型很多，可按不同方法进行划分。

按使用对象划分，移动通信系统可分为军用、民用；按用途和区域划分，移动通信系统可分为陆上、海上、空间；按经营方式划分，移动通信系统可分为公众网、专用网；按通信网的制式划分，移动通信系统可分为小容量的大区制、大容量的小区制；按信号性质划分，移动通信系统可分为模拟、数字；按调制方式划分，移动通信系统可分为调频、调相、调幅等；按多址连接方式划分，移动通信系统可分为频分多址（FDMA）、时分多址（TDMA）、码分多址（CDMA）；按无线电信道工作方式划分，移动通信系统可分为单工制、半双工制、全双工制。

单工制指数据传输只支持单方向的传输，如只接收信号或者命令，不发出信号。其实际应用有广播电台；特殊训练的场景，如部队训练、军事演习、调度等通话相对少而简练的场景；数据收集系统，如气象数据的收集、电话费的集中计算等。

半双工制指数据传输支持双方向的传输，但是不能同时进行双向传输，在同一时刻，某一端只能进行发送或者接收。其典型应用为对讲机，由于对讲机传送及接收使用相同的频率，数据传输不允许同时进行，因此一方讲完后，需设法告知另一方讲话结束（如讲完后加上“Over”），另一方才知可以开始讲话。

全双工制指收发双方采用一对频率，使基站、移动台同时工作。这种方式操作方便，但电能消耗大，模拟或数字的蜂窝移动电话系统都采用双工制。

在移动通信系统中，许多用户都要同时通过一个基站和其他用户进行通信，因此，必须给不同用户台和基站发出的信号赋予不同特征，使基站能从众多用户台的信号中区分出哪一个是该用户台发出来的信号，而该用户台也能识别出基站发出的信号中哪个是发给自己的信号，解决这个问题的办法称为多址技术。多址技术使众多的用户能够共用公共的通信线路。为使信号多路化而实现多址的方法基本上有三种，它们分别为采用频率、时间或编码分隔的多址方式，即人们通常所称的 FDMA、TDMA 和 CDMA 三种接入方式。图 3-14 展示了这三种多址技术的概念。

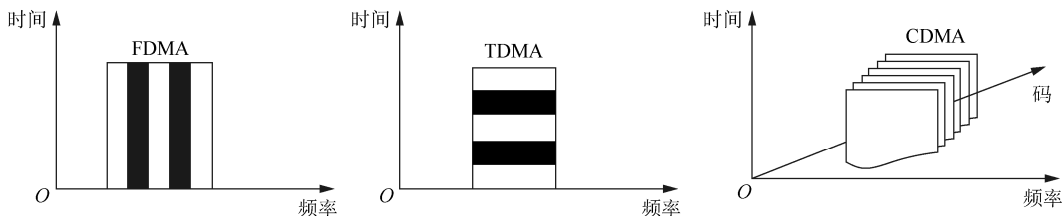


图 3-14 多址技术

模拟蜂窝移动通信网采用 FDMA 方式，而数字蜂窝移动通信网主要采用 TDMA 方式。

另外，还有上述三种基本方式的混合多址方式，如 TDMA/FDMA、CDMA/FDMA 等。下面就三种多址技术的基本原理进行分析。

FDMA 是以不同的频道实现通信的，把通信系统的总频段划分成若干个等间隔的频道（或称信道）分配给不同的用户使用。这些频道互不交叠，其宽度应能传输一路语音信息，而相邻频道之间无明显的串扰。

TDMA 是以不同的时隙实现通信的，把时间分割成周期性的帧，每一帧再分割成若干个时隙（无论是帧还是时隙，都互不重叠），然后根据一定的时隙分配原则，使各移动台在每帧内只能按指定的时隙向基站发送信号，在满足定时和同步的条件下，基站可以分别在各个时隙内接收到各移动台的信号而不混扰。

同时，基站向多个移动台发送的信号都按顺序安排在预定的时隙内传输，各移动台只要在指定的时隙内接收，就能在合路的信号中把发给它的信号区分出来。

CDMA 是以不同的码序列实现通信的，不同的移动台使用同一频率，每一个移动台被分配一个独特的随机码序列，与其他移动台的码序列不同，即彼此是不相关的或相关性很小，以便区分不同移动台，在这样一个频道中，可容纳比 TDMA 还要多的用户。

3. 移动通信的发展

移动无线电话在 20 世纪早期偶尔被海军和海洋部门用于通信；在 20 世纪 60 年代，改进型移动电话系统（Improved Mobile Telephone System, IMTS）开始安装；在 20 世纪 80 年代，移动通信开始盛行。到现在为止，移动通信已经经历了从模拟时代到数字时代的演进，其发展大致可分为第一代移动通信系统、第二代移动通信系统（2G）、第三代移动通信系统（3G）、第四代移动通信系统（4G）和第五代移动通信系统（5G）。

（1）模拟时代——第一代移动通信系统。

第一代移动通信系统属于模拟移动通信系统，如 AMPS 和 TACS 系统。它主要采用 FDMA 技术，由于模拟移动通信系统的容量小、安全性差，只支持语音业务，不支持数据业务，再加上 FDMA 技术浪费带宽，所以模拟移动通信系统的使用时间不长。在我国，模拟移动通信系统于 1987 年 11 月开始运营，2001 年 12 月底全网关闭。

模拟移动通信系统的不足之处还体现在下列四个方面。

- ① 系统制式复杂，不易实现国际漫游。
- ② 模拟移动通信系统的设备价格昂贵，手机体积大，电池充电后有效工作时间短，一般只能持续工作 8 小时，给用户带来不便。
- ③ 模拟移动通信系统的用户容量受限制，在人口密度很大的城市，系统扩容困难。

解决上述问题最有效的办法就是采用一种新技术，即移动通信系统的数字化，称为数字移动通信系统。

（2）数字时代——2G。

2G 属于数字移动通信系统，它主要采用 TDMA 技术或 CDMA 技术，如中国移动的 GSM 网络和中国联通的窄带 CDMA 网络。

GSM 技术由欧洲移动通信特别小组提出，CDMA 技术由美国提出。CDMA 技术最早被军用设备所采用，可直接扩频和抗干扰性强是其突出的特点。除了语音业务，2G 还可以传输低速的数据业务。随着各种增值业务的不断增长，GSM 取得了空前的成功。

数字移动通信系统有以下特点。

- ① 能更有效地利用频率资源，声音信号压缩算法可减少语音传输所需的信道带宽。
- ② 提高了保密性，数字调制是在信息本身编码后进行的，故容易进行加密。
- (3) 3G——第三代移动通信系统。

随着通信业务种类和数量需求的剧增，业务类型主要限于语音和低速数据的第二代移动通信系统已经不能满足需要，因此，ITU 提出了大容量、高速率、全方位的 3G 的概念，3G 的主要特点如下。

- ① 具有世界范围内高度共同的设计。
- ② 具有高速和多种速率传输能力，广域覆盖下的速率达 384 kbit/s，本地覆盖下的速率达 2048 kbit/s。
- ③ 具有多媒体应用能力、多种业务能力和多种终端。
- ④ 能够实现全球覆盖和全球无缝漫游。
- ⑤ 具有较高的频谱利用率。
- ⑥ 具有较高的服务质量。
- ⑦ 具有很高的兼容性、灵活性和安全性。
- ⑧ 具有突出的个性化服务。

3G 除要进一步提高语音质量外，更要满足日益增长的数据通信、视频传输、个性化服务等的需求，因此提高数据传输速率是其最关键的环节。ITU 公开的 3G 标准有 3 个：欧洲和日本共同提出的 WCDMA，美国以高通公司为代表提出的 CDMA 2000 及中国以大唐电信集团为代表提出的 TD-SCDMA。这些标准在核心网中都采用分组交换方式及 CDMA 技术解决无线端口问题。3G 于 2009 年在我国成功商用。

(4) 4G——第四代移动通信系统。

根据 ITU 的定义，4G 是基于 IP 协议的高速蜂窝移动通信网，由 3G 演进而来，在移动状态下数据传输速率可达 100Mbit/s，在静态和慢移动状态下数据传输速率可达 1Gbit/s。4G 的数据传输速率高，支持各种数据、语音业务，采用全 IP 技术，融合更多的协议和新技术。

2012 年 1 月 18 日，ITU-R 正式审核通过 4G (IMT-Advanced) 标准，包括 3G 的演进技术 LTE-Advanced 及 WiMax 的演进技术 WirelessMAN-Advanced (802.16m)。

2013 年 12 月，我国正式发放了 4G 的 TDD-LTE 牌照，4G 进入商用时代。

(5) 5G——第五代移动通信系统。

到了 4G 时代，移动通信系统的发展演进路径就已经出现了两大分支，覆盖更多应用场景：一条分支是大流量、高速率、高速移动的宽带时代；另一条分支是小数据、广覆盖、大容量的物联网时代。

因此，为了适应未来移动通信用户数即网络容量的极大增长，以及满足巨大的物联网业务需求和超高的数据传输速率的要求，除移动通信网络架构的演进外，5G 还从提升频谱效率、扩展工作频段、增加网络密度 3 个维度来演进。

2022 年，5G R17 标准宣布冻结。我国于 2018 年具备初期试商用 5G 网络部署能力，2019 年底正式发放 5G 牌照，2020 年正式商用 5G，进入 5G 时代。

4. 2G 概述

1) GSM

欧洲各国为了建立全欧洲统一的数字蜂窝移动通信系统，在 1982 年成立了欧洲移动通

信特别小组 (GSM), 1988 年制定出 GSM 标准, 并于 1991 年率先将 GSM 投入商用, 随后 GSM 在整个欧洲、大洋洲及其他许多国家和地区得到了广泛普及, 一度成为世界上覆盖面积最大、用户数最多的蜂窝移动通信系统, 曾占据全球移动通信市场 80% 以上的份额。

(1) GSM 的无线参数。

① 工作频段。

GSM 使用 900MHz、1800MHz 两个频段构成“双频”网络, 其工作频段的基本信息如表 3-5 所示。在我国, 上述两个频段被分给了中国移动和中国联通两家运营商。

表 3-5 GSM 工作频段的基本信息

	900MHz 频段	1800MHz 频段
频率范围	890~915MHz (移动台发, 基站收) 925~960MHz (移动台收, 基站发)	1710~1785MHz (移动台发, 基站收) 1805~1880MHz (移动台收, 基站发)
带宽	25MHz	75MHz
信道带宽	200kHz	200kHz
频道序号	1~124	512~885
中心频率	$f_U = 890.2 + (N - 1) \times 0.2\text{MHz}$ $f_D = f_U + 45\text{MHz}$ $N = 1 \sim 124$	$f_U = 1710.2 + (N - 512) \times 0.2\text{MHz}$ $f_D = f_U + 95\text{MHz}$ $N = 512 \sim 885$

② GSM 多址方式。

GSM 采用 TDMA/FDMA、频分双工 (TDMA/FDMA/FDD) 制式, 移动台在特定的频率上和特定的时隙内, 以突发方式向基站传输信息, 基站在相应的频率上和相应的时隙内, 以时分复用的方式向各个移动台传输信息。

③ 频率配置。

GSM 多采用 4 无线小区 3 扇区 (4×3) 的频率配置和频率复用方案, 如图 3-15 所示, 即把所有可用频率分成 4 大组 12 个小组, 分配给 4 个无线小区, 从而形成一个单位无线区群, 每个无线小区又分为 3 个扇区, 然后由单位无线区群彼此邻接, 覆盖整个服务区域。

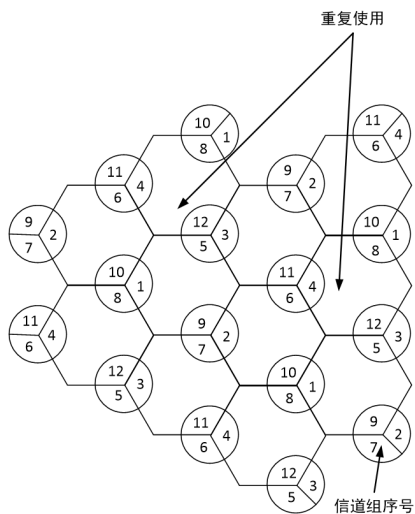


图 3-15 4×3 频率复用方案

(2) GSM 结构。

GSM 的主要组成部分为移动台 (MS)、基站子系统 (BSS) 和网络子系统 (NSS)，如图 3-16 所示。

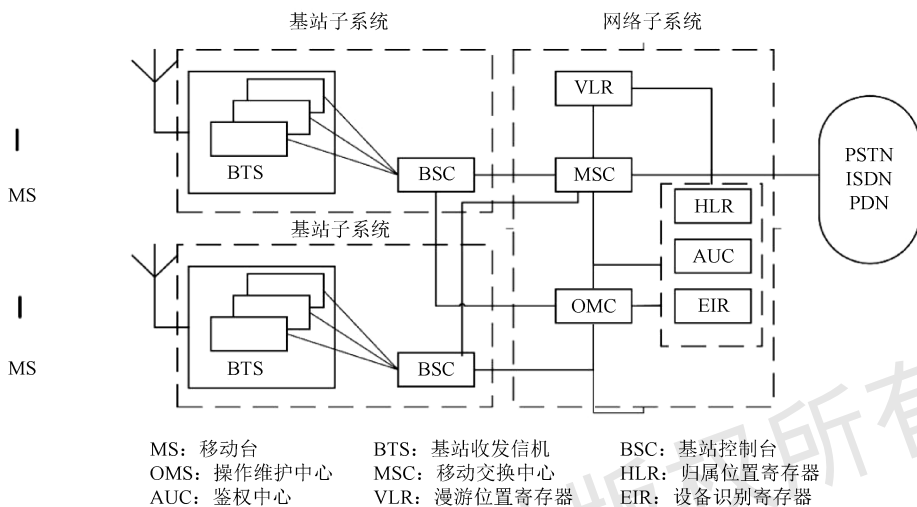


图 3-16 GSM 的结构示意图

① 移动台。

移动台即便携台 (手机) 或车载台，它包括移动终端 (MT) 和用户识别模块 (SIM 卡) 两部分，其中移动终端可完成语音编码、信道编码、信息加密、信息调制和解调，以及信息发射和接收等；SIM 卡则存有确认用户身份所需的认证信息，以及与网络、用户有关的管理数据。只有插入 SIM 卡后，移动终端才能入网。

② 基站子系统。

基站子系统包括基站收发信机 (BTS) 和基站控制器 (BSC)。该子系统由移动交换中心 (MSC) 控制，通过无线信道完成与移动台的通信，主要负责无线信号的收发及无线资源管理等。

基站收发信机：基站收发信机包括无线传输所需要的各种硬件和软件，如多部收发信机、支持各种小区结构 (全向、扇形等) 所需要的天线，连接基站控制器的接口电路，以及收发信机本身所需要的检测和控制装置等。它实现对服务区的无线覆盖，并在基站控制器的控制下提供足够的与移动台连接的无线信道。

基站控制器：基站控制器是基站收发信机和移动交换中心之间的连接点，也为基站收发信机和操作维护中心 (OMC) 之间的信息交换提供接口。一个基站控制器通常控制几个基站收发信机，完成无线网络资源管理、小区配置数据管理、功率控制、呼叫、通信链路的建立和拆除、本控制区内移动台的过区切换控制等。

③ 网络子系统。

网络子系统由移动交换中心、操作维护中心、归属位置寄存器 (HLR)、漫游位置寄存器 (VLR)、鉴权中心 (AUC) 和设备识别寄存器 (EIR) 组成。

网络子系统主要实现交换功能及用户数据与移动管理、安全管理等所需的数据库功能。

移动交换中心：移动交换中心是蜂窝移动通信网络的核心，主要功能是对位于其控制

区域内的移动用户进行通信控制、语音交换和管理，同时为本系统连接别的移动交换中心和其他公用通信网络（如公用电话交换网）提供链路接口，实现交换功能、计费功能、网络接口功能、无线资源管理与移动性能管理功能等。具体包括信道的管理和分配，呼叫的处理和控制，越区切换和漫游的控制，用户位置信息的登记与管理，用户号码、移动设备号码的登记和管理，服务类型的控制，对用户实施鉴权，保证用户在转移或漫游的过程中获得无间隙的服务等。

归属位置寄存器：它是 GSM 的中央数据库，存储着该归属位置寄存器控制区内所有移动用户的管理信息，如用户的注册信息和各用户当前所处位置的有关信息等。每一个用户都应在入网所在地的归属位置寄存器中登记注册。

漫游位置寄存器：漫游位置寄存器是一个动态数据库，记录着当前进入其服务区内已登记的移动用户的相关信息，如用户号码、所处位置区域信息等。一旦移动用户离开该漫游位置寄存器服务区而在另一个漫游位置寄存器服务区中重新登记，该移动用户的相关信息即被删除。

鉴权中心：鉴权中心存储着鉴权算法和加密密钥，在确定移动用户身份和对呼叫进行鉴权、加密处理时，提供所需的 3 个参数（随机号码 RAND、符合响应 SRES、密钥 Kc），用来防止无权用户接入系统和保证通过无线接口接入系统的移动用户的通信安全。

设备识别寄存器：它也是一个数据库，用于存储移动设备的参数，主要实现对移动设备的识别、监视、闭锁等功能，以防止非法移动台的使用。

操作维护中心：操作维护中心用于对 GSM 的集中操作维护与管理，允许远程集中操作维护与管理，并支持高层网络管理中心（NMC）的接口。操作维护中心对基站子系统和网络子系统分别进行操作维护与管理，实现事件管理、告警管理、故障管理、性能管理、安全管理和配置管理功能。

（3）GPRS。

GPRS 由欧洲电信标准委员会（ETSI）推出。GPRS 在原 GSM 网络的基础上叠加了支持分组数据业务的网络，并对 GSM 无线网络设备进行了升级，为 GSM 向宽带移动通信系统 UMTS 的平滑过渡奠定了基础，因而 GPRS 又被称为 2.5G 系统。

GPRS 网络结构图如图 3-17 所示。

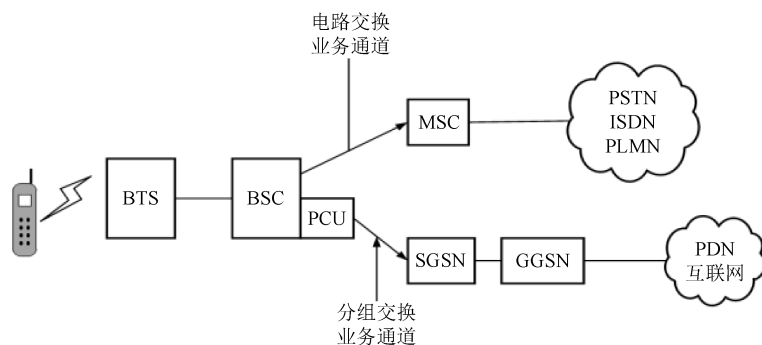


图 3-17 GPRS 网络结构图

GPRS 的核心网络采用了 IP 技术，是移动网和 IP 网的结合。其可提供固定 IP 网支持的所有业务，顺应了通信网络的分组化发展趋势；可与高速发展的互联网实现无缝连接，

为 GSM 网络向 3G 演进打下了基础。

GPRS 网络是基于 GSM 网络实现分组数据业务的，与 GSM 网络相比，GPRS 网络新增或升级的设备有以下几种。

① GPRS 服务支持节点 (SGSN)。

SGSN 的主要功能是对移动台进行鉴权、移动性管理和路由选择，建立移动台到 GPRS 网关支持节点 (GGSN) 的传输通道，接收基站子系统传送来的移动台分组数据包，通过 GPRS 骨干网将其传送给 GGSN 或进行反向操作，并进行计费和业务统计。

② GPRS 网关支持节点 (GGSN)。

GGSN 主要起网关作用，与外部多种不同的数据网相连。对于外部网络来说，它就是一个路由器，因而也称其为 GPRS 路由器。GGSN 接收移动台发送的分组数据包并进行协议转换，从而把这些分组数据包传送到远端的 TCP/IP 网络或进行反向操作。另外，GGSN 还具有地址分配和计费等功能。

③ 分组控制单元 (PCU)。

PCU 通常位于基站控制器中，用于处理分组数据业务，并将分组数据业务在基站控制器处从 GSM 语音业务中分离出来，在基站收发信机和 SGSN 之间传送。PCU 增加了分组功能，可控制无线链路，并允许多个用户占用同一无线资源。

④ 原 GSM 网络设备升级。

GPRS 网络使用原 GSM 基站，但基站要进行软件更新；GPRS 要增加新的移动性管理程序，通过路由器实现 GPRS 骨干网互联；GSM 要进行软件更新并增加新的 MAP 信令和 GPRS 信令等。

⑤ GPRS 终端。

GPRS 网络必须采用新的 GPRS 终端。GPRS 移动台有以下 3 种类型。

A 类——有同时提供 GPRS 服务和电路交换承载业务的能力，即在同一时间内既可进行 GSM 语音业务，又可以接收 GPRS 数据包。

B 类——可同时侦听 GPRS 和 GSM 的寻呼信息，同时附着于 GPRS 和 GSM，但同一时刻只能支持其中的一种业务。

C 类——要么支持 GSM 网络，要么支持 GPRS 网络，通过人工方式进行网络选择更换。GPRS 终端也可以做成计算机 PCMCIA 卡，用于移动互联网接入。

2) CDMA 系统

(1) CDMA 的无线特性。

① CDMA 的工作频段。

我国 CDMA 系统采用 800MHz AMPS 工作频段，频率范围为 825~835MHz (上行：移动台发，基站收)，870~880MHz (下行：移动台收，基站发)。

② CDMA 的频率分配和多址方式。

CDMA 系统通常采用 1 小区频率复用模式，即相邻小区或扇区使用同一频道频率。从理论上讲，其频率利用率和系统容量可达到很高的水平，但由于功率控制不够理想和多址干扰的影响，实际系统容量仍是有限的。当 CDMA 系统的容量要求较大时，通常在 1 个小区或扇区中使用多个频道 (载波)，即采用 FDMA/CDMA 混合多址方式。

(2) CDMA 系统的特点。

① 频谱利用率高，系统容量较大。在使用相同频率资源的情况下，CDMA 系统的容量比模拟网络大 10 倍，比 GSM 大 4~5 倍。

② 通话质量好，其语音质量近似有线电话。GDMA 系统采用码激励线性预测 (CELP) 编码算法，其基础速率是 8kbit/s，可随输入语音的特征而动态地变为 4kbit/s、2kbit/s 或 0.8kbit/s。改进的增强型可变速率声码器 (EVRC) 能降低背景噪声，从而提高通话质量，特别适合在移动环境中使用。同时，CDMA 系统特有的频率分集、路径分集、软切换也大大提高了系统性能。

③ 抗多径衰落，利用 Rake 接收机将多径信号分离出来后再进行合并，从而获得更多的有用信号。

④ 具有“软容量”特性，系统配置灵活。在 CDMA 系统中，当系统中增加一个通话的用户时，所有用户的信噪比都略有下降，相当于背景噪声的增加。CDMA 系统的这种特征使系统容量与用户数之间存在一种“软”的关系，可在容量和语音质量之间折中，从而使系统容纳的用户数适当增加。

⑤ 抗干扰性强，保密性好。CDMA 系统利用扩频码的相关性来获取用户的信息，抗截获的能力强；通过增大信号传输带宽来降低对信噪比的要求，具有良好的抗干扰性。扩频码一般较长，如 IS-95 中以周期为 242-1 的长码来实现扩频，难以对其进行窃听和检测。

⑥ 发射功率低，移动台的电池使用寿命长。由于在 CDMA 系统中可以采用许多特有的技术（分集技术、功率控制技术等）来提高系统的性能，因而大大降低了所要求的发射功率，有利于减小电池的体积和增加其使用寿命。

(3) CDMA 系统的关键技术。

① 功率控制技术。

CDMA 系统是自干扰系统，所有用户占用相同的频率和带宽，因此“远近效应”尤为突出，若不采取有力的措施，则将使基站无法正常接收远距离移动台发送来的信号。同时，从系统容量的角度考虑，如果每个移动台发送的信号到达基站时都能达到最小所需的信噪比，系统容量将达到最大。

CDMA 系统进行功率控制的目的是既要保持每个用户的高质量通信，又不对占用同一信道的其他用户产生不应有的干扰。在 IS-95 中，反向链路采用了控制速率达 800 次/秒，调整步长精确到 1dB 的快速闭环功率控制技术，而在 CDMA 2000 系统中则同时采用了快速前向及反向闭环功率控制技术，以进一步提高系统容量和通信质量。

② 伪随机码的选择。

伪随机码的自相关性和互相关性会直接影响系统容量、抗干扰能力、接入和切换速率等性能。CDMA 信道是以伪随机码来区分的，因此要求伪随机码自相关性好、互相关性差，实现和编码简单等。

在所有的伪随机序列中，m 序列是一种最重要、最基本的伪随机序列，它有近似最佳的自相关性，但同样长度的 m 序列个数有限，序列之间的互相关性不好。为此，R.Gold 提出了基于 m 序列的码序列，称为 Gold 序列。它有良好的自相关性和互相关性，构造简单，序列数多，因而获得了广泛的应用。寻找具有良好相关性的伪随机码一直是 CDMA 系统相关研究中的重点。

③ 软切换。

在 FDMA 和 TDMA 系统中，越区切换时采用先断后通的硬切换方式，势必会引起通信的短暂中断。同时，在两个小区的交叠区域内，移动台接收到两个基站发来的信号的强度有时会出现大小交替变化的现象，从而导致出现越区切换的“乒乓”效应，用户会听到“咔嚓”声，对通信产生不利的影响，切换时间也较长。

在 CDMA 系统中，所有的小区（或扇区）都使用相同的频率，因此在切换时可采用先连接后断开的软切换方式。当移动用户从一个小小区（或扇区）移动到另一个小区（或扇区）时，只需在码序列上做相应的调整，而不需要切换移动台的收/发频率。利用 Rake 接收机的多路径接收能力，在切换前先与新小区（或扇区）建立新的通话连接，然后切断原来的连接。这种先通后断的软切换方式不会出现“乒乓”效应，并且切换时间也很短。另外，CDMA 系统的“软容量”特点使越区切换的成功率远大于 FDMA 系统和 TDMA 系统。

④ Rake 接收技术。

发射机发出的扩频信号在传输过程中受地形、地物影响，经多条路径到达接收机。CDMA 系统采用特有的 Rake 接收技术，将这些不同时延的信号分离出来，分别经不同时延线对齐后再合并，从而把多径信号变成了增强有用信号的有利因素，有效地克服了多径效应的影响。

⑤ 语音激活技术。

CDMA 系统中采用了语音激活技术，使用户发射机发射的功率根据用户语音编码器的输出速率来做调整。CDMA 系统的语音编码采用了可变速率声码器的速率（8kbit/s），当用户讲话时，声码器的输出速率高，发射机发射的平均功率就大；当用户不讲话时，声码器的输出速率很低，发射机发射的平均功率就很小。这样可以使各用户之间的干扰平均减少约 65%。也就是说，当系统容量较大时，采用语音激活技术可以使系统容量增加约 3 倍，但当系统容量较小时，系统容量的增加值就稍低。

⑥ 分集技术。

CDMA 系统采用了宽带传输，使它具有特有的频率分集特性，即当信道具有频率选择性衰落时，对系统的信息传输影响较小。同时，CDMA 系统具有分离多径的能力，实现了路径分集。另外，CDMA 系统还采用了空间分集和极化分集技术来提高系统性能。

5. 3G 概述

(1) 3G 发展简史。

3G 最初被命名为 FPLMTS(未来公共陆地移动通信系统)，由 ITU TG8/1 在 1985 年提出，后在 1996 年被更名为 IMT-2000 (International Mobile Telecommunications- 2000)，IMT-2000 是 3G 的统称。

3G 的目标是世界范围内设计上的高度一致性，与固定网络各种业务相互兼容，具有高服务质量、全球漫游能力，以及支持多媒体功能及广泛业务的终端。

对第三代无线传输技术 (RTT) 提出的速率要求是在高速移动环境中至少达到 144kbit/s，在室外步行环境中至少达到 384kbit/s，在室内环境中至少达到 2Mbit/s，比现有系统的频谱效率更高等。

2000 年，ITU-T 完成了 IMT-2000 全部网络标准。

(2) 3G 标准。

ITU-R 最终推荐的 3G 标准中包括 3 种 CDMA 标准，即 MC-CDMA (CDMA2000)、DS-SS-SSMA (WCDMA) 和 CDMA TDD (TD-SS-SSMA)。这 3 种标准的核心差异在于 RTT，即多址技术、调制技术、信道编码与交织、双工技术、物理信道结构与复用、帧结构、RF 信道参数等方面的差异。

WCDMA 由标准化组织 3GPP 制定，CDMA2000 是在 IS-95 标准基础上提出的 3G 标准，其标准化工作由 3GPP2 来完成，TD-SS-SSMA 标准由中国无线通信标准研究组 CWTS 提出，已经融合到了 3GPP 关于 WCDMA-TDD 的相关规范中。

(3) 3G 频谱分配。

依据 ITU 对 IMT-2000 的频率划分和技术标准，以及我国无线电频率划分规定，结合我国无线电频谱使用的实际情况，我国对 IMT-2000 的频率规划如图 3-18 所示。

① 主要工作频段：

频分双工 (FDD) 方式：1920~1980MHz、2110~2170MHz，共 2×60MHz。

时分双工 (TDD) 方式：1880~1920MHz、2010~2025MHz，共 55MHz。

② 补充工作频段：

频分双工 (FDD) 方式：1755~1785MHz、1850~1880MHz，共 2×30MHz。

时分双工 (TDD) 方式：2300~2400MHz，与无线电定位业务共用，均为主要业务。

③ 卫星移动通信系统工作频段：1980~2010MHz、2170~2200MHz。

目前将已规划给 CDMA 系统的 825~835MHz/870~880MHz、885~915MHz/930~960MHz 和 1710~1755MHz/1805~1850MHz 频段，同时规划为 IMT-2000 FDD 方式的扩展频段，上、下行频率使用方式不变。

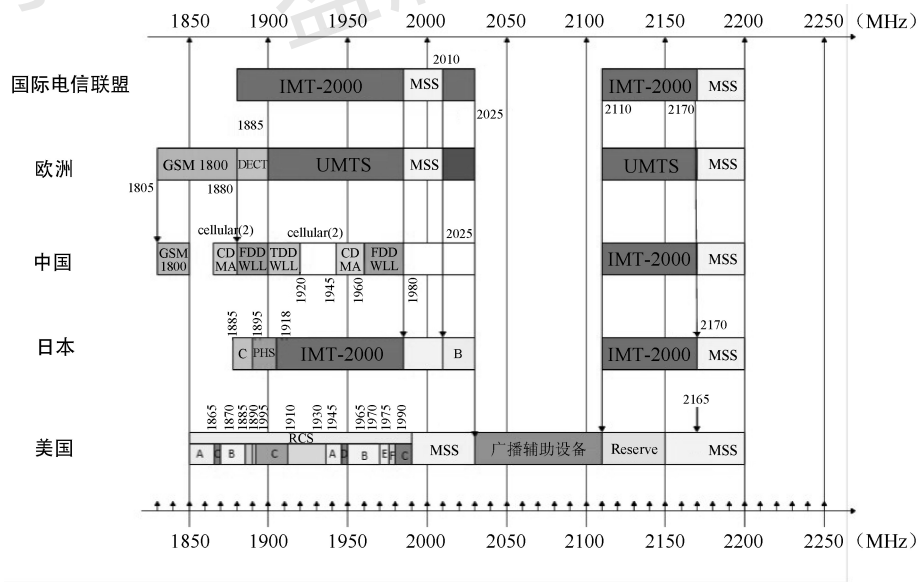


图 3-18 我国对 IMT-2000 的频率规划

(4) WCDMA。

WCDMA 由欧洲 ETSI 和日本 ARIB 提出，经多方融合而成，是在 GSM 基础上发展起

来的一种技术，其核心网基于 GSM-MAP。支持这一标准的电信运营商、设备制造商形成了 3GPP 阵营。

① UMTS 系统。

采用 WCDMA 空中接口技术的 3G 通常被称为通用移动通信业务（UMTS）系统，它采用了与 2G 类似的结构，包括无线接入网（RAN）和核心网（CN）。其中 RAN 处理所有与无线有关的功能，而 CN 从逻辑上分为电路交换域（CS 域）和分组交换域（PS 域），处理 UMTS 系统内所有的语音呼叫和数据连接，并作为路由实现与外部网络的数据交换。通用电信无线接入网（UTRAN）、CN 和用户终端（UE）一起构成了整个 UMTS 系统。其系统结构与网络单元构成分别如图 3-19、图 3-20 所示。

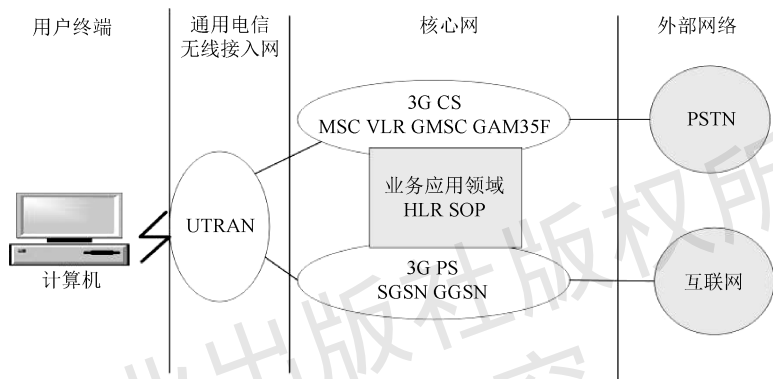


图 3-19 UMTS 系统结构

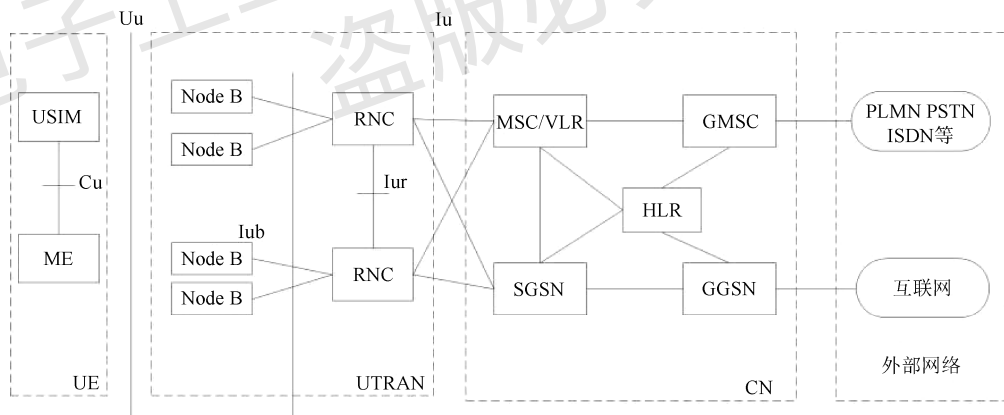


图 3-20 UMTS 网络单元构成

UMTS 网络单元的介绍如下。

UE 主要包括射频处理单元、基带处理单元、协议栈模块及应用层软件模块等。UE 通过 Uu 接口与网络设备进行数据交互，为用户提供电路交换域和分组交换域的各种业务功能。

UTRAN 分为基站（Node B）和无线网络控制器（RNC）两部分。Node B 是 WCDMA 的基站（无线收发信机），其在网络中的功能和作用类似于 GSM 中的基站收发信机；RNC 在网络中的功能和作用类似于 GSM 中的基站控制器。

CN 负责实现与其他网络的连接及对移动台通信的管理。它分成两个子系统：电路交

交换域和分组交换域。电路交换域设备是指为用户提供电路交换业务或提供相关信令连接的实体，电路交换域特有的实体包括 MSC、GMSC、VLR、IWF；分组交换域为用户提供分组交换业务，分组交换域特有的实体包括 SGSN 和 GGSN。其他设备，如 HLR（或 HSS）、AUC、EIR、智能网设备（SCP）等为电路交换域和分组交换域的共用设备。

② WCDMA 的技术特点。

a) 高度的业务灵活性。WCDMA 允许每个 5MHz 载波提供从 8kbit/s 到 2Mbit/s 的混合业务。另外，在同一信道上既可进行电路交换业务，又可以进行分组交换业务，分组和电路交换业务可在不同的带宽内自由地混合，并可同时向同一用户提供。每个 WCDMA 终端能够同时接入多达 6 个不同业务，可以支持不同质量要求的业务（语音和分组数据等）并保证高质量的完美覆盖。

b) 频谱效率高。WCDMA 能够高效利用可用的无线电频谱。由于它采用单小区复用模式，因此不需要进行频率规划。利用分层小区结构、自适应天线阵列和相干解调（双向）等技术，其网络容量可以得到大幅提高。

c) 容量和覆盖范围大。WCDMA 射频收发信机能够处理的语音用户量是典型窄带收发信机的 8 倍。每个载波可同时处理 80 个语音呼叫，或者每个载波可同时处理 50 个互联网数据用户。在城市和郊区，WCDMA 的容量约是窄带 CDMA 的两倍。

d) 网络规模的经济性好。通过在原有数字蜂窝移动通信网络（GSM 等）的基础上增加 WCDMA 无线接入网，同一核心网可被复用，并使用相同的站点。

e) 卓越的语音能力。在 WCDMA 中，每个小区能够处理至少 192 个语音呼叫，而在 GSM 网络中，每个小区只能处理大约 100 个语音呼叫。

f) 无缝的 GSM/WCDMA 接入。

g) 快速业务接入。在移动用户和基站之间建立连接只需零点几毫秒。

h) 从 GSM 平滑升级，技术成熟。

i) 终端经济简单。

(5) TD-SCDMA。

TD-SCDMA 是时分同步码分多路访问的英文缩写，是由原中国无线通信标准研究组于 1999 年正式提出的，中国具有独立知识产权的新技术，被 ITU 正式批准为 3G 主要技术标准之一，是我国通信业发展的一个新的里程碑，它打破了国外厂商在专利、技术、市场方面的垄断格局，促进了民族移动通信产业的迅速发展。2006 年，TD-SCDMA 作为我国第一个 3G 标准被发布，随后开展规模网络技术应用试验；2007 年，由中国移动主导了涉及 10 个城市的大规模 TD-SCDMA 二期试验，并在 2008 年奥运会中得到了检验；2009 年 1 月 7 日，中国移动获得了 TD-SCDMA 运营牌照，开始大规模建设及商用。

同 WCDMA 一样，TD-SCDMA 的制定与演进也是在 3GPP 组织内进行的，并被纳入 3GPP 出版标准中，3GPP R4、3GPP R5、3GPP R6 等版本都包含了完整的 TD-SCDMA 无线接入技术。由于双工方式的差别，TD-SCDMA 的所有技术特点和优势得以在无线接口的物理层体现，即 TD-SCDMA 与 WCDMA 最主要的差别体现在无线接口物理层技术方面。在核心网方面，TD-SCDMA 与 WCDMA 采用完全相同的标准规范。这些共同之处不仅保证了两个系统之间无缝漫游、切换、业务支持的一致性，以及 QoS 等，还保证了 TD-SCDMA 和 WCDMA 在标准技术的后续演进上能够保持一致性。

在实际的标准制定与演进中，TD-SCDMA 具有鲜明的特征。它基于 GSM，其基本设计思想是使用较窄的带宽（1.2~1.6MHz）和较低的码片速率（不超过 1.35Mchip/s），利用同步 CDMA、软件无线电、智能天线、现代信号处理等技术来达到 IMT-2000 的要求。

TD-SCDMA 采用时分双工（TDD）、TDMA/CDMA 多址方式工作，基于同步 CDMA、智能天线、多用户检测、正交可变扩频系数、Turbo 编码技术、软件无线电等新技术，工作在 1880~1920MHz，2010~2025MHz 等非成对频段上。

TD-SCDMA 的技术特点如下。

① 频谱灵活性好，频谱利用率高。如图 3-21 所示，TD-SCDMA 采用 TDD 方式，不需要成对的频段，并且仅需要 1.6MHz 的最小带宽，因而它对频谱的使用非常灵活，可利用 2G 空置出来的频率开展 3G 业务，有效地使用日益宝贵的频谱资源（如空置出的 8 个连续 GSM 频点就可安排一个 1.6MHz 的 TD-SCDMA 载波）。TD-SCDMA 能以较低的码片速率和较窄的带宽满足 IMT-2000 的要求，因而它的频谱利用率很高，可以达到 GSM 的 3~5 倍，能够解决人口密集地区频谱资源紧张的问题。相对而言，采用 FDD 方式的 WCDMA 占用 2/5MHz 带宽，CDMA2000 1x 系统占用 $2 \times 1.25\text{MHz}$ 带宽。

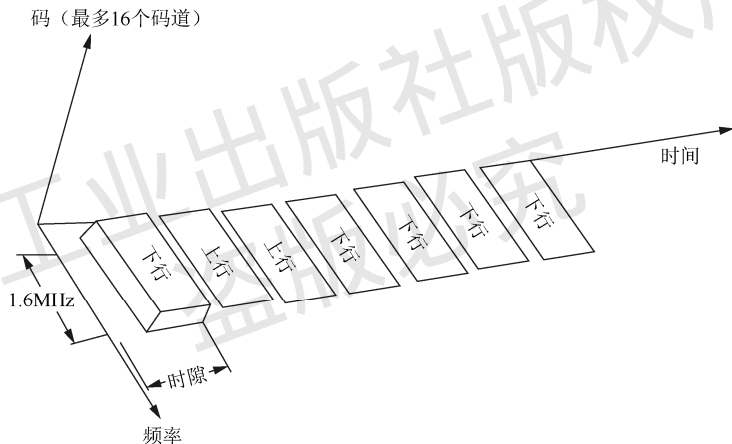


图 3-21 TD-SCDMA 原理示意图

② 易于采用智能天线等新技术。TDD 上下行链路工作于同一频率、不同的时隙，因而上下行链路的无线电波传播特性基本一致，易于使用智能天线等新技术。TD-SCDMA 的基站天线是一个智能化的天线阵，采用波束成形技术，能够自动确定并跟踪手机的方位，天线波束随着移动台的移动而动态跟踪。天线波束很窄，可减少对其他用户的干扰，降低基站的发射功率，提高系统容量。同时还可减轻下行链路的多径传播现象，易于获得移动台的位置信息。

③ 特别适合不对称业务。在 3G 中，数据业务尤其是不对称的数据业务是主要业务。TDD 方式灵活的时隙配置可高效率地满足上下行不对称、不同传输速率的数据业务的需要，大大提高资源利用率，在互联网浏览等非对称移动数据和视频点播等多媒体业务方面具有突出优势。在业务发展初期，为适应语音业务上下行对称的特点可采用 3:3（上行：下行）的对称时隙结构；当数据业务进一步发展时，可采用 2:4 或 1:5 的非对称时隙结构。

④ 易于数字化集成，可降低产品成本和价格。

- ⑤ 采用软件无线电技术。
- ⑥ 与 GSM 兼容，可由 GSM 平滑演进而来。
- (6) CDMA2000。

CDMA2000 是由窄带 CDMA(IS-95)向上演进而来的技术，经融合形成了现有的 3GPP2 CDMA2000。IMT-2000 标准中 CDMA2000 包括 1x 和 Nx 两部分，对于射频带宽为 $N \times 1.25\text{MHz}$ 的 CDMA2000 系统 ($N=1,3,6,9,12$)，采用多个载波来利用整个频段。

表 3-6 归纳了 IMT-2000 标准中 CDMA2000 系列的主要技术特点。

表 3-6 IMT-2000 标准中 CDMA2000 系列的主要技术特点

名称	CDMA2000 1x	CDMA2000 3x	CDMA2000 6x	CDMA2000 9x	CDMA2000 12x
带宽 (MHz)	1.25	3.75	7.5	11.5	15
无线接口来源于	IS-95				
业务演进来源于	IS-95				
最大用户比特率 (bit/s)	307.2k	1.0386M	2.0736M	2.4567M	2.8432M
码片速率 (Mbit/s)	1.2288	3.6864	7.3728	11.0592	14.7456
帧的时长 (ms)	典型为 20，也可选 5，用于控制				
同步方式	IS-95 (使用 GPS，使基站之间严格同步)				
导频方式	IS-95 (使用公共导频方式，与业务码复用)				

与 2G 的 CDMA 相比，CDMA2000 有下列技术特点。

- ① 具有 $N \times 1.25\text{MHz}$ 多种信道带宽。
- ② 可以更加有效地使用无线资源。
- ③ 具备先进的媒体接入控制，从而有效地支持高速分组数据业务。
- ④ 可在 CDMAOne 系统的基础上实现向 CDMA2000 系统的平滑过渡。
- ⑤ 核心网协议可使用 IS-41、GSM-MAP 及 IP 骨干网标准。

⑥ 采用前向发送分集、快速前向功率控制、Turbo 码、辅助导频信道、灵活帧长、反向链路相干解调、选择较长的交织器等技术，进一步提高了系统容量，增强了系统性能。

从严格意义上来讲，CDMA2000 1x 系统只能算作 2.5G 系统，其后续走上了一条新的演进之路。3GPP2 从 2000 年开始在 CDMA2000 1x 基础上制定 1x 的增强技术 1xEV 标准，人们通常认为自此 CDMA2000 才真正进入 3G 阶段。

(7) 3G 的不足。

虽然 3G 和 2G 相比有很多优点，但是 3G 还存在着很多不尽如人意的地方，不能满足人们日益增长的通信要求，主要体现在以下几个方面。

- ① 对 IP 的支持远远不够。

3G 在无线传输技术和核心网方面都没有统一的制式，其主流技术并不适应互联网的发展要求。因此，需要提出能在各种环境和移动状态下提供无线多媒体服务，并能满足 QoS 要求的更新一代移动通信系统。

- ② 业务提供和业务管理不灵活。

3G 网络平台与实现完全开放式业务平台之间还存在着很大的差距。

- ③ 高速数据传输不成熟。

3G 的接入速率有限，而且由于各种业务之间的干扰，要提高到更高的无线传输速率很

难。3G 的最高无线传输速率是 2Mbit/s，而且仅限于室内环境和移动速率不高的环境；在车载移动状态下，其无线传输速率只能达到 144kbit/s，难以适应多媒体业务增长的需要。

3G 的这些不足及政策、经济等因素导致了人们对它的众多争议，再加上市场需求和技术的发展，更先进的 4G 必将替代 3G。

6. 2G/3G 网络现状

(1) 全球 142 家运营商已计划或已完成关停 2G 和 3G 网络。

随着 4G 和 5G 在全球范围内的加速推广，2G 和 3G 在全球范围内的使用正不断减少。许多运营商和政府已经关闭或决定关闭旧的 2G 和 3G 网络，并将其使用的频谱资源进行重新分配，用于建设更快、更高效的 4G 和 5G 网络。

GSA 的最新报告显示，截至 2022 年 9 月，全球 142 家运营商在 56 个国家和地区已经完成、计划进行或正在关闭 2G 和 3G 网络。43 个国家和地区的 76 家运营商已经完成或计划关闭 2G 网络。其中，15 个国家和地区的 24 家运营商已经完成 2G 网络关停；31 个国家和地区的 51 家运营商已有 2G 网络关停计划；2 个国家和地区的 2 家运营商目前正在关闭 2G 网络。42 个国家和地区的 80 家运营商已经完成、计划进行或正在关闭 3G 网络。其中，17 个国家和地区的 28 家运营商已经完成 3G 网络关停；31 个国家和地区的 46 家运营商已有 3G 网络关停计划；6 个国家和地区的 6 家运营商目前正在关闭 3G 网络。

(2) 2G/3G 退网是必然。

一是 2G/3G 腾退的频谱资源将推动 4G/5G 网络加快完善与发展。

2G/3G 早已成为老旧技术，网络速率、容量、频率、效率等均存在不足，但其占用的低频资源具有信号覆盖广和穿透能力强等天然优势，若将其释放出来用于 4G 和 5G 等新技术，必将大幅降低建设和运营成本，提高资源使用效率。

二是我国主推的蜂窝物联网和宽带语音技术可以很好地替代 2G/3G 网络。

2G/3G 网络主要承载语音通话和中低速数据业务，当前我国主推的 NB-IoT（窄带物联网）、4G（含 Cat1、VoLTE）和 5G 技术，正好可以完整填补 2G/3G 退网之后的技术空白。

三是关停 2G/3G 网络是落实绿色低碳和网络安全战略的必然选择。

关停 2G/3G 网络可降能降耗，节省运营维护开支和许可费用，便于电信运营商轻装上阵，集中精力发展 4G/5G 网络。因 2G/3G 基站认证机制不完备，关停 2G/3G 网络可消除一些黑客窃听和伪基站诈骗等犯罪行为，排除部分危害用户信息安全和公共安全的隐患。

(3) 我国 2G/3G 退网速度慢。

2G/3G 退网是一个系统性工程，并不是简单的技术问题或者经济问题，相比于欧洲运营商，我国三家运营商的 2G、3G 退网速度略慢，原因如下。

一是 2G/3G 网络规模庞大，退网周期非常长，退网过程不宜“一刀切”。

在我国，2G、3G 的发展历史超过 20 年，目前仍有规模巨大的基础设施，承载着大量用户，特别是偏远的农村地区，仍有大量用户使用 2G 网络。截至 2021 年底，2G/3G 基站数量仍达 263.5 万座，占基站总数的比例超过 26%。据估计，全国 2G 在网用户仍有 2.73 亿个，占移动电话用户总量的 17.15%，2G/3G 网络还承载着许多物联网用户。在三大运营商中，中国移动的 2G 网络规模最大，承载着九成的用户。或许正是因为 2G 网络覆盖较为完善，覆盖我国大部分地方，所以可以看到在很多地方，尤其是一些偏远地区，2G 网络仍

有存在的价值。因此退网并非在短期内可以完成的。在部分地区，电信运营商已启动部分 2G/3G 基站关停工作，但因退网方案欠妥当，引发了部分负面舆情。

二是 2G/3G 物联网新终端仍在出货。

据统计，2021 年 2G/3G 非手机终端出货量达 1501 万部，同比虽下降 69.7%，但仍呈现“产销两旺”的局面。终端设备一旦入网便承担起行业用户的重要生产经营任务，且物联网终端迭代周期长，以智慧抄表为例，其迭代周期可达 7~15 年，这给今后 2G/3G 彻底退网带来了隐患。

三是 2G/3G 存量业务迁移任务重。

对于 2G/3G 物联网业务，中国移动研究院的研究表明，2G/3G 当前主要承载的物联网业务包括车联网、共享行业、智能金融、智能表计、消费电子等，涉及大量历史资产问题，如现有通信模组，甚至生产类设备升级的费用由谁出等。

对于 2G/3G 手机业务，2G 用户终端大多是老年人功能机，部分是儿童电话手表。据调查，目前价格低廉的 2G 功能机仍有市场，其与 4G 功能机有几十元的价格差距，因此受到部分老年人的欢迎。2021 年，2G/3G 手机终端出货量达到 417 万部，虽同比下降 52.3%，但仍有 12 款 2G/3G 手机新产品面市。

所以我国三大运营商要实现 2G/3G 退网，从用户的角度考虑，需要制定相应的退网计划，同时创造条件推动产品、终端更新迭代，加快引导 2G/3G 存量业务转网，同步谋划 2G/3G 频率重耕事宜。

(4) 国内 2G/3G 退网政策日渐明朗，步伐开始加快。

政策层面，2021 年 11 月，工信部印发的《“十四五”信息通信行业发展规划》中明确提出“全面推进 5G 网络建设。加快 5G 独立组网（SA）规模化部署，逐步构建多频段协同发展的 5G 网络体系，适时开展 5G 毫米波网络建设。加快拓展 5G 网络覆盖范围，优化城区室内 5G 网络覆盖，重点加强交通枢纽、大型体育场馆、景点等流量密集区域深度覆盖，推进 5G 网络向乡镇和农村延伸。优化产业园区、港口、厂矿等场景 5G 覆盖，推广 5G 行业虚拟专网建设。深入推进电信基础设施共建共享，支持 5G 接入网共建共享，推进 5G 异网漫游，逐步形成热点地区多网并存、边远地区一网托底的移动通信网络格局。加快 2G、3G 网络退网，统筹 4G 与 5G 网络协同发展。”在此之前，2020 年 4 月，工信部办公厅发布了《工业和信息化部办公厅关于深入推进移动物联网全面发展的通知》，首次明确提出“推动存量 2G/3G 物联网业务向 NB-IoT/4G（Cat1）/5G 网络迁移”。

运营商也发布多个 2G/3G 退网文件，如中国移动要求在 2020 年底前停止新增 2G 物联网用户；中国电信力推将 2G 语音业务逐步迁移到 VoLTE，并要求 5G 终端不再支持 2G；中国联通发布 2G/3G 退网计划，鼓励 2G 用户升级到 4G/5G。

我国 2G/3G 退网的进展如下。

对于运营商来说，退网是一个很漫长的复杂过程，需权衡各方利弊，采取逐步清退方式。

回看国内运营商退网情况，中国电信的 CDMA 网络（2G/3G）都在退网计划中，现在也未全部关停，还遗留部分点位在用；中国移动的 3G 网络几乎已经全部退出了，因为当初本身的 3G 用户并不多，不过其 2G 网络依然在用；中国联通有 2G/3G 退网计划，不过主要还是 2G 网络，同样未全面清理完毕。但 4G 网络对于国内这几家运营商来说，短期内绝对不会退，其将与 5G 网络并存很长时间。但是，运营商如果一直要维护 2G、3G、4G、

5G 这 4 张网，那么背后必然是巨大的资源支出。

因此，针对 2G/3G 退网，三大运营商在积极行动。如中国联通在多个场合表示 2021 年底实现 2G 全面退网；中国电信则从 2020 年 6 月 1 日起，开始逐步关闭 3G 网络；中国移动也发出了关于 2G/3G 网络订购限制，这意味着距离关闭 2G/3G 网络不远了。

如今，在 5G 已经成为全社会共识的情况下，加快 2G 退网，既是通信技术浪潮直接推动的结果，又是运营商不堪重负的现实考虑。5G 网络的建设速度越快，运营商退出 2G 网络的压力就越大。在科技进步面前，不管是企业，还是个人，与时俱进才是更明智的选择，2G、3G 退网势在必行！

7. 4G 概述

4G 的下载速率能达到 100Mbit/s，上传速率能达到 20Mbit/s，并能够满足几乎所有用户对无线服务的要求。4G 并没有脱离之前的通信技术，而是以传统通信技术为基础，利用一些新的技术来提高无线通信的网络效率和功能。

(1) 4G 与 3G 的区别。

① 3G 的关键技术是 CDMA 技术，而 4G 采用的是正交频分复用 (OFDM) 技术。

OFDM 技术可以提高频谱利用率，能够克服 CDMA 技术在支持高速率数据传输时的信号间干扰增大问题。

② 4G 的无线接入标准统一，软件无线电技术升级。

③ 3G 采用的主要是蜂窝组网，4G 采用全数字 IP 技术，支持分组交换。

④ 4G 使用的其他新技术包括超链接和特定无线网络技术、动态自适应网络技术、智能频谱动态分配技术。

⑤ 4G 在功率控制上更加严格。

⑥ 在切换技术方面，4G 采用软切换和硬切换相结合的技术。

(2) 4G 标准。

目前基于 LTE 的 4G 标准有两个：LTE FDD 和 LTE TDD（国内习惯将 LTE TDD 称为 TD-LTE）。两大标准是基于 LTE 的不同分支，相似度超过 90%。LTE FDD 采用的是 FDD 方式，TD-LTE 采用的则是 TDD 方式。

TDD 系统的优势如下。

① 能够灵活配置频段，使用 FDD 系统不易使用的零散频段。

② 可以通过调整上下行时隙转换点，提高下行时隙比例，能够很好地支持非对称业务。

③ 具有上下行信道一致性，基站接收和发送数据可以共用部分射频单元，降低设备成本和设备复杂度。

④ 具有上下行信道互惠性，能够更好地利用传输预处理技术，如预 Rake 技术、联合传输 (JT) 技术、智能天线技术等，有效地降低移动终端的处理复杂性。

TDD 系统的劣势如下。

由于 TDD 系统的时间资源要分别分配给上行和下行，因此 TDD 系统的收发时间大约只有 FDD 系统的一半，如果 TDD 系统要发送和 FDD 系统同样多的数据，就要增加 TDD 系统的发送功率。

TDD 系统上行受限，因此 TDD 基站的覆盖范围明显小于 FDD 基站。

TDD 系统收发信道同频，无法进行干扰隔离，系统内和系统间存在干扰。

为了避免与其他无线系统之间的干扰，TDD 系统需要预留较大的保护带，影响了整体频谱利用效率。

LTE FDD 和 TD-LTE 这两个 LTE 的分支标准各有所长，但两者的基础技术非常相似，因此，有专家表示 LTE FDD 和 TD-LTE 完全可以看作一个系统。将 LTE FDD 和 TD-LTE 混合组网，可发挥各自的长处，TD-LTE 用于热点覆盖，LTE FDD 用于广域覆盖。

(3) 4G 的关键技术。

① OFDM 技术。

多径效应造成接收机收到的信号是多个时延、幅度和相位各不相同的发送信号的叠加，存在码间干扰，从而导致错误发生。为了实现高速数据业务，必须采取措施对抗码间干扰。既要对抗码间干扰，又要采用低复杂度且高效的手段传输高速数据业务，OFDM 技术是最佳选择。OFDM 系统框图如图 3-22 所示。

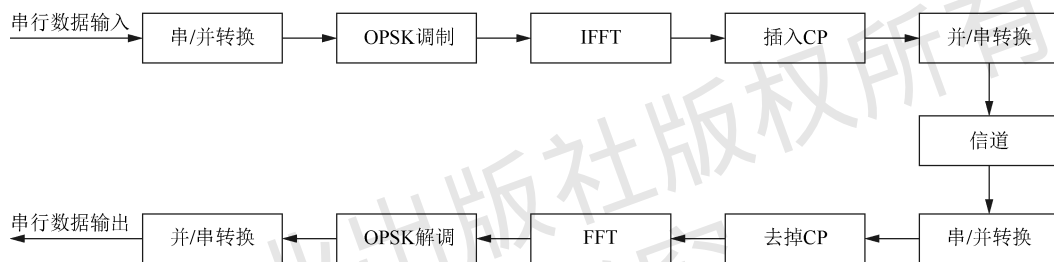


图 3-22 OFDM 系统框图

② 智能天线技术。

智能天线采用空分多址 (SDMA) 技术。其利用信号在传输方向上的差别，对同频率或同时隙、同码道的信号进行区分，动态改变信号的覆盖区域，将主波束对准用户方向，旁瓣或零陷对准干扰信号方向，并能够自动跟踪用户和监测环境变化，为每个用户提供优质的上行链路信号和下行链路信号，从而达到抑制干扰、准确提取有效信号的目的。

③ 无线链路增强技术。

可以提高容量，扩大覆盖范围的无线链路增强技术：分集技术，如通过空间分集、时间分集（信道编码）、频率分集和极化分集等方法来获得最好的分集性能；多天线技术，如采用 2 或 4 天线来实现发射分集，或采用多输入多输出 (MIMO) 技术来实现发射和接收分集。

④ 软件无线电技术。

软件无线电技术强调以开放性、标准化、模块化的通用最简硬件为平台，尽可能地用可升级、可重新配置的不同应用软件来实现工作频段、调制解调类型、数据格式、加密模式、通信协议等各种无线电功能，并使宽带 A/D 转换器和 D/A 转换器尽可能靠近天线。软件无线电技术不仅能适应产品的多样性，降低开发风险，还易开发系列型产品。此外，它还缩小了硅芯片的容量，从而降低了运算器件的价格。

⑤ 多用户检测技术。

4G 的终端和基站采用多用户检测技术提高系统的容量。多用户检测技术的基本思想：把同时占用某个信道的所有用户或部分用户的信号都当作有用信号，而不作为噪声处理，

利用多个用户的码元、时间、信号幅度及相位等信息联合检测单个用户的信号，即综合利用各种信息及信号处理手段，对接收信号进行处理，从而达到对多用户信号的最佳联合检测。它在传统检测技术的基础上，充分利用造成多址干扰的所有用户的信号进行检测，从而具有良好的抗干扰和抗远近效应性能，降低了系统对功率控制精度的要求，因此可以更加有效地利用链路频谱资源，显著提高系统容量。

8. 5G 概述

5G 具有高速率、低时延、大带宽的特性。目前，5G 业务单用户最高上行速率约为 100Mbit/s；最高下载速率能达到 10Gbit/s。例如，1GB 高清电影（播放时长约为 1.5h 的高清电影）在 5G 网络环境下，最快只需约 8s 即可下载完。5G 支持 1000 亿的海量连接和低至 1ms 的时延。

(1) 5G 应用场景。

ITU 定义了三种 5G 应用场景，分别是增强移动宽带 eMBB、海量机器类通信 mMTC、超可靠低时延通信 URLLC。经过大量讨论和论证，5G 重点关注如下典型部署场景：室内热点、密集城区、郊区、高铁、超远覆盖、高速公路、空地通信等。

(2) 5G 网络架构。

5G 网络架构的总体需求明确规定了支持多系统制式、统一鉴权架构、终端多系统同时接入、无线与核心网独立演进、用户面和控制面分离等技术，以降低终端的能量消耗，提供更好的移动业务体验、业务灵活配置等更高的业务服务能力。5G 核心网与接入网参考架构如图 3-23 所示，其中 5G 核心网支持 eLTE eNB 和 5G 基站（gNB）接入，5G 核心网和接入网之间的接口需要支持用户面和控制面功能，且 eLTE eNB 和 5G 基站之间支持用户面和控制面相关功能。

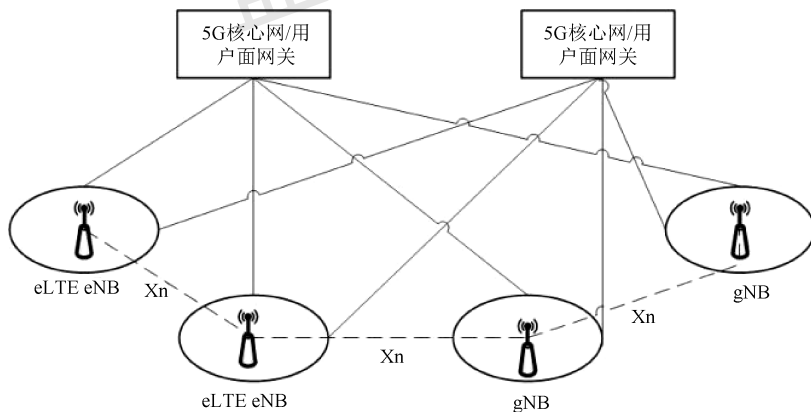


图 3-23 5G 核心网与接入网参考架构

(3) 5G 无线关键技术。

① 大规模天线技术。

目前，MIMO 技术是一种提高频谱效率和网络可靠性的重要手段，随着移动互联网的快速发展，迅猛增加的数据流量需求与有限频谱资源的矛盾日益突出，而天线数量的增加可以显著提高频谱效率。与 MIMO 技术相比，大规模天线技术可以实现更高的空间分辨率，使多个用户可以利用同一时频资源进行通信，从而在不增加基站密度的情况下大幅度提高

频谱效率。此外，其还可以降低发送功率，将波束集中在很窄的范围内，从而降低干扰。总之，大规模天线技术无论是在频谱效率、可靠性方面，还是在能效方面都具有很大优势，在 5G 网络中被广泛采用。

② 高频通信技术。

4G 及之前的移动通信系统使用的频谱资源都集中在 2.6GHz 以下，但是由于频谱资源极其匮乏，故难以满足日益增长的移动流量需求。为了满足 5G 网络所需的大带宽频率，5G 必须向高频段扩展，尤其是毫米波频段，该频段具有连续的大带宽，可以满足 5G 的高速率需求。

③ 非正交多址（NOMA）技术。

4G 及之前的移动通信系统都采用了正交的多址接入技术。在 5G 网络中，非正交多址技术日益受到产业界的重视。这是因为，一方面 4G LTE 系统单链路的频谱效率提升十分有限；另一方面，采用非正交多址技术可以显著提高频谱资源使用率。它的基本原理是在发送端采用非正交发送方式，主动引入干扰信息，在接收端通过串行干扰消除接收机实现正确的解调，换句话说，以串行干扰消除接收机的处理复杂度为代价实现频谱效率的提升。

④ 全双工技术。

采用 FDD 方式的移动通信系统需要使用成对的收发频段，而在实际系统中，有很多上下行非对称的业务，因此采用 FDD 方式会导致较低的频谱资源使用率。灵活的全双工技术可以在相同的频谱上，实现上下行同时发送、接收电磁波信息，且利用干扰消除技术消除来自天线的干扰信号，从而实现同时同频全双工通信，显著提升信道容量。

（4）5G 与物联网。

5G 为物联网不同应用场景提供针对性的通信能力和网络基础。

物联网的应用场景非常多，且不同应用场景的需求不一样，如智能抄表需要低功耗，自动驾驶需要低时延，VR/AR 需要大流量，智能井盖需要深度覆盖等，由于同时满足这些条件较为困难且有些要求是相互矛盾的，因此 5G 标准相应地制定了三个应用方向，即 eMBB、mMTC、URLLC，以适应不同的应用场景。

eMBB 支持大带宽高速率应用，如 Gbit/s 移动通信、超高清 3D 视频、云办公、云游戏等。

mMTC 适用于智慧城市等场景中连接设备的绝对数量不断增长情况下的物联网应用，且随着每个设备变得越来越复杂，它收集和发送的信息越来越多，积累大量的数据。正是 mMTC 确保了这些连接的可靠性和应用的实现。

URLLC 可确保网络同时具有低时延和超高可靠性。该特性能确保 5G 网络适用于某些生死攸关的情景，如在机器人的帮助下开展远程手术或驾驶自动驾驶汽车。在这两种情况下，任何网络故障或滞后后都可能会产生使人难以承受的后果。管理电网、第一响应者通信系统，甚至在线银行系统等都将越来越依赖 5G 网络。

5G 为物联网应用的实现提供网络基础，同时，5G 和物联网都是支撑数字经济发展的基础设施。5G+物联网必将形成一个更加智能和友好的环境，为人类的工作、生活和娱乐提供更好的用户体验。

3.2.2 LPWAN 技术

1. LPWAN 技术的特点

对于广范围、远距离的连接，需要长距离无线通信技术，LPWAN 技术正是满足物联网需求的长距离无线通信技术。

LPWAN 技术专为低带宽、低功耗、远距离、大量连接的物联网应用而设计。LPWAN 技术可分为两类：一类是工作于未授权频谱的 LoRa (Long Range Radio, 远距离无线电)、Sigfox 等技术，这类技术大多是非标、自定义实现的；另一类工作于授权频谱下，如 2G/3G/4G 技术、NB-IoT (Narrow Band-IoT, 窄带物联网) 等。典型长距离无线通信技术及短距离无线通信技术各项技术参数、特征对比如表 3-7 所示。

表 3-7 各项技术参数、特征对比

距离分类	长距离			短距离		
技术名称	NB-IoT	LoRa	Sigfox	Wi-Fi	ZigBee	蓝牙
传输速度	100kbit/s	0.3~50 kbit/s	10~1000bit/s	150~200 Mbit/s	250 kbit/s	1Mbit/s
通信距离	1~20km	1~20km	3~50 km	50m	2~20m	20~200m
频段	800~900MHz	470~510MHz	900MHz	2.4GHz 或 5GHz	2.4GHz	2.4GHz
安全性能	高	低	低	低	中	高
功耗	<5mA	<5mA	50MW 或 100MW	10~50mA	5mA	20mA
成本	5 美元	<5 美元	<1 美元	25 美元	5 美元	2~5 美元

本节我们重点介绍 LoRa 技术和 NB-IoT 技术。LoRa 技术作为未授权频谱技术的代表，NB-IoT 作为授权频谱技术的代表。

2. LoRa 技术

(1) LoRa 技术发展简介。

LoRa 技术是最早由法国公司 Cycleo (成立于 2009 年) 开发的一种扩频无线调制专利技术。LoRa 技术融合了数字扩频、数字信号处理和前向纠错编码技术，适用于超长距离的无线通信，拥有前所未有的性能，主要应用于物联网或 M2M 诸多垂直行业，包括能源、农业、商业、制造业、汽车及物流等。

2012 年，Cycleo 公司被美国 Semtech 公司以约 500 万美金收购，收购之后，Semtech 公司为促进其他公司共同参与到 LoRa 生态中，于 2015 年 3 月在世界移动通信大会上联合 Actility、Cisco 和 IBM 等多家厂商共同发起创立 LoRa 联盟，联盟成员包括跨国电信运营商、设备制造商、系统集成商、传感器生产商、芯片厂商和创新创业企业等。

经过几年的发展，目前 LoRa 联盟在全球拥有超过 500 个成员，包括微软、谷歌这样重量级的软件和互联网公司，并在全球超过 100 个国家布置了 LoRa 网络，这些网络分布于美国、加拿大、巴西、中国、俄罗斯、印度、马来西亚、新加坡等国家。截至 2021 年底，LoRa 已在全球部署超过 220 万个网关、2.8 亿个终端节点，LoRaWAN 覆盖 171 个国家和地区。预计到 2026 年，50% 的 LPWAN 物联网解决方案将会使用 LoRa 的方案。

LoRa 技术于 2014 年进入中国市场，阿里巴巴是 LoRa 技术在中国的积极推动者，并

担任 LoRa 联盟董事及亚洲区主席。2018 年, 腾讯、京东等巨头也加入 LoRa 联盟, 各地方广电、浙江联通、联通物联网公司、中国铁塔等 LoRa 生态伙伴也开始在各地积极部署 LoRa 网络, LoRa 技术在中国已成长成为一种成熟的物联网通信技术, 并形成了完整的生态系统。LoRa 技术在智慧城市、智能园区、智慧建筑、智慧安防等垂直领域均有了大量落地的行业应用。Semtech 公司物联网业务总监曾表示, 全球大量的垂直行业中已形成 300 多个 LoRa 应用场景。

(2) LoRa 技术的特点。

在 LoRa 技术出现之前已经有多种无线通信技术, 可组成局域网或广域网。广域网的无线通信技术主要有 2G、3G、4G; 局域网的短距离无线通信技术主要有 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee、UWB、Z-Wave 等。这些技术各有优缺点, 但是最突出的矛盾在于低功耗和远距离通信似乎只能选择其一, 而 LoRa 技术的出现打破了这一格局。LoRa 技术更易以较低功耗进行远距离通信, 可以使用电池供电或者其他能量收集的方式供电。较低的数据传输速率延长了电池寿命、增加了网络容量, LoRa 信号对建筑的穿透力也很强。LoRa 技术的这些特点更适用于低成本大规模的物联网部署。

LoRa 技术的特点如表 3-8 所示。

表 3-8 LoRa 技术的特点

特点	具体指标
长距离传输	1~20km
多节点	万级, 甚至百万级
低成本	基础建设和运营成本
长电池寿命	3~10 年
数据传输速率	0.3~50kbit/s

(3) LoRa 无线通信原理。

① LoRa 频谱。

LoRa 技术使用的是免授权 ISM 频段, 但各国或地区的 ISM 频段使用情况不同。目前, 其在中国使用 470~510MHz 频段。表 3-9 所示为部分国家或地区的 LoRa 使用频段。

表 3-9 部分国家或地区的 LoRa 使用频段

	欧洲	北美	中国	韩国	日本	印度
频段	867~869MHz	902~928MHz	470~510MHz	920~925MHz	920~925MHz	865~867MHz
通道	10	64+8+8	LoRa 联盟定义			
通道带宽 Up	125/250kHz	125/500 kHz	LoRa 联盟定义			
通道带宽 Dn	125 kHz	500 kHz	LoRa 联盟定义			
发射频率 Up	+14dBm	+20 dBm	LoRa 联盟定义			
发射频率 Dn	+14dBm	+27dBm	LoRa 联盟定义			
扩频因子	7~12	7~10	LoRa 联盟定义			
数据传输速率	250bit/s~ 50kbit/s	980bit/s~ 21.9bit/s	LoRa 联盟定义			
链路设计 Up	155dB	154 dB	LoRa 联盟定义			
链路设计 Dn	155dB	157 dB	LoRa 联盟定义			

② LoRa 网络结构。

使用 LoRa 技术可以将万个无线传输模块组成一个无线数字传输网络（类似于现有的移动通信基站网，每一个节点类似于移动网络的手机用户），在整个网络覆盖范围内，每个节点和 LoRa 集中器（网关）之间的可视通信距离在城市一般为 1~2km，在郊区或空旷地区可达到 20km。

LoRa 网络采用星型网络结构，如图 3-24 所示。



图 3-24 LoRa 星型网络结构

与网状网络结构相比，星型网具有最简单的网络结构和最小传输时延，使用起来非常方便简单。LoRa 技术既可以利用简单的 LoRa 集中器组建局域网，也可以利用 LoRa 集中器组建广域网。LoRa 集中器位于 LoRa 网络的核心位置，是终端和服务端（Server）间的信息桥梁，是多信道的收发机。LoRa 集中器通过标准的 IP 互联，终端采用单跳方式与一个或多个 LoRa 集中器通信，且均为双向通信。

(4) LoRa 技术的优势。

LoRa 技术的优势在于①远距离、低功耗、高性能大规模组网；②独一无二的原生地理位置技术。

① 远距离、低功耗、高性能大规模组网。

LoRa 技术因其具有低功耗、低成本、广覆盖及支持大规模组网的优势，在物联网领域得到了广泛应用。在频段干扰足够小的情况下，其覆盖能力和容量也能满足 LPWAN 通信的需求，因此终端-LoRa 集中器-服务器模式成为 LoRa 网络部署的发展方向。在现有的蜂窝移动通信网基站地区安装 LoRa 集中器，布局 LoRa 网络，可大大提高网络的部署和运行速率。

② 独一无二的原生地理位置技术。

Semtech 公司于 2016 年 6 月宣布 LoRa 技术增加地理位置功能，此功能允许用户定位资产、跟踪路径和管理设备。LoRa 技术的地理位置功能是 LoRaWAN 独有的，通过 LoRa 技术来实现。LoRa 技术是独一无二的，只要终端节点与网络通信，就可以得到地理位置数据，与地理位置相关的数据接收、传输或处理在传感器外面完成，因此不需要额外的硬件、电池或时间，对物料清单和功耗几乎没有任何影响。基于 LoRa 技术的地理位置特点，它可以工作在室外，也可以工作在室内，精度取决于地形和基站密度。

目前，LoRa 技术的地理位置用途主要有 4 个：定位、导航、管理和跟踪。

LoRa 技术使用到达时间差 (Time Difference Of Arrival, TDOA) 来实现地理定位。首先, 所有的 LoRa 集中器共享一个共同的时基 (时间同步), 当任意 LoRaWAN 设备发送一个数据包时, 不必扫描和连接到特定的 LoRa 集中器, 而是统一发送给范围内的所有 LoRa 集中器, 并且每个数据包都将发送给服务器。所有的 LoRa 集中器都一样, 它们一直在信道上接收所有数据传输速率的信号。传感器被简单地唤醒, 发送数据包, 范围内的所有 LoRa 集中器都可以接收它。内置在 LoRa 集中器中的专用硬件和软件捕获高精度到达时间, 服务器端的算法比较到达时间、信号强度、信噪比和其他参数, 综合多种参数, 最终计算出终端节点最可能的存在位置。

为了使地理位置准确, 通常需要不少于三个 LoRa 集中器接收数据包, 更多的 LoRa 集中器、更密集的网络会提高定位的精度和容量, 因为当更多的 LoRa 集中器接收到相同的数据包时, 服务器算法会收到更多的信息, 从而提高了地理位置精度, 如图 3-25 所示。我们期待混合数据融合技术和地图匹配技术来改善到达时间差, 增强定位精度。

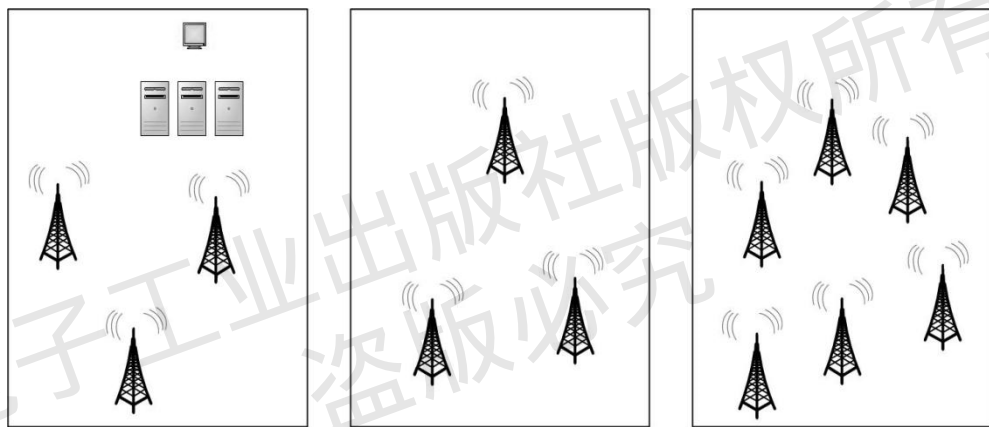


图 3-25 LoRa 地理定位

3. NB-IoT 技术

(1) NB-IoT 技术发展简介。

2014 年 5 月, 华为、Vodafone (沃达丰) 共同提出了基于蜂窝移动通信网的 NB-IoT, 当时被称为窄带技术 NB M2M, 而后又演进成 NB-CIoT; 2015 年 8 月, Nokia、Ericsson (爱立信)、Intel 提出了 NB-LTE 技术; 2015 年 9 月, 在 3GPP 第 69 次 RAN 全会上, NB-CIoT 和 NB-LTE 这 2 种技术合并为 NB-IoT; 2016 年 6 月, NB-IoT 获得国际组织 3GPP 通过; 2020 年 7 月 9 日, NB-IoT 技术正式被确定为 ITU IMT-2020 5G 技术标准。NB-IoT 技术的演进能力持续加强, 将成为窄带物联网主力承载技术。

截至 2022 年, 全球已经有 71 个国家 93 张 NB-IoT 网络实现了部署和商用, 其中, 我国已建成全球最大的 NB-IoT 网络, 实现了全国主要城市乡镇以上区域的连续覆盖。根据相关官方数据及从运营商处获取的信息, 截至 2022 年 9 月, 中国电信部署的 NB-IoT 基站数超过 42 万个, 在网 NB-IoT 终端数为 1.77 亿台; 中国移动部署的 NB-IoT 基站数为 35 万个, 在网 NB-IoT 终端数超过 1 亿台; 中国联通部署的 NB-IoT 基站数为 10 万个。我国 NB-IoT 网络的整体覆盖率超过 97%, 国内 NB-IoT 连接数已经过亿, 智能水表、智能燃气表、烟感、电动车监控等典型应用的连接数达到数百万个, 甚至超过千万个, 智慧路灯、智慧停车、智能门

锁等新兴规模化应用不断涌现。Grand View Research 的一项最新市场研究表明,到 2025 年,全球 NB-IoT 的市场规模预计将达到 60.20 亿美元,2019 年至 2025 年的复合年增长率预计为 34.9%。

(2) NB-IoT 的典型应用场景。

NB-IoT 主要实现数据的上报传输、网络下发控制指令、短信传输、端到端数据透传,以及基于基站的定位等功能,可满足有低功耗、长待机、深覆盖、大容量要求的低速率连接业务;同时由于其具有较差的移动性能,更适合静态及低速业务,因此对于时延不敏感、非连续移动、静态场景的实时传输数据业务场景,其基本可以承接大部分 2G 网络承载的物联网业务。从全球目前的应用经验看,其业务场景主要可以分为以下几类。

① 自主事件触发业务场景,如烟雾探测报警、视频监控、电梯报警、电子围栏报警、车辆防盗报警、设备工作异常报警等与安防行业相关的业务。上行数据量极小(十字字节量级),周期多以年、月为单位。

② 自主周期上报业务场景,如公共事业,智能电表、智能水表、智能燃气表的远程抄表,有效降低人工抄表所产生的成本及人工抄表的错误率,更重要的是可以确保用电高峰时数据的实时性搜集,掌握各城市不同区域的用电状况,从而进行用电调度,提供阶梯式电费计价;环境监测、农业物联网行业,土壤温湿度监测、光照度监测、空气温湿度监测、土壤 pH 值监测、天气预测及农业灾害监测等,可作为预防虫害、掌握农作物疾病、了解影响农作物生长因素的重要信息来源;社会安全行业,宠物管理、精神病患者及老人监管、儿童监护、危险品监控等应用场景。上行数据量较小(百字节量级),周期多以小时、天为单位。

③ 远程控制指令业务场景,如设备远程开启/关闭、设备触发发送上行报告,下行数据量极小(十字字节量级),周期多以天、小时为单位。

④ 软件远程更新业务场景,如软件补丁/更新,上行、下行数据量需求较大(千字节量级),周期多以天、小时为单位。

(3) NB-IoT 特性。

NB-IoT 技术总体上被定义为一种蜂窝物联网无线接入技术,它可以解决室内大范围覆盖、低速率设备大量接入、低时延敏感、设备低成本及低功耗等一系列问题。

NB-IoT 具备六大特点:一是广覆盖,NB-IoT 将提供改进的室内覆盖,在同样的频段上,NB-IoT 比现有的网络增益 20dB,覆盖面积扩大 100 倍;二是低时延敏感,大量数据重传将导致时延增加,NB-IoT 支持低时延敏感度、超低设备成本、低设备功耗和优化的网络架构;三是高容量、窄带灵活部署,NB-IoT 一个扇区能够支持 5 万个连接,具备支撑海量连接的能力,同时在授权频段内支持三种部署方式;四是支持非连续移动的业务;五是低功耗,NB-IoT 终端模块的待机时间可长达 10 年;六是低成本,企业预期的单个连接模块不超过 5 美元。

① 广覆盖。

NB-IoT 为实现覆盖增强采用了重传(可达 200 次)和低阶调制等机制。

② 低时延敏感。

目前 3GPP IoT 设想允许时延约为 10s,但实际可以支持更低时延,如 6s 左右(最大耦合损耗环境)。

③ 大容量、窄带灵活部署。

NB-IoT 单扇区支持 5 万个连接,比现行网络高近 50 倍(2G/3G/4G 分别是 14/128/1200),目前全球约有 500 万个物理站点,假设全部部署 NB-IoT,每站点三扇区可接入物联网终端数高达 7500 亿个。

NB-IoT 在授权频段中使用窄带技术,有三种部署模式:独立部署 (Stand-alone)、保护带部署 (Guard-band)、带内部署 (In-band)。独立部署模式利用现网的空闲频谱或新的频谱,适合用于 GSM 频段的重耕;保护带部署模式可以利用 LTE 系统中边缘无用频段,最大化频谱资源利用率;带内部署模式可以利用 LTE 载波中间的任何资源块。在带内部署模式中,NB-IoT 频谱紧邻 LTE 的资源块。NB-IoT 的覆盖在带内场景中相比其他场景更受限,故一般多采用独立部署模式或保护带部署模式。三种部署模式的比较如表 3-10 所示。

表 3-10 三种部署模式的比较

	独立部署模式	保护带部署模式	带内部署模式
频谱	频谱占用,不存在与现有系统共存的问题	需考虑与 LTE 系统共存的问题,如干扰规避、射频指标等	需考虑与 LTE 系统共存的问题,如干扰消除、射频指标等
带宽	限制较少	LTE 带宽不同,对应的可用保护带宽也不同,用于 NB-IoT 的频域位置比较少	要满足中心频点 300kHz 需求
兼容性	独占频谱,配置限制较少	需要考虑与 LTE 兼容	需要考虑与 LTE 兼容
覆盖	满足协议覆盖要求,覆盖面积最大	满足协议覆盖要求,覆盖面积略小	满足协议覆盖要求,覆盖面积最小
容量	比基站每扇区多 200000 个终端,能满足每扇区 52500 个终端的容量目标	比基站每扇区多 200000 个终端,能满足每扇区 52500 个终端的容量目标	比基站每扇区多 70000 个终端,能满足每扇区 52500 个终端的容量目标,但支持容量略小
传输时延	满足协议时延要求,时延最小	满足协议时延要求,时延略大	满足协议时延要求,时延最大
终端能耗	终端模块待机时间大于 10 年,满足能耗目标	终端模块待机时间大于 10 年,满足能耗目标	终端模块待机时间大于 10 年,满足能耗目标

全球主流的频段是 800MHz 频段和 900MHz 频段。中国电信把 NB-IoT 部署在 800MHz 频段上,中国联通选择 900MHz 频段来部署 NB-IoT,中国移动则重耕现有 900MHz 频段。

NB-IoT 属于授权频段,和 2G/3G/4G 一样,是专门规划的频段,频段干扰相对少。NB-IoT 网络具有电信级网络的标准,可以提供更好的信号服务质量、安全性和认证等的网络标准,可与现有的蜂窝移动通信网基站融合,更有利于快速大规模部署。运营商有成熟的电信网络产业生态链和经验,可以更好地运营 NB-IoT 网络。我国运营商可用频段如表 3-11 所示。

表 3-11 我国运营商可用频段

运营商	上行频段 (MHz)	下行频段 (MHz)	带宽 (MHz)
中国联通	900~915	954~960	6
中国移动	890~900	934~944	10
中国电信	825~840	870~885	15

④ 支持非连续性移动的业务。

NB-IoT 最初被设想为适用于非移动或者移动性不强的应用场景(智能抄表、智能停车

等), 同时可简化终端的复杂度, 降低终端功耗。

⑤ 低功耗。

NB-IoT 借助 PSM (Power Saving Mode, 节电模式) 和 eDRX (extended Discontinuous Reception, 扩展型非连续接收) 可实现更长待机。在 PSM 机制下, 终端仍旧注册在网但信令不可达, 从而使终端更长时间驻留在深睡眠状态以达到省电的目的。eDRX 进一步延长终端在空闲模式下的睡眠周期, 减少接收单元不必要的启动, 相比于 PSM, 其大幅度提升了下行可达性。PSM 和 eDRX 节电机制如图 3-26 所示。

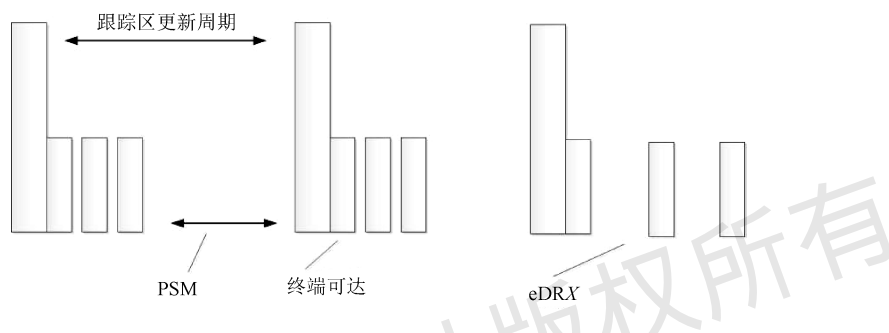


图 3-26 PSM 和 eDRX 节电机制

NB-IoT 的目标是对于典型的低速率、低频次业务模型, 等容量电池的寿命可达 10 年以上。根据仿真数据, 在耦合损耗为 164dB 的恶劣环境中, PSM 和 eDRX 均部署, 若终端每天发送一次 200B 报文, 则 5Wh 电池的寿命可达 12.8 年, 如表 3-12 所示。

表 3-12 5Wh 电池寿命估计

大小/间隔	电池寿命 (年)		
	耦合损耗=144dB	耦合损耗=154dB	耦合损耗=164dB
50B/2h	22.4	11.0	2.5
200B/2h	18.2	5.9	1.5
50B/1 天	36.0	31.6	17.5
200B/1 天	34.9	26.2	12.8

⑥ 低成本。

华为在 “NarrowBand IoT Wide Range of Opportunitieess” 中提到, NB-IoT 芯片组的价格为 1~2 美元, NB-IoT 模组的价格为 5~10 美元, NB-IoT 模组的理想价格应小于 5 美元; “Pre5G: Building the Bridge to 5G” 中提到, NB-IoT 模组的成本是 5~10 美元, 芯片组的成本为 1~2 美元; 互联网工程任务组 (The Internet Engineering Task Force, IETF) 也提到, 每个 NB-IoT 模组的成本小于 5 美元。综上所述, NB-IoT 模组的成本不超过 5 美元, 目标是下降到 1 美元。但是, 由于 NB-IoT 工作于授权频段, 除 NB-IoT 模组的价格以外, 还需接入运营商网络, 每个 NB-IoT 模组还会增加流量费用或者服务费用。

就技术而言, 在短时间内, NB-IoT 技术和 LoRa 技术肯定会并行, 它们有共同点和不同点, 又各有优缺点, 很难说谁压倒谁, 但是如果受到技术以外的因素影响, 比如盈利模式的创新、与应用行业的紧密结合、借助行业的影响力等, 那什么都有可能。

➔ 任务实施

请画出移动通信技术和 LPWAN 技术分类、原理、应用领域的思维导图。

➔ 任务评价

本任务的任务评价表如表 3-13 所示。

表 3-13 任务 2 的任务评价表

评估细则	分值 (分)	得分 (分)
思维导图完整、详细	40	
对关键技术原理的叙述正确	30	
叙述条理性强、表达准确	15	
语言浅显易懂	15	

练 习 题

一、判断题

蓝牙技术支持语音和数据同时传输。()

二、选择题

1. ZigBee 的 () 无须人工干预, 网络节点能够感知其他节点的存在, 并确定连接关系, 组成结构化的网络。

- | | |
|-----------|-----------|
| A. 自愈功能 | B. 自组织功能 |
| C. 碰撞避免机制 | D. 数据传输机制 |
2. 在现有的各种无线通信技术中, () 是功耗最低的技术。
- | | | | |
|-------|----------|----------|-----------|
| A. 蓝牙 | B. Wi-Fi | C. LPWAN | D. ZigBee |
|-------|----------|----------|-----------|

三、简答题

作为新一代移动通信技术, 5G 的哪些特性可以极大地消除人与人、物与物, 以及人与物之间的连接屏障?