

21

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

无线通信基础及应用

(第二版)

- ◎主编 魏崇毓
- ◎参编 孙海英 邵敏 李勤
- ◎主审 禹思敏

WUXIANTONGXINJICHU
JYINGYONG



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

无线通信基础及应用

(第二版)

主编 魏崇毓

参编 孙海英 邵敏 李勤

主审 禹思敏

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书深入浅出地讨论了无线通信的相关基础理论和涉及的无线通信系统。全书共5章,首先介绍了无线通信的传播环境和大尺度、小尺度传播模型;其次介绍了均衡、分集与多天线通信技术以及移动通信网络技术;最后介绍了2G(GSM、CDMA)、3G(WCDMA、TD-SCDMA、CDMA2000)系统和LTE等无线通信系统与网络。

本书兼顾无线通信的基础理论和应用,以满足不同层次读者的需要,可作为高等学校工科通信专业和相关专业的高年级本科生教材,也可作为通信工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无线通信基础及应用/魏崇毓主编. —2版. —西安:西安电子科技大学出版社, 2015.5

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-3544-6

I. ①无… II. ①魏… III. ①无线电通信—高等学校—教材 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第273345号

策 划 马乐惠

责任编辑 张 玮 马乐惠

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2015年5月第2版 2015年5月第3次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17.5

字 数 409千字

印 数 7001~10 000册

定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-3544-6/TN

XDUP 3836002-3

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

本书第一版于2009年出版,至今已有五年,在此期间,许多教师和学生根据自己的使用情况提出了不少修改意见;同时,编者也感到在第一版中有一些章节不能适应迅速发展的通信技术对教学的要求,特别是第三代移动通信技术的演进和第四代移动通信技术的逐渐成熟,要求在教材中增加相应的内容。因此,编者在广泛吸收意见的基础上进行了第二版的编写。

与第一版相比,本次较大的修改有以下几个方面:

(1) 将原书第3章无线通信基本技术改为均衡、分集与多天线通信技术。这部分内容的修改,力求以循序渐进的方式介绍第三代移动通信演进和第四代移动通信的技术基础,包括空间分集、多天线系统、OFDM原理和空时编码技术等。

(2) 第5章增加介绍3G系统的长期演进和无线传感器网络,这两部分内容是近年来无线通信技术应用最有代表性的发展。

(3) 删去了原书第6章。

(4) 增添了部分例题和习题,其中部分附有答案。

本书共分5章,即绪论,无线通信基础,均衡、分集与多天线通信技术,移动通信网络技术,无线通信系统与网络。

禹思敏教授审阅了全书并提出了不少宝贵意见,同时兄弟院校的教师在使用本书第一版的过程中也提出了许多宝贵意见和建议,西安电子科技大学出版社的老师更是做了大量具体工作,这些都对本书的出版起到了很大的促进作用,编者对此表示衷心的感谢。

编者衷心希望读者对本书中的缺点和不足之处提出批评和指正。

编 者

2014年6月

第一版前言

目前无线通信在世界各地都得到了快速发展,已经成为电信行业中发展最快、最活跃的领域之一。从蜂窝电话到无线局域网和个人域网,无线通信设备的普及程度几乎超过了任何工业产品。自20世纪90年代中期以来,我国在无线通信产业和科研方面的发展也大大加速。从开发生产第二代数字蜂窝系统产品到独立提出3G系统国际标准TD-SCDMA,再到TD-SCDMA开始大规模商用,充分说明我国在无线通信领域的发展令人瞩目。在这种形势下,“无线通信”已经成为通信工程及其相关专业的一门重要课程。

无线通信涉及的技术内容非常广泛,不仅各种不同类型的无线通信系统不断出现,无线通信的基础技术也在不断发展变化。因此,不论是从教材编写还是从学习时间上来说,一门课程都难以完全解决问题。采取分别对待全面性与深入性的学习方式也许会更好处理一些。换句话说,就是分别从两个方面考虑无线通信的学习问题,即首先系统学习基础技术内容,通过这一阶段的学习达到对无线通信基本原理与技术的全面深刻的认识,为以后的科研工作和进一步学习打好专业基础;然后根据需要,有针对性地深入学习具体的无线通信系统。本书就是出于这样一个目的为通信及信息工程类专业本科高年级学生而编写的。

在选材上,本书主要关心无线通信领域的基本理论和共性技术,内容上力求深入浅出、通俗易懂。

本书分6章。第1章为绪论,主要介绍无线通信系统的一些基本概念、无线通信技术的发展历史与发展趋势。本章的目的是为以后章节的学习做一个铺垫。第2章是无线通信基础,主要介绍电磁波的基本知识和无线信道传播特性,包括大尺度损耗特性与小尺度衰落特性。无线信道特性是研究和设计无线通信系统的基础,而且无线信道特性分析也是学习上的难点。因此,第2章的编写力求选择最核心的内容,并且力求以便于理解的方式进行表述。第3章是无线通信基本技术,主要介绍无线通信系统设计中基本的共用技术,包括编解码技术、调制解调技术、多址接入技术、抗衰落技术等。第4章为移动通信网络技术,主要介绍移动通信蜂窝网的组网技术,包括蜂窝网的频率复用技术、网络工程规划以及移动性管理技术等。第5章简要介绍当前常见的无线通信系统。本章的目的是使读者对各种主要无线通信系统原理有一个基本的认识。为便于读者跟踪无线通信技术的发展,第6章对近几年无线通信领域普遍关心的新技术进行了简单介绍,其内容包括软件无线电技术、超宽带无线通信技术、WiMAX技术、智能天线技术和认知无线电技术等。

在本书的编写过程中,苏州大学的刘学观教授提出了宝贵建议,海信集团的李勇和毛洪波高级工程师、中国联通青岛分公司的谭佩良高级工程师、歌尔声学股份有限公司的胡永生教授提供了部分素材,禹思敏教授审阅了全书并提出了宝贵的意见与建议。另外,本书还得到了青岛科技大学信息科学技术学院领导与同事的支持。在此向他们表示诚挚的谢意。

本书由魏崇毓主编，参加编写的还有孙海英、邵敏和李勤。在本书的编写过程中，研究生顾有军、朱卫娟、刘臣、韩永亮、杨洋、吕畅、李东生等协助整理了部分材料并绘制了部分插图，青岛科技大学通信工程教研室的全体老师也提供了很多帮助，西安电子科技大学出版社给予了大力支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免会存在一些疏漏与不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2009年5月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 无线通信系统的构成	1
1.2 无线通信系统的主要规格指标	6
1.3 无线通信技术的发展	7
1.4 无线通信的发展趋势	9
1.5 现代无线通信系统实例	10
1.5.1 无线寻呼系统	10
1.5.2 蜂窝电话	11
1.5.3 集群通信系统	12
1.5.4 无绳电话	13
1.5.5 无线局域网	14
1.5.6 个人域网	16
1.5.7 固定无线接入	16
1.6 无线通信面临的技术挑战	18
习题	19
第 2 章 无线通信基础	21
2.1 无线信道传播概述	21
2.1.1 电磁波的基本知识	23
2.1.2 无线电波的传播方式	26
2.1.3 电磁波的极化	29
2.2 大尺度路径损耗	31
2.2.1 概述	31
2.2.2 自由空间传播模型	32
2.2.3 辐射电场与功率的关系	34
2.2.4 电磁波基本传播机制	35
2.2.5 无线信道传输损耗模型	46
2.3 小尺度衰落和多径效应	51
2.3.1 小尺度多径传播	51
2.3.2 多径信道的冲激响应模型	61
2.3.3 无线多径信道特性测量	63
2.3.4 无线多径信道特性参数	66
2.3.5 小尺度衰落信道类型	71
2.3.6 阴影衰落和衰落储备	72
习题	73
第 3 章 均衡、分集与多天线通信技术	77
3.1 概述	77

3.2 均衡技术	77
3.2.1 均衡原理	77
3.2.2 均衡的分类	79
3.2.3 均衡技术算法	80
3.3 分集技术	82
3.3.1 概述	82
3.3.2 微分集技术	82
3.3.3 分集信号的合并	85
3.4 多天线通信技术	90
3.4.1 MIMO 系统的基带信道模型	91
3.4.2 接收端已知、发射端未知信道特性时的 MIMO 系统容量	93
3.4.3 MIMO 系统的等效特征传输模型	96
3.4.4 发射端已知信道特性时的 MIMO 容量	97
3.4.5 MIMO 系统的空时编码技术	99
3.4.6 MIMO-OFDM 技术	113
习题	120
第 4 章 移动通信网络技术	123
4.1 概述	123
4.1.1 移动通信的概念及特点	123
4.1.2 移动通信系统的基本组成	124
4.1.3 移动通信的分类	124
4.2 频率复用技术和系统容量	125
4.2.1 频率复用技术	125
4.2.2 干扰和系统容量	132
4.3 移动性管理	138
4.3.1 位置管理	138
4.3.2 切换控制	141
4.4 蜂窝通信网络规划	146
4.4.1 蜂窝网络规划的主要内容	147
4.4.2 蜂窝无线网络规划流程	147
4.4.3 蜂窝系统业务量描述与业务量估计	148
4.4.4 蜂窝无线网络设计	149
习题	163
第 5 章 无线通信系统与网络	165
5.1 GSM 移动通信系统	165
5.1.1 概述	165
5.1.2 GSM 无线子系统的结构原理	167
5.1.3 GSM 的主要规格参数	174
5.1.4 GSM 逻辑信道	175
5.1.5 GSM 帧结构	178
5.1.6 语音编码和信道编码	181
5.2 CDMA 蜂窝移动通信系统	184
5.2.1 IS-95 CDMA 系统	185

5.2.2	IS-95 系统的无线传输	186
5.2.3	CDMA 系统的功率控制	192
5.2.4	CDMA 系统的软切换	194
5.2.5	RAKE 接收技术	195
5.3	第三代移动通信系统及其演进	196
5.3.1	系统概述	196
5.3.2	WCDMA 系统	198
5.3.3	TD-SCDMA 系统	204
5.3.4	CDMA2000 系统	217
5.4	第三代移动通信长期演进技术——LTE	221
5.4.1	LTE 概述	221
5.4.2	LTE 网络架构	221
5.4.3	LTE 物理层	224
5.5	卫星通信	227
5.6	无线传感器网络	230
5.6.1	传感器网络概述	230
5.6.2	无线传感器网络支撑技术	234
5.7	其他无线通信系统	236
5.7.1	蓝牙技术	236
5.7.2	短波通信	242
5.7.3	无线射频识别(RFID)技术	246
	习题	248
	附录 A 带通信号的基带等效表示	251
	附录 B 式(2-3-28)的证明	253
	附录 C 无线通信中常用英文缩略词	255
	参考文献	269

第1章 绪 论

无线通信技术已经成为当今社会不可缺少的信息交流技术手段和发展最快的工程技术领域之一。

移动通信是无线通信的重要方面。移动通信以其移动性和个人化服务为特征,表现出旺盛的生命力和巨大的市场潜力。除了移动通信之外,无线通信还包括许多其他系统,如无线遥控、无线检测、射频识别(RFID)、移动计算、无线定位等。无线通信技术的各种新的应用对无线工程师所形成的挑战与日俱增,要求他们掌握深厚的通信技术基础来应对这些挑战。本书旨在对无线通信技术的基础内容进行全面的介绍,以培养无线通信工程师应对目前和未来挑战的基础知识和能力。

实现无线通信的基础是电磁波传播理论。市场应用需求的迅猛增长与超大规模集成电路技术(VLSI)、数字处理技术和网络传输技术的发展是推动无线通信快速发展的重要因素。本章将首先介绍无线通信系统的基本构成,使读者建立无线通信系统的基本概念,接着讨论无线通信技术发展的大致过程以及无线通信的未来,然后概略介绍一些无线通信系统实例,最后讨论无线通信技术面临的主要技术挑战,这些挑战决定了无线通信技术的主要研究内容。

1.1 无线通信系统的构成

无线通信系统的基本构成如图1-1所示。

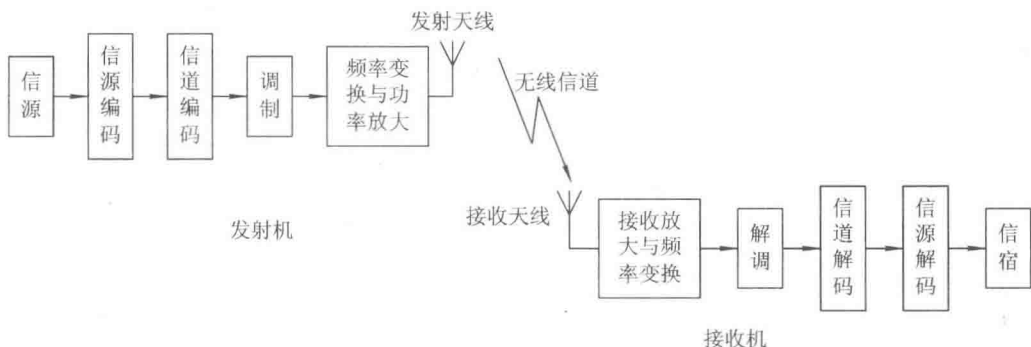


图 1-1 无线通信系统的基本构成

图1-1中,信源是发出信息的基本设施,信宿是信息的接收者。发射机将信源产生的消息信号变换成便于通过空间传播的电磁波信号形式,并送入无线传播信道。信源编码将来自信源的连续消息变换为数字信号,并进行适当的压缩处理以提高传输效率。信道编码

使数字信号与无线传输信道相匹配,以提高传输的可靠性和有效性。信道编码部分输出的是数字基带信号。调制器将数字基带信号调制到中频载波上。频率变换将调制后的中频信号变换到适合发射的射频频段。功率放大的作用是将射频信号提升到一定的功率电平,以保证无线通信系统的距离覆盖达到一定的范围。频率变换与功率放大部分的主要构成见图 1-2。发射天线的作用是将射频传导功率变换为在空间传播的电磁波功率,接收天线的作用是将空间传播的电磁波功率转换为射频传导功率。发射信号可以表示为

$$x(t) = A(t) \cos[2\pi f_c t + \varphi(t)] = \operatorname{Re}[c(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (1-1-1)$$

式中:

$$c(t) = A(t) \cos\varphi(t) + jA(t) \sin\varphi(t) = x_1(t) + jx_2(t) \quad (1-1-2)$$

为等效基带信号,亦称复包络。 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 分别称为 $x(t)$ 的同相分量和正交分量。有关基带等效表示的原理,请参考本书附录 A。

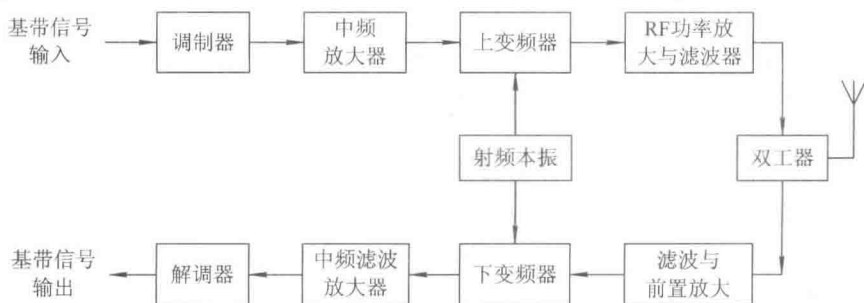


图 1-2 频率变换与功率放大部分的构成框图

在无线通信系统中,有些无线设备的发射机与接收机分别配有自己的天线。这时,收发设备之间的相互影响相对容易隔离。但在小型设备中,特别是用户终端设备上,接收机与发射机共用一副天线。在这种情况下,为了防止发射信号泄漏进入接收机,对接收机造成干扰或损坏,天线系统需经过一个双工器分别与发射机、接收机相连接。双工器的功能就是将发射机与接收机隔离,将来自发射机的发射信号送到天线发射出去,而不进入接收机,同时将来自天线的接收信号送到接收机,而不进入发射机。

另外,在发射机中还经常完成某些特殊要求的处理,如纠错编码、加密和多路复用等。

接收机的任务是从带有干扰的信号中正确恢复出原始消息,实现同发射机中相反的处理过程,即完成解调、译码、解密等。

按工作方式的不同,无线通信系统可以分为如下三种类型。

(1) 单工系统(Simplex System)。单工系统是只提供单向通信的系统,如无线电广播系统为单工系统,20世纪末广泛使用的无线寻呼系统也是一种单工系统。

(2) 半双工系统(Half Duplex System)。在半双工系统中,通信双方交替地进行收信和发信,收信和发信不能同时进行。按下通话、放开收听的对讲系统是典型的半双工系统。半双工系统在指挥调度等专业无线电中比较常用。

(3) 全双工系统(Full Duplex System)。全双工系统是允许通信双方同时进行发信和收信的无线通信系统。蜂窝电话是当前典型的全双工系统。

实际上,大多数场合通信双方使用的都是收发兼备的全双工系统。在蜂窝电话这类无

线移动通信系统中,用户使用的设备称为移动台(MS, Mobile Station)或移动终端。通信时移动台通过无线信道接入通信网络。在系统中,为 MS 提供网络无线接入服务的设备叫做基站(BS, Base Station)。一个基站提供服务的地域范围称为无线小区(Cell)。基站和移动台之间能够可靠通信的最大距离称为小区覆盖半径。用来从 BS 向 MS 传输信息的无线信道称为前向信道(Forward Channel),也叫正向信道或下行链路(Downlink)。用来从 MS 向 BS 传输信息的无线信道称为反向信道(Reverse Channel)或上行链路(Uplink)。

无线通信系统实现全双工工作需要采用特殊的技术。目前实现全双工通信的技术有时分双工(TDD, Time Division Duplex)和频分双工(FDD, Frequency Division Duplex)两种。FDD 是将发射机和接收机设计在两个不同的无线频率上工作,从而实现收发隔离的双工技术。由于发射机和接收机的工作频率不同,因此在设计双工器(Duplexer)时,使用合适的滤波器就可以实现发射机与接收机之间的隔离。目前应用的大多数无线通信系统都采用 FDD,如 GSM(Global System for Mobile communication)、CDMA、WCDMA(Wideband CDMA)、CDMA2000 等。TDD 是在同一个无线频率信道上使通信系统的发射机和接收机分时工作,发射时不接收,接收时不发射,通过分时控制来避免发射机和接收机之间可能产生的干扰。

TDD 技术是 20 世纪 80 年代后才在无线通信系统中使用的,这种双工技术具有一些独特的优点。首先,采用 TDD 技术的通信系统不需要使用成对的频谱资源。在当前频率资源越来越紧张、为通信系统分配成对频谱越来越困难的情况下,TDD 的这一特点给频谱资源的分配带来了很大方便。其次,采用 TDD 技术的通信系统特别适用于上下行链路不对称、上下行链路具有不同数据传输速率的业务。实际上,采用 TDD 技术的系统可以根据业务需要动态地分配下行链路和上行链路的时间长度比例。比如,访问互联网时往往要从网络上下载大量数据,而向网络上发送的数据量一般都非常小,这时可以将 TDD 系统上行链路的时间缩短,将更多的时间分配给下行链路。我国提出的第三代(3G)移动通信系统标准 TD-SCDMA 采用了 TDD 技术。

商业运营的无线通信系统一般要同时服务于众多用户,这方面的典型例子是当前广泛使用的蜂窝移动电话,其用户量很大,并且还在不断增长。当有很多用户同时在蜂窝系统中通信时,首先面临的问题是如何使这么多用户能方便地接入网络,不会造成相互干扰或拥堵,这就是无线通信系统的多用户接入问题,也称为多址接入。

常用的多址接入方式有频分多址(FDMA, Frequency Division Multiple Access)、时分多址(TDMA, Time Division Multiple Access)和码分多址(CDMA, Code Division Multiple Access)。FDMA 采用不同用户分配不同工作频率的办法避免多用户干扰。TDMA 用户可以工作在同一个频率上,但在时间上分配不同的时间段(称为时隙),由于不同用户工作的时间段不同,因此也同样避免了相互间的干扰。CDMA 系统也是让所有用户工作在同一个频率上,但对不同用户的信息使用不同的伪随机码序列进行扩频调制,在接收端采用与发射端相同的伪随机码序列进行相关解调,以达到区分不同用户的目的。第一代模拟无线通信系统采用了 FDMA 技术。目前中国使用的蜂窝电话系统有 GSM 和 CDMA 两种标准。GSM 系统采用 TDMA 方式,CDMA 系统采用码分多址接入方式。

按照无线小区覆盖半径的大小,无线通信系统可以分为大区制、中区制和小区制系统。

早期,无线通信系统服务的用户很少,因此对系统容量没有很高的要求,但一般要求

无线通信系统有尽可能大的无线覆盖范围。所以早期的无线通信系统采用大区制，一个基站的覆盖半径为 30~50 km。大区制系统的优点是网络结构简单，信道数目少，不需要移动交换机，直接与 PSTN 相连。

大区制系统有以下几个方面的局限性：

(1) 需要使用大功率发射机，并将天线架设得很高。

(2) 覆盖范围有限。无线通信系统大多工作于视线(LOS, Line Of Sight)传播方式，如果考虑地球曲率半径的影响，则一个基站的最大无线覆盖半径一般限定在 50 km 以内。

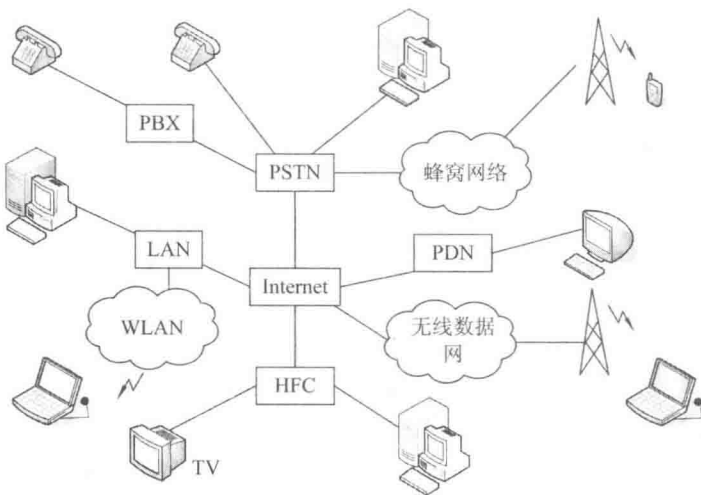
(3) 系统容量有限。早期的无线通信系统全部采用 FDMA 的多址接入方式，一个基站一般只提供几个频道(信道)，可容纳的用户数很少，而且无线频率在系统内部不能重复使用。

(4) 大区制系统下，BS 和 MS 均需要有较大的发射功率，这种要求对移动台来说是非常不利的，因为 MS 在体积、重量和天线高度等方面都会受到限制。

随着社会的发展，蜂窝通信用户数量快速增加，对通信系统容量的要求不断提高。为了在有限的频谱资源条件下获得尽可能大的用户容量，蜂窝系统一般采用小区制，其覆盖半径一般为 1~20 km，在城市高密度用户区域甚至可达到 1 km 以下。

无线覆盖介于大区制与小区制之间的系统称为中区制系统。

无线通信在很多情况下是多点之间的全双工通信，特别是对于公众通信业务，无线网络一般要同时服务于众多用户。在这种情况下，需要使用大容量的多点通信网络，多点之间的大容量双向通信需要通过信息网络基础结构实现。实际上，公众无线通信从最初的发展开始，就是建立在这种信息网络基础结构之上的，无线通信设备通过信息网络基础结构相互连接起来，并且在相互促进的过程中不断发展，因此也可以将无线传输网络看做有线网络在功能上的延伸。图 1-3 示出了信息网络基础结构无线和有线部分之间的关系。其中，无线网络部分包括移动通信蜂窝网、无线数据网和无线局域网(WLAN)等。随着技术的发展，还将有其他无线网络加入。



PBX—专用小交换机；PDN—公共数据网；HFC—光纤同轴电缆混合网络

图 1-3 无线通信网络架构与有线传输网络架构的关系

信息网络基础结构由一系列交换机、路由器以及点到点的传输链路构成,实现通信设备之间的信息交换。目前使用的信息网络基础结构包括有线和无线两个部分。有线网络部分是信息传输的骨干网络,主要包括公共交换电话网(PSTN, Public Switched Telephone Network)、Internet 和有线电视网。其中,有线电视网的用户一般采用同轴电缆接入端局,端局之间则采用光缆连接,因此有线电视网又称为光纤同轴电缆混合网络,即 HFC (Hybrid Fiber Coaxial)。

需要指出的是,以往 PSTN、Internet 和 HFC 这三部分网络是独立运行的。在功能上, PSTN 用来传输双向对称的语音业务(固定电话),用户端对传输带宽基本没有要求,但要求传输实时性好。Internet 传输计算机数据,其业务特点有两个:一是 Internet 业务对实时性的要求不高;二是 Internet 网络上下行传输量不对称,用户上传的内容很少,而往往需要从网络上下载大量的数据。有线电视网则是一种完全单向传输的电视广播网络。随着技术的发展,近十年来,这三种网络的业务都发生了很大的变化。电话网络的传输带宽大大增加,在功能上已经可以传输高速数据和视频数据,从而可以提供 Internet 和视频业务。Internet 网上也已经可以提供服务质量(QoS)良好的语音业务和视频业务。许多有线电视网在大带宽的基础上进行了双向传输改造,能够提供双向语音和数据传输业务。换句话说,目前这三种网络在功能上已经实现了融合,从而使得任何一种网络都可以提供其他网络的传统业务,这就是人们常说的三网融合。

无线网络的发展也存在类似有线网络的业务融合情况。最初的无线网络只提供语音通信业务,后来发展了专用的无线数据网络和宽带的无线局域网(WLAN)。随着无线传输技术的发展,第三代移动通信技术及其长期演进(LTE)已经将这三种网络的业务融合起来,即实现了集语音、数据、图像和视频于一体的宽带多媒体通信。

表征无线通信技术的核心是无线传输技术(RTT, Radio Transmission Technology),它是区分各种无线通信系统标准、确立知识产权的主要部分。

无线通信系统的业务功能包括语音和数据两个方面:语音是通信系统的传统业务,数据业务面向计算机通信和 Internet。实际上,数字技术的发展已经使得语音、数据、图像以及视频等任何一种业务都以数字方式传输。现在无线通信系统已经成为一种多媒体通信系统,宽带多媒体无线传输也成为未来一项重要的要求和发展方向。

信息传输效率和可靠性是无线通信系统的主要指标。信息传输效率可以用一定无线信道条件下的信息传输速率来衡量,具体指标有波特率和比特率。波特率是指系统通过无线信道每秒钟传送的码元个数。比特率是指系统通过无线信道每秒钟传输信息的比特个数。无线通信系统可能采用不同的编码和调制技术,因而一个码元可能对应不同的信息比特数,或者说每个码元通常含有一定比特数的信息量。比特率越高,说明系统的传输效率越高。信息传输的可靠性用误码率或误比特率来衡量。误码率是指码元在传输系统中被传错的概率。

无线电波信号在传输过程中必然会引入多种干扰(Interference),如热噪声、衰落以及其他无线设备的干扰等。这些干扰是影响无线通信系统传输效率和可靠性的主要因素。无线传输信道的固有特性和干扰特性,以及如何选择无线通信系统中信号的变换方式来提高系统性能和频谱使用效率,这些都是无线通信技术研究的主要方面。

1.2 无线通信系统的主要规格指标

1. 工作频段及频谱使用

无线频率的使用是由政府统一管理的,无线通信系统的工作频段是指政府无线电管理部门划分给该项业务的工作频率范围。

对于以 FDD 方式工作的无线通信系统,其工作频段分为上行频段和下行频段两部分,这两个频段分别用于无线通信系统的上行链路和下行链路,因此 FDD 系统需要分配一对无线频率,而且这一对频率之间要留有一定的频率间隔。例如,中国移动通信公司的 GSM 网络工作频段是:上行 890~909 MHz,下行 935~954 MHz;中国联通公司的 GSM 网络工作频段是:上行 909~915 MHz,下行 954~960 MHz;中国电信的 CDMA 网络工作频段是:上行 825~835 MHz,下行 870~880 MHz。这些网络的上下行频段间隔都是 45 MHz。

对于以 TDD 方式工作的无线通信系统,由于其上下行链路工作在一个频率上,因此系统只需要分配一个频段。例如,中国移动 TD-SCDMA 网络现阶段的工作频段是 2010~2025 MHz。

在政府划分的工作频段上,运营商需要按照无线通信系统的单载波信道带宽进一步将可用频段细分,将整个可用频段划分成一系列单载波无线信道(或称为频道)。例如,GSM 的单载波信道带宽为 200 kHz,CDMA 的单载波信道带宽为 1.25 MHz,TD-SCDMA 的单载波信道带宽为 1.6 MHz,WCDMA 的单载波信道带宽为 5 MHz。可用频段划分成一系列单载波无线信道之后,运营商还要根据自己的网络建设方案将这些无线信道编组,并确定合适的频率复用方案。

2. 无线覆盖距离和传输方式

无线通信系统的无线覆盖距离主要取决于发射机的发射功率、接收机的接收灵敏度,以及天线的架设高度、系统的工作频段和地形地物等传播环境因素。一般陆地无线移动通信系统的无线覆盖距离在 50 km 以内。利用地面绕射传播的通信系统,无线覆盖距离为 200 km;利用对流层反射传播的无线通信系统,无线覆盖距离一般可达几百千米;利用电离层传播进行通信的无线通信系统,其无线覆盖距离可达几千千米;卫星通信系统可以达到洲际无线覆盖的范围。

无线通信有以下几种传输方式:点对点传输、点对多点传输、中继方式等。

3. 信道速率与传输质量

无线通信系统中传输的全部数据可以分为两大类,即经过信源编码和信道编码后的用户数据以及网络控制信令数据。信道速率指的是在一个无线信道(频道)中传输数据的总速率,一般用比特率表示。比如,GSM 系统信道速率为 270.833 kb/s,而超宽带(UWB)无线通信系统的信道速率可达几百 Mb/s。

数字信号传输质量用传输误码率表示。

4. 调制方式与信道编码方式

调制方式分为模拟调制与数字调制两大类。第一代无线通信系统采用模拟调制,目前

的无线通信系统基本上都采用数字调制。常用的数字调制方式有 FSK、MSK、GMSK、BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、64QAM、256QAM 等。

解调方式包括相干解调和非相干解调两种。

5. 多用户接入方式

多用户接入也叫多址接入,是无线通信系统根据无线通信用户呼叫请求的统计特性,让众多用户共享无线信道的一种技术。常用的多址接入方式包括 FDMA、TDMA、CDMA、SDMA(空分多址)等。

1.3 无线通信技术的发展

自 20 世纪 30 年代无线通信系统开始使用以来,无线通信系统的发展已经分别经过第一代面向语音的模拟系统和第二代(2G)面向语音的数字系统。目前,适合多媒体信息传输的第三代系统(3G)也已经开始商用,并且 3G 的长期演进技术 LTE 和 4G 技术正在快速发展。

最初,无线通信技术进步缓慢。从 1873 年 Maxwell 建立电、磁、光相统一的电磁波理论,到 1897 年 Marconi 的标志无线通信诞生的横跨布里斯托尔海峡无线电传播试验成功,再到 1968 年 Bell 实验室提出蜂窝电话技术的概念,1979 年世界上第一套蜂窝移动通信系统在日本投入使用,这中间用了 100 多年的时间。直到 1984 年,全球移动通信用户数也只发展到 2.5 万。

无线通信系统的规模应用始于 20 世纪 30 年代的美国,这些早期的无线通信系统采用调幅(AM)技术。由于设备体积太大,当时的移动电话一般需要安装在汽车上。由于 AM 技术的特点,早期无线通信系统的抗幅度干扰能力很弱,车辆点火装置产生的严重幅度干扰无法克服。1935 年,频率调制(FM)技术发明并很快获得应用,使当时的无线移动通信系统抗幅度干扰的能力大大增强,此后调频技术成为移动通信系统的主要调制技术。

滤波器和低噪声前端放大器是无线通信接收机的关键部件。早期设计窄带射频滤波器和低噪声前端放大器比较困难,直到 20 世纪 40 年代后期,移动通信系统的语音信道带宽还采用 120 kHz,50 年代才改为 60 kHz,60 年代语音传输的调频带宽减小到了 30 kHz,这使得无线频谱的使用效率大大提高。从 20 世纪 40 年代后期到 60 年代中期,仅窄带滤波器和前端放大器设计技术的进步,就使无线通信系统对频谱资源的利用率提高到了原来的 4 倍。

信道自动交换技术是在 20 世纪 60 年代出现的,这是电话通信技术的又一次重大变革,使得电话运营公司可以为用户提供自动接续的移动电话服务。当时的自动交换机还不是采用电子交换接点,仍然是金属接点,这种自动交换机都是空分的、模拟的,不论在功能上还是在所能提供的网络容量上都受到很大的限制。1970 年,法国开通了世界上第一部程控数字交换机,开始采用时分复用技术和大规模集成电路。20 世纪 80 年代,程控数字交换机开始在上世界普及。

程控数字交换与数字传输相结合,可以构成综合业务数字网,不仅能实现电话交换,还能实现传真、数据、图像等的交换。程控数字交换机处理速度快,体积小,容量大,灵活性强,服务功能多,便于改变交换机功能,便于建设智能网,向用户提供更多、更方便的电

话服务。因此，它已成为当代电话交换的主要制式。

在蜂窝概念提出之前，早期的无线通信系统设计主要追求大的无线覆盖区域。这个阶段的无线通信系统一般采用提高发射天线架设高度和大功率发射机。但是，在早期的无线通信系统中，无线频率在同一个系统内无法重复使用，无线通信系统的用户容量非常低。例如，20世纪70年代的美国纽约 Bell 移动电话系统只有12个信道，在1000平方英里（1平方英里=2.589 988 11平方公里）的面积上只能同时支持12个呼叫。这种情况使得早期的无线通信系统无法满足不断增长的移动业务需求。

20世纪60年代末，Bell 实验室提出并发展了蜂窝无线通信技术。蜂窝概念的提出是无线通信技术发展历史上的一项重大突破。采用蜂窝概念可以设计任意大容量的无线通信系统，从而解决了无线通信技术向公众应用发展的关键问题。

蜂窝是一个系统级的概念，其思想是将需要提供服务的地理区域划分为许多称为小区的更小区域，并将这些小区编组成区群，也叫簇(cluster)，区群中小区的数目称为区群的大小。同时，无线运营商将国家无线电管理部门分配的无线频谱进一步划分为一定带宽的无线信道，并根据区群的大小将这些信道分组（一般是信道组的数目与区群大小相同），不同信道组的无线信道频率不同。蜂窝系统中的每一个小区配置一个无线基站，该基站使用一个小功率的发射机提供本小区的无线覆盖。每个小区的基站分配一组无线信道，这样所有信道组在一个区群中分配完毕，并且相邻基站分配不同的信道组。由于相邻基站使用了不同的信道组，因此工作频率不同，从而可以使得相邻基站之间的无线电干扰最小。接下来，将分配了无线信道组的区群在需要提供服务的地理区域上不断复制，就可以将相同的信道组在不同的区群中重复使用，这种频率分配方法就是频率复用(Frequency Reuse)。采用频率复用技术，通信运营商就可以在整个业务区内重复地使用国家无线电管理部门分配的无线电频谱，提供非常大的无线通信系统容量，从而大大提高了无线频谱的使用效率。

20世纪70年代，人们对蜂窝通信技术进行了广泛、深入的基础研究，建立了路径损耗、多普勒频移、多径衰落统计分析等参量模型。随着集成电路技术和数字信号处理技术的进步，自20世纪70年代末开始，无线通信技术及其应用进入快速发展阶段。1979年，第一代模拟蜂窝系统 NTT 首先在日本投入市场应用。1983年，AMPS(高级移动电话系统)在美国投入商用。1985年，ETACS 在欧洲投入商用。这些蜂窝系统均采用 FM 调制，之所以被称为模拟系统，是因为它们采用的射频传输技术仍然是模拟的。

20世纪80年代初，欧洲电信标准协会(ETSD)就下设小组对第二代(2G)数字蜂窝系统展开研究，并将其作为全欧洲强制性的数字蜂窝标准，这就是后来被许多国家广泛采用的 GSM(全球移动通信系统)。GSM 是第一个对数字调制、网络层结构和业务做了规定的第二代数字蜂窝系统，该系统1990年在欧洲投入使用。数字技术的使用是蜂窝系统发展的又一个重大进步，除了数字技术相比较模拟技术有许多优点之外，数字技术的使用也为通信系统从第一代语音业务向语音加数据的更广泛的业务，以至多媒体业务发展提供了更好的条件。在这个发展过程中，先是 GSM 提供了短数据业务(SMS)，而后发展到称为2.5G 的 GPRS，进而再向 3G 发展。与 GSM 对应但发展稍晚的另一个标准——CDMA 也经历了相似的发展演进过程。

无线通信系统从 2G 发展到 3G，在技术上并没有本质的变化，主要是在系统带宽和数据传输速率方面进一步提高，业务功能进一步增强。但是，2G 面向语音服务，而 3G 主要