

高等院校通信与信息工程类规划教材

现代无线通信技术

胡健栋 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校通信与信息工程类规划教材

现代无线通信技术

主 编 胡健栋

参 编 程卫军 纪 阳
田 辉 全庆一



机械工业出版社

本书主要介绍现代无线通信技术的有关内容。全书共分9章,内容包括
导论、无线信道、蜂窝结构系统、信源、调制技术、多址通信技术、衰落信
道的抗干扰技术、无线网络和业务、无线系统与标准。

本书适于作为通信及相关专业本科高年级学生和研究生无线通信教
材,同时也可作为通信专业工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代无线通信技术/胡健栋主编. —北京:机械工业出版社, 2003.5
高等院校通信与信息工程类规划教材
ISBN 7-111-11994-0

I. 现... II. 胡... III. 无线电通信—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第034319号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:周娟 版式设计:冉晓华 责任校对:李秋荣
封面设计:姚毅 责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2003年6月第1版第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·15.75印张·388千字
定价:23.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
封面无防伪标均为盗版

前 言

无线通信是当前发展最快的技术之一，已渗透到社会的各个角落，有着广阔的市场和业务需要，吸纳了大量的工程技术人才和从业人员。

现代无线通信最主要的特点是系统的分区结构和接入网模式，纵观现阶段无线通信发展的趋向，本书在编写中具有以下特点：

(1) 通信基础和新技术的结合 推陈出新，螺旋上升是当前通信技术发展的规律。事实上，目前公认的无线通信发展方向在技术上是正交频分调制、时空编码和IP技术等，都属于老树开新花。因此，根深叶茂是一条学习的原则。

(2) 模拟技术与数字技术的平衡 虽然现在所谓的数字技术时代，但是模拟技术仍是基础，不可或缺。本书以数字技术为主，但充分考虑到必要的模拟技术基础。

(3) 理论与实际的结合 考虑到课程设置的不同，提供读者阅读的方便性和灵活性，对基础理论作了适当的讲解，对专业知识作了适当的介绍。读者可以根据需要灵活地选择章节阅读。

(4) 技术与业务的密切关系 技术是为业务服务的，是业务的支撑，反过来业务又是推动技术演进的动力。本书既继承传统习惯，以技术为主，又适当介绍业务理论，如信源的业务模型、无线网的业务等。

本书共分9章，第1章为导论；第2章为无线信道；第3章为蜂窝结构系统；第4章为信源；第5章为调制技术；第6章为多址通信技术；第7章为衰落信道的抗干扰技术；第8章为无线网络和业务；第9章为无线系统与标准。

在本书的编写过程中，肖建华博士和张洁博士分别写了蜂窝结构和正交频分调制的初稿，谢芳硕士和尚展垒老师协助部分文稿的制作，程卫军博士和郭春纲硕士进行了审阅。对于他们为本书作出的贡献，在此表示由衷的感谢。纪阳博士写了第4、5、8、9章，田辉博士写了第2、3、6章，全庆一博士参加了讨论和书稿的审阅，胡健栋教授写了第1、7章，并对全书进行了统稿，程卫军博士作了最后的修正。

由于无线通信的技术和业务发展十分迅速，也由于时间比较紧张编写中不免有疏漏和差错，希望读者指正。

编 者

目 录

前言

第 1 章 导论 1

1.1 引言 1

1.2 现代无线通信的基础 2

1.2.1 数字技术 2

1.2.2 移动性和个人化 2

1.2.3 分区制、越区切换和频率复用 3

1.2.4 点对多点通信 4

1.2.5 无线通信网 4

1.3 数字通信系统的结构 6

1.3.1 通信系统的基础结构 6

1.3.2 数字通信系统 6

1.3.3 链路容量 8

1.4 无线信道特性 9

1.4.1 传播损耗 10

1.4.2 传播路径衰耗 10

1.4.3 多径衰落 10

1.4.4 频率选择性和非选择性衰落 11

1.4.5 Doppler 效应 12

1.4.6 噪声、干扰和失真 12

1.5 无线通信的展望 12

1.5.1 无线通信的发展技术 13

1.5.2 软件无线电 13

1.5.3 智能技术和自适应技术 15

1.5.4 多输入多输出系统 16

1.5.5 多址技术 17

1.5.6 多用户检测 17

参考文献 17

第 2 章 无线信道 18

2.1 电磁波传播机制 18

2.1.1 反射 18

2.1.2 绕射 20

2.1.3 散射 21

2.2 空间信道的大尺度模型 22

2.2.1 自由空间的传播模型 22

2.2.2 路径损耗 23

2.2.3 地面反射模型 23

2.2.4 阴影衰落 25

2.2.5 室外、室内传播模型 25

2.3 多径衰落与 Doppler 扩展 25

2.3.1 多径衰落 26

2.3.2 多普勒频移 27

2.4 信道的冲激响应模型 28

2.4.1 信道的相关函数和功率谱 29

2.4.2 信道参数 32

2.4.3 多普勒扩展引起的衰落效应 33

2.4.4 多径时延扩展产生的衰落效应 33

2.5 多径信道的统计模型 34

2.5.1 瑞利衰落分布 34

2.5.2 莱斯衰落分布 36

2.5.3 Nakagami-m 分布 37

2.5.4 电平交叉和衰落统计 37

2.5.5 频率选择性衰落信道的模型 37

参考文献 38

第 3 章 蜂窝结构系统 39

3.1 概述 39

3.2 频率重用 40

3.2.1 重用模式的分析 40

3.2.2 激励方式 42

3.2.3 越区切换 42

3.2.4 软切换技术 43

3.3 蜂窝系统的干扰 44

3.3.1 同频干扰 44

3.3.2 邻频干扰 45

3.3.3 功率控制 45

3.4 信道指派策略和接纳控制 45

3.4.1 信道指派策略 46

3.4.2 呼叫接纳控制 46

3.5 蜂窝业务量分析 47

3.5.1 分区的容量依据 47

3.5.2 话务量 47

3.5.3 明显损失系统的链路占用数	
概率分布	48
3.5.4 呼损	48
3.5.5 等待制呼损	49
3.5.6 呼叫平均等待时间	49
3.6 蜂窝系统容量	49
3.6.1 提高系统容量的方法	50
3.6.2 小区分裂	50
3.6.3 扇区划分	51
3.6.4 增加容量的其他方法	51
3.7 小结	52
附录 A 呼叫阻塞计算	52
参考文献	58
第 4 章 信源	59
4.1 概论	59
4.1.1 编码压缩技术的必要性和可行性	59
4.1.2 信源业务模型的意义	60
4.2 基本压缩编码技术简介	60
4.2.1 脉冲编码调制	61
4.2.2 预测编码	62
4.2.3 线性预测编码 (Linear Predictive Coder LPC)	63
4.2.4 变换编码	64
4.2.5 统计编码	65
4.2.6 矢量量化	66
4.3 语音压缩编码技术	67
4.3.1 GSM 编译码器	67
4.3.2 CDMA 系统的语音编码	68
4.3.3 第三代移动通信系统的编码压缩方案	69
4.3.4 视频编码压缩技术	69
4.4 业务模型	72
4.4.1 语音业务模型	73
4.4.2 图像业务模型	74
4.4.3 非实时业务	76
附录 B 马尔可夫模型	78
参考文献	79
第 5 章 调制技术	80
5.1 模拟调制	80
5.1.1 模拟乘法器的数学模型	81
5.1.2 角度调制	85
5.2 数字调制	86
5.2.1 矩形脉冲序列的信号处理	86
5.2.2 振幅键控	89
5.2.3 移相键控	90
5.2.4 差分移相键控	91
5.2.5 移频键控	92
5.2.6 正交移相和多移相键控	93
5.2.7 正交调幅	95
5.2.8 偏移正交移相键控	96
5.2.9 $\pi/4$ 正交移相键控	96
5.2.10 恒包络调制	97
5.2.11 最小频移键控	97
5.2.12 高斯最小频移键控	99
5.2.13 小结	99
5.3 最佳接收机及其性能	100
5.3.1 预备知识	100
5.3.2 高斯信道中二元信号的最佳接收	101
5.3.3 BPSK 在高斯信道的误码率	103
5.3.4 QPSK 在高斯信道的误码率	103
5.3.5 FSK 在高斯信道的误码率	103
5.3.6 MSK 的误码率	104
5.3.7 小结	105
5.4 调制在瑞利平衰落信道的性能	106
5.4.1 慢时变信道的误码率	106
5.4.2 平衰落信道的误码率	106
5.4.3 BPSK 调制的性能	106
5.4.4 QPSK 的性能	107
5.4.5 DPSK 的性能	108
5.4.6 DFSK 的性能	108
5.4.7 MSK 的性能	108
5.5 其他衰落信道的误码率	109
5.6 小结	109
参考文献	111
第 6 章 多址通信技术	112
6.1 概述	112
6.1.1 多址接入	112
6.1.2 双工技术	112
6.1.3 窄带和宽带接入	113
6.1.4 多址接入的正交条件	114
6.2 时分多址接入	114

6.3 频分多址接入	115	7.1.1 多径干扰	150
6.3.1 频分多址接入概述	116	7.1.2 多用户干扰	150
6.3.2 正交频分复用	116	7.1.3 抗干扰技术	150
6.4 正交频分复用技术	117	7.1.4 本章的目标	151
6.4.1 OFDM 的基本原理	118	7.2 分集技术	151
6.4.2 OFDM 系统	120	7.2.1 分集的方式和方法	151
6.4.3 OFDM 的同步	121	7.2.2 分集合并	153
6.4.4 OFDM 的峰值功率	121	7.2.3 宏分集	159
6.4.5 参数的选择	122	7.2.4 发送分集	163
6.4.6 小结	122	7.2.5 双发送分集	163
6.5 码分多址接入	123	7.2.6 分集系统的功率分配	165
6.5.1 标记序列	123	7.3 信道编码	166
6.5.2 m 序列	124	7.3.1 信道编码概述	167
6.5.3 Gold 序列和 Kasami 序列	125	7.3.2 分组码	167
6.5.4 Walsh-Hadamard 序列	125	7.3.3 卷积码	170
6.5.5 扩频比可变正交码	125	7.3.4 格码调制	177
6.6 直接序列扩频多址	126	7.3.5 交织技术	180
6.6.1 直接序列扩频技术	126	7.3.6 级联编码	182
6.6.2 Rake 接收	128	7.3.7 编码性能	185
6.6.3 CDMA 的误码率	130	7.3.8 时空编码	187
6.6.4 小结	133	7.4 信道的均衡	189
6.7 跳频多址技术	134	7.4.1 均衡原理	189
6.7.1 跳频技术	134	7.4.2 ISI 信道的模型	191
6.7.2 DS 扩频与 FH 扩频的比较	135	7.4.3 符号均衡器	193
6.8 多载波与码分多址的结合	136	7.4.4 线性均衡器	193
6.8.1 多载波 CDMA	137	7.4.5 判决反馈均衡器	194
6.8.2 多载波 DS-CDMA	138	7.4.6 序列估值	195
6.8.3 多音 CDMA	138	7.4.7 分数间隔均衡器	196
6.9 空分多址接入	139	7.5 小结	197
6.10 随机接入原理	141	附录 C MRC 的权的确定	197
6.10.1 ALOHA 系统和协议	141	附录 D 平衰落信道的误码率	198
6.10.2 载波监听多址 (CSMA) 协议	143	参考文献	204
6.11 蜂窝系统的容量	144	第 8 章 无线网络和业务	205
6.11.1 蜂窝系统的频率重用	144	8.1 无线网络的组成方式	205
6.11.2 蜂窝系统的干扰分析	145	8.1.1 概述	205
6.11.3 蜂窝系统容量	145	8.1.2 Ad hoc 网络的特点	206
6.11.4 系统容量比较	146	8.2 蜂窝网络	207
6.11.5 CDMA 的容量	147	8.3 无线网络与固定网络的异同与 协作	208
参考文献	149	8.4 无线网络中的业务路由选择	209
第 7 章 衰落信道的抗干扰技术	150	8.5 无线网络的业务提供方式和核心网络 构成	210
7.1 概述	150		

8.5.1 设计方法	210	9.2 CDMA 数字蜂窝系统 IS-95	228
8.5.2 核心网和接入网的划分	215	9.2.1 CDMA 系统的空中接口参数	228
8.5.3 第三代移动通信网络	218	9.2.2 CDMA 的信道划分	228
8.5.4 3GPP 的全 IP 核心网解决 方案	219	9.2.3 CDMA 系统的声码器	229
8.5.5 虚拟归属环境与业务开发	222	9.2.4 CDMA 系统的多重扩频	229
参考文献	223	9.2.5 CDMA 系统的空中帧结构	229
第 9 章 无线系统与标准	224	9.2.6 码分多址系统的定时	232
9.1 GSM 移动通信系统和标准	224	9.3 第三代移动通信系统和标准	233
9.1.1 GSM 系统的物理信道设计	224	9.3.1 WCDMA 系统	234
9.1.2 GSM 系统的逻辑信道分类	225	9.3.2 CDMA2000	238
9.1.3 GSM 中的数字信号处理	226	9.3.3 TD-SCDMA 移动通信系统	239
		9.4 无线局域网	242
		参考文献	244

第 1 章 导 论

1.1 引言

采用通信技术来传输信息在现代社会是十分流行和重要的，它已经变成人们生活和工作的必需，社会发展的重要工具。特别是数字通信，推动了数字化社会的形成，使人们进入信息化社会成为现实。

通信技术的发展首先是从任何信息的二进制数字传输开始的。最有名的是电报，它出现在 1837 年。在发电报时，先把信息编成电报码，一种由 0、1 组成的所谓报文，然后用正负极性的电流进行传输。这是现代通信技术意义上最早的数字通信方式。这里包含两个过程：用手工把文字翻译成二进制字符，然后把字符变换为相应电流进行传输。

由于电报的生成比较复杂，不易普及到个人、家庭和一般的办公室，社会的需要推动了电话的发明。这是一种模拟通信方式。所以，当它在 1876 年出现后相当一段时间，模拟通信占了优势。因为它直接传输语言，便于应用，很快得到了普及。开始时出现有线电话，直接到达家庭、办公室，以及一些公共场所，在此同时，电报不断向自动化发展，出现了各种各样的电传机。随着真迹传递的需要，开发了传真技术和传真机，目前在通信中还占一席之地。在有线电话的基础上，各种无线电话通信、广播等蓬勃发展起来，出现了电视广播和图像通信。在这个阶段，有线通信着重发展交换和通信网，以便扩大呼叫范围；无线通信着眼于点对点的通信，作为通信网中传输链路的组成部分。一般讲，无线通信的基本问题在于拓宽传输频带，增大传输距离，提高可靠性。其使用频带从长波到微波，以便适应各种传输环境的电磁波传播条件。这是一个以模拟通信为主，数字通信为辅的通信时代。

模拟通信的发展，主要在于保证一定的通信质量下，增加通信的容量，提高可能转接次数和伸张通信距离。但是在 20 世纪 70 年代，由于交通的发展，汽车、轮船和飞机的增多，引起对移动中通信的社会需要，出现了移动通信的名词。移动通信的要素是点对多点通信，而且用户密度高。因此，短距离的多用户无线通信技术，即所谓蜂窝移动通信得到蓬勃发展。这是一种依托于有线骨干网，以无线通信技术作为接入手段的通信网。这样，通信技术进入了所谓任何人可以随时随地与其他人进行通信的个人通信时代。这样一个目标变为现代通信发展的推动力之一。

通信技术的进展与信源是分不开的。自然界的信源，如声音、图像等主要是模拟信号。它在传输中受到干扰以后无法恢复，因此，传输距离有限。随着数字计算机技术的进步，数据传输的交换成为通信的重要内容之一，推动了现代意义的数据网的建立。由此，称为公用网的电话网、广播用的有线广播网和数据网形成三网鼎立的局面。这不但经济，而且不能满足各种信号同步传输的要求。模拟信号与数字信号同步传输，带来不少技术困难和复杂性。同时由于信号处理技术的进步，模拟到数字的变换已很容易实现。因此，数字通信渐渐在替代模拟通信。经过近十几年的发展，现在数字通信已经变为主流。

本书讲述通信的组成原理，主要针对现代无线通信。

1.2 现代无线通信的基础

现代无线通信基本上是分区通信或蜂窝通信。它的实现基于一些基本技术：数字化、移动性和个人通信、分区制和频率再用、点对多点通信和无线通信网等。

1.2.1 数字技术

通信数字化现在已经取得绝对的地位。在历史上，数字化的主要障碍在于模拟信号变换为数字信号后，其频带加大很多倍。例如，应用最广的电话，其频带标称为4kHz（实际应用是300~3400Hz），数字化后变为64kHz，为原来的16倍。过去，这在传输效率上是不能容忍的。好在现代数字信号处理技术可以将它压缩到例如8kHz，甚至更低。加上一些节省频带的数字信号调制技术和接收技术，使数字传输变为现实可行。

通信的趋势倾向数字化，有下列原因：

1) 模拟信号的传输距离是有限的。信道的噪声和失真对信号的影响是随传输距离而积累的，这限制了通信的转接次数和距离。然而，数字信号可以在受到可容忍的损伤以后加以再生，消除损伤，因此，不受转接次数的限制，理论上可以传送无限距离。

2) 信息的数字表示便于信号处理。例如信号频带压缩、信号加密、信道的差错校正编码、信号的频谱扩展、信道均衡等，这些处理有利于提高通信的可靠性和安全性。

3) 可以采用数字集成电路，这是非常重要的问题。集成电路体积小、能耗少、成本低，对于通信的移动性、易用性和普及等有十分重要的意义。另外，由于可编程信号处理器、微计算机和其他可编程电路的发展，通信系统可以用软件来实现其功能对传输环境的自适应性，这就是所谓软件无线电（Software Radio）。其优点是一种设计可以适应多种标准和条件，避免不能通用和不能自动调节的缺点。

4) 各种信息都可以变换为数字信号，这样各种信号可以具有同样的格式，便于采用同样的传输方式，提供了统一传输的可能性。这样避免建立多种传输网的必需。同时，同一传输方式便于各种信号的同步传输。最直观的例子是电视信号的传输需要同步传输图像、声音和文字等。

5) 采用数据传输提供了交换技术的发展空间。过去模拟信号的传输都采用电路交换，用户接通以后，信道就被占用，虽然讲话有空隙，也无法加以利用。数据传输有可能采用分组交换，用户并不独自占用信道，其数据与其他用户的数据混合传输，大大提高了传输效率，降低了通信成本。为了保证各种信号的不同传输要求，提出了业务质量（Quality of Service, QoS）的概念，为各种信息信号制定优先等级，既保证了质量，又降低了传输成本。

由上述可见，采用数字或数据通信方式为什么变为通信技术的发展趋势。

数字化带来的直接问题是信号的模数变换、信源编码、数字调制、信道编码、低电压低功率集成电路等的研究与开发。

现代数字通信影响到社会的各个方面。可以看到，数字办公室、数字社区、数字银行等新名词的出现，反映了数字通信技术的广泛意义。这也是为什么本书将聚焦于数字通信技术的原因。虽然模拟通信技术作为学习基础，以后将给以一定的讲述，但主要是讨论数字通信。

1.2.2 移动性和个人化

现代无线通信的重点成果之一是通信的移动性。交通工具的发展, 交通的便利, 人们移动的频繁和距离大大增大, 对于通信的移动性提出了更高的要求, 希望能够随时随地与所需的任何地方的对象进行通信。同时, 通信工具的小型化提供了移动的可能性, 又反过来促进更高的移动性要求。

通信移动性的意义在不断扩大, 最基本的是人对人通信。这也是目前流行的第二代和将投入市场的第三代移动通信标准所考虑的主要目标。但是, 当前出现的一个发展方向是人与机器的移动通信, 拓宽了后者的概念。例如, 移动 IP、移动计算 (Mobile Computing)、视频点播 (Video on Demand, VoD) 等。

通信移动性的孪生物是通信个人化, 即通信的移动终端附属于个人而不是附属于地方, 如固定电话那样。个人化的一个直接的问题是个人呼叫标志, 例如电话号码将隶属于个人, 以及随之而来的通信密度的增大。现在提高通信系统的容量是个十分重要的课题, 推动了诸如自适应技术、多址技术的推陈出新。空分多址 (Space Division Multiple Access, SDMA) 就是近年来提出的方法。

1.2.3 分区制、越区切换和频率复用

通信系统的容量问题是移动通信遇到的最基本的问题, 这就是大量用户与有限频带之间的矛盾。由于分配给移动通信的频带有限, 提供的信道满足不了用户的需要, 必须用空间的分区制来加以补偿, 也就是将通信空间划分成许多通信小区, 习惯用六边形表示, 故也称作蜂窝。这种移动通信常称作蜂窝通信, 是移动通信的主流。它的分区结构如图 1-1 所示。图中将通信空间划分成蜂窝形小区, 通信系统的基站设在蜂窝中心, 并与地区性骨干网相连。移动终端, 一般称作手机, 在某一蜂窝中通信时, 可以与该蜂窝的基站建立链路, 通过基站与骨干网连接起来, 达到所需通信对象。当手机移动到另一个蜂窝时, 它将自动与新到蜂窝的基站建立新链路, 以便继续进行通信。

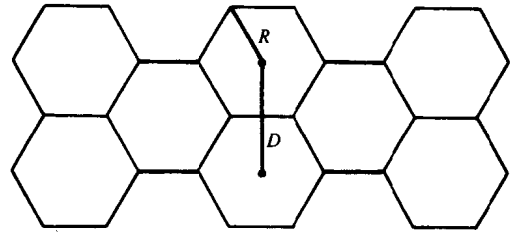


图 1-1 蜂窝结构

这种从一个基站越区到另一个基站的链路切换过程称为越区切换 (Inter-cell Handoff, Inter-cell Handover)。因此, 随着用户在各个蜂窝间移动, 手机将不断地改变其通信链路和相应的基站。为了保证在越区切换过程中, 正在进行的通信不中断, 越区切换需考虑两个问题:

- 1) 所到蜂窝应备有空闲的链路, 但这又势必降低蜂窝的链路利用率。
- 2) 链路交换时不引起误码的产生, 但这又势必增加链路的交接时间, 从而降低链路的利用率。

为此, 必须采取相应的技术, 保证切换的顺利完成, 同时带来最小的不利影响。这是移动通信的一个关键性问题, 也是分区带来的麻烦问题。为此, 各种越区切换和接入容纳 (Access Admission) 算法相应而生。

为什么要分区? 这是为了解决空中信道与用户数量的矛盾。由于空中信道有限, 在用户呼叫密集时会产生阻塞, 即所谓打不通电话, 此时必须把一个基站的服务范围减小, 以满足用户的通信需要。由此可见, 用户密度愈大, 分区愈小, 因此, 产生了小区、微小区和微微小区等分区规划。当然, 分区愈小, 越区切换也愈频繁。不过, 分区划小是有限制的, 过小

的分区会利小弊大，得不偿失。因此，分区技术并不说明提高系统容量是无足轻重的。相反，这是当前的一个重大问题。

分区不但带来越区切换的问题，还产生区间同信道干扰 (Cochannel Interference, CCI)。由图 1-1 可见，手机与基站的最大距离是 R ，相邻蜂窝中心的距离是 D ，而 $D=R\sqrt{3}$ 。因此，手机的功率必然会达到相邻的蜂窝，从而产生干扰。如果相邻小区采用同样的载波，这种干扰是易懂的，发生讨厌的串话，造成不可忽视的失密。为此，相邻小区必须采用不同的载波，以便减小干扰并使干扰不可懂。同一载波必须相隔一定数目的小区才能再用，这种小区的频率规划技术称为频率重用 (Frequency Reuse) 设计。

显然，分区解决了服务面的问题，但也造成越区切换和干扰增大的问题，这是有代价的。不过前者是必要的，后者则可以用一定的抗干扰技术来克服或减轻。

关于上述诸问题将在以后章节中具体讨论。

1.2.4 点对多点通信

现代无线通信系统是点对多点的系统，它的特点是：

1) 多个移动终端对基站进行通信，为了保持各终端来到基站的信号具有相等的功率，必须由基站控制移动终端的功率。这种功能称为功率控制。

2) 多个移动终端与基站进行通信，产生相互间的干扰，称为多址干扰 (Multiple Access Interference, MAI)。在移动通信中，MAI 结合多径传输构成主要干扰因素，促进了多址技术的发展，例如，多用户接收就是其中之一。

3) 点对多点通信系统有着广泛的应用。例如，用户无线接入系统、室内布线系统、无绳电话、无线局域网等。

这种通信方式属于多用户通信，它的容量是一个重要指标。因此，提高其容量是研究和设计的目标之一。现在通行的有频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA)、时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA) 和码分多址 (Code Division Multiple Access) 三种方式。它们适用于各种通信环境，一般不单独使用。现在流行的是在频分复用 (Frequency Division Multiplex, FDM) 基础上的 TDMA 和 CDMA，即将频谱划分为若干频带，再在每个频带内采用 TDMA 或 CDMA 的多用户复用。此外，SDMA 正在不断发展，以改善频谱利用率，提高抗干扰能力。

按照现在的分析，CDMA 比 TDMA 有较高的频谱利用率。第三代移动通信就是采用 CDMA 制式。另外，属于 FDM 观念的频分正交复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplex, OFDM) 技术愈来愈受到重视。

1.2.5 无线通信网

现代无线通信的一个重要标志是网络化。网络分成核心网和接入网两个部分。接入网必须是无线的；核心网可以有线的或无线的如卫星通信系统，但以有线为主。无线与有线通信系统的结合构成了直接面向用户的现代无线通信网。在这里，无线网络主要扮演着接入网的角色，提供用户在移动中进行通信的可能性。图 1-2 给出了无线接入网的结构示意图。

为构成网络，无线通信系统装备了大量复杂的信令系统，以为连接骨干网及进行呼叫过程之用，这是老一代无线通信系统所没有的。

无线通信网的特点有下列几个方面。

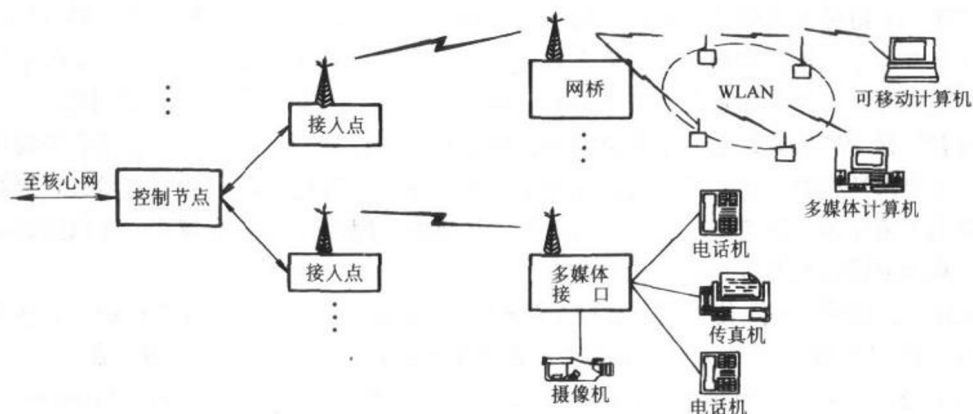


图 1-2 现代无线通信网的组织结构

1.2.5.1 全球化

全球化对无线通信网有着特殊的意义。在现代交通条件和社会活动环境下，移动范围是全球性的。无线通信网的国际通用性日益显得迫切。现在网络全球标准化方面已经取得相当的成绩，例如，GSM 或 CDMA 手机分别在采用 GSM 和 CDMA 移动通信网的地区，不论该地区在哪个洲，都可以应用。但是，从全球统一标准的要求看，目前无线网还未脱离割据状态，有待进一步解决。

无线网与有线网是不一样的。有线网可以局限于一个地区，不同地区可采用不同的标准，然后通过长途通信系统加以连接，并完成通信标准的匹配。无线网是与用户直接接口，而用户是全球漫游的，因此，必须有全球统一的接口标准。国际标准的制定是个关键问题。但是由于各种因素，如经济利益、文化技术背景、政治关系等因素，目前很难解决这个问题。

通信全球化的另一个方法是手机具有适应不同标准的能力，目前已有一些出台的例子，如适应不同频段和标准的手机。但这是通过在同一手机中装置相应接收电路完成的，不能解决多标准的问题。现在有一种软件无线电的想法，也许这是一种解决方案。

1.2.5.2 多业务通信

现代无线通信系统已经或正在变成多业务通信系统。多业务的意义是指语音、图像、文本和电视等业务。从传输的要求来看，它们可以分成两类：对传输时延敏感（Delay-Sensitive）的业务，也称实时业务和不敏感的业务，也称突发性业务。前者如语音和电视；后者如文本和数据。

多业务通信的主要问题是交换问题。交换方式最基本的有电路交换（Circuit Switching）和分组交换（Packet Switching）。前者在用户呼叫后首先必须把链路接通，然后才能通信，是一种面向连接（Connection-Oriented）的接续方式。这种方式的优点是通信时延小，适合于对时延敏感的通信，也是经典的交换方式，现在的公用电话网（PSTN）就采用电路交换。其缺点是信道的利用效率低下。后者是无连接的（Connectionless），只需要能通过逻辑信号的逻辑信道就能进行通信。数据网采用这种方式。打个比喻，正如一个集体通过繁忙的城市一样，可以有两种方法：一种是采用戒严的方法，先将要通过的所有街道戒严，把街道清理出来，然后让这个集体通过街道到达目的地。此方法的优点是保证集体在较短的时间范围内，整齐地到达目的地，但街道利用率很低。另一种方法是将到达的目的地告诉集体的每个人，让其分

别通过拥挤的街道自己到达目的地。其优点是街道利用率高；缺点是集体成员到达时间会有较大的参差不齐。现在倾向于采用后者，但应采取一定的措施。例如，给各种通信不同的优先权和服务等级，加大信道的吞吐量 (Throughput) 等，来解决传输的时延问题。

现有的移动通信系统是基于电路交换的概念进行设计的。正如上述，电路交换的优点是适合时延要求严格的信息；缺点是传输效率较低。由于信道的吞吐量大幅度增大，提高信道利用率是主要矛盾，分组交换逐渐变为看好。其缺点采用 QoS 技术来解决，可以达到一定的效果。移动通信向其靠拢已经变为现实。

采用分组交换方式，使无线局域网 (Wireless Local Area Network, WLAN) 具备很大的竞争力。WLAN 的另一个优点是它适合局部到整体的建设程序，可以节省投资。

除上述以外，还有其他的交换方式，如异步转移模式 (Asynchronous Transfer Mode, ATM) 等，是分组交换的变种。

1.3 数字通信系统的结构

数字通信系统的结构及性能是本书的主要内容，将在以后作深入和详细的讨论。下面主要讲述一个初步的观念，带有复习和引导性质，便于以后学习。

1.3.1 通信系统的基础结构

通信系统的基础结构是通信所必需的机构。不管是模拟还是数字通信，都可以表示如图 1-3 所示。通信系统包含信源变换器、发送器、信道、接收器和信宿变换器。

信源变换器用于将信源变成发送器能接受的信号 $x(t)$ ，在模拟通信的情况下，它可以是电话机等设备，将非电信号变成模拟电信号。在数字通信中，它还要把模拟信号变换成数字信号 $x(t)$ 。信宿变换器的功能与之相反，将接收的基带数字信号 $y(t)$ 变换为源信号。

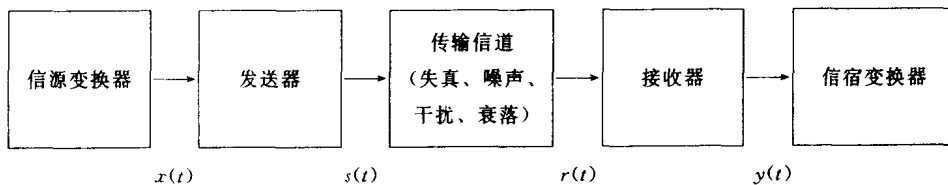


图 1-3 通信系统基本结构

发送器主要解决信号 $x(t)$ 与信道的匹配。它由调制器、放大器、均衡器等组成。调制器的作用是将信号的频谱搬迁到有利于信道传输的频带内。均衡器是一种滤波器，其特性与信道的相反，用于均衡信道的线性失真。发送器的输出是 $s(t)$ 。接收器的功能与发送器相反，将接收信号 $r(t)$ 变换为基带信号 $y(t)$ 。

信道的特性决定于整个传输过程，包括发送和接收器特性、空中传播特性，以及天线系统的特性。由于空中传输情况复杂，对于通信系统的设计影响很深，将在以后设专门章节加以讨论。

1.3.2 数字通信系统

数字通信系统与模拟的有一些不同的特点。下面主要提出一些关键性的问题，便于读者在以后章节的学习中注意。

1.3.2.1 信源编码

数字通信的重要特点之一是信源变换中模拟信号变换为数字信号的过程，习惯称为模数变换 (Analog-to-Digital Conversion, ADC 或 A/D)，以及信源编码，也有将整个上述过程称为信源编码。

A/D 变换是一个分界线，在其前是模拟信号，在其后到调制以前是数字信号。在图 1-3 中， $x(t)$ 表示离散数字信号，可以写作

$$x(t) = \sum_{n=-N}^N b p_b(t - nT_b - \tau_b) = \sum_{n=-N}^N x_n(t) \quad (1-1)$$

式中， b 为幅度； p_b 为比特波形； T_b 为比特持续时间； τ_b 为延迟。

一般比特波形是矩形，即

$$x_n(t) = x_n, 0 \leq t < T_b$$

离散数字信号可称为数字序列，也称为数据流。

数字序列的速率决定于原模拟信号的频谱宽度和量化的分辨率。假定频谱带宽是 W ，根据 Nyquist 准则取样频率应满足下列条件：

$$f_s \geq 2WS$$

式中， S 为样本数 (S)。

样本的量化以分辨率 q 表示，也就是把样本分成 q 级。用二进制码表示时，一个数码用 1bit 表示，一个样本应有 $k = \log_2 q$ 数码。因此，信源码率为

$$R_b = f_s k = f_s \log_2 q \geq 2W \log_2 q \quad (1-2)$$

式中， $2W \log_2 q$ 是最小码率，这个最小码率是没有压缩时的值。

由于其中有信息冗余，可以用压缩技术降低信源码率。以语声为例，其标准频谱习惯取 4kHz，一般取 $f_s = 8\text{kS/s}$ ；量化取 128 级，即用 8bit 表示。于是标准码率是 64kbit/s。通过压缩技术，现在语声的码率可以降到 13~8kbit/s，而保证标准质量。信源编码就是按照信源的统计特性解除其内在的相关性，消除其中的冗余信息，达到压缩信源码率，降低对信道传输频带的要求，从而提高通信系统的传输效率。

1.3.2.2 信道编码

数字通信技术的另一特点是信道编码 (Channel Coding)。信道编码有两类：用于识别差错的编码和纠正差错的编码。前者称为检错码 (Error-Detecting Code)；后者称为纠错编码 (Error-Correcting Code)。

检错码一般与自动请求重发 (Automatic Repeat Request, ARQ) 机制结合应用。当接收端检测到来的码有错时，发出信号要求发送端重发。

信道编码的机理是在信息码中按一定的算法插入冗余码，用以校验或扩大不同信号之间的距离。信道编码的码率比不编码时高，这表示信道编码是以增加信道带宽来换取信道可靠性的提高。此二码率之比称为编码率 (Coding Rate)

$$R_c = R_{\text{uncoded}} / R_{\text{coded}}$$

也有用其倒数作为编码率的。

1.3.2.3 数字调制

第三个特点是数字调制。由于一般采用二进制数字系统，只有 0 或 1，相当于扳键的开合，所以称数字调制为移位键控 (Shift Keying)。例如，幅度调制为幅度移位键控 (Amplitude Shift

Keying, ASK), 频率调制为频率移位键控 (Frequency Shift Keying, FSK), 相位调制为相位移位键控 (Phase Shift Keying, PSK)。

对于多进制, 则在前面加多进制的数。例如, 4 进制相位移位键控用 4PSK, 或 QPSK (Quadrature PSK)。多进制调制可用于提高单位频带的传输码率。

二进制数字调制有一个有趣的特性, 它的 ASK 与 PSK 的表示是一样的。

当调制和被调制波形都是二进制数字信号时, 数字调制可以用模二加法来完成。

1.3.2.4 数字加密

在竞争激烈的今天, 加密 (Encryption) 不仅是军政通信的需要, 在商业, 乃至个人通信方面也是重要的问题。数字信号的加密比模拟信号容易。由于这个问题可以自成系统, 本书后面不加以讨论。

1.3.2.5 模拟传播

由于传播的频带带宽有限, 发送和接收的信号都是模拟信号。为了规范频带, 降低带外杂散频率, 在发送器中设置滤波器, 具有严格的频率特性要求。在接收器中也一样, 接收滤波器用于减少由天线来的带外干扰。

另外, 考虑到滤波器与空中信道的总线性失真, 采用均衡器来补偿是必要的。

1.3.3 链路容量

这里简单介绍数字通信链路容量 (Link Capacity) 的评价。

假定发送功率是 P , 频带是 W 。同时假定信道对信号的影响只是加入了热噪声, 其频带比信号的宽得多。由于这种噪声的统计特性是高斯型的 (Gaussian), 称这种信道为加性高斯白噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道。

在上述条件下, 为了保证任意高的可靠性, 通过链路传输的信息有一个最大的速率。此速率称为通信系统的无差错容量 (Error-Free Capacity)。

Shannon 证明了无差错容量是

$$\frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{P}{N_0 W} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{E_b R}{N_0 W} \right) \quad (1-3)$$

式中 C ——信道容量 (bit/s);

W ——传输带宽 (Hz);

N_0 ——单边噪声功谱密度 (W/Hz);

E_b ——接收信号每比特能量 (J);

R ——数据速率 (bit/s);

P ——接收信号功率 (W), $P = E_b R$ 。

从上式可以看到, 单位带宽的容量决定于比特能量与噪声功谱密度之比乘以单位带宽的数据率。显然, 单位带宽的比特率不变时, 信噪比 E_b/N_0 愈大, 容量愈大。同样, 信噪比不变时, 单位带宽的比特率愈高, 则容量愈大。为了提高容量, 可以采用不同的办法。例如, 提高信噪比、提高单位频宽的比特率等。

理想的通信系统定义为: 能提供最大的传输速率的系统。在式 (1-3) 中, 令 $R=C$ (bit/s)。于是可有如下关系:

$$\frac{C}{W} = \log_2 \left(1 + \frac{E_b C}{N_0 W} \right) \quad (1-4)$$

或记作

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{C/W} - 1}{C/W} \quad (1-5)$$

此方程的曲线如图 1-4 所示。

图中曲线将平面分成两个区域：一个区域是 $R/W > 1$ ，是带宽限制区；另一个区域是 $R/W < 1$ ，是功率限制区。在带宽限制区，充分利用频带是经济的。相反，在功率限制区，充分利用功率是有利的。但带宽趋于无穷时，信噪比为 $\ln 2$ ，即 1.6dB，即只要信噪比大于此门限，就可以得到无差错传输。对于任意 R/W ，存在一个 E_b/N_0 门限，大于它，则有可能得到无差错传输；相反，小于它，则不可能。

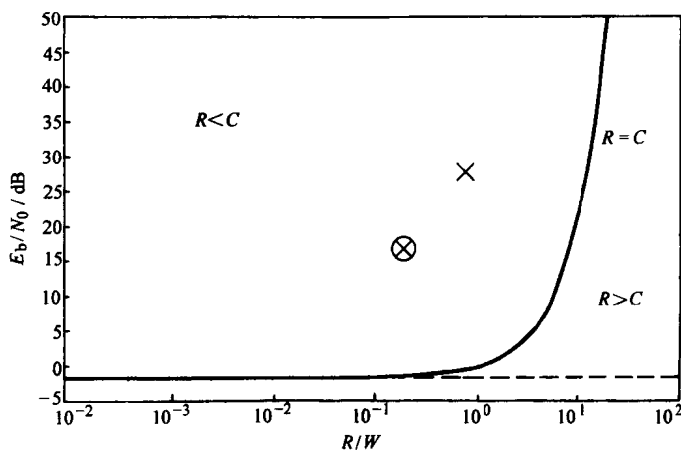


图 1-4 $R=C$ 曲线

(摘自 R. E. Ziemer and R. Peterson: Introduction to Digital Communications, 2 nd.)

在实际应用时，先确定差错概率，然后计算达到它的信噪比。将此信噪比对 R/W 画出曲线，并由此决定带宽。例如，假定误码率为 10^{-6} ，取 $E_b/N_0 = 10.6\text{dB}$ ， $R/W = 1/2\text{bit/s/Hz}$ 。在图 1-4 中得到一点 \times 。如果考虑信道编码，采用编码率为 $1/2$ ，并假定采用的编码在保证误码率要求的条件下可降低信噪比 3.6dB。由于编码， $R/W = 1/4\text{bit/s/Hz}$ ，这一点在图中表示为 \otimes 。

1.4 无线信道特性

无线信道的含义有广义和狭义之分。广义信道可以是信源变换器输入到信宿变换器输出的传输路径，或者由信源变换器输出到信宿变换器输入。相应地，它的特性由五个部分的特性组成：信源变换器、发送器、传播路径、接收器和信宿变换器；或者是三个部分组成：发送器、传播路径和接收器。

其狭义概念仅指传播路径的部分，也称为传播信道。由于应用的习惯，一般倾向于狭义的概念。下面提到的信道是指狭义信道。

无线信道比有线信道要复杂得多。最主要的问题是后者的发送电磁波在约束的均匀介质中传输，其数学模型是确定的。前者则不同，不管是定向还是不定向发射，其路径的空间约束性差，不确定因素多，只能用随机模型表示。特别在移动通信领域，工作环境复杂，由于