

信息与通信工程研究生系列教材

现代无线通信原理

林基明 张文辉 编著
仇洪冰 郑霖



科学出版社

信息与通信工程研究生系列教材

现代无线通信原理

林基明 张文辉 编著
仇洪冰 郑 霖

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书以衰落信道效应和相应传输性能改善方法为主线,以通信信号分析与设计为基本方法,以通信传输系统模型框架为章节划分依据,重点论述当前各类无线通信传输系统中具有普遍性和代表性的基本理论、基本概念和分析方法。主要内容包括:通信信号与系统的表征、无线传输信道、无线信道容量、数字调制信号及其功率谱密度、平坦衰落信道数字传输的接收与性能、分集技术等。

本书内容丰富、概念清楚、取材新颖、系统性强,充分反映了国际上近年来先进无线通信技术领域的新理论、新技术和新方法。

本书可作为高等院校信息与通信工程一级学科下各专业以及电子与通信工程专业领域的研究生、高年级本科生的教材,也可作为信息与通信工程领域的工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代无线通信原理/林基明等编著. —北京:科学出版社,2015.5

信息与通信工程研究生系列教材

ISBN 978-7-03-044066-5

I. ①理… II. ①林… III. ①无线通信—研究生—教材 IV. ①TN92

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第114332号



责任编辑:潘斯非 封面设计:郭瑞芝
责任印制:陈晔晨 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年6月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年6月第一次印刷 印张:20 3/4

字数:478 000

定价:59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近年来,无线通信发展非常迅速,大量新标准、新系统不断涌现。伴随着这些具体标准和系统出现的是大量的新技术、新理论和分析问题的新方法。目前关于无线通信的书籍很多,但大部分是介绍具体标准和具体系统。然而以讲述基本理论为主,适合用作信息与通信工程学科的本科生和研究生教材的书籍并不多。目前比较流行的通信专业教材以西安电子科技大学樊昌信教授的《通信原理》和清华大学曹志刚教授的《现代通信原理》为主。目前国内各高校信息与通信工程学科研究生大多使用 Proakis 的 *Digital Communications*(《数字通信》) 作为教材, Proakis 的《数字通信》内容很全面,信源编码、纠错编码、扩频等内容均包括在内,内容丰富但较深,用于自学比较困难,其内容涵盖广泛,使得初学者在学习过程中容易忽略对通信传输核心要义的把握。

近年来,作者为信息与通信工程学科研究生开设“现代通信原理”学位课程,同时也为通信工程专业本科生开设“通信原理”课程。在参考国内外主要书籍的基础上,根据上课效果逐渐形成一套讲稿,同时又得到桂林电子科技大学研究生精品课程建设的支持,在讲稿基础上经多次修改,历时三年多完善才形成本书。

本书的宗旨是希望能够适应无线通信迅速发展的形势,不局限于描述具体系统或标准的具体设计细节,而侧重深入讲述现代无线通信传输系统的基本理论、概念和分析问题的方法,期望通过它使学生能在无线通信理论方面打下坚实的基础,以便进一步从事相关的研究和技术工作。本书以衰落信道效应和相应传输性能改善方法为主线,以通信信号分析与设计为基本方法,以通信传输系统模型框架为章节划分依据,重点论述当前各类无线通信传输系统中具有普遍性和代表性的基本知识。

本书主要内容安排如下。

第 1 章:绪论。给出数字通信系统模型框架,通过模型的介绍确定随后章节的主要内容,将本书的重点锁定在传输过程,信源编码、信道编码、扩频等均不作详细讨论。介绍双工、复用、多址等信道资源分配概念,简述多输入多输出 (MIMO) 技术、空时处理、全数字接收、软件无线电等新的发展趋势,给出系统性能指标的定义和链路估算的方法。

第 2 章:通信信号与系统的表征。以复基带表示和信号空间为主,并扩展到随机信号。从确定信号出发给出确定性带通信号和系统的复基带表示,从矢量空间概念出发给出信号空间概念和信号波形的矢量表示方法,简述平稳随机过程和周期平稳随机过程的概念,在此基础上结合带通信号的复基带表示得到带通平稳随机过程的复表示。后续章节中的信号分析是基于本章给出的复基带和矢量表示。

第 3 章:无线传输信道。主要讨论衰落信道的特性与模型,包括传播模型、平坦衰落信道、频率选择性衰落信道、方向性衰落信道和衰落信道仿真五个部分。平坦衰落信道包括基站到移动站信道、空时相关的上下行信道、移动到移动信道,详细讨论平坦衰落信道的各种特性;频率选择性衰落信道部分详细介绍信道的分类、信道特征参数以及信道模型;方向性衰落信道部分重点介绍双向冲激响应和 MIMO 信道响应矩阵。

第 4 章:无线信道容量。从离散信道和信息度量出发,从带限白高斯噪声信道的信道

容量分析出发, 扩展到并行白高斯和色高斯信道以及非理想线性滤波信道的容量分析; 对于平坦衰落信道, 主要分析包含信道状态信息、功率控制和采用接收分集条件下的信道容量分析; 详细分析不同信道信息状态下的 MIMO 信道容量。

第 5 章: 数字调制信号及其功率谱密度。详细介绍目前比较常用的几种无记忆调制和有记忆调制方法, 包括正交频分复用 (OFDM) 调制, 在此基础上详细分析各种调制信号的功率谱密度。

第 6 章: 平坦衰落信道数字传输的接收与性能。本章以统一的方法来分析加性白高斯噪声 (AWGN) 信道和平坦衰落信道中数字调制信号的最佳接收与差错性能。首先给出一般矢量信道中的最佳检测分析, 在此基础上对 AWGN 信道中相干接收、非相干接收以及连续相位调制 (CPM) 信号的接收进行性能分析, 最后给出瑞利和 Nakagami- m 两种衰落形式下信号接收的性能分析方法, 并给出各种调制方式在相干或非相干接收下的接收性能结果。

第 7 章: 分集技术。详细分析各种接收分集合并技术, 针对瑞利和 Nakagami- m 两种衰落信道, 在第 6 章性能分析的基础上, 详细给出最大比合并、等增益合并、选择合并、切换合并和最佳合并下的性能分析, 最后针对多天线系统讨论发送分集技术的实现。

附录 A 介绍通信系统分析中常用概率分布的定义和相应的统计特性。

附录 B 介绍本书在分析中经常用到的完全复随机矢量和循环对称复随机矢量的定义和特性。

本书没有将 OFDM、MIMO 等新技术单独成章, 而是根据通信系统模型框架将其分解到相应的各部分, 形成统一思路。如对于 MIMO 系统, 将 MIMO 系统的传输信道特性放到无线信道一章, 在传统衰落信道分析方法的基础上, 考虑传播方向性来构建 MIMO 信道模型, 这样既有利于学生对 MIMO 信道分析的理解, 又有利于加深对衰落信道分析基本方法的掌握。

本书的 MIMO 信道容量 (4.5 节) 中给出的曲线直接引用了 Yang 的著作 *Multicarrier Communications* 一书和他在 University of Southampton 所用课件中的内容, 其余各章节中所绘曲线全由作者通过数值计算或仿真得到。

本书内容丰富、概念清楚、取材新颖、系统性强, 充分反映了国际上近年来先进无线通信技术领域的新理论、新技术和新方法。全书内容由浅入深, 定性分析与定量分析并举, 以适应不同层次的教学需求, 在几届研究生的教学过程中反映良好。

本书的主要对象为信息与通信工程等相关学科的研究生, 也可向下兼容大学高年级本科生 (主要讲授书中定性分析内容), 向上兼容博士生 (主要讲授本书中定量分析内容和新技术), 还可作为从事本专业研制、开发、维护专业技术人员的主要技术参考书。

本书得到桂林电子科技大学研究生精品课程建设的支持, 本书的编写工作得到桂林电子科技大学信息与通信学院、认知无线电与信息处理省部共建教育部重点实验室以及广西无线宽带通信与信号处理重点实验室的大力支持, 特此致谢。

由于作者才疏学浅, 书中不妥之处在所难免, 热切希望广大读者多提宝贵意见和具体修正意见, 以便进一步修改完善。

作者的电子邮件地址: 914854024@qq.com。

作者

2014 年 12 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 数字通信系统模型	1
1.1.1 信源	1
1.1.2 信源编码	2
1.1.3 加密与信道编码	3
1.1.4 数据调制与扩频调制	3
1.1.5 载波调制	4
1.1.6 信道	4
1.1.7 同步与均衡	5
1.2 信道	6
1.2.1 加性噪声信道	6
1.2.2 线性滤波器信道	6
1.2.3 线性时变滤波器信道	6
1.3 双工、复用与多址	7
1.3.1 双工	7
1.3.2 复用	8
1.3.3 多址	9
1.4 MIMO 与空时处理	11
1.4.1 MIMO	12
1.4.2 空时处理	13
1.5 全数字接收机	14
1.6 通信系统的主要性能指标	15
1.7 无线信道的链路估算	16
第 2 章 通信信号与系统的表征	18
2.1 带通信号及系统的复基带表示	18
2.1.1 确知信号	18
2.1.2 带通信号的复基带表示	20
2.1.3 线性带通系统的复基带表示	24
2.2 信号空间表示法	25
2.2.1 矢量空间	26
2.2.2 信号空间概念	28
2.2.3 信号波形的矢量表示	29

2.3	随机信号	33
2.3.1	平稳与周期平稳随机过程	33
2.3.2	带通平稳随机过程的表示	34
2.3.3	带限白高斯噪声	35
	习题	36
第 3 章	无线传输信道	40
3.1	传播模型	42
3.1.1	传播特性	42
3.1.2	大尺度路径损耗经验模型	46
3.1.3	阴影慢衰落	50
3.2	平坦衰落信道	51
3.2.1	线性时变信道模型	51
3.2.2	信号包络相关与多普勒谱	53
3.2.3	信号包络分布	57
3.2.4	信号相位分布	60
3.2.5	组合衰落阴影分布	61
3.2.6	电平交叉率	64
3.2.7	平均衰落时段	65
3.2.8	空时相关	66
3.2.9	移动到移动信道	71
3.3	频率选择性衰落信道	72
3.3.1	确定线性时变信道的系统函数	72
3.3.2	随机线性时变信道特征	74
3.3.3	随机线性时变信道分类	76
3.3.4	频率选择性衰落信道特征参数	79
3.3.5	频率选择性衰落信道模型	84
3.4	方向性衰落信道	85
3.4.1	双向冲激响应	85
3.4.2	统计描述	85
3.4.3	MIMO 信道响应矩阵	87
3.5	衰落信道仿真	89
3.5.1	窄带(平坦)衰落信道的仿真	89
3.5.2	宽带衰落信道仿真	96
3.5.3	M2M 衰落信道仿真	98
	习题	100
第 4 章	无线信道容量	104
4.1	信道模型	104
4.1.1	无记忆离散信道	104

4.1.2	离散输入连续输出信道	106
4.1.3	离散时间 AWGN 信道	107
4.1.4	AWGN 波形信道	107
4.2	信息度量	108
4.2.1	离散信源	108
4.2.2	连续信源	110
4.3	加性高斯噪声信道容量	110
4.3.1	功率约束高斯噪声信道	111
4.3.2	带限白高斯噪声信道	111
4.3.3	香农信道容量公式	113
4.3.4	并行白高斯噪声信道	120
4.3.5	并行色高斯噪声信道	123
4.3.6	非理想线性滤波信道	125
4.4	平坦衰落信道容量	126
4.4.1	含信道状态信息的衰落信道容量	126
4.4.2	功率控制衰落信道容量	131
4.4.3	采用接收分集的信道容量	132
4.5	MIMO 信道容量	135
4.5.1	MIMO 信道模型	135
4.5.2	一般算法	135
4.5.3	CSI/CSI 模式下 MIMO 信道容量	137
4.5.4	CDI/CSI 模式下 MIMO 信道容量	139
	习题	145
第 5 章	数字调制信号及其功率谱密度	148
5.1	奈奎斯特脉冲成形	149
5.2	数字调制信号表示	152
5.2.1	无记忆调制信号	153
5.2.2	有记忆调制信号	161
5.3	调制信号功率谱	169
5.3.1	调制信号复包络的功率谱密度	169
5.3.2	线性调制信号功率谱	175
5.3.3	广义 CPM 信号功率谱	179
5.3.4	完全响应 CPM 信号功率谱	182
	习题	187
第 6 章	平坦衰落信道数字传输的接收与性能	191
6.1	接收信号的矢量表示	191
6.2	一般矢量信道中的最优检测	193
6.3	AWGN 信道中相干接收性能	198

6.3.1	PSK 信号的差错概率性能	200
6.3.2	M -QAM 信号的差错概率性能	207
6.3.3	正交信号的差错概率	213
6.3.4	OFDM 信号的检测	217
6.3.5	MSK 的差错概率	219
6.3.6	AWGN 信道中差分相干检测性能	220
6.4	AWGN 信道中非相干接收性能	225
6.4.1	AWGN 信道中的最佳非相干检测器	225
6.4.2	M 元正交信号的差错概率	226
6.4.3	相关二进制信号包络检测的差错概率	229
6.5	AWGN 信道中 CPM 信号的检测	230
6.5.1	相干 CPM 解调器	231
6.5.2	非相干 CPM 解调器	231
6.6	平坦慢衰落信道中的接收性能	232
6.6.1	相干接收性能	235
6.6.2	非相干接收性能	239
	习题	240
第 7 章	分集技术	242
7.1	最大比合并	244
7.1.1	瑞利衰落信道	245
7.1.2	Nakgami- m 衰落信道	247
7.2	等增益合并	249
7.2.1	相干等增益合并	249
7.2.2	差分检测等增益合并	251
7.2.3	非相干平方律合并	252
7.3	选择合并	254
7.3.1	相干检测选择合并	255
7.3.2	非相干选择合并	259
7.4	切换合并	261
7.5	最佳合并	264
7.6	发送分集	271
	习题	274
附录 A	通信系统分析中的常用概率分布	276
A.1	定义	276
A.1.1	连续随机变量分布的描述	276
A.1.2	连续随机变量的统计特性描述	277
A.2	二项式分布	278
A.3	泊松分布	280

A.4	高斯 (正态) 分布	282
A.5	对数正态分布	286
A.6	中心 χ^2 分布和伽马分布	288
A.7	非中心 χ^2 分布	291
A.8	瑞利分布	294
A.9	莱斯分布	299
A.10	Nakagami- m 分布	302
A.11	韦伯分布	304
A.12	Suzuki 分布	306
A.13	随机变量的仿真	308
A.14	尾部概率的边界	308
A.14.1	切比雪夫不等式	308
A.14.2	马尔可夫不等式	309
A.14.3	契尔诺夫上边界	309
附录 B	复随机矢量	311
B.1	复随机变量	311
B.2	复随机矢量的协方差	311
B.3	完全复随机矢量	312
B.4	循环对称复随机矢量	312
参考文献		314

第1章 绪 论

通信 (Communication), 按照传统的理解, 就是实现对信息高速、准确地传递。

从 20 世纪 90 年代开始, 人类社会逐渐步入信息化社会。信息化社会是以信息技术为基础, 以信息产业为支柱, 以信息价值的生产为核心, 以信息产品为标志的社会。在信息化社会中, 信息 (Information) 成为重要的生产力要素, 和物质、能源一起构成社会赖以生存的三大资源。信息作为社会活动的战略资源和重要财富, 只有通过广泛的流通和交换才能产生价值, 创造出巨大的经济效益和社会效益。而通信作为信息的传输方式, 是人类社会传递信息、交流思想、传播知识的重要手段。通信与微电子技术、计算机技术、传感技术相互融合, 发展迅速, 尤其是无线通信技术在过去十几年取得了令人瞩目的成就。现代通信网络 (Network) 已成为支撑国家经济社会发展最重要的基础设施之一。可以预见, 未来通信的发展仍将继续对人们的生产生活方式、行为方式和价值观念产生更加重大和意义深远的影响。

在信息化社会发展进程中, 信息数字化是信息科学的一次重要革命。信息数字化包括两个层面的含义: 一是信息资源的数字化, 包括图像、视频、文字等视觉信息的数字化, 话音、音乐等听觉信息的数字化, 以及地理信息、空间信息和传感物理量等其他感觉信息的数字化; 另一层面则是信息处理的数字化, 包括对通信信号的分析、表示、处理、自动识别等过程的数字化, 以及对信号处理和信息传输方法的数字化, 如使用数字信号处理技术和对通信网络的系统仿真等。数字化使得传统模拟 (Analog) 通信在实际应用中逐渐淡出, 被数字 (Digital) 通信代替, 同时, 数字通信也向全数字接收、软件无线电方向迈进。因此, 本书将主要讨论无线数字通信。在深入讨论之前, 首先对数字通信系统作简单的介绍。

1.1 数字通信系统模型

图 1.1 给出了数字通信系统的基本组成框架。以图中信道为界, 上半部分为发射机部分, 下半部分为接收机部分。不考虑噪声和干扰带来的影响, 接收过程在数学上可以看成发送过程的逆过程, 其中解扩是扩频的逆, 解调是调制的逆, 交织与解交织、信道编码与信道译码、加密与解密、信源编码与信源译码、信源与信宿分别构成一对逆。因此这里重点讨论发射机组成部分。

1.1.1 信源

对于通信系统的传输信号, 一般主要考虑电信号形式, 所有非电信号 (光、声、机械波等) 均通过传感器转换为电信号, 然后进行处理和传输。数字通信系统 (Digital Communication System, DCS) 传输的信号是时间和取值幅度都离散的数字信号。实际信源输出可以是数字信号也可以是模拟信号。对模拟信号需要作数字化处理将其转化为数字信号。数字化过程包括三个步骤: 抽样 (Sampling)、量化 (Quantization) 和编码 (Coding)^[1, 2]。为能够从数字信号重新准确恢复出原模拟信号, 要求抽样速率满足奈奎斯特 (Nyquist) 抽样定理, 即抽样速率

f_s 不小于 2 倍信号最高频率 f_H , 即 $f_s \geq 2f_H$ 。近年来出现了一种称为压缩感知 (Compressive Sensing) 的新理论^[3], 利用合适的变换空间来描述信号, 将对信号的抽样转变为对信息的抽样, 有望大幅降低抽样速率。

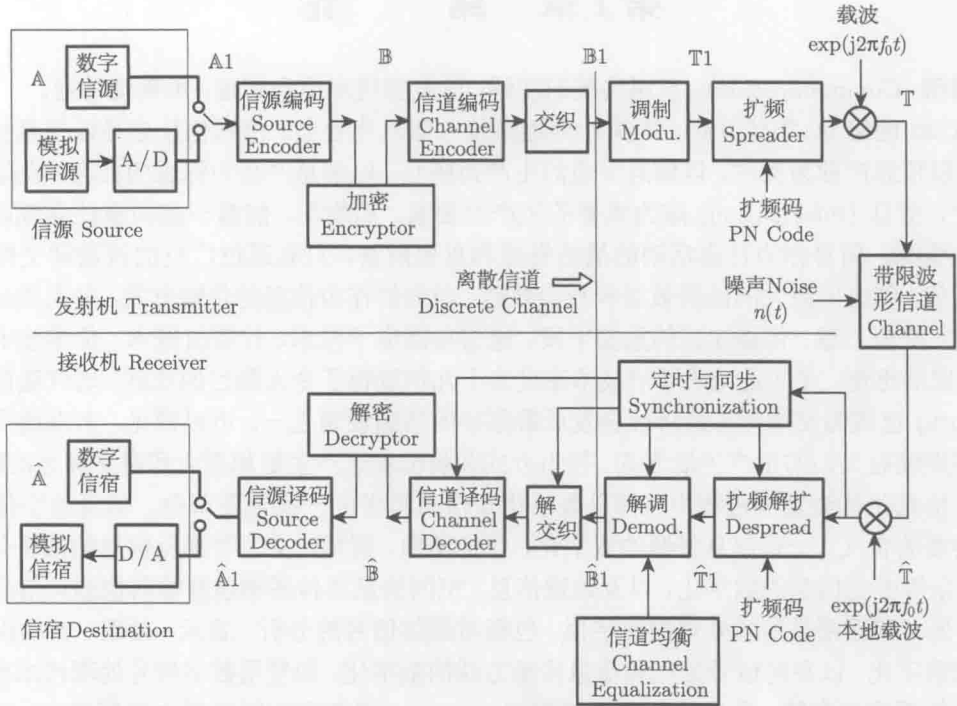


图 1.1 数字通信系统模型

经过数字化处理后信源消息全部变换为二进制数字 (比特) 序列, 速率单位为比特/秒 (bit/s)。由于各种信息源产生信息的种类多、数量大、信息速率变化范围大, 因此对传输系统的要求也不尽相同。

信源在数学上可以用概率空间 $[X, P(x)]$ 来描述^[4], 其中 X 为全体信源符号构成的样本空间 (Sample Space), $P(x)$ 为样本 $x \in X$ 的出现概率 (Probability)。

1.1.2 信源编码

在将信源产生的消息变换成二进制数字序列时, 应当用尽可能少的二进制数字符号 (Binary Digits) 来表示尽可能多的信源输出信息, 也就是得到的信源表示具有尽可能小的或几乎没有冗余 (Redundancy)。这一过程就是信源编码 (Source Encoder) 或数据压缩。信源编码的目的是提高信息传输的有效性 (Efficiency)。这就要求: ①用于表示信源输出的符号率尽可能低; ②所得信息序列在接收端又可以准确再现信源输出, 这一过程称为信源译码 (Source Decoder), 是信道编码的逆过程。信源编码的基本实现思路是删去数据符号中的冗余, 使前后符号之间尽可能接近统计独立。

信源的压缩编码处理可以显著降低数据的传输速率, 如 64kbit/s 的脉冲编码调制 (Pulse Code Modulation, PCM) 语音可压缩至 2.4kbit/s。压缩编码有利于占用较少的信道带宽来实

现传输,提高整个通信系统的网络容量。针对不同信源类型,有不同的压缩编码算法。例如,针对语音信号^[5],有脉冲编码调制、自适应差分 PCM(Adaptive Differential PCM, ADPCM)、增量调制(Delta Modulation, ΔM 或 DM)等波形编码方法,以及以线性预测编码(Linear Predictive Coding, LPC)为主的基于语音数学模型的参数编码方法;针对静止图像和活动图像,有 JPEG 和 MPEG 等压缩标准^[6, 7];对于一般数据文件,可基于概率统计而得到有效的数据压缩。

信源编码器的编码极限为信源输出的熵率,实际信源输出信息速率为单位时间内产生的二进制符号数,用 R_b 表示,单位为 bit/s。信源编码输入(图 1.1 中 A1 位置)信源因存在冗余,数据符号之间是相关的,信源编码输出(图 1.1 中 B 位置)因冗余已删除,可以认为数据符号之间是统计独立的,符号出现概率可以看成均匀分布的。

1.1.3 加密与信道编码

信源编码的输出数据符号因编码规律众所周知,任何接收者都能从中提取出正确信息,实际应用系统中往往需要避免这一情况的出现。为此,需要在传送前对数据进行加密(Encryption),以确保通信的安全性(Security)。加密是指通过加密算法和加密密钥将原始数据由明文(Plaintext)转变为密文(Ciphertext),而接收端的解密(Decryption)则是通过解密算法和解密密钥将密文恢复为明文。加解密过程利用密码技术对所传信息进行加密,实现信息隐蔽,从而起到保护信息安全的作用。

信道编码能减弱传输过程所面临的噪声和干扰环境的影响,提高信息传输的可靠性(Reliability)。信道编码的实现思路是人为、可控地在传输序列中增加一定程度的冗余,接收端利用冗余关系来判断是否在信息传输过程中产生了错误(即检错),并用来修正在信息传输过程中产生的错误(就是纠错),从而达到增加信息传输可靠性的目的。常用的信道编码方法包括各种前向纠错编码(Forward Error Correction, FEC)、自动请求重传(Automatic Repeat-Request, ARQ)等。

为了进一步对抗因信道记忆性导致的突发(Burst)差错,实际数字通信系统还常常采用交织(Interleaver)技术将突发差错在时间上离散化,使得接收时分布在各码字上的差错相互独立,降低纠错难度。

尽管信道编码增加了传输序列的相关性,但交织又进一步扰乱了相关性,因此基本上可以认为交织输出(图 1.1 中 B1 位置)的数据序列是统计独立的,无记忆的。

本书主要考虑传输过程,信源编解码、加密解密、信道编码技术不在本书讨论的范围内,读者若有兴趣可以阅读相关书籍^[8-10]。

1.1.4 数据调制与扩频调制

数据调制(Modulation)的主要目的是将待传二进制符号序列映射成适合相应信道的信号波形。针对不同的传输信道形式有不同的调制思想,对于基带信道,主要是码型变换;对于频带信道,则以载波数字调制/解调(Demodulation)为主。

不少现代通信系统还利用扩频(Spread Spectrum, SS)调制来进一步提高系统性能和实现多址传输。扩频调制通过在编码波形中引入伪随机码元使得传输信号的频谱比所传消息实际需要带宽大得多,且传输信号带宽独立于信息带宽,扩频具有抗干扰、抗多径、低截获

概率等优势。本书对扩频技术不作详细讨论，有兴趣的读者可参阅相关书籍^[11-13]。

数据调制和扩频一般都在基带完成，因此可以更多地用等效基带信号的调制映射来表示。此时数字调制相当于将二进制数据序列映射为信号空间上的矢量点即星座图。

1.1.1.5 载波调制

图 1.1 中给出的为单载波调制，载波的复信号形式为 $e^{j2\pi f_0 t} = \cos(2\pi f_0 t) + j\sin(2\pi f_0 t)$ ，这在具体实现时，相当于 I、Q 两路正交载波 ($\cos(2\pi f_0 t)$ 和 $\sin(2\pi f_0 t)$) 调制。

为对抗信道衰落，多载波调制得到重视。有两种多载波调制方式：一种是用多路子载波传输同样信息，如图 1.2 所示，这种传输模式主要用于信道不可靠概率较高的情况，如电离层散射和对流层散射通信环境；另一种是数据串并变换后，每一路子载波承载一部分信息，如图 1.3 所示，正交频分复用 (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, OFDM) 调制正是其中的典型^[14]。

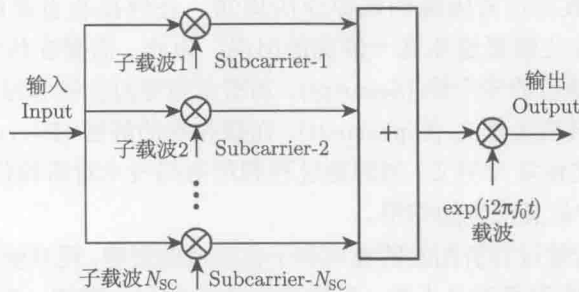


图 1.2 多载波调制 1

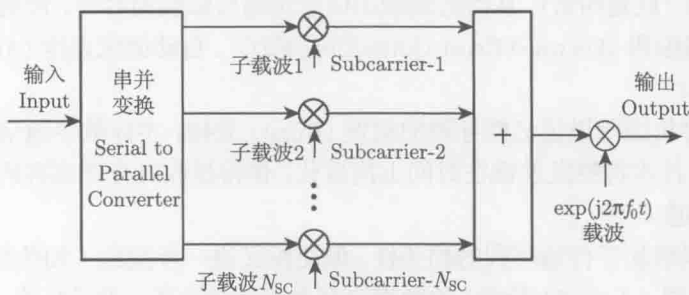


图 1.3 多载波调制 2

1.1.1.6 信道

通信系统中，由传输介质构成的物理信道 (Channel) 及相应的交换、共享等技术为用户提供传输信道。电信号的传输介质主要分为无线介质和有线介质两类。有线介质包括光纤、电缆、双绞线、电力线、波导等，其中，光纤具有巨大的可用带宽和极低的传输损耗，在长途干线网和区域网络中已完全取代了电缆成为主力。

无线介质主要包括无线电波、红外、激光等，根据国际电信联盟 (International Telecommunications Union, ITU) 的定义，无线电波指频率在 $3000\text{GHz} (3 \times 10^{12})$ 以下，不用人造波导而在空间传播的电磁波。目前国际上只划分出 $9\text{kHz} \sim 400\text{GHz}$ 的范围，而实际上大多

数应用系统都集中在 40GHz 以下的有限频段。根据波长,将无线电波分为长波、中波、短波和微波等频段,主要用于移动通信、卫星通信、散射通信、微波接力等无线通信方式。国际上主要由 ITU 来负责协调全球无线频谱资源管理,ITU 利用《无线电规则》将世界划分为三个区域,中国位于第三区。在美国,商用频谱由联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 负责管理,军用频谱由频谱管理局 (Office of Spectrum Management, OSM) 负责。欧洲商用频谱分配与管理由欧洲电信标准化协会 (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) 负责管理。我国商用频谱由工业和信息化部无线电管理局负责管理,对无线电频段使用的详细规定详见 2011 版《中华人民共和国无线电频率划分规定》^[15]。

由于无线电波的开放性,其受到的各种干扰远比有线信道大得多,因此无线通信所能实现的传输速率一直比同期的有线通信低一个数量级,甚至更多。但也正是无线电波的开放性为人类通信交流提供了巨大的便利,才有可能实现随时随地不受时空限制的通信。

1.1.7 同步与均衡

不考虑噪声和干扰的影响,接收过程是发送过程的逆。然而由于信道噪声和其他干扰的存在,不仅接收端的处理过程一般远比对应发送端复杂得多,而且接收端还需考虑同步和信道均衡处理。

通信接收机接收到的时间连续波形不仅与被调信号有关,还与载波频率、相位、信号延时等参数有关。而接收过程实际上就是从被噪声、干扰所污染接收的信号中提取被调信号获取发送信息,为了实现信息的正确提取,首先需要在被噪声和干扰污染的信号中对载波频率、相位、信号延时等参数进行准确估计才能实现信息的解调。这一信号参数的估值过程就是同步 (Synchronization)^[16-18]。同步主要包括载波同步与定时恢复。载波同步指本地载波与信号载波频率相同、相位相同 (对相干解调),定时恢复指时钟时延的准确估计。载波同步误差会导致解调质量降低,时钟误差导致符号间串扰 (Inter-Symbol Interference, ISI)。对于采用扩频调制的系统,还需实现本地伪随机码与输入扩频序列之间的同步。

数字通信中,一般采用时分复用方式实现多路信号的汇合来提高信道传输效率,接收时需要实现多路信号的分路,此时需要接收机能正确地数据流中识别各路信号的起止位置。在移动通信中,常采用时分多址 (Time-Division Multiple Access, TDMA) 来实现信道的多用户共享,接收端要能在接收数据流中区分出各用户信号的起止时刻。当系统存在分组码、卷积码等信道编码时,接收端译码器需要判别出各码组的正确起止位置。实际数字消息流用一定数目的信息符号组成一个码字,若干码字构成一个数据帧,接收端要正确地恢复这些消息数据流,就必须知道这些码字或帧的起止时刻。这些在接收端产生与分组、码字、帧起止时刻相一致的定时脉冲序列的过程,统称为帧同步 (Frame Synchronization)。

在一个数字通信网中,需要将多个方向传来的数据码,按其不同目的进行分路、合路和交换。为可靠地实现这些功能,必须在整个通信网中建立一个统一的时间标准时钟,这一过程称为网同步 (Network Synchronization)^[19, 20]。

实际通信信道都是带宽有限的带限信道,带宽有限导致时域上信号持续时间是无限的,导致发端限定时宽的符号在接收时的接收符号时宽延展,接收符号出现前后重叠现象,造成符号间串扰。符号间串扰依靠信道均衡 (Channel Equalization) 来补偿或消除。

图 1.1 给出的是数字通信系统的一般模型,实际系统不一定包含图中所有环节,如数字

基带传输系统就不需要扩频和载波调制。另外,图 1.1 给出的是点到点之间的通信模型,而实际通信系统是存在交换 (Switch) 和多种通信链路组合的通信网络。通信网络的基础是点与点之间的传输,所以本书的重点放在点对点传输问题上。

1.2 信 道

在通信系统设计过程中,需要建立一个能反映传输信道特征的数学模型,第 3 章将详细讨论移动信道模型,这里概括性地给出简化信道模型。

1.2.1 加性噪声信道

通信信道最简单、最基本的模型就是加性噪声信道。传输信号 $s(t)$ 受加性噪声 $n(t)$ 的影响,再考虑到传输信号在信道中的衰减,接收信号为

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t) \quad (1.1)$$

其中, α 为衰减因子,如图 1.4 所示。如果噪声主要由系统内部器件引起,则为热噪声,可表征为高斯白噪声,该信道模型又称为加性白高斯噪声 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 信道,是通信系统分析设计的主要信道模型。

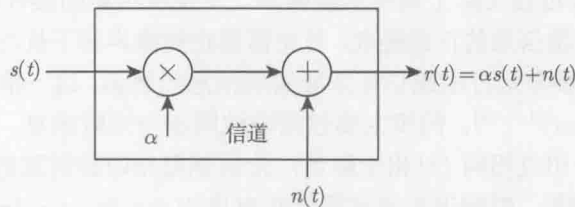


图 1.4 加性噪声信道模型

1.2.2 线性滤波器信道

如图 1.5 所示,在加性噪声信道模型基础上,再考虑用滤波器来限制信道带宽,则信道输出信号为

$$r(t) = s(t) * h(t) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1.2)$$

其中, $h(t)$ 为滤波器冲激响应; * 表示卷积 (Convolution)。这类信道常见于有线信道,滤波器用于限制发送信号频谱,避免不同频带的信号相互干扰。

1.2.3 线性时变滤波器信道

如图 1.5 所示,如果信道具有时变特性,滤波器为线性时变滤波器,用时变信道冲激响应 $h(t, \tau)$ 来表征,则输出信号为

$$r(t) = s(t) * h(t, \tau) + n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, \tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1.3)$$

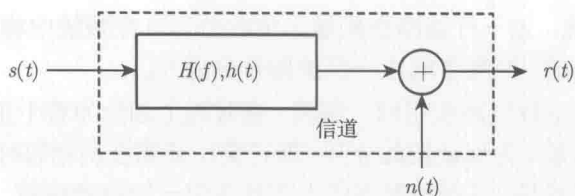


图 1.5 线性滤波器信道模型

例 1.1 多径信道一般都可模型化为线性时变滤波器信道 (见图 1.6), 详见第 3 章。典型多径信道如电离层信道、移动无线信道等, 均存在多条具有不同时延、不同衰减的传播路径, 其时变冲激响应为

$$h(t, \tau) = \sum_{k=1}^L a_k(t) \delta(\tau - \tau_k) \quad (1.4)$$

其中, $a_k(t)$ 为第 k 条传播路径的时变衰减因子; τ_k 为第 k 条传播路径相对于直达路径的相对传播时延。

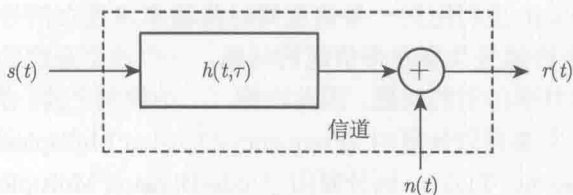


图 1.6 线性时变滤波器信道模型

上述三种模型, 足以概括实际应用中绝大多数物理信道的特性, 更详细的信道模型将在第 3 章加以深入讨论。

1.3 双工、复用与多址

无线信道是一种宝贵的频谱资源, 需要考虑充分利用, 通过共享的形式容纳更多的用户、更大的数据容量。双工、复用和多址都是共享信道的方式, 虽然目的不同但共享信道思路是相同的。

1.3.1 双工

通信双方之间信号传输方式有单工 (Simplex)、半双工 (Half Duplex)、全双工 (Full Duplex) 三种方式。单工指消息只能单一方向传输的工作方式, 如广播、遥控遥测; 半双工指通信双方都能收发消息但不能同时进行收和发的工作方式, 如对讲机; 全双工指通信双方可同时进行消息接收和发送的工作方式, 是最普遍的工作方式。

在蜂窝无线通信系统中, 双向通常指移动用户到基站的上行信道 (反向链路) 和基站到用户的下行信道 (前向链路) 两个相反方向。主要的双工技术包括频分双工 (Frequency-Division Duplex, FDD)、时分双工 (Time-Division Duplex, TDD)、码分双工 (Code-Division Duplex, CDD) 和多载波双工 (Multicarrier-Division Duplex, MDD)^[21] 等。