



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业 规划教材

通信原理

◆ 张祖凡 于秀兰 雷维嘉 编著

Electronic Information
Science and Engineering



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

电子信息科学与工程类专业规划教材

第2版

通信原理

张祖凡 于秀兰 雷维嘉 编著

开 本 787mm×1092mm 1/16
版 次 2018年7月第1版
印 次 2018年7月第1次
定 价 29.00元

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了通信系统的基本概念、基本理论和基本分析方法,是通信及信息专业的专业基础课程教材。全书共9章,内容包括:绪论、信号与噪声分析、模拟调制系统、模拟信号的数字化、数字信号的基带传输、数字信号的频带传输、扩频调制与多载波调制、信息论基础和信道编码。

本书叙述上力求概念清楚、重点突出、深入浅出、通俗易懂;内容上力求逻辑性、科学性、系统性与先进性的统一。书中列举了大量的例题和图示,各章后附有大量的习题供练习,便于教学和自学。

本书可作为高等学校通信工程、电子与信息工程及其相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可作为相关领域的教学与科研人员和工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理 / 张祖凡, 于秀兰, 雷维嘉编著. — 北京: 电子工业出版社, 2018.7

电子信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-34529-6

I. ①通… II. ①张… ②于… ③雷… III. ①通信原理—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第128301号

策划编辑: 竺南直

责任编辑: 竺南直 特约编辑: 丁 波

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.75 字数: 660千字

版 次: 2018年7月第1版

印 次: 2018年7月第1次印刷

定 价: 59.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: davidzhu@phei.com.cn。

前 言

通信原理作为高等学校通信工程及相关专业的主干课程,在培养计划中占有极其重要的地位。课程重点讲授各种通信系统的基本原理和分析方法,是当前通信系统设计和其他信息技术的重要理论基础。

本书针对通信工程、电子工程和信息工程等专业的教学需要,以高等数学、概率论和随机过程、信号与系统等先修知识为基础,侧重介绍通信系统的基本理论、技术和分析方法。全书共9章,参考学时为56~88学时。主要包括:

第1章——绪论,介绍通信系统的基本概念和入门知识。

第2章——信号与噪声分析,主要介绍平稳随机过程的性质及其通过线性系统的基本分析方法,并简要介绍循环平稳随机过程。

第3章——模拟调制系统,主要介绍模拟调制系统原理和性能分析,包括幅度调制和角度调制信号的时域表示、频谱分析、调制解调原理以及在高斯白噪声干扰下的抗噪声性能分析;并简单介绍频分复用技术。

第4章——模拟信号的数字化,主要介绍PCM系统中有关抽样、量化、编解码等所涉及的理论问题,并简要介绍时分复用技术。

第5章——数字信号的基带传输,主要介绍数字基带信号的频谱特性、在限带信道中如何有效地消除码间干扰、在AWGN信道条件下接收端进行最佳接收的基本原理和性能指标的分析方法、最佳基带传输系统、部分响应系统。

第6章——数字信号的频带传输,介绍二进制和多进制数字调制系统的基本原理,并讨论数字信号的矢量空间分析、最佳接收和抗噪声性能分析等理论。

第7章——扩频调制与多载波调制,主要介绍伪噪声序列、扩频调制系统的3种工作方式和正交频分复用的基本原理。

第8章——信息论基础,主要介绍信源及其信息度量、信道及其信道容量和香农编码定理。

第9章——信道编码,介绍几种常见的信道编码和译码的方法,并讨论基于性能指标要求如何选择信道编码方案。

本书由张祖凡、于秀兰、雷维嘉编著,其中第2章、第3章和第5章由张祖凡编写;第4章、第6章、第8章和第9章由于秀兰编写;第1章和第7章由雷维嘉编写。最后由张祖凡负责统稿。

本书在编写过程中得到了重庆邮电大学通信原理教学团队同仁的鼓励、帮助和支持,在出版过程中得到了电子工业出版社的鼎力支持,在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中谬误和疏漏在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2018年5月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 通信的基本概念	1
1.2 通信系统模型	1
1.2.1 通信系统一般模型	1
1.2.2 模拟信源与数字信源	2
1.2.3 模拟通信系统模型	3
1.2.4 数字通信系统模型	3
1.2.5 数字通信的特点	4
1.2.6 广播通信与点对点通信	6
1.2.7 单工与双工通信	6
1.2.8 存储系统	7
1.3 信道	7
1.3.1 信道对信号的影响	7
1.3.2 有线信道	7
1.3.3 无线信道和电波传播	9
1.4 信息及其度量	11
1.5 通信系统的主要性能指标	13
1.5.1 数字通信系统的主要性能指标	13
1.5.2 模拟通信系统的主要性能指标	14
1.5.3 香农公式	14
1.6 通信发展简史	17
习题1	18
第2章 信号与噪声分析	20
2.1 确定信号分析	20
2.1.1 确定信号的分类	20
2.1.2 周期信号的傅里叶级数	21
2.1.3 傅里叶变换	23
2.1.4 能量谱密度和功率谱密度	25
2.1.5 确定信号的相关函数	28
2.1.6 确定信号通过线性系统	30
2.1.7 希尔伯特变换和解析信号	32
2.1.8 频带信号和带通系统的等效基带分析	34
2.2 随机变量的统计特征	37
2.2.1 单个随机变量的统计特征	37

2.2.2	多个随机变量的统计特征	38
2.3	随机过程的统计特性	39
2.3.1	随机过程的一般表述	39
2.3.2	随机过程的概率密度和数字特征	40
2.4	平稳随机过程	42
2.4.1	平稳随机过程的定义	42
2.4.2	各态历经性	43
2.4.3	平稳随机过程自相关函数的性质	43
2.4.4	平稳随机过程的功率谱密度	44
2.5	高斯随机过程	46
2.5.1	高斯过程的定义	46
2.5.2	高斯过程的性质	47
2.5.3	一维高斯分布	47
2.5.4	加性高斯白噪声(AWGN)	47
2.5.5	Q 函数和互补误差函数	49
2.6	平稳随机过程通过线性系统	51
2.7	匹配滤波器	53
2.8	窄带高斯白噪声	57
2.8.1	窄带高斯白噪声的表达式	57
2.8.2	窄带高斯白噪声的统计特征	58
2.8.3	窄带高斯白噪声加正弦波的包络分布	62
2.9	循环平稳随机过程	62
2.9.1	循环平稳随机过程的定义	62
2.9.2	循环平稳随机过程的功率谱密度	63
2.9.3	平稳随机过程通过乘法器的输出	63
	习题2	66
第3章	模拟调制系统	70
3.1	模拟调制系统模型	70
3.2	幅度调制系统的原理	71
3.2.1	具有离散大载波的双边带调幅(AM)	71
3.2.2	抑制载波的双边带调幅(DSB)	75
3.2.3	单边带调幅(SSB)	77
3.2.4	残留边带调幅(VSB)	80
3.3	幅度调制系统的抗噪声性能	81
3.3.1	抗噪声性能的分析模型和指标	82
3.3.2	相干解调的抗噪声性能	82
3.3.3	包络检波的抗噪声性能	86
3.4	角度调制系统的原理及抗噪声性能	88
3.4.1	角度调制信号的时域表示	88

3.4.2	角度调制信号的频谱特性	91
3.4.3	调频信号的产生	93
3.4.4	调频信号的解调	94
3.4.5	调频系统的抗噪声性能	95
3.4.6	模拟调制系统的性能比较	99
3.4.7	调频系统的门限效应	100
3.4.8	调频系统的加重技术	101
3.5	频分复用	101
	习题 3	103
第 4 章	模拟信号的数字化	108
4.1	PCM 通信系统	108
4.1.1	PCM 通信系统模型	108
4.1.2	PCM 通信系统的信息速率	109
4.2	抽样	109
4.2.1	理想抽样	110
4.2.2	自然抽样	113
4.3	量化	114
4.3.1	均匀量化	114
4.3.2	非均匀量化	116
4.4	PCM 编码	119
4.4.1	常用的二进制码型	119
4.4.2	A 律 13 折线编码	120
4.5	PCM 系统的信噪比	124
4.6	差值脉冲编码调制和增量调制	125
4.6.1	差值脉冲编码调制	126
4.6.2	增量调制	127
4.7	时分复用	129
4.7.1	时分复用的基本原理	129
4.7.2	TDM-PCM 系统的信息速率	131
4.7.3	PCM 30/32 路系统的帧结构	131
4.7.4	数字复接系列	133
	习题 4	133
第 5 章	数字信号的基带传输	137
5.1	数字基带传输系统模型	137
5.2	数字基带 PAM 信号波形及其功率谱密度	139
5.2.1	常用的数字 PAM 信号	139
5.2.2	数字 PAM 信号的功率谱密度	141
5.2.3	线路码型	147
5.2.4	脉冲波形	150

10	5.3	AWGN 信道条件下的 2PAM 数字基带系统的抗噪声性能	150
EQ	5.3.1	双极性 2PAM 数字基带系统误比特率分析	151
40	5.3.2	单极性 2PAM 数字基带系统误比特率分析	153
20	5.3.3	利用匹配滤波器进行最佳接收的误比特率	154
00	5.3.4	2PAM 数字基带系统误比特率比较	157
001	5.4	限带信道中数字 PAM 信号的无码间干扰基带传输	159
101	5.4.1	基带传输特性的分析模型	159
101	5.4.2	无码间干扰的基带传输特性满足的条件	160
EO1	5.4.3	无码间干扰的传输特性实例	163
801	5.4.4	理想限带 AWGN 信道条件下的数字 PAM 信号的最佳基带传输	167
801	5.4.5	信道均衡	169
801	5.5	眼图	171
EO1	5.6	部分响应系统	172
001	5.6.1	第 I 类部分响应系统	172
011	5.6.2	一般部分响应系统	176
EO1	习题 5		177
	第 6 章	数字信号的频带传输	182
111	6.1	数字频带传输系统模型	182
011	6.2	二进制数字信号的正弦型载波调制原理	183
011	6.2.1	二进制数字调制信号的时域表示	183
011	6.2.2	二进制数字调制信号的产生	185
051	6.2.3	二进制数字调制信号的功率谱及带宽	187
151	6.3	多进制数字信号的正弦型载波调制原理	189
251	6.3.1	M 进制幅移键控	189
051	6.3.2	M 进制相移键控	191
251	6.3.3	M 进制频移键控	195
051	6.4	数字信号的矢量空间分析和最佳接收理论	196
051	6.4.1	数字信号的矢量空间分析	196
1E1	6.4.2	数字信号的星座图	201
1E1	6.4.3	接收信号的矢量空间分析	205
EE1	6.4.4	AWGN 信道条件下的最佳接收理论	208
EE1	6.5	AWGN 信道条件下二进制数字调制系统的抗噪声性能	217
3E1	6.5.1	采用最佳接收的误比特率分析	217
3E1	6.5.2	采用其他接收方式的误比特率分析	223
0E1	6.6	AWGN 信道条件下多进制数字调制系统的抗噪声性能	231
0E1	6.6.1	MASK 的最佳接收及其误符号率分析	231
141	6.6.2	MPSK 的最佳接收及其误符号率分析	233
341	6.6.3	正交 MFSK 的最佳接收及其误符号率分析	238
021	6.6.4	多进制数字调制系统的误比特率	240

6.7	差分相移键控	241
6.7.1	二进制相对相移键控 (2DPSK)	241
6.7.2	四进制相对相移键控 (4DPSK)	244
6.8	正交幅度调制	245
6.8.1	MQAM 信号的时域表示	245
6.8.2	MQAM 信号的星座图	245
6.8.3	方型星座 MQAM 信号的产生	247
6.8.4	方型星座 MQAM 信号的频带利用率	248
6.8.5	AWGN 信道条件下 MQAM 信号的最佳接收和抗噪声性能	248
6.9	理想限带 AWGN 信道条件下的最佳频带传输系统	250
6.10	改进型四相相移键控	252
6.10.1	偏移四相相移键控	252
6.10.2	$\pi/4$ 差分四相相移键控	254
6.11	恒包络连续相位频移键控	256
6.11.1	MSK 信号	256
6.11.2	GMSK 信号	261
6.12	基于性能指标要求的调制方案选择	262
6.12.1	数字调制系统的性能分析	262
6.12.2	数字调制方案的选择	264
	思考题	265
	习题 6	265
第 7 章	扩频调制与多载波调制	274
7.1	扩频调制	274
7.1.1	扩频调制的概念	274
7.1.2	伪噪声序列	275
7.1.3	直接序列扩频	277
7.1.4	跳频扩频	280
7.1.5	跳时扩频	282
7.2	多载波调制	283
7.2.1	引言	283
7.2.2	正交频分复用的基本原理	285
7.2.3	循环前缀	290
7.2.4	OFDM 系统发送机和接收机的结构	292
7.2.5	OFDM 系统中的频率和定时同步	293
7.2.6	OFDM 系统中的峰均比	294
7.2.7	OFDM 技术应用实例——IEEE 802.11a	294
	习题 7	295
第 8 章	信息论基础	297
8.1	信息传输系统模型	297

8.2	离散信源及其信息度量	298
8.2.1	离散信源的分类及统计特性	298
8.2.2	单符号离散信源熵	299
8.2.3	联合熵和条件熵	301
8.2.4	多符号离散信源熵	303
8.2.5	离散信源的剩余度	305
8.3	离散信道及其信道容量	306
8.3.1	离散信道的分类及统计特性	306
8.3.2	互信息和平均互信息	308
8.3.3	信道容量的定义	311
8.3.4	典型离散信道的容量	312
8.3.5	信源与信道的匹配	313
8.4	连续信源熵与加性高斯信道容量	313
8.4.1	连续信源的分类及其统计特性	313
8.4.2	连续信源的熵	314
8.4.3	连续信道的统计特性	316
8.4.4	加性连续信道的平均互信息	316
8.4.5	加性高斯连续信道的容量	317
8.5	香农编码定理	319
8.5.1	无失真离散信源编码定理	319
8.5.2	有噪信道编码定理	323
8.5.3	限失真信源编码定理	323
	思考题	325
	习题 8	326
第 9 章	信道编码	330
9.1	信道编码通信模型	330
9.2	信道编码的基本概念	331
9.2.1	信道编码的分类	331
9.2.2	简单的信道编码	332
9.2.3	信道编码的检错和纠错能力	332
9.2.4	信道编码的译码方法	334
9.2.5	差错控制的三种方式	336
9.3	线性分组码	336
9.3.1	线性分组码的编码	337
9.3.2	线性分组码的译码	342
9.3.3	完备码和汉明码	348
9.3.4	对偶码	349
9.3.5	扩展码和缩短码	349
9.4	循环码	351

9.4.1	循环码的码多项式	352
9.4.2	循环码的生成多项式和生成矩阵	353
9.4.3	循环码的监督多项式和监督矩阵	356
9.4.4	循环码的编码电路	358
9.4.5	循环码的伴随式	361
9.4.6	循环码的译码电路	363
9.4.7	CRC 码	366
9.4.8	BCH 码和 RS 码	367
9.5	卷积码	369
9.5.1	卷积码的解析表示	369
9.5.2	卷积码的图形描述	373
9.5.3	卷积码的译码方法	375
9.5.4	卷积码的特性	377
9.5.5	删余卷积码	378
9.5.6	递归型系统卷积码	379
9.6	交织码	380
9.7	级联码	382
9.8	Turbo 码	383
9.9	LDPC 码	384
9.10	基于性能指标要求下的信道编码方案选择	385
9.10.1	香农理论极限	385
9.10.2	编码与调制的权衡	387
9.10.3	数字调制系统中信道编码方案选择	388
习题 9		391
附录 A	常用三角公式	395
附录 B	傅里叶变换	396
附录 C	Q 函数和互补误差函数	398
参考文献		400

第1章 绪论

1.1 通信的基本概念

人类在生产生活和社会活动中总是伴随着信息的传递，信息在空间或（和）时间上的传输就是通信。在通信的研究中，常涉及三个紧密联系而又互相区别的概念，即消息、信号和信息。消息是由信源产生的、由通信系统传输的具体内容，消息中包含信息。信号是消息的物理载体，是消息的具体表现形式，如文字、声音、图形等。而信息则是消息中对接收者而言新的、有意义的且可被理解的东西，因而是抽象的。如“今天是星期一”，这是一个用文字信号来承载的消息，对于不知道今天是星期几的接收者而言提供了一个有价值的东西。同样的消息可以用不同形式的信号来承载，如“今天是星期一”这个消息是用文字信号来承载的，也可以用语言来承载，还可以用信号灯来承载。而同样的信号，在不同场合可能承载的是不同的消息。

通信普遍存在于人类生活之中，如人与人之间的交谈就是一个通信过程。对于远距离的通信，在古代有烽火台、驿站等方式，而在现代则有电话、电报、电视、电子邮件等方式。现代的通信系统都是以电信号作为消息的载体，因此也称为电信系统。

1.2 通信系统模型

1.2.1 通信系统一般模型

通信系统模型一般包括信源、发送机、信道、接收机和信宿，如图 1-1 所示。

信源也称发信者，产生待传输的消息信号，如语音、文字、图像、数据等。如果信源产生的原始消息信号不是电信号的形式，则需要通过转换器将其转换为电信号。如麦克风能将声音信号转换为电信号，而图像传感器则能将图像信号转换为电信号。

信道是将载荷消息的电信号从发送端传送到接收端的传输媒质，可以是架空明线、电缆、光缆等有线信道，也可以是传输电磁波的自由空间（即无线信道）。信号在信道中的传输过程总是伴随着噪声的干扰。图 1-1 中的噪声是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集中表示。

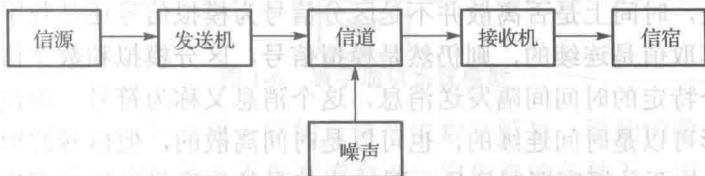


图 1-1 通信系统模型

通信系统中发送机的基本功能是将信源产生的原始电信号变换成适合在信道中传输的信号。接收机的功能是从有干扰的接收信号中恢复出相应的原始电信号。而信宿（也称收信者）的功能是将接收机输出的电信号转换成原始形式的消息信号。

1.2.2 模拟信源与数字信源

如果一个信源输出的消息来自于一个元素数量有限的消息集，则为数字信源。反之，如果一个信源输出的消息来自于一个元素数量无限的消息集，则为模拟信源。例如，一个电话机键盘的符号有数字 0~9，以及符号*和#，共有 12 种符号（消息），因此就是一个数字信源。而麦克风的输出是幅度连续取值的信号，是一个模拟信源。

模拟信源产生的信号通过模数变换后可变换成有限取值的信号，此时把模拟信源和模数变换器合在一起看作等效数字信源。

模拟信源产生的消息是用模拟信号来承载的。一个信号如果其一个或几个参量，如幅度、频率、相位等是连续变化的，则称为模拟信号，模拟信号示意图如图 1-2 所示。

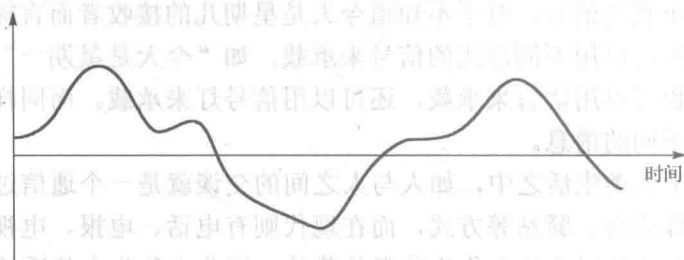


图 1-2 模拟信号示意图

数字信源产生的消息是用数字信号来承载的。一个信号如果其参量，如幅度、频率、相位等，只能取离散值，也就是取值的数量是有限的，则称为数字信号，数字信号示意图如图 1-3 所示。

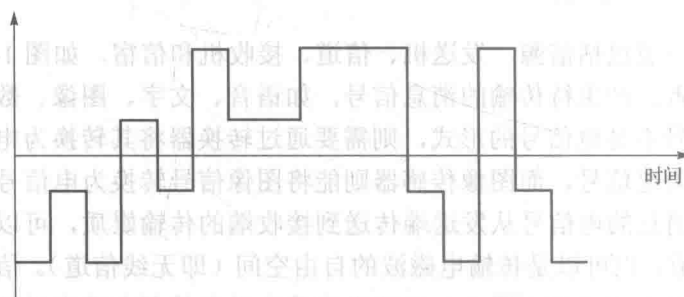


图 1-3 数字信号示意图

需要注意的是，时间上是否离散并不是区分信号为模拟信号还是数字信号的特征。时间离散信号如果其取值是连续的，则仍然是模拟信号。区分模拟和数字信号的关键在于：数字信号是以一个特定的时间间隔发送消息，这个消息又称为符号。而在一个间隔内，承载消息的信号波形可以是时间连续的，也可以是时间离散的，但信号波形的种类数是有限的。如图 1-4 所示的两种幅度调制信号，图(a)中信号的幅度可以连续变化，因此是模拟信号，即在第 3 章中要介绍的模拟调幅信号；而图(b)中的信号幅度在一个符号时间间隔内是

固定的，但不同的时间间隔内可以不同，共有 4 种幅度，其波形也只有 4 种，因此是数字信号，也就是将在第 6 章中介绍的幅移键控信号。

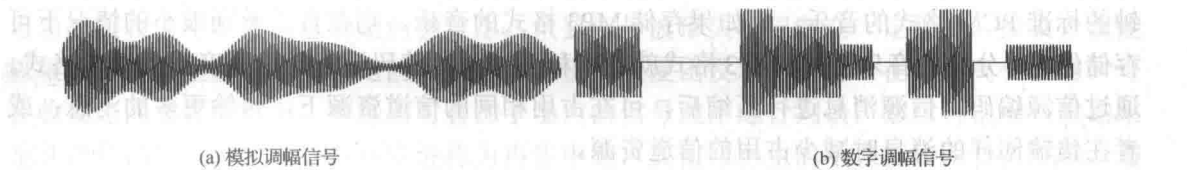


图 1-4 模拟调幅和数字调幅信号示意图

1.2.3 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号传输模拟消息的通信系统，其系统模型如图 1-5 所示。

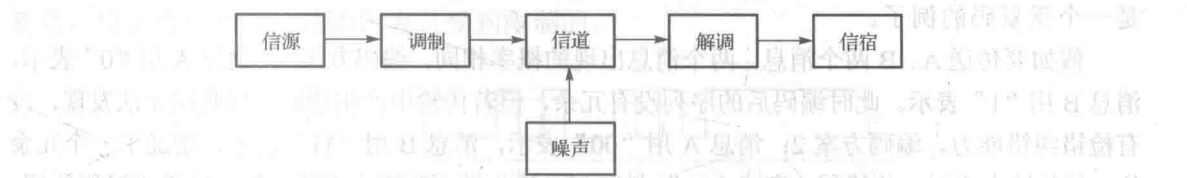


图 1-5 模拟通信系统模型

模拟信源输出模拟消息，并把消息转换成原始的模拟电信号。原始的电信号的频率范围一般在零频率附近，称为低通信号，也称为基带信号。

调制器的作用是将原始信号转换成适合于信道传输的信号。如果信道只能传送高频的带通信号，则需要通过调制将基带信号的频谱进行搬移，从零频率附近搬移到载波频率附近，转换成适合在信道中传输的频带信号。此外，调制器通过变换信号形式，还具有提高信号的抗噪声性能、并有效利用信道传输频带的功能。在接收端，解调器则将接收到的已调制信号还原成原始电信号。

信宿将接收到的电信号转换为消息的原始信号形式。

在模拟通信系统中，如果不对基带信号进行频谱搬移，则称为基带传输系统。有线电话就是一个典型的基带通信系统。绝大多数模拟通信系统中需要对基带信号进行频谱搬移，称为频带通信系统，如无线电广播系统。

1.2.4 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号传输数字消息的通信系统，其系统模型如图 1-6 所示。

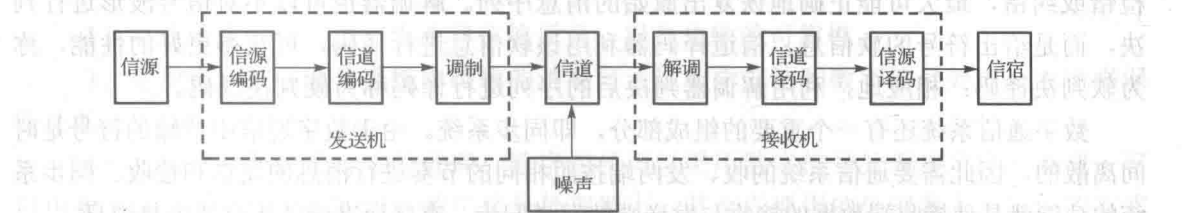


图 1-6 数字通信系统模型

信源（或等效数字信源）按照一定的节奏产生数字消息。原始的数字消息可能会有较大的冗余，信源编码的作用就是在不失真或允许一定失真的条件下，用尽可能短的数字序列来表示信源产生的消息，提高信息传输的有效性，因此又称为有效性编码。如“清华大

学”、“北京大学”、“北京邮电大学”、“重庆邮电大学”可以用“清华”、“北大”、“北邮”、“重邮”等简称,其也包含了与原名称一样的信息。又如一张标准的音乐 CD 可存储 74 分钟的标准 PCM 格式的音乐,而如果存储 MP3 格式的音乐,则在音质差别很小的情况下可存储约 700 分钟的音乐。这里 MP3 格式就是一种采用信源编码进行压缩后音乐的存储格式。通过信源编码对信源消息进行压缩后,可在占用相同的信道资源下,传输更多的消息;或者在传输同样的消息时减少占用的信道资源。

承载消息的信号在信道上传输时,由于受到噪声的影响,接收端接收到的信号与发送信号不会完全相同,因此有可能导致部分消息出现传输错误。信道编码就是在表示消息的码元序列中按照一定的规则增加一定数量的冗余码元,接收方通过该规则识别或纠正在传输中出现的错误。由于信道编码用于差错控制,所以又叫差错控制编码或纠错编码。下面是一个重复码的例子。

假如要传送 A、B 两个消息,两个消息出现的概率相同。编码方案 1: 消息 A 用“0”表示,消息 B 用“1”表示。此时编码后的序列没有冗余,但若传输中产生错码,接收端无法发现,没有检错纠错能力。编码方案 2: 消息 A 用“00”表示,消息 B 用“11”表示,增加了一个冗余位。若传输中产生一位错码,变成“01”或“10”,接收端可判断出有错,但无法确定错码位置,不能纠正,具有检出一位错码的能力。编码方案 3: 消息 A 用“000”表示,消息 B 用“111”表示,增加了两个冗余位。传输中产生一位和两位错码,接收端都能检测出来,具有检出两位错码的能力,或者接收端根据“大数”法则进行判决,能纠正一位错码,具有纠正一位错码的能力。

重复码的效率很低,实际上采用的信道编码要复杂得多,同时效率也要高得多。

与模拟通信系统中的调制器类似,数字通信系统中数字调制器的作用是将经过纠错编码的序列映射为适合于信道传输的信号波形。 M 进制数字调制器可产生 M 种信号波形,分别与 M 种编码序列对应。多数数字通信系统中都采用二进制的信道编码,因此信道编码器输出的是二进制序列。 M 进制数字调制器将 $\log_2 M$ 个编码数据为一组,对应地映射为一个信号波形。

数字调制器输出的信号如果是带通信号,则称为数字频带调制;如果输出的是低通信号,则称为数字基带调制。

数字解调器对被噪声污染的接收信号进行处理,判断最有可能的发送信号波形,恢复相应的(二进制)数字序列。

数字解调器恢复得到的数字序列可能有错,信道译码器对解调器输出的接收码字进行检错或纠错,最大可能正确地恢复出原始的消息序列。解调器也可以不对信号波形进行判决,而是给出符号的软信息,信道译码器利用该软信息进行译码,可获得更好的性能,称为软判决译码;相应地,利用解调器判决后的序列进行译码称为硬判决译码。

数字通信系统还有一个重要的组成部分,即同步系统。由于数字通信中传输的符号是时间离散的,因此需要通信系统的收、发两端按照相同的节奏进行消息的发送和接收。同步系统的功能就是使接收端数据的接收与发送端的发送同步,有序而准确地接收和恢复消息。

1.2.5 数字通信的特点

数字通信系统传输的波形种类有限,这是区别于模拟通信系统最根本的特点,也使其相比较模拟通信系统有如下优点。

(1) 抗噪声性能好, 可避免噪声积累。信号在信道传输的过程中, 不可避免地要受到噪声的污染, 导致信号波形失真。在数字通信系统中, 由于发送的波形种类有限, 接收机可通过接收信号判断发送的是何种波形。只要信号波形失真限制在一定程度, 接收方就能以很大的概率正确识别出发送的信号波形, 正确恢复出发送的消息。在长距离传输时, 可在收发之间设置中继器, 中继器对叠加了噪声的信号波形进行判决, 然后再根据判决结果重新产生信号波形发送。这种中继称为再生中继, 其信号再生的示意图如图 1-7 所示。通过中继再生信号波形, 去除了这个中继段中叠加的噪声, 使得噪声不会在传输中积累, 传输距离不受限制。而在模拟通信系统中, 由于信号波形取值有无限多种, 中继器不能通过再生的方法消除叠加在信号上的噪声, 只能对信号进行放大, 但放大信号的同时噪声也被放大了, 因此在模拟通信系统中噪声会随传输距离的延长而积累。为保证一定的接收信号质量, 模拟通信系统的传输距离是受到限制的。

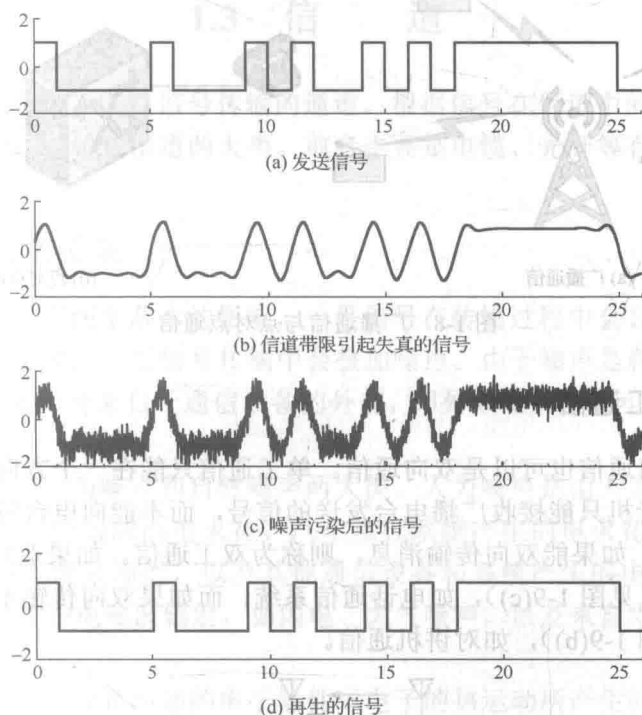


图 1-7 数字再生中继信号示意图

(2) 可通过信道编码进一步改善传输质量, 提高传输的可靠性。

(3) 易加密。数字通信系统中传输的消息可通过数学方法和数字信号处理技术增强保密性能。

(4) 数字信号便于进行信号处理。数字信号可以采用数字信号处理技术进行处理, 可以用数字逻辑电路实现, 也可在数字信号处理器上, 甚至在通用的处理器上用软件的方式实现。同时, 数字信号处理可以实现的功能也远比模拟信号处理复杂和灵活。

(5) 可通过信源编码压缩冗余, 提高传输的有效性。

(6) 不同的数字消息通过信源编码后可统一为形式相同的二进制的数据流, 可在同一个通信系统中混合进行传输和处理。

数字通信系统中需要复杂的同步系统, 相比较模拟通信系统需要耗费更多的系统资源实现收发设备间, 甚至整个通信网内设备间的同步。另外, 传输同样的信息, 数字通信系统一般需要消耗更多的带宽, 但随着数字通信技术的发展, 数字通信系统的频谱效率也在不断提高。

1.2.6 广播通信与点对点通信

广播通信系统中 (见图 1-8(a)) 有一个发送者, 有多个接收者, 信源发送的消息可被多个接收者接收。无线电广播和电视就是广播通信。

点对点通信系统中 (见图 1-8(b)) 一个发送者连接一个接收者, 信源发送的消息只送给一个接收者。常规的电话通信就是典型的点对点通信。

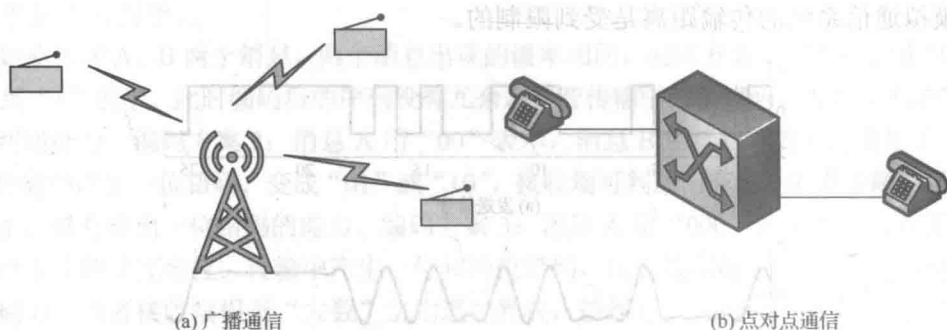


图 1-8 广播通信与点对点通信

1.2.7 单工与双工通信

通信可以是单向通信也可以是双向通信。单工通信只能在一个方向上传输消息, 如无线广播系统中, 收音机只能接收广播电台发送的信号, 而不能向电台发送信号, 就是单工通信 (见图 1-9(a))。如果能双向传输消息, 则称为双工通信。如果双向传输能同时进行, 则称为全双工通信 (见图 1-9(c)), 如电话通信系统; 而如果双向传输不能同时进行, 则称为半双工通信 (见图 1-9(b)), 如对讲机通信。

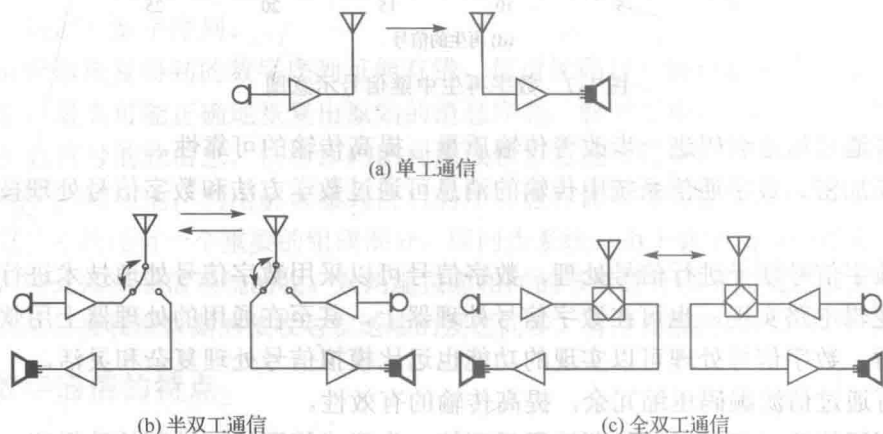


图 1-9 单工与双工通信