

面向 21 世纪

高等学校信息工程专业系列教材

数字通信原理

Principles of Digital Communication

黎洪松 编著
张卫钢 主审

西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校信息工程类专业系列教材

数字通信原理

Principles of Digital Communication

黎洪松 编著

张卫钢 主审

西安电子科技大学出版社

2005

内 容 简 介

本书系统、深入地论述了数字通信的基本概念、基本理论、基本技术,以及系统组成、性能指标、性能分析和设计方法,力求充分地反映国内外数字通信技术的最新发展。

全书共七章,内容包括数字通信基础、信源编码、数字传输技术、信道编码、衰落信道与抗衰落技术、多址通信和典型数字通信系统。

本书可作为通信、电子和信息技术等专业的本科生和研究生教材,也可作为通信网络和信息系统工程技术人员参考书和培训教材。

★本书配有电子教案,有需要的老师可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信原理/黎洪松主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2005.7

(面向21世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1540-6

I. 数… II. 黎… III. 数字通信-高等学校-教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 062935 号

策 划 马晓娟

责任编辑 王晓杰 马晓娟

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

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西画报社印刷厂

版 次 2005年7月第1版 2005年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 23.75

字 数 561千字

印 数 1~4000册

定 价 25.00元

ISBN 7-5606-1540-6/TN·0308

XDUP 1831001-1

*** 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

随着科学技术和社会经济的发展,人类已经迈入了信息时代。信息作为人类社会最重要的资源之一,只有通过广泛的传播和交流,才能产生利用价值,促进社会成员之间的合作,推动社会生产力的发展,创造出巨大的经济效益。信息的传播与交流,是依靠各种通信方式和技术来实现的,要实现信息化,数字技术是关键,而数字通信则是现代通信系统的基础。目前我国通信网已经基本实现了数字化,数字通信技术的应用越来越广泛,数字通信的新理论、新技术、新设备和新应用不断涌现,推动着通信技术的不断发展。人们越来越期望学习和掌握数字通信的基础理论和技术,也希望了解数字通信的新成就和发展方向,本书正是顺应这一需求而编写的。

本书以数字通信系统的“点—线—网”为主线,围绕数字信号传输时如何在噪声、衰落和各种干扰下提高通信系统的有效性和可靠性进行编写的。本书力求系统、深入地论述数字通信的基本概念、基本理论、基本技术,以及系统组成、性能指标、性能分析和设计方法,充分反映国内外数字通信技术的最新发展。全书共分为七章,每章的内容一般都包括基础部分、提高部分和新技术部分,以适应本科生和研究生的教学要求。

第1章为数字通信基础,主要介绍数字通信概论、随机信号和信道与噪声。

第2章为信源编码,主要介绍信源编码基础、语音编码、图像编码和视频/音频编码等。

第3章为数字传输技术,主要介绍数字信号的基带传输、数字信号的频带传输、数字复用技术、数字信号的最佳接收和同步技术。

第4章为信道编码,主要介绍信道编码基础、线性分组码、卷积码、TCM码和Turbo码等。

第5章为衰落信道与抗衰落技术,主要介绍无线移动通信信道、衰落信道、抗衰落技术、分集技术、Rake接收、空时编码技术、衰落数字信号的最佳接收。

第6章为多址通信,主要介绍多址方式、扩频通信、蜂窝技术、抗多址干扰技术、功率控制技术等。

第7章为典型数字通信系统,主要介绍GSM数字蜂窝移动通信系统、CDMA数字蜂窝移动通信系统和数字卫星通信系统。

本书可作为通信原理和数字通信课程的教材,可根据本科生或研究生的教学需要选学其中的部分章节,并辅以相应的实验课。对于本科生,可分为两个学期学习,第一学期学习第1章、第3章和第4章,第二学期学习第2章、第5章、第6章和第7章。对于已经熟悉通信原理内容的研究生可跳过第1章、第3章和第4章,只阅读第2章、第5章、第6章和第7章即可。

在本书的编写过程中,得到了全子一老师、李承恕老师、吴仁彪教授和姚力教授的大力支持,在此一并致谢。

限于作者水平,书中难免存在错误、疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。
联系邮箱: hongsongli@vip. sina. com。

作者

2005年5月

目 录

第 1 章 数字通信基础	1
1.1 数字通信概论	1
1.1.1 通信的基本概念	1
1.1.2 通信系统的组成	4
1.1.3 数字信号与数字通信的特点	6
1.1.4 数字通信系统的主要性能指标	7
1.1.5 数字通信的发展	9
1.2 信号	11
1.2.1 信号表示	11
1.2.2 信号分类	11
1.2.3 信号分析与处理	12
1.2.4 频谱密度	13
1.2.5 相关函数	14
1.2.6 随机变量	15
1.2.7 随机过程	17
1.2.8 平稳随机过程	20
1.2.9 高斯过程	24
1.2.10 通信系统中的噪声	26
1.2.11 随机信号通过线性系统	28
1.3 信道	32
1.3.1 信道分类	32
1.3.2 有线信道	33
1.3.3 无线信道	34
1.3.4 信道模型	36
1.3.5 信道容量	37
1.4 信号带宽与系统带宽	40
1.4.1 信号带宽	40
1.4.2 系统带宽	42
1.4.3 信号带宽与系统带宽的关系	42
1.5 信号设计	42
1.5.1 信号设计的基本概念	42
1.5.2 信号设计的基本原则	43
习题	44
第 2 章 信源编码	47
2.1 概述	47
2.1.1 压缩编码的重要性	47
2.1.2 压缩编码分类	47
2.1.3 编码器的模型	48
2.2 模拟信号的数字化	48
2.2.1 模拟信号的抽样	49
2.2.2 抽样信号的标量量化	52
2.2.3 矢量量化	57
2.2.4 编码	60
2.3 语音编码	61
2.3.1 语音编码概述	61
2.3.2 语音信号的波形编码	65
2.3.3 语音信号的参数编码	71
2.3.4 语音信号的混合编码	74
2.4 图像编码	78
2.4.1 图像编码概述	78
2.4.2 图像预测编码	85
2.4.3 熵编码	88
2.4.4 图像变换编码	89
2.4.5 视频编码标准	95
2.4.6 新的图像编码技术	100
习题	102
第 3 章 数字传输技术	104
3.1 概述	104
3.2 数字信号的基带传输	104
3.2.1 数字信号波形与频谱	104
3.2.2 数字基带信号的传输码型	107
3.2.3 数字基带传输系统	114
3.2.4 部分响应基带传输系统	121
3.2.5 时域均衡	124
3.3 数字信号的频带传输	130
3.3.1 调制与解调	130
3.3.2 二进制数字调制系统	130
3.3.3 多进制数字调制系统	139
3.3.4 正交幅度调制(QAM)	147
3.3.5 最小频移键控(MSK)	150
3.3.6 正交频分复用(OFDM)	154
3.4 数字复用技术	158
3.4.1 频分多路复用(FDM)	158

3.4.2	时分多路复用(TDM)	159	4.3.7	缩短循环码	236
3.4.3	码分多路复用(CDM)	173	4.3.8	BCH 码	236
3.4.4	波分复用(WDM)	175	4.3.9	Fire 码	237
3.5	数字信号的最佳接收	178	4.3.10	RS 码	238
3.5.1	概述	178	4.3.11	循环冗余校验码	238
3.5.2	数字信号的匹配滤波接收	178	4.4	卷积码	239
3.5.3	最小差错概率接收准则	182	4.4.1	卷积码的概念	239
3.5.4	确知数字信号的最佳接收	185	4.4.2	卷积码的编码	239
3.5.5	随相数字信号的最佳接收	190	4.4.3	卷积码的译码	243
3.5.6	实际接收机与最佳接收机的性能比较	193	4.5	交织码	247
3.6	同步技术	194	4.5.1	交织码的概念	247
3.6.1	概述	194	4.5.2	分组交织器	248
3.6.2	载波同步	195	4.5.3	卷积交织器	249
3.6.3	位同步	200	4.5.4	随机交织器	250
3.6.4	帧同步	205	4.6	网格编码调制(TCM)	250
习题		210	4.6.1	TCM 概述	250
第 4 章 信道编码		215	4.6.2	TCM 基本原理	251
4.1	信道编码的基础	215	4.6.3	TCM 码的编译码	253
4.1.1	信道编码的基本概念	215	4.7	Turbo 码	256
4.1.2	信道编码的基本原理	217	4.7.1	级联码	256
4.1.3	纠错编码的信道模型	217	4.7.2	Turbo 码的编码	258
4.1.4	信道编码定理	219	4.7.3	Turbo 码的译码	259
4.1.5	差错控制的原理	219	习题		260
4.1.6	纠错编码系统的性能指标	222	第 5 章 衰落信道与抗衰落技术		262
4.1.7	常用的检错码	223	5.1	无线移动通信信道	262
4.2	线性分组码	225	5.1.1	无线信道	262
4.2.1	线性分组码的基本概念	225	5.1.2	无线移动信道	262
4.2.2	线性分组码编码方程与生成矩阵 G	225	5.1.3	无线移动信道的干扰	263
4.2.3	线性分组码的监督方程与监督矩阵 H	226	5.1.4	自由空间的无线电传播	263
4.2.4	校正子(伴随式) S 与译码	227	5.2	衰落信道	264
4.2.5	完备码与汉明码	229	5.2.1	阴影衰落	264
4.3	循环码	230	5.2.2	多径衰落	264
4.3.1	循环码的概念	230	5.3	抗衰落技术概述	269
4.3.2	循环码的码多项式	231	5.3.1	无线移动信道的特点	269
4.3.3	循环码的生成多项式和生成矩阵	232	5.3.2	主要的抗衰落技术	270
4.3.4	循环码的监督多项式和监督矩阵	233	5.4	分集技术	270
4.3.5	循环码的编码方法	234	5.4.1	分集技术概述	270
4.3.6	循环码的译码方法	235	5.4.2	空间分集技术	271
			5.4.3	极化分集技术	274
			5.4.4	其他分集技术	274
			5.5	Rake 接收	275
			5.6	空时编码技术	276
			5.6.1	多输入多输出(MIMO)信道	276

5.6.2 发送分集	277	6.6.3 智能天线的工作方式	316
5.6.3 空时编码	278	6.6.4 智能天线的波束形成	317
5.7 衰落数字信号的最佳接收	279	习题	318
5.7.1 衰落数字信号的最佳接收机	279	第7章 典型数字通信系统	319
5.7.2 衰落数字信号最佳接收机的 误码率性能	283	7.1 GSM 数字蜂窝移动通信系统	319
习题	283	7.1.1 GSM 系统的业务功能	319
第6章 多址通信	284	7.1.2 GSM 系统结构	319
6.1 多址方式	284	7.1.3 GSM 系统设计	321
6.1.1 信道分割原理	284	7.1.4 GSM 的信道	324
6.1.2 频分多址(FDMA)方式	285	7.1.5 GSM 的语音编码技术	327
6.1.3 时分多址(TDMA)方式	287	7.1.6 GSM 的数字调制技术	327
6.1.4 码分多址(CDMA)方式	288	7.1.7 GSM 的抗衰落技术	328
6.1.5 空分多址(SDMA)方式	289	7.1.8 话音激活与功率控制技术	329
6.1.6 随机接入方式	289	7.1.9 接续技术	330
6.2 扩频通信	293	7.1.10 越区切换	332
6.2.1 扩频通信概述	293	7.1.11 漫游	333
6.2.2 直接序列扩频码分多址 (DS-CDMA)	296	7.2 CDMA 数字蜂窝移动通信系统	334
6.2.3 跳变频率扩频	299	7.2.1 IS-95 CDMA 系统概述	334
6.2.4 跳变时间扩频	300	7.2.2 无线信道结构	335
6.3 蜂窝技术	300	7.2.3 语音编码技术	336
6.3.1 蜂窝技术概述	300	7.2.4 IS-95 CDMA 功率控制技术	337
6.3.2 小区划分与频率复用	302	7.2.5 软切换技术	338
6.3.3 蜂窝系统的干扰	305	7.2.6 Rake 接收技术	338
6.3.4 扩展系统容量的方法	306	7.2.7 第三代移动通信系统	339
6.3.5 越区切换	307	7.3 数字卫星通信系统	340
6.4 抗多址干扰技术概述	309	7.3.1 概述	340
6.4.1 多址干扰	309	7.3.2 卫星通信的多址技术	346
6.4.2 抗多址干扰技术简介	309	7.3.3 IDR 数字卫星通信系统	348
6.5 功率控制技术	311	7.3.4 VSAT 卫星通信系统	351
6.5.1 功率控制原理	311	7.3.5 移动卫星通信系统	355
6.5.2 功率控制方式	311	习题	362
6.5.3 功率控制准则	312	附录一 常用三角公式	363
6.6 智能天线	313	附录二 傅里叶变换	364
6.6.1 智能天线的基本概念	313	附录三 Q 函数与误差函数	366
6.6.2 智能天线的基本原理	314	参考文献	369

第 1 章 数字通信基础

1.1 数字通信概论

通信就是信息的传递和交流,即利用有线电、无线电、光学或其他电磁系统实现符号、文字、信号、语音、图像、音频、视频和多媒体信息的传输、发射和接收。

目前,通信网已经基本实现了数字化,在我国公众通信网中传输的信号主要是数字信号,只有用户环路(例如电话)所传输的信号和其他特定应用(例如模拟电视)中传输的信号还是模拟信号。模拟通信系统传递的电信号在时间上的瞬时值是连续的。模拟通信系统存在噪声积累、干扰严重、传输质量差、信号处理困难、不易集成和设备庞大等许多缺点。20 世纪 60 年代出现了 TDM 数字传输技术,它采用数字信号来传递信息,从此通信进入了数字化时代。目前,数字通信技术的应用越来越广泛,例如数字移动通信、数字卫星通信、数字电视广播、数字光纤通信、数字微波通信、数字视频通信、多媒体通信等等。电信网(例如电话网、数据网等)、因特网和广播电视网几乎都是采用数字化技术的。数字通信的新理论、新技术、新设备和新应用正不断涌现,推动着数字通信技术的进一步发展。

数字通信可分为点对点通信和点对多点通信。点对点通信(线)是将发送端的消息通过各种信道传递到一个接收端;点对多点通信(通信网)则是将发送端的消息通过多址通信等方式传递到指定的接收端。本书以数字通信系统的“点—线—网”为主线,围绕数字信号传输时如何在噪声、衰落和各种干扰下提高通信系统的有效性和可靠性来展开。由于点对点通信是点对多点通信的基础,因此我们先介绍点对点通信,然后在第 6 章和第 7 章介绍点对多点通信。

1.1.1 通信的基本概念

1. 消息、信息和信号

通信的目的是传递消息中所包含的信息。消息是通信系统传输的对象。消息是由信源产生的,它具有各种不同的形式和内容。用文字、符号、数据、语言、音符、图片、图像、声音等能够被人们的感觉器官所能感知的形式,把客观物质运动和主观思维活动的状态表达出来就成为消息(message)。消息是随机变化的、不确定的。

消息中包含信息(information),信息是消息中包含的待知的、有意义的内容。信息是一个含义广泛、抽象的概念,各种随机变化的消息都会有一定量的信息。消息是信息的载体,一则消息可以载荷不同的信息,通过得到消息从而获得信息。

消息不能直接传输,为了传输消息,需要将待传的消息先通过各种传感器转换为电压或电流信号(电信号),才能通过信道传输。信号随消息变化,由于消息是随机变化的,因此信号也是随机的,即信源输出的是随机信号。人们要正确地获取,有效地传递并可靠地交换科技、文化、教育、社会、经济等各种信息,就必须通过信号来实现。信号携带着信息,信号(signal)是消息的运载工具,或者说传输手段。同一消息可用不同的信号来表示,同一信号也可表示不同的消息。

2. 信息量

通信的本质是随机的。随机性在通信中起着重要的作用,且与信息密切相关。通信理论假定:发送端发送的消息是随机的,对接收端来说是无法预知的。

消息中包含的信息的多少用信息量来量度,消息中所含的信息量的大小与消息发生的概率有密切关系。概率论告诉我们,事件的不确定性可用事件出现的概率来描述。可能性越小,概率就越小;反之,概率就越大。若用概率来描述信息量,则消息所表达的事件出现的概率越小,消息中包含的信息量就越大。如果事件是必然的,其发生概率等于1,则消息的信息量等于0。即消息中所含的信息量与消息出现的概率的倒数成比例。若假设 $P(x)$ 是一个消息发生的概率,则消息中所含的信息量 I 定义为:

(1) 信息量 I 是概率的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1.1-1)$$

(2) $P(x)$ 越小, I 越大;反之, $P(x)$ 越大, I 越小。当 $P(x)=1$ 时, $I=0$ 。

(3) 假设若干个互相独立事件的出现概率分别为 $P(x_1)$, $P(x_2)$, $P(x_3)$, ..., 则由这些独立事件构成的消息所含的信息量等于各独立事件信息量之和。也就是说,信息量具有相加性,即

$$I = I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots \quad (1.1-2)$$

显然,信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 之间的关系为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.1-3)$$

信息量的单位与对数底数 a 有关。当 $a=2$ 时,信息量的单位为比特(bit);当 $a=e$ 时,信息量的单位为奈特(nat);当 $a=10$ 时,信息量的单位为哈特莱(hartley)。目前广泛使用的是比特。下面讨论离散消息所含信息量的量度方法。

对于等概情况,设离散信源中 M 个波形等概率($P=1/M$)发送,且每一个波形的出现是独立的,即信源是无记忆的,则传送 M 个波形之一的信息量为

$$I = \lg \frac{1}{P} = \lg M \quad \text{bit} \quad (1.1-4)$$

式中, P 为每一个波形出现的概率; M 为传送的波形数。通常 $M=2^k$ ($k=1, 2, 3, \cdots$), 则式(1.1-4)可改写为

$$I = \lg M = \lg 2^k = k \quad \text{bit} \quad (1.1-5)$$

式中, k 为二进制脉冲数目。即传送每一个 M 进制波形的信息量等于用二进制脉冲表示该波形所需的脉冲数目 k 。

一般来说,信源可以产生多个独立的消息(或符号),每个消息发生的概率可能并不相等,所以每个消息的信息量也不相同。在这种情况下,通常考虑每个消息(或符号)所包含

的统计平均值,称为信源的平均信息量。

信源的平均信息量的计算是由每个消息的信息量按概率加权求和得到的。对于非等概情况,设离散信源是一个由 n 个符号组成的符号集,其中每个符号 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 出现的概率为 $P(x_i)$,且有 $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$,则 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\lg P(x_1), -\lg P(x_2), \dots, -\lg P(x_n)$,其平均信息量为

$$H(x) = P(x_1)[-\lg P(x_1)] + P(x_2)[-\lg P(x_2)] + \dots + P(x_n)[-\lg P(x_n)]$$

$$= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \lg P(x_i) \quad \text{bit/符号} \quad (1.1-6)$$

显然,当信源中每个符号等概独立出现时,信源的平均信息量有最大值。

3. 数字通信与数字通信系统

代表消息的电信号按其代表消息的参量的取值方式不同,可分为模拟信号(或称连续信号)和数字信号(或称离散信号)。

模拟信号的特点是信号参量的取值是连续的,如图 1-1 所示。例如话筒送出的语音信号,其电压(或电流)可用取值连续的时间函数表示。

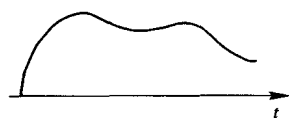


图 1-1 模拟信号示例

数字信号与模拟信号相反,数字信号的参量取值是离散变化的,如图 1-2 所示。图 1-2(a)所示的信号为二进制数字信号。所谓二进制就是只有两种取值(0, +E)的可能性,通常用 0 和 1 表示。当然,数字信号也可以用多进制表示,如四进制、八进制等。图 1-2(b)所示的就是四进制数字信号,四进制数字信号有四种可能的取值(-3E, -E, +E, +3E),通常可用 0, 1, 2, 3 表示。

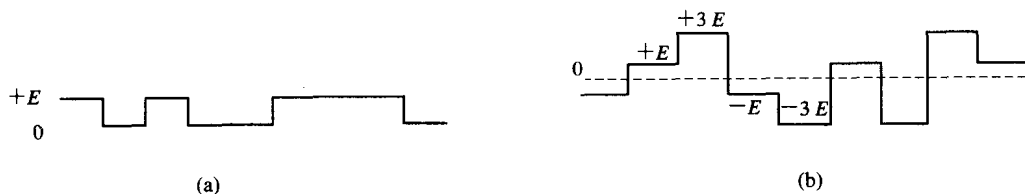


图 1-2 数字信号示例

(a) 二进制数字信号; (b) 四进制数字信号

根据信道中传输的是模拟信号还是数字信号,通信(通信系统)可以分为模拟通信(模拟通信系统)和数字通信(数字通信系统)。

在数字通信系统中,信源所发出的信号经过变换和处理后,送往信道上传输的是数字信号。语音信号的数字通信如图 1-3 所示。在发送端,声/电变换器将语音变换成模拟电信号,模/数(A/D)变换器将模拟语音信号变换成数字信号,数字信号通常是采用二进制信号形式传送至信道。在接收端,数字信号再经数/模(D/A)变换和电/声变换还原成语音,送给接收者。

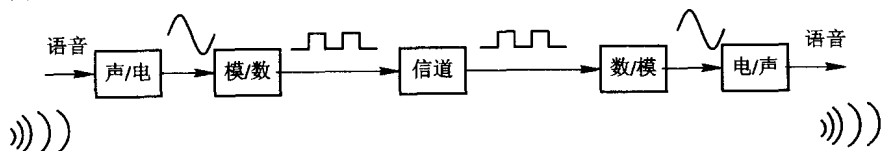


图 1-3 数字通信示例

1.1.2 通信系统的组成

1. 通信系统模型

通信系统的目的是实现从一地到另一地的信息传递或交换。对于点对点通信，可以把通信系统概括为一个统一的模型，如图 1-4 所示。通信系统主要包括以下六个部分：信源、发送设备、信道、噪声源、接收设备和信宿。

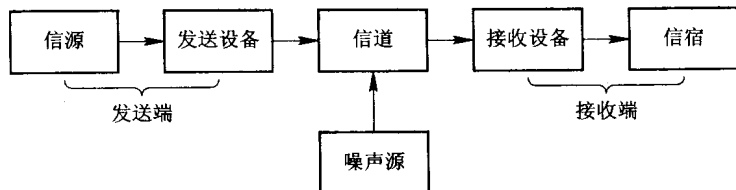


图 1-4 通信系统模型

通信系统模型中各部分的功能如下：

(1) 信源是指发出信息的信息源，它是产生消息或消息序列的源泉，如语音、电视图像、电传报文、传真、数据等都是信源发出的消息。信源的作用是把待传送的消息转换成原始电信号。信源输出的信号称为基带信号，即没有经过调制的原始信号。基带信号的特点是具有频率较低的频谱分量，一般不适合直接传输。基带信号分为模拟基带信号和数字基带信号。

(2) 发送设备的作用是对基带信号进行某种变换和处理，使基带信号(原始信号)变换成适合在信道上传输的信号。

(3) 信道是信号传输的通道(或媒体)，传输信道可分为有线信道(如双绞线、通信电缆、同轴电缆、光纤等)和无线信道(如传输电磁波的自由空间)。当信号经过信道传输时，要注意信道带宽 W 、信噪比 S/N 、信道容量 C 等特性。例如，信号经过信道传输，由于必然有能量的损耗，会产生信号功率的衰减；任何信道的频率特性不可能为无限宽(带限信道)，不能百分之百满足传输信号的要求；信道中存在的电感和电容等储能元件，会对信号的频率特性产生影响，造成信号的畸变和失真；信道也会受到来自信道内部和外部的各种噪声的干扰；信号会受到污染而直接影响接收端的正确判决。

(4) 这里的噪声源是指非人为产生的，在通信系统中它是客观存在的。在通信系统模型中，噪声源是以集中形式表示的，实际上这种噪声分散在通信系统的各个部分。这种集中表示是为了便于理解和分析问题。噪声对信号的传输会产生干扰，需要指出的是：噪声只是对信号传输的干扰之一，干扰可分为自然干扰和人为干扰。香农的信道容量公式是基于理想加性高斯白噪声(AWGN)信道而言的。本书先介绍理想加性高斯白噪声信道的信号传输问题，这是通信理论的基础。我们将在第 5 章和第 6 章详细介绍无线通信信道的衰落干扰和多址干扰。

(5) 接收设备的功能与发送设备的功能相反，即从接收信号中恢复出相应的原始信号。

(6) 信宿是指信息接收者，其作用是将复原的原始信号变换成相应的消息。

2. 模拟通信系统模型

模拟通信系统传输的是模拟信号，模拟通信系统模型如图 1-5 所示。

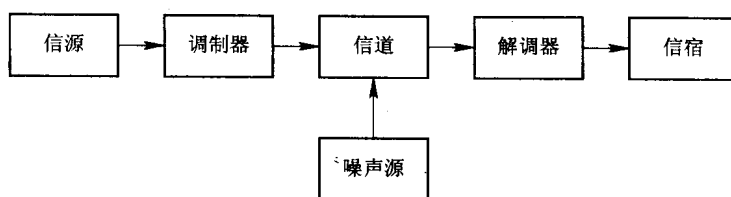


图 1-5 模拟通信系统模型

在模拟通信系统中，发送端主要包括两种变换：将连续消息变换成原始电信号（由信源完成）；将原始电信号（模拟基带信号）变换成适合信道传输的已调信号（由调制器完成）。经过调制后的已调信号具有三个基本特征：一是携带信息；二是适合在信道中传输；三是信号的频谱具有带通形式，且中心频率远离零频，因此已调信号也称为频带信号。

在接收端，解调器将已调信号恢复为原始电信号，信宿将原始电信号恢复为连续消息，从而实现模拟信号的传输。

3. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传输信息的通信系统，如图 1-6 所示。数字通信系统的组成主要有：信源编码/解码、信道编码/解码、数字调制/解调和同步与多路复用等部分。

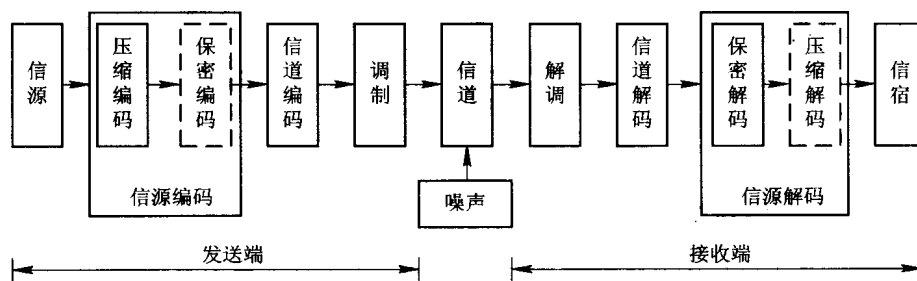


图 1-6 数字通信系统模型

下面简述各部分的主要功能。

(1) 信源编码和信源解码（译码）。信源编码的任务是把信源输出的消息变换为所需的信息码元序列（信息序列），主要包括压缩编码和保密编码。压缩编码是信源编码的基本功能，其作用是通过减小数字信号的冗余度来压缩数据，降低数码率，从而提高数字信号传输的有效性。如果是模拟信源，则它还包括模拟信号的数字化（A/D）部分，即对模拟信号进行抽样、量化和编码，转换成数字信号，然后再对数字信号进行压缩编码，如图 1-7 所示。保密编码的作用是对压缩编码后的信码进行加密，确保信息传输的安全保密性。信源解码的作用与信源编码相反，它是把信息码元序列变换为适合于信宿接收的信号。

(2) 信道编码和信道解码（译码）。信道编码是检测和纠正传输错误的编码，其作用是提高信号传输的可靠性，因此也称为抗干扰编码或纠错编码。它是在信源编码的信码中人为地按照一定的规律加入一些多余码元，以便在接收端自动发现或纠正信息序列在传输中发生的差错，从而降低信码传输的错误概率。信道解码的作用与信道编码相反。

(3) 调制与解调。调制可分为基带调制和频带调制。所谓频带调制，是指用一个载波对数字基带信号（因为频率低，一般不适合于在信道中传输）进行调制，将基带信号的频率范围搬移到适合于在信道中传输的频段上（载波调制），便于实现多路复用，使几个信号共享一个信道的频带。调制还可以避开各种干扰，使干扰的影响减到最小。解调的作用与调

制相反，它把从信道接收到的已调信号转换为数字基带信号。

如果不经载波调制，则需要对原基带信号进行码型和波形变换，以便与信道特性相适应。对基带信号的这种处理称为基带调制，其实现称为数字基带传输系统。

(4) 同步。同步是保证数字通信有序、准确、可靠工作的基本前提，对数字通信系统特别重要。同步可分为载波同步、位同步、群同步和网同步。

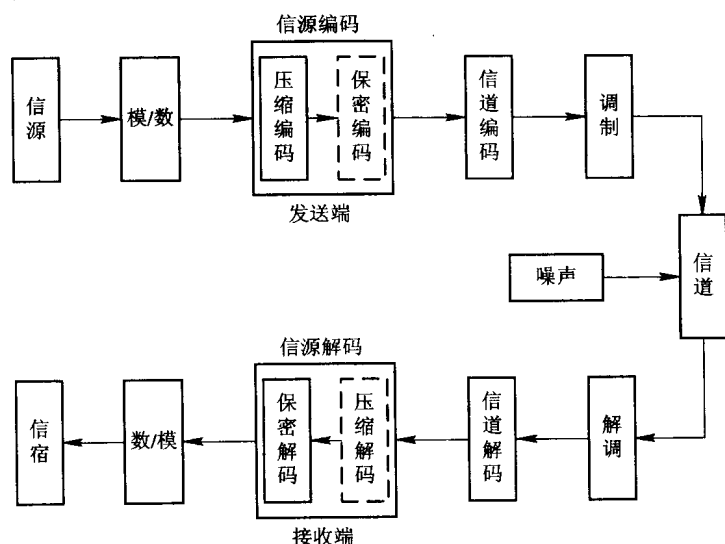


图 1-7 模拟信号的数字传输

1.1.3 数字信号与数字通信的特点

数字通信已成为通信技术的主流，它代表了通信技术的发展方向。这是因为与模拟通信相比，数字信号及数字通信具有以下优点：

(1) 数字信号便于传输和交换，便于组成数字多路通信系统和数字通信网络。例如，一根光纤可同时传送几十万路数字电话，一台程控交换机可同时为上万个电话用户提供线路，各种通信业务经过数字化处理后可统一到一个网络中（例如因特网等）。

(2) 数字信号便于存储、处理（加密等）、加工和变换。随着通信网络的迅速发展，信息传输的安全保密变得越来越重要，数字通信的加密处理比模拟通信更容易实现，也更加有效。

(3) 数字通信的抗干扰能力强，无噪声积累。在模拟通信中，一方面模拟信号上叠加的噪声（即使噪声很小），很难被消除和分开；另一方面为了保证接收信号有一定的幅度，需要对传输信号加以放大，但与此同时也放大了叠加在信号上的噪声，放大器的非线性也会产生波形畸变；同时，随着传输距离的增加，噪声积累越来越大，使传输质量严重恶化。

在数字通信中，由于数字信号的幅度值为有限个数的离散值，以二进制为例，信号在传输过程中，也会受到噪声的干扰，但只要噪声的大小不足以影响接收端的正确判决，就能正确地接收信号，并再生原发送的信号。因此，数字通信具有较强的抗干扰能力，可做到无噪声积累，故可实现长距离、高质量的传输。

(4) 差错可控。在数字通信系统中可采用各种纠错编码技术，从而有效降低了误码率，提高了传输的可靠性。

(5) 数字化技术便于实现通信设备的小型化。与模拟通信设备相比, 数字通信设备的设计和制造更容易, 可靠性更高, 体积更小, 重量更轻, 能耗更小。

(6) 数字信号可通过压缩编码来降低数码率, 从而提高信道的利用率, 以解决数字通信占用频带较宽的问题。

与模拟通信相比, 数字通信的缺点是: 占用的频带较宽, 对同步的要求较高, 系统设备较复杂。

近年来, 由于数字电路和微电子技术的发展, 特别是超大规模集成电路的发展, 使得数字通信的优点变得越来越突出, 并得到了广泛的应用, 正在逐步取代模拟通信。例如, 电话、电视、计算机数据等信号的远距离传输几乎都是采用数字传输。

1.1.4 数字通信系统的主要性能指标

有效性和可靠性是衡量通信系统优劣的两个主要指标。有效性是指在给定信道内所传输的信息内容的多少, 即信道传输信息的“速度”问题; 可靠性是指信道传输信息的准确程度, 即信道传输信息的“质量”问题。

通信系统的有效性和可靠性是一对矛盾, 为了提高有效性就需要提高传输速率, 随之而来的是可靠性降低; 反之, 为了提高可靠性就需增加纠错编码码元, 从而降低了有效性。这两者可以互换, 既可用降低可靠性的办法来换取有效性的提高, 也可用降低有效性的办法来提高可靠性。

数字通信系统的有效性常用传输速率和系统频带利用率等来衡量。数字通信系统的可靠性通常用差错率来衡量。

1. 传输速率

(1) 码元传输速率又称码元速率或传码率, 用 R_B 表示, 它是指单位时间(每秒钟)内系统传输的码元符号的数目, 单位为波特(Baud), 记为 B(注意: 不能用小写)。例如, 某数字通信系统在 2 秒内共传输 2400 个码元符号, 则该系统的码元传输速率为 1200 B。

需要指出的是, 码元传输速率 R_B 与数字信号的进制数无关。码元符号可以是二进制, 也可以是多进制(M 进制), R_B 只与传输的码元宽度 T_s 有关:

$$R_B = \frac{1}{T_s} \quad B \quad (1.1-7)$$

(2) 信息传输速率又称信息速率或传信率, 用 R_b 表示, 它是指单位时间(每秒钟)内传送的信息量的多少, 单位为比特/秒(bit/s), 简记为 b/s 或 bps。例如, 若系统 2 秒传送的信息量为 2400 bit, 则信息传输速率 $R_b = 1200$ b/s。

注意: 由于码元速率与信息速率具有不同的定义, 所以不能混淆。码元传输速率 R_B 与信息传输速率 R_b 的关系是明确的。当码元符号为二进制时, 每个码元符号包含的信息量就是 1 比特, 此时码元传输速率等于信息传输速率。

由于每个码元符号通常都含有一定比特数(bit)的信息量, 因此码元传输速率与信息传输速率之间的关系为

$$R_b = R_B \cdot H(x) \quad (1.1-8)$$

式中, $H(x)$ 为信源中每个消息(码元符号)所含的平均信息量, 即

$$H(x) = - \sum_{i=1}^M P_i \lg P_i \quad \text{bit/符号} \quad (1.1-9)$$

式中, M 为信源可能产生的不同离散消息(码元符号)的数目; P_i 为第 i 个可能消息(码元符号)出现的概率。

等概传输时(实际应用中, 通常认为各种可能消息的出现概率相等), 即 $P_i = \frac{1}{M}$, 则式(1.1-9)变为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^M P_i \lg P_i = \lg M \quad \text{bit/符号} \quad (1.1-10)$$

对于二进制信号($M=2$), 每个码元所含的信息量是 $H(x) = \lg 2 = 1$ 。此时, 码元传输速率与信息传输速率在数值上相等, 但含义和单位不同。

对于 M 进制信号, 每个码元所含的信息量是

$$H(x) = \lg M \quad \text{bit/符号} \quad (1.1-11)$$

这时, 码元速率与信息速率的关系为

$$R_b = R_B \lg M \quad (1.1-12)$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\lg M} \quad (1.1-13)$$

例如, 码元速率 R_B 为 2400 B, 采用四进制($M=4$)时, 信息速率 R_b 为 4800 b/s; 采用二进制($M=2$)时, 信息速率 R_b 为 2400 b/s。

【例 1-1】 某信息源的符号集由 A、B、C、D、E 组成, 设每一符号独立出现, 其出现的概率分别为 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/8$ 、 $3/16$ 和 $5/16$ 。(1) 试求该信息源符号的平均信息量; (2) 若信息源以 1000 B 速率传送信息, 试求传送 1 小时的信息量; (3) 试求传送 1 小时可能达到的最大信息量。

解 (1) 该信息源符号的平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \lg P(x_i) \\ &= - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} - \frac{3}{16} \lg \frac{3}{16} - \frac{5}{16} \lg \frac{5}{16} \\ &= 2.23 \quad \text{bit/符号} \end{aligned}$$

(2) 平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H(x) = 1000 \times 2.23 = 2.23 \times 10^3 \quad \text{bit/s}$$

传送 1 小时的信息量为

$$I = R_b \cdot t = 2.23 \times 10^3 \times 3600 = 8.028 \times 10^6 \quad \text{bit}$$

(3) 当信息源的每个符号等概出现时, 信息源的熵最大, 此时信息源符号的平均信息量为

$$H(x) = - \lg 5 = 2.322 \quad \text{bit/符号}$$

平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H(x) = 1000 \times 2.322 = 2.322 \times 10^3 \quad \text{bit/s}$$

传送 1 小时的信息量为

$$I = R_b \cdot t = 2.322 \times 10^3 \times 3600 = 8.359 \times 10^6 \text{ bit}$$

2. 频带利用率

有时为了进一步描述数字通信系统传输信息的效率,还定义了频带利用率 η 。频带利用率是指单位频带(每赫兹)内的传输速率,即

$$\eta_B = \frac{\text{码元传输速率}}{\text{频带宽度}} \text{ B/Hz} \quad (1.1-14)$$

或

$$\eta_b = \frac{\text{信息传输速率}}{\text{频带宽度}} \text{ (b/s)/Hz} \quad (1.1-15)$$

3. 差错率

在数字通信系统中,差错率越小,系统的可靠性就越高。描述可靠性的主要指标是误码率和误比特率。

(1) 误码率是指接收错误的码元数目在传输码元总数中所占的比例,常用 P_e 表示,即

$$P_e = \frac{\text{接收错误码元数目}}{\text{传输码元总数目}} \quad (1.1-16)$$

(2) 误比特率又称误信率,是指接收错误的比特数在传输总比特数中所占的比例,采用 P_b 来表示,即

$$P_b = \frac{\text{接收错误比特数目}}{\text{传输比特总数目}} \quad (1.1-17)$$

对于二进制信号,显然误码率等于误比特率,即 $P_b = P_e$ 。

对于 M 进制信号,每个码元含有 $k = \lg M \text{ bit}$ ($M = 2^k$)。当一个码元发生错误时,在 k 个比特中错误比特所占比例的平均值(数学期望值)为

$$\begin{aligned} E(k) &= E\left[\frac{\text{错误比特数}}{\text{一个码元中的比特数}}\right] = \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^k \frac{i}{k} C_k^i \\ &= \frac{2^{k-1}}{M-1} = \frac{M}{2(M-1)} \end{aligned} \quad (1.1-18)$$

误码率与误比特率之间关系为

$$P_b = E(k)P_e = \frac{M}{2(M-1)}P_e \quad (1.1-19)$$

当 M 较大时,误比特率为

$$P_b \approx \frac{1}{2}P_e \quad (1.1-20)$$

1.1.5 数字通信的发展

近年来,对数据传输需求的高速增长,特别是计算机技术和因特网(Internet)的出现和发展,促进了数字通信的快速发展。通信的数字化革命使得通信系统既能传输语音,也能传输各种数据、图像、文字、报表等其他信息。目前,数字通信在卫星通信、光纤通信、移动通信等方面的发展很快。下面我们从上述几个方面来了解数字通信的现状和未来。

1. 卫星通信

卫星通信是随着现代航天技术的发展而发展起来的一种现代通信方式,它是利用人造