



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等院校

电子信息类系列教材

Shuzi Tongxin
Jishu

数字通信 技术

© 张杭 张邦宁 郭道省 王孝国 陈瑾 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等院校电子信息类系列教材

数字通信技术

张 杭 张邦宁 郭道省 王孝国 陈 瑾 编著



人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

数字通信技术 / 张杭等编著. —北京: 人民邮电出版社, 2008.8

(普通高等院校电子信息类系列教材. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-115-18181-7

I. 数… II. 张… 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 (2008) 第 075254 号

内 容 提 要

本书着重阐述一个点对点通信系统, 在有线、无线等不同介质中完成多媒体业务传输所必需的关键技术, 包括语音编码技术、图像编码技术、信道编码技术、数字载波调制技术、同步技术、均衡技术、分集技术、扩频通信技术、数字复接技术、光波调制复用技术和多址通信技术, 详细介绍了这些技术的基本原理和性能指标, 阐述时力求概念清晰。本书还简单介绍了远程用户接入通信网共享通信资源的多址通信技术, 为读者理解通信网的传输机理奠定基础。书中各章都附有思考题和习题。

本书可以作为普通高等院校通信工程、电子信息等专业本科生和研究生相关课程的教科书和教辅书, 也可作为通信工程技术人员的参考书。

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等院校电子信息类系列教材

数字通信技术

◆ 编 著 张 杭 张邦宁 郭道省 王孝国 陈 瑾
责任编辑 蒋 亮

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京世纪雨田印刷有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 24

字数: 667 千字

2008 年 8 月第 1 版

印数: 1—3 000 册

2008 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-18181-7/TN

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010) 67170985 印装质量热线: (010) 67129223

反盗版热线: (010) 67171154

前 言

随着通信技术的发展,数字通信已经成为主要的信息传输方式。数字通信技术的发展呈现以下趋势:

- (1) 传输的业务种类多样化,包括数据、声音、图像等;
- (2) 传输速率越来越高;
- (3) 传输质量越来越好;
- (4) 随时随地都能通信,包括在移动状态下;
- (5) 传输介质多样化,包括无线电介质和有线电介质,频率从长波到光波;
- (6) 能够组成性能良好的通信网。

根据数字通信技术的上述特点,对本书的体系结构作了如下安排。

首先,根据点到点通信系统的组成,按顺序分别在第2章到第6章讨论了各组成部分的理论基础、实现方式和技术指标。这部分内容包括语音编码技术、图像编码技术、信道编码技术、数字载波调制技术和同步技术。

由于信道可能具有带限特性、非线性特性和衰落特性,使信号在传输过程中发生畸变与衰落,影响通信质量。为了解决信号在传输中的畸变和衰落问题,第7章和第8章分别讲述了均衡技术与分集技术。

扩频通信方式能够提高信号在传输过程中的抗干扰能力,并且也是实现多址通信的一种方式,因此在第9章讲述了扩频通信技术。

一个点对点的通信系统,不但要完成两点之间单个用户的信息传输,还必须完成两点之间多个用户信息的同时传输,因此每条线路上都包含多个用户的信号。这些信号如何共存、以什么方式组合,关系到整个系统的效率,为此,在第10章讲述了数字复接技术,重点讲述了同步数字系列(SDH)技术。

光纤通信已经成为当今有线通信的主要传输方式,由于光通信的特殊性,使光纤通信中的调制复用技术不同于其他通信系统,因此,本书特地安排第11章讲述光波调制复用技术。

通信网是多个点对点通信系统相互连接而构成的通信体系,能够实现远程多个用户同时互相通信。上述各种技术都是只能解决点对点的通信问题,不能解决通信网中远程多用户同时通信的问题,为此本书第12章简单介绍了远程多用户共享信道资源的多址通信技术,为读者理解通信网的传输机理奠定基础。

建议全书的教学课时为80学时。第1章至第6章是实现数字传输的基本技术,可安排40学时讲授。第7章至第9章是提高数字传输可靠性的技术,可安排20学时讲授,由于第8章分集技术中的Rake接收技术涉及部分扩频通信的知识,所以也可以先讲述第9章的内容。第10章和第11章是提高系统传输容量的技术,可安排20学时讲授。本书各章内容均具有一定的独立性,因此读者也可根据需要进行相应章节学习。如果读者在学习本书之前已经学习过数字通信原理课程的一些基础知识,将有助于对本书内容的理解与掌握。

本书由张杭和张邦宁主持编写，其中第1、2、4、5、9、12章由张杭编写，第3章由王孝国编写，第6章由张邦宁编写，第7、8章由陈瑾编写，第10、11章由郭道省编写。陈建华、童新海、朱勇对本书的编写提出了许多宝贵的修改意见；罗清勇、吴昊、张叶琳、李强、王虎成、张江等研究生对本书的部分习题进行了解答，并参与了本书部分文字的编排、制图等工作。

本书在编写过程中，得到了赵杭生、范建华、冯川玉、王凌等同志的关心与支持；还得到了解放军理工大学通信工程学院各级领导和同事们的关心与支持，在此一并表示诚挚的感谢。

由于数字通信技术发展迅速，加之作者水平有限，书中难免出现错误和不妥之处，恳请读者批评指正。

作者

2008年7月

目 录

第1章 概述

1.1 通信的一般原理	1
1.2 数字通信系统及主要组成	2
1.3 数字通信系统的主要性能指标	3
1.3.1 有效性	3
1.3.2 可靠性	4
1.3.3 性能极限	4
1.4 数字通信的特点	5
1.5 小结	5
思考题与习题	6

第2章 语音编码技术

2.1 引言	7
2.1.1 语音编码的方法	7
2.1.2 语音编码的性能和标准	7
2.2 波形编码	9
2.2.1 抽样	10
2.2.2 标量量化	12
2.2.3 矢量量化	16
2.2.4 编码	18
2.3 语音信号的参量编码	22
2.3.1 语音产生模型	22
2.3.2 语音信号的线性预测编码	23
2.3.3 LPC-10 声码器	27
2.3.4 合成分析法	29
2.4 几种混合编码方式	32
2.4.1 规则脉冲激励线性预测编码 (RPE-LTP)	32
2.4.2 码本激励线性预测编码 (CELP)	35
2.4.3 矢量和激励线性预测编码 (VSELP)	36
2.4.4 短时延码激励线性预测编码 (LD-CELP)	38
2.4.5 多带激励 (MBE)	39
2.4.6 混合激励线性预测编码 (MELP)	40

2.5 小结	42
思考题与习题	42
参考文献	43

第3章 图像编码技术

3.1 引言	45
3.2 图像信号的数字化及图像质量的评价	45
3.2.1 图像信号的数字化	45
3.2.2 图像质量的评价	47
3.3 图像压缩编码的基本技术	48
3.3.1 熵编码	49
3.3.2 矢量量化	54
3.3.3 预测编码	55
3.3.4 变换编码	59
3.3.5 分形图像编码	68
3.3.6 模型基编码	69
3.3.7 实用编码方案	69
3.4 图像压缩编码标准	70
3.4.1 静止图像压缩标准	70
3.4.2 运动图像压缩标准	75
3.5 小结	93
思考题与习题	93
参考文献	94

第4章 信道编码技术

4.1 引言	95
4.2 ARQ 方式	96
4.3 线性分组码	98
4.3.1 基本概念	98
4.3.2 汉明码	100
4.3.3 循环码	101
4.3.4 BCH 码	104
4.3.5 RS 码	105
4.4 卷积码	108
4.4.1 基本概念	108
4.4.2 卷积码的编码原理	109
4.4.3 卷积码编码规则的表示方法	109

4.4.4	卷积码的距离特性	113	5.3.2	$\pi/2$ -DBPSK 和 $\pi/4$ -DQPSK	158
4.4.5	卷积码的译法	114	5.3.3	OQPSK	161
4.4.6	卷积码 Viterbi 译码器的 性能指标	119	5.4	频移键控的调制方式及其改进型	162
4.4.7	卷积编译码器及应用	121	5.4.1	MSK	163
4.5	交织编码	121	5.4.2	GMSK	165
4.5.1	分组交织	122	5.5	幅移键控的调制方式及其改进型	169
4.5.2	卷积交织	122	5.5.1	QAM	170
4.5.3	随机交织	124	5.5.2	SQAM	172
4.5.4	交织编码的性能及参数选取	124	5.6	多载波调制和正交频分复用	173
4.6	级联码	125	5.6.1	MCM	174
4.7	乘积码	126	5.6.2	OFDM	174
4.8	Turbo 码	126	5.7	频带信号的传输特性	177
4.8.1	Turbo 编码器	126	5.7.1	功率谱特性	177
4.8.2	Turbo 码的译码	128	5.7.2	抗噪声性能	180
4.8.3	Turbo 码的性能	129	5.7.3	滤波和限幅对传输性能的影响	184
4.9	LDPC 码	130	5.8	BPSK/QPSK 调制解调器的数字 实现	186
4.10	小结	133	5.8.1	调制解调器的数字实现方式	186
附录 4A	硬判决与软判决	133	5.8.2	调制器的数字实现	186
附录 4A.1	信道模型	133	5.8.3	解调器的数字实现	188
附录 4A.2	硬判决与软判决	134	5.9	小结	189
附录 4A.3	软判决 Viterbi 译码	135	思考题与习题	190	
附录 4B	删余卷积码	136	参考文献	190	
思考题与习题		137	第 6 章 同步技术	192	
参考文献		139	6.1	引言	192
第 5 章 数字载波调制技术		140	6.2	载波同步技术	193
5.1	引言	140	6.2.1	载波同步的基本工作原理	193
5.1.1	基带信号与频带信号	140	6.2.2	基于锁相理论的闭环载波 同步技术	196
5.1.2	实现数字调制的方式	140	6.2.3	开环前馈载波同步技术	204
5.1.3	衡量数字调制技术的性能 指标	141	6.3	位同步技术	207
5.2	基带传输系统及其设计	142	6.3.1	位同步的基本工作原理	207
5.2.1	基带信号的波形与功率谱 特性	142	6.3.2	定时误差估计	209
5.2.2	无码间串扰基带传输系统的 设计	144	6.3.3	基于锁相环的定时误差调整	214
5.2.3	部分响应技术	153	6.3.4	基于内插法的定时误差调整	215
5.3	相移键控的调制方式及其改进型	155	6.4	小结	218
5.3.1	BPSK 和 QPSK	156	思考题与习题	218	
			参考文献	219	

第7章 均衡技术	220	主要性能参数	256
7.1 引言	220	9.3 扩频序列	257
7.2 均衡的基本原理	220	9.3.1 对扩频序列的要求	257
7.3 均衡器的分类	222	9.3.2 PN序列的相关特性及其	
7.3.1 线性均衡器	222	分类	258
7.3.2 非线性均衡器	224	9.3.3 m 序列	259
7.4 均衡器的算法	226	9.3.4 Gold序列	262
7.4.1 迫零算法	227	9.3.5 Walsh序列	264
7.4.2 基本LMS算法	227	9.4 扩频序列的捕获与跟踪	266
7.4.3 RLS算法	229	9.4.1 PN序列捕捉的基本原理	266
7.4.4 算法比较	232	9.4.2 单积分滑动相关捕捉	267
7.5 小结	232	9.4.3 匹配滤波器捕捉	267
思考题与习题	232	9.4.4 声表面波器件实现匹配	
参考文献	233	滤波器捕捉	268
第8章 分集技术	234	9.4.5 扩频序列的跟踪	269
8.1 引言	234	9.5 跳频扩频通信	270
8.2 分集技术基本原理	234	9.5.1 跳频扩频的实现原理	271
8.2.1 无线信道特征	234	9.5.2 跳频扩频的重要概念	272
8.2.2 分集的基本概念	236	9.6 扩频通信技术的应用	275
8.3 分集接收	236	9.7 小结	276
8.3.1 多径分离技术	236	思考题与习题	276
8.3.2 分集合并技术	237	参考文献	277
8.4 Rake接收机	240	第10章 数字复接技术	278
8.4.1 Rake接收机的工作原理	240	10.1 引言	278
8.4.2 Rake接收机的设计考虑	243	10.2 PDH数字传输体制	279
8.4.3 Rake接收的几种方式	244	10.2.1 时分复用	281
8.5 分集发射	245	10.2.2 一次群的帧结构	281
8.6 MIMO空时处理技术	247	10.2.3 PDH的数字复接	282
8.6.1 MIMO信息论基础	247	10.3 SDH数字传输体制	285
8.6.2 空时分组码	249	10.3.1 PDH与SDH的比较	285
8.7 小结	250	10.3.2 SDH标准和速率	286
思考题与习题	250	10.3.3 SDH的帧结构	287
参考文献	250	10.3.4 SDH复用原理	288
第9章 扩频通信技术	252	10.3.5 开销及其作用	298
9.1 引言	252	10.3.6 指针及指针调整	303
9.2 直接序列扩频通信的基本原理	252	10.3.7 SDH网络及设备	309
9.2.1 直接序列扩频的原理	252	10.4 SDH的定时和同步	312
9.2.2 直接序列扩频信号的频谱	253	10.5 小结	314
9.2.3 直接序列扩频通信系统的		思考题与习题	314

参考文献	315	11.4 光时分复用	362
第 11 章 光波调制复用技术	316	11.5 小结	363
11.1 引言	316	思考题与习题	363
11.1.1 光波调制复用系统	316	参考文献	364
11.1.2 通信光纤	316	第 12 章 多址通信技术	365
11.1.3 光纤的分类	317	12.1 引言	365
11.1.4 光纤的传输特性	317	12.2 频分多址	366
11.2 光波调制解调技术	322	12.2.1 频分多址的基本原理	366
11.2.1 数字光发送机	322	12.2.2 频分多址的分配方式	366
11.2.2 数字光接收机	328	12.3 时分多址	367
11.2.3 光波调制解调的器件	330	12.3.1 时分多址的基本原理	367
11.3 光波复用解复用技术	338	12.3.2 时分多址的分配方式	368
11.3.1 WDM 的工作原理和系统		12.4 码分多址	369
基本结构	339	12.4.1 码分多址的基本原理	369
11.3.2 DWDM 技术	341	12.4.2 码分多址的分配方式	370
11.3.3 DWDM 的相关标准	343	12.5 空分多址与极分多址	370
11.3.4 DWDM 的关键技术及器件	344	12.6 混合多址	371
11.3.5 DWDM 系统的全光长距离		12.7 相关问题讨论	374
传输	349	12.7.1 多址与复用	374
11.3.6 WDM 系统的基本构成形式		12.7.2 载波侦听多址	375
	357	12.8 小结	376
11.3.7 DWDM 的组网应用方式和		思考题与习题	376
应用系统	358	参考文献	376

第1章 概述

本章首先讨论通信的一般原理，进而介绍数字通信系统的主要组成，在此基础上给出衡量通信质量的主要性能指标，使读者对通信的基本概念、术语以及本课程所要研究的主要对象有一个初步的了解。最后说明数字通信系统的优缺点及发展趋势。

1.1 通信的一般原理

通常把从一个地方向另一个地方进行信息的有效传输与交换称为通信。因此，克服距离上的障碍，迅速而有效地传输信息是通信的目的。我们将传输和交换信息所需的一切技术设备的总和称为通信系统。本书不研究交换技术，只研究传输技术，因此本书中所描述的通信系统的组成只包含传输设备，所讨论的通信技术只涉及传输技术。图 1-1 所示为具有普遍意义的通信系统的组成。

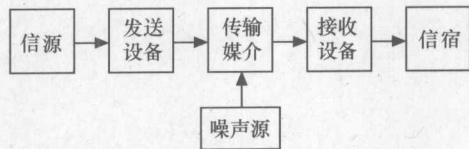


图 1-1 通信系统的基本组成框图

信源是发出信息的源。信息 (information) 表达着消息 (message)，消息中包含着信息。

在实际生活中，消息的表现形式是高度复杂的物理现象，例如人类的语言和文字、图像、声音，甚至于各种传感器的输出。但是通信系统中所说的信源，其输出均为电信号。这些电信号是上述物理现象经过相应的能量转换器件转换后得到的。例如，声音的物理表现形式是声波，而拾音器（话筒）则将声波转换成表现声音的电信号，称为音频信号；再如，摄像机将一系列静止的或活动的景物转换成表现图像的电信号，称为视频信号，也称图像信号。

信源既可以输出连续的模拟信号，也可以输出离散的数字信号。例如，拾音器和摄像机输出的是连续的模拟信号，计算机键盘输出的是离散的数字信号。

模拟信号的特点是表示信号的参量取值无限，即用无穷多的值表征信号的变化；数字信号的特点是表示信号的参量取值有限，即用有限个值表征信号的变化。

信宿是信息传输的归宿点。在信宿，所传输的电信号重新被变换为消息的原始物理形式输出。例如，喇叭将音频信号变换为声波输出。

发送设备的基本功能是将信源输出的信号与传输媒介匹配起来，即将信源产生的电信号变换为便于传送的信号形式，送往传输媒介。变换方式是多种多样的，包括信源编码、多路复用、保密处理、纠错编码、载波调制、变频和放大等。

传输媒介也叫信道。信道是指传输信号的通道，是从发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介，可以是无线的，也可以是有线的。有线信道又可以细分双绞线、同轴电缆、波导、光纤等多种介质，无线信道又可细分为长波、短波、微波等不同波段。

噪声源产生各种噪声和干扰。在发送设备、传输媒介和接收设备中，噪声无处不在。而干扰则主要来自传输媒介。噪声和干扰对信号的正确传输产生不利的影响，由于无线信道是开放式的，因此信号在无线信道传输时更易受到干扰的损害。为了描述和分析的方便，将噪声和干扰集中起来，

等效地在传输媒介中加入。

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换，即进行解调、纠错译码、解密、解复用、信源译码等。它的任务是从混有噪声和干扰的信号中正确恢复出发送的信号波形。

1.2 数字通信系统及主要组成

如前所述，数字信号的特点是用有限个值表征信号的变化。而数字通信系统就是实现数字信号有效而可靠传输的技术设备的总和。

电报、数据等数字信号可以在数字通信系统中传输，声音、图像等模拟信号经过模拟到数字的变换后也可以在数字通信系统中传输。

学习和研究数字通信理论和技术的目的，是在尽量节省资源（功率、频率、时间和设备成本）的条件下，优化数字通信系统，提高系统传输信息的有效性和可靠性。图 1-2 所示为数字通信系统的较为详细的组成。

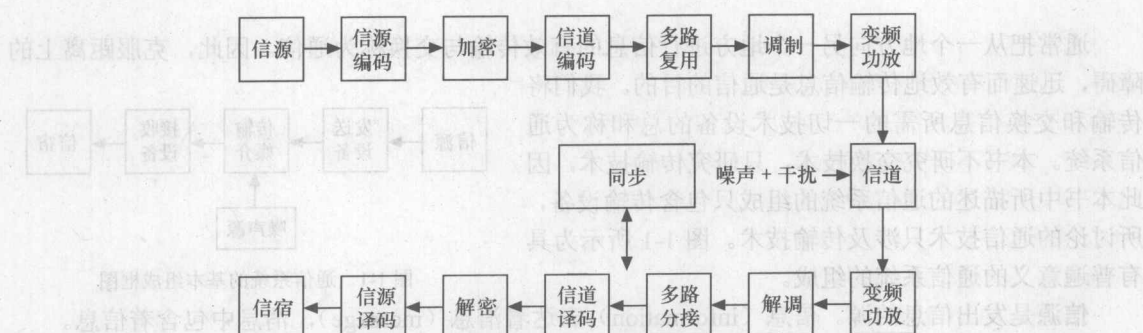


图 1-2 数字通信系统的组成

(1) 信源编码与信源译码

在数字通信系统中，信源编码的作用是将信源输出的（模拟的或数字的）信号变换为适合数字通信系统传输的数字信号，在变换过程中应尽量去除信号中的冗余，降低数字信号的速率，从而提高系统的传输效率，即实现数据压缩。信源译码是将信源编码器输出的信号恢复为信源编码器输入的信号。

(2) 加密与解密

数字信号比模拟信号易于加密，且效果也好。加密器的作用是产生密码，并人为地将输入的明文数字序列进行扰乱；解密器对接收到的数字序列进行解密，恢复明文。

(3) 信道编码与信道译码

数字信号在传输过程中，由于噪声、衰落以及人为干扰等的影响，会引起传输错误。信道编码的目的就是尽可能地减小错误概率。信道编码器通过适当地增加信号的冗余，对传输的原始信息按一定编码规则进行编码，信道译码器则根据已知的编码规则进行解码，看其编码规则是否遭到破坏，从而发现错误或纠正错误。因此信道编码技术也称为差错控制编码技术。

(4) 调制与解调

调制是利用载波调制技术把待传输的数字基带信号转换成适合于信道传输的波形。载波调制是利用数字基带信号对正弦波的某些参量进行控制，使载波的这些参量随数字基带信号的变化而变化。解调是调制的逆变换。

(5) 信道与噪声

信道既给传输的信号以通路,又给传输的信号以限制和影响。当数字信号通过信道时,信号的功率由于传输距离的增加而下降。噪声和干扰则会损害信号的传输质量。

(6) 同步

这是数字通信系统的接收端不可缺少的一个重要组成部分。它关系到能否正确接收。对于点对点通信系统,同步包括载波同步、位同步和帧同步。如果进一步考虑通信网,那么还要包括网同步。虽然上述各种同步都要在接收端实现,但发送端在设计信号的传输波形时要为接收端实现同步提供必要的条件。

综上所述,一个点对点的数字通信系统的工作过程如下。

(1) 发送端

信源输出的模拟信号或数字信号经过信源编码器变换为适合数字通信系统传输的数字信号,在变换的过程中尽量消除冗余,然后进行加密,加密后的信号送到信道编码器,有规律地增加冗余,接着进行载波调制,将数字信号变换为适合给定信道传输的波形,最后根据所分配的频段进行频谱搬移(上变频)和功率放大并送入传输媒介进行传输。

(2) 接收端

信号经过有线或无线的传输介质传输后,将被衰减、衰落以及受到噪声和干扰的污染,衰减对信号的影响是减小了信号的功率,衰落对信号的影响是导致信号的幅度、频率和相位产生失真。衰减、噪声及干扰必定存在,衰落是否发生,取决于传输媒介的特性以及接收端的移动性。对抗由衰落引起的接收质量问题可以采用均衡和分集技术解决,这些技术将在第7章和第8章中讨论。图1-2给出的是具有普遍意义的接收机原理框图,作用是将接收到的被衰减和被污染的信号复原。因此首先进行功率放大和滤波,然后是下变频,将信号的频谱恢复到发送端调制器输出的频段,以便解调器进行解调,去除载波,将信号恢复为基带数据信号,接下来对信号进行信道译码(检测/纠正错误的码元)、解密(将信号还原为明文)、信源译码,至此,信号被还原为信源输出的电信号,送入信宿。

1.3 数字通信系统的主要性能指标

衡量数字通信系统的主要性能指标是有效性和可靠性。

有效性: 在给定信道内能传输的信息内容的多少,用单位频带内的信息传输速率或码元传输速率衡量。

可靠性: 接收信息的正确程度,用码元传输的错误概率,即误码率衡量。

有效性和可靠性是相互矛盾而又相互联系的,通常两者也是可以互换的。

1.3.1 有效性

(1) 信息传输速率

信息传输速率表示单位时间(每秒)内传送信息的比特数,单位为 bit/s(比特/秒)。信息传输速率常常被简称为传信率或比特速率,用 R_b 表示。

(2) 码元传输速率

码元传输速率表示单位时间(每秒)内传输的码元(符号)数,单位为 Baud(波特)。码元传输速率常常被简称传码率或波特率,用 R_s 表示。

二进制传输时,码元传输速率和信息速率相等。 N 进制传输,码元传输速率和信息传输速率可以通过下述公式换算,即

$$R_b = R_s \log_2 N \quad (1-1)$$

(3) 频带利用率

频带利用率是单位频带内的传输速率，用 η 表示，它的定义式为

$$\eta = \frac{\text{码元传输速率}}{\text{频带宽度}} \quad \text{Baud/Hz} \quad (1-2)$$

对于二进制传输，若用 β 表示频带利用率，则计算式可表示为

$$\beta = \frac{\text{信息传输速率}}{\text{频带宽度}} \quad (\text{bit/s})/\text{Hz} \quad (1-3)$$

1.3.2 可靠性

在数字通信系统中，传输的错误概率是用古典概率定义的。

(1) 误比特率：在传输过程中发生错误的比特个数与传输的总比特数之比，用 P_b 表示，即

$$P_b = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\text{传输错误的比特数 } n}{\text{传输的总比特数 } N} \quad (1-4)$$

(2) 误码率：在传输过程中发生错误的码元数与传输的总码元数之比，用 P_s 表示，即

$$P_s = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\text{传输错误的码元数 } n}{\text{传输的总码元数 } N} \quad (1-5)$$

1.3.3 性能极限

根据 Shannon 的通信理论，任何一个通信系统，它的有效性与可靠性之间有一定的关系，并且任何一个通信系统的传输性能都有一个极限值。Shannon 定理表明：如果信源输出的信息速率小于或者等于一个所谓的信道容量 C ，那么在理论上就存在一种方法，可使信源输出的信息以任意小的差错率通过信道传输；反之，如果大于 C ，则没有任何办法传输这样的信息，或者说传输二进制信息的误比特率为 1/2。

信道容量 C 描述了信道的极限传输能力。Shannon 给出了它的计算公式

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad \text{bit/s} \quad (1-6)$$

它的另一个形式是

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (1-7)$$

式 (1-6) 和式 (1-7) 中， B 是信号占用的信道带宽， S 是信号功率， N 是噪声功率， n_0 是在带宽 B 内的噪声功率谱密度。从式 (1-7) 可知，在 B 一定的条件下， $n_0 = 0$ 或 $S = \infty$ ，均能使 $C = \infty$ 。 $n_0 = 0$ 意味着无噪声， $S = \infty$ 意味着发送功率达到无穷大。因此，当 B 一定时，若要提高信道容量 C ，则应减小噪声或者提高发射功率。

下面讨论带宽 B 对信道容量的影响。

(1) $B = 0$ ，则 $C = 0$ 。

(2) $B = \infty$ ，则

$$\begin{aligned} \lim_{B \rightarrow \infty} C &= \lim_{B \rightarrow \infty} \left[B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \right] \\ &= \frac{S}{n_0} \log_2 e \\ &= 1.44 \frac{S}{n_0} \end{aligned} \quad (1-8)$$

此时，能够获得信道容量的最大值为信号与噪声功率谱密度之比的 1.44 倍，这被称为信道容量极限。

如果某通信系统能实现 $R_b = C$ 的比特传输速率, 并且无传输错误, 那么就可以得到极限频带利用率, 其计算公式为

$$\frac{R_b}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/s})/\text{Hz} \quad (1-9)$$

(3) 带宽与信噪比的互换

由式(1-7)可知, 当信道容量 C 保持不变时, 带宽 B 与信噪比可以进行互换, 即增加信号的传输带宽可以节省发送功率, 反之增加发送功率则可以节省带宽。带宽和信号功率的互换, 通常可由信道编码技术、载波调制技术以及扩频技术来实现。

1.4 数字通信的特点

数字通信的起源可追溯到 19 世纪 50 年代发明的电报传输系统, 之后在 1937 年脉冲编码调制被提出, 在 20 世纪的后半叶, 数字通信技术发展迅猛, 大有替代模拟通信的趋势。

与模拟通信方式相比, 数字通信方式主要具有以下优点:

- (1) 可以通过信源编码技术消除冗余, 降低信源输出的数据速率;
- (2) 便于进行复杂的加密处理, 提高传输的安全性;
- (3) 可以通过增加冗余进行差错控制编码, 提高传输的可靠性;
- (4) 可以研究更多更有效的调制与解调方式, 使有效性与可靠性同时提高;
- (5) 可以采用中继的方式进行再生, 消除噪声积累;
- (6) 便于集成, 使设备小型化;
- (7) 便于利用计算机技术, 采用软硬件相结合的方式, 研制符合软件无线电概念的智能化通信设备;
- (8) 便于利用通信协议组网;
- (9) 便于实现多媒体通信。

1.5 小 结

随着通信技术的发展, 数字通信已经成为主要的信息传输方式。与此同时, 人们对通信系统的功能以及通信质量的要求也越来越高, 主要表现在以下方面:

- (1) 传输的信号种类多媒体化;
- (2) 传输速度越快越好;
- (3) 传输质量越高越好, 并具有抗干扰能力;
- (4) 随时随地都能进行通信, 并具有移动通信能力;
- (5) 组成多用户的通信网。

因此, 对于提高传输效率的信源编码技术、提高传输质量的信道编码技术、使信号与信道相匹配的数字载波调制技术、保证信号接收的同步技术、保证运动中通质量的均衡技术与分集技术, 可实现大容量传输的 SDH 技术以及光波调制复用技术、具有抗干扰能力的扩频通信技术、能够实现不同地址多个用户同时通信的多址通信技术, 本书将从先基础, 后实用的角度进行讲解和阐述。

本章的重点是引出数字通信系统的组成模型以及衡量数字通信系统优劣的性能指标。数字通信系统的各个组成部分的工作原理、关键技术和性能指标都被分散在后续的章节中一一介绍。

本书的每章都有练习题, 目的是加强概念的理解和掌握, 提高分析问题的技巧。读者应该做一些练习, 以检验自己的学习效果。

思考题与习题

1-1 画出“数字通信系统”组成框图并简述各组成部分的功能。

1-2 你认为数字通信系统的优点是什么？数字通信系统有缺点吗？

1-3 你认为数字通信技术的发展方向是什么？

1-4 一个二进制数字通信系统的码元速率为 2.048MBaud，连续传 2h 后，接收端收到的错误码元个数为 1 000 个，求误码率和误比特率。

1-5 一个 256 进制的数字通信系统，码元速率为 1.024kBaud，连续传 4h 后，接收端收到的错误码元个数为 10 个，求误码率和误比特率。如果该传输系统所需要的信道带宽与码元速率相等，请分别求出以 Baud/Hz 为单位的频带利用率和以(bit/s)/Hz 为单位的频带利用率。

1-6 已知电话信道的带宽为 3.4kHz，试求：

(1) 接收端信噪比 $S/N = 30\text{dB}$ 时的信道容量；

(2) 若要求该信道能传输 4 800bit/s 的数据，信道带宽是传输速率的两倍，则接收端要求最小信噪比 S/N 为多少 dB？

参 考 文 献

- (1) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (2) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (3) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (4) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (5) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (6) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (7) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (8) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- (9) 樊钟秀, 樊钟秀, 樊钟秀. 数字通信原理. 北京: 人民邮电出版社, 2002.

第 2 章 语音编码技术

2.1 引言

在通信系统中,信源输出的信号种类可分为声音、图像和数据。声音信号和图像信号是连续的模拟信号,必须经过信源编码器的处理使其成为数字信号后才能在数字通信系统中传输。由于声音信号和图像信号的特点不同,因此声音编码和图像编码技术有很大的差别。另外人的发声系统也使语音信号具有特殊的产生机理。鉴于语音信号的常见性和特殊性,本章专门讨论语音编码技术。

2.1.1 语音编码的方法

数字通信与模拟通信相比具有许多优点,因此,随着数字通信技术的发展,语音数字化编码技术也得以迅速发展。20 世纪 60 年代,CCITT 制定了第一个语音数字化编码标准,即 A 律或 μ 律 PCM 的 G.711 标准。但这一简单的编码方案没有对语音信号的冗余信息作任何处理,它产生的高比特率数据占用了巨大的信道带宽和存储空间。此后,研究开发了多种压缩编码技术,并形成了下述语音编码体系:一是以波形匹配为目标的波形编码,主要有脉冲编码调制类(PCM,ADPCM 等)、增量调制类(DM, CVSD 等)、频域编码类(SBC, TC 等);二是以追求解码语音的可懂度和清晰度为目标的参量编码,主要有二源激励的开环线性预测类(LPC 系列)、改进了激励源的开环线性预测类(MELP 系列);三是综合两者之优点的混合编码方式,这种编码方式的特点是不但改进了激励源,采用了合成分析技术,将简单的开环线性预测改进为闭环线性预测,而且增加了逼近语音波形的感觉加权滤波器,这类编码方式主要有脉冲激励闭环线性预测类(PE-LPC 系列)、码激励闭环线性预测类(CELP 系列)、混合激励闭环线性预测类(MELP 系列)等。上述分类并不是非常严格,只是在某种意义上的区分,不排除有交叉的情况。

2.1.2 语音编码的性能和标准

不同的编码方式有不同的质量。语音编码质量用质量评估指标衡量,分为以失真度衡量的客观指标和以听觉感知衡量的主观评价标准两大类。

国际上常用的主观评价标准主要有:主观评定等级(Subjective Opinion Scale)或称平均评价分(Mean Opinion Score, MOS)、诊断押韵测试(Diagnostic Rhyme Test, DRT)、诊断可接受度(Diagnostic Acceptability Measure, DAM)、可懂度指数(Articulation Index, AI)等。

客观评价可在时域和频域进行。时域方法有:信噪比、加权信噪比、平均分段信噪比等;频域方法有:谱失真测度、LPC 倒谱距离测度等。需要说明的是,以上方法都建立在度量均方误差的基础上,其特点是计算简单,但不能完全反映人对语音质量的感觉,对于速率为 16kbit/s 以下

的中低速率语音编码尤为突出，主要适用于速率较高的波形编码。

由于语音质量高低的直接感受者是听众的主观感觉，因此目前广泛采用的评定方法是 MOS。获取 MOS 的方法是，由数十名试听者在不同的信道环境中试听并给予评分，然后求出统计平均分。分数等级采用 5 级分制：5 分为优，4 分为良，3 分为中，2 分为差，1 分为不可接受。4 分以及 4 分以上为高质量语音编码，又称为“网络级质量”。3.5 分为“通信级质量”，此时听者能够感觉出语音质量有所下降，但不影响正常的电话通信。3 分以及 3 分以下为“合成级质量”，这种语音编码具有一定的可懂度，但自然度（即讲话人的特征）较差，以致于难以识别讲话人。

实际上，听者对语音质量的主观感觉与注意力的集中程度密切相关。因此，对应于主观评定等级，还有一个收听注意力等级（Listening Effort Scale）。表 2-1 列出了主观评定等级制的质量等级、平均评价分和相应的收听注意力等级。

表 2-1 主观评定等级

质量等级	平均评价分	收听注意力等级
优	5	可完全松弛，不需要注意力
良	4	需要注意，但不需要明显集中注意力
中（正常）	3	需要中等程度注意力
差	2	需要集中注意力
劣	1	即使努力去听，也很难听懂

主观评价的其他标准能给出质量的不同意义，如 DRT 能给出字的可懂度，DAM 则可给出言的可接受度。

表 2-2 给出了几种语音编码的质量比较。表 2-2 显示，不同的编码方式具有不同的比特传输速率。比特传输速率越低，所需要的信道带宽就越小。选用较低速率的语音编码方式是节省频率资源和功率资源的有效方法。值得注意的是：当编码速率低到一定程度时，语音质量将明显下降，恶化程度与编码方式有关。图 2-1 所示为语音质量与比特速率以及编码方式的关系。

表 2-2 几种语音编码标准的质量比较

编码速率(kbit/s)	64	32	16	13	8	4.8	2.4	3.6	8, 6.4	6.6~23.85
标准制定年代	1972	1986	1992	1988	1989	1989	1975	1994	1995~2002	2001~2002
标准制定组织	CCITT	CCITT	CCITT	GSM	CTIA	NSA	NSA	海事卫星	ITU	ITU&3GPP
标准名称	G.711	G.721	G.728	GSM	IS-54	FS-1016	FS-1015	INMARSAT-ICO	G.729	G.722-2
编码方法	压缩 PCM	ADPCM	LD-CELP	RPE-LTP	VSELP	CELP	LPC-10c	AMBE	CS-ACELP	ACELP
语音质量	MOS	4.3	4.1	4.0	3.8	3.7	3.0 ⁺	2.5 [*]	4.0 ⁻	4.0 ⁺
	DRT	95	94	94 [*]	93 ⁺		93 ⁻	90		
	DAM	73	68	70 [*]	68 [*]		67 ⁻	54		
主要用途	通信网			移动通信，语音邮件		保密电话，移动通信			IP phone, H.323 系统	GSM, WCDMA, VoIP, IP, PSTN, ISDN, 会议电话

注：

CTIA—Cellular Technology Industry Association

NSA—National Security Agency

*——估计值，———上界，+——下界

编码速率越低，则语音编码的压缩比越大，运算的复杂程度也越大，但是延时却不能增加，否则将无法满语音通信的实时性要求。20 世纪 80 年代以后，随着 VLSI 技术的发展，专用高速 DSP 芯片的产生，特别是通用 DSP 处理器指令效率和运算速度的不断提高，使压缩编码算法的实时处理成为可能。高速 DSP 器件的发展，推动了压缩编码技术的应用进一步发展。

语音编码技术在数字通信系统中相当关键。高质量低速率的语音编码技术与高效率的数字调制技术相结合，能够不断地挖掘数字通信系统的容量，例如带宽较窄的数字移动通信系统的容量