

❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖


通信原理简明教程

CONCISE COURSE
OF COMMUNICATION PRINCIPLES



黄葆华 沈忠良 张伟明 编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书赠送电子教案
www.cmpedu.com

普通高等教育电子信息类规划教材

通信原理简明教程

黄葆华 沈忠良 张伟明 编著



NLIC2970801777



机械工业出版社

本书以现代通信系统组成为主线，以预备知识为基础，系统阐述了通信原理的核心内容。全书共8章，内容分别是绪论、预备知识、模拟调制、数字基带传输、数字调制、模拟信号的数字传输、信道编码和同步原理。

本书内容精炼，条理清晰，通俗易懂，图文并茂，例题丰富，并附有电子教案和较为详细的习题参考答案，便于自学和组织教学，可从机械工业出版社教材网（www.cmpedu.com）下载。

本书突出基本概念、基本原理和基本方法，弱化数学推导，注重实际应用。可作为电子与通信类相关专业本科生和大专生以及非通信类专业研究生等层次学生的教材，还可作为相关科技人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

通信原理简明教程/黄葆华等编著. —北京：
机械工业出版社，2012.5
普通高等教育电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-37784-9

I. ①通… II. ①黄… 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（2012）第 049001 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：李馨馨 责任编辑：李馨馨 张博

版式设计：刘岚 责任校对：肖琳

封面设计：鞠杨 责任印制：乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm 13.5印张·332千字

0001—3000册

标准书号：ISBN 978-7-111-37784-9

定价：29.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

“通信原理”是通信工程、信息工程、电子信息工程专业的一门主干课程,它以“高等数学”、“概率论和数理统计”、“高低频电子线路”、“信号与系统”、“数字逻辑电路”等课程为基础,是进一步学习各种类型的通信、信息系统不可缺少的专业基础课。随着现代通信技术的快速发展和深入,越来越多的院校和专业开设了“通信原理”课程。为满足应用型院校电子与通信类专业本科生和大专生,以及计算机网络等非通信专业的本科生和研究生的教学需求,我们编写了本书。

本书在编写过程中参考了大量国内外经典教材,并努力反映通信理论和技术的新发展,融入了作者多年教学实践积累的心得和学术研究成果,其具有以下特点:

1. 内容精炼。本书紧扣通信原理核心内容选材,摒弃了一些陈旧内容,弱化了数学推导,突出对物理概念和基本原理的理解,注重实际应用,在较短篇幅内使内容具有系统性、完整性和先进性。

2. 结构紧凑。本书对通信原理基本内容进行整合,按照预备知识、模拟通信系统、数字通信系统中的各模块功能有序展开,在通信系统整体框架下研究局部模块的功能和原理,使教学内容循序渐进,脉络清晰,增强了逻辑性和可读性,适于较少学时数的教学。

3. 论述简明。本书阐述问题深入浅出,通俗易懂,图文并茂。

4. 例题丰富。本书为每个主要知识点都设置了例题,针对性强,便于学生对抽象概念和原理的理解,同时在附录中给出了部分习题的参考答案,便于读者自学。

本书共8章,内容分别是绪论、预备知识、模拟调制、数字基带传输、数字调制、模拟信号的数字传输、信道编码和同步原理。

第1章绪论,重点介绍了通信的基本概念、通信系统的组成及性能指标,使读者对通信系统建立总体认识。

第2章预备知识,有针对性地复习了通信原理核心内容涉及的数学和专业基础知识,这章内容可集中复习,也可以根据需要进行分散复习。

第3章模拟调制,主要介绍了各种模拟调制的原理和性能、频分复用技术及其应用实例。

第4章数字基带传输,围绕数字基带传输系统框图,介绍了数字基带系统码型和功率谱、数字基带系统码间干扰及消除的方法、误码率、眼图和均衡技术。

第5章数字调制,着重讨论了各种二进制调制解调原理和性能,并对其他常用数字调制技术进行简要介绍。

第6章模拟信号的数字传输,介绍了模拟信号数字化的基本原理,重点讨论了脉冲编码调制和增量调制,简要介绍了其他语音编码技术,讨论了时分复用原理并给出了其应用实例。

第7章信道编码,主要介绍了信道编码的基本概念,讨论了常用纠检错码的编译码原



理, 简要介绍了其他一些常用编译码技术, 最后介绍了 m 序列及扰码技术。

第 8 章同步原理, 阐述通信系统中所涉及的各种同步的基本概念及实现原理。

本书主要由黄葆华编写, 沈忠良、张伟明参加了 1~3 章和习题解答的编写, 并参与了目录的制作工作, 全书由黄葆华统编。在编写过程中也得到了课程组其他同事的关心和帮助, 在此一并表示衷心的感谢。本书在编写过程中参考了许多资料, 在此也向这些参考资料的作者表示感谢。

由于编者水平有限, 书中难免有错漏之处, 敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言	1
第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统的组成	1
1.1.1 通信系统的模型及各部分的作用	1
1.1.2 模拟与数字通信系统模型	2
1.2 信息及其度量	5
1.2.1 信息量的定义	5
1.2.2 信源熵的概念	6
1.3 通信系统的性能指标	7
1.3.1 模拟通信系统的性能指标	7
1.3.2 数字通信系统的性能指标	8
1.4 通信发展简史	10
1.5 思考题与习题	11
第 2 章 预备知识	12
2.1 信号与系统的分类	12
2.1.1 信号的分类	12
2.1.2 系统的分类	13
2.2 确知信号分析	14
2.2.1 周期信号的频谱分析	14
2.2.2 非周期信号的频谱分析	15
2.2.3 帕塞瓦尔定理及谱密度	20
2.2.4 波形的相关与卷积	22
2.2.5 信号带宽	24
2.3 随机信号分析	25
2.3.1 随机变量	25
2.3.2 随机过程	30
2.3.3 平稳随机过程	31
2.4 通信系统中的噪声	36
2.4.1 噪声分类	36
2.4.2 窄带高斯噪声	38
2.5 匹配滤波器	39
2.5.1 匹配滤波器的传输特性	39
2.5.2 匹配滤波器的冲激响应	40

2.5.3	匹配滤波器的输出	41
2.6	信道	43
2.6.1	信道实例介绍	43
2.6.2	信道分类	47
2.6.3	信道容量	48
2.7	思考题与习题	49
第3章	模拟调制	52
3.1	振幅调制	52
3.1.1	完全调幅	53
3.1.2	抑制载波双边带调制	57
3.1.3	单边带调制	59
3.1.4	残留边带调制	62
3.2	角度调制	63
3.2.1	角度调制的基本概念	64
3.2.2	窄带调频与宽带调频	65
3.2.3	调频信号的产生	68
3.2.4	调频信号的解调	69
3.3	频分复用	71
3.3.1	频分复用原理	71
3.3.2	频分复用应用实例	72
3.4	思考题与习题	74
第4章	数字基带传输	76
4.1	数字基带信号的码型和波形	77
4.1.1	数字基带信号的码型	77
4.1.2	数字基带信号的波形	80
4.2	数字基带信号的功率谱分析	80
4.3	数字基带传输系统及码间干扰	83
4.3.1	数字基带传输系统	83
4.3.2	数字基带传输系统的码间干扰	84
4.3.3	无码间干扰传输波形	84
4.3.4	无码间干扰传输特性	86
4.4	无码间干扰时噪声对传输性能的影响	90
4.4.1	二进制数字基带传输系统的误码率	90
4.4.2	多进制数字基带传输系统的误码率	93
4.5	眼图	95
4.6	均衡	96
4.6.1	时域均衡原理	96
4.6.2	均衡器抽头系数的确定	98
4.7	思考题与习题	99

第 5 章 数字调制	102
5.1 二进制数字振幅调制	102
5.1.1 2ASK 调制原理	102
5.1.2 2ASK 信号的解调原理	104
5.2 二进制数字频率调制	108
5.2.1 2FSK 调制原理	108
5.2.2 2FSK 信号的解调原理	109
5.3 二进制数字相位调制	111
5.3.1 二进制绝对相移键控	111
5.3.2 二进制差分相移键控	114
5.4 二进制数字调制技术的性能比较	118
5.5 多进制数字调制	120
5.5.1 多进制幅移键控	120
5.5.2 多进制频移键控	122
5.5.3 多进制绝对相移键控	123
5.5.4 多进制差分相移键控	125
5.6 其他调制技术介绍	127
5.6.1 多进制正交幅度调制	127
5.6.2 最小频移键控	128
5.6.3 高斯最小频移键控	129
5.6.4 多载波调制和 OFDM	129
5.7 思考题与习题	131
第 6 章 模拟信号的数字传输	134
6.1 脉冲编码调制	134
6.1.1 取样及取样定理	135
6.1.2 量化	136
6.1.3 编码	141
6.1.4 PCM 系统的误码噪声	144
6.2 增量调制	145
6.2.1 ΔM 编译码原理	145
6.2.2 ΔM 系统中的噪声	146
6.2.3 自适应增量调制	148
6.2.4 PCM 与 ΔM 性能比较	148
6.2.5 其他语音编码技术简介	150
6.3 时分复用	151
6.3.1 时分复用原理	151
6.3.2 时分复用应用实例	154
6.4 思考题与习题	154



第7章 信道编码	157
7.1 信道编码的基本概念	157
7.1.1 信道编码的检错、纠错原理	157
7.1.2 码长、码重、码距和编码效率	158
7.1.3 最小码距离 d_0 与码的纠、检错能力之间的关系	159
7.1.4 信道编码的分类	160
7.1.5 差错控制方式	161
7.2 常用检错码	161
7.2.1 奇偶监督码	161
7.2.2 行列奇偶监督码	162
7.2.3 恒比码	163
7.3 线性分组码	163
7.3.1 线性分组码的特点	163
7.3.2 线性分组码的编码	164
7.3.3 线性分组码的译码	167
7.4 其他常用纠错码介绍	170
7.4.1 循环码	170
7.4.2 卷积码	171
7.4.3 交织码	173
7.4.4 级联码	173
7.5 m 序列及其应用	174
7.5.1 m 序列的产生	174
7.5.2 m 序列的性质	175
7.5.3 m 序列的应用	176
7.6 思考题与习题	178
第8章 同步原理	180
8.1 载波同步	180
8.1.1 直接法	181
8.1.2 插入导频法	183
8.1.3 载波同步系统的性能指标	183
8.2 位同步	184
8.2.1 直接法	184
8.2.2 位同步系统主要性能指标	186
8.3 群同步	187
8.3.1 起止式同步法	188
8.3.2 连贯式插入法	188
8.3.3 间隙式插入法	191
8.3.4 群同步系统的性能指标	191
8.4 思考题与习题	193



附录

附录 A	误差函数及互补误差函数.....	195
附录 B	常用的三角公式	196
附录 C	常用的积分及级数公式	196
附录 D	各章部分习题参考答案	197
参考文献	206

第 1 章 绪 论

通俗地说，通信就是信息的传递。从这个意义上说，自从有了人类社会，也就有了通信。原始的手语、古代的烽火台、鸣金击鼓，以及近现代的信函、电报、电话、传真、电视等，都属于通信的范畴。但是，本教材中研究的通信是指电通信，也就是以电信号（包括光信号，因为光也是一种电磁波）作为信息载体的通信方式，如电报、电话、传真和广播电视等。

本章主要介绍通信系统的组成与分类、模拟通信与数字通信，以及通信系统的主要性能指标。目的是使读者对通信和通信系统有一个初步的了解和认识。

1.1 通信系统的组成

1.1.1 通信系统的模型及各部分的作用

实现信息传递所需的一切通信设备和传输媒介组成了一个通信系统。通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

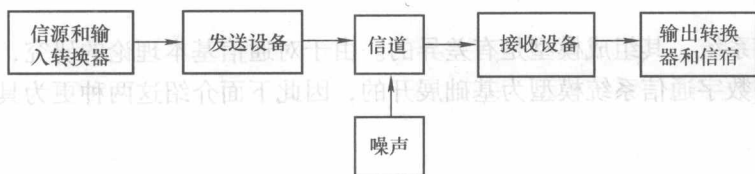


图 1-1 通信系统的一般模型

1. 信源和输入转换器

信源是信息的来源。信源产生的信息分为离散信息和连续信息两种。若信息的状态是可数的或离散型的，如符号、文字或数据等，则称为离散信息。若信息的状态是连续变化的，如强弱连续变化的语音、亮度连续变化的图像等，则称为连续信息。输入转换器的作用是将信源输出的信息转换成电信号，完成非电量到电量的变换。例如，电话机的受话器完成声-电转换（声音转换为音频信号）、摄像机完成光-电转换（图像转换为视频信号）、计算机键盘完成键盘符号到“1”、“0”信号的转换等。通常将信源与输入转换器合称为信源，信源输出电信号，以下简称为信号。

2. 发送设备

发送设备对信源产生的信号进行各种加工处理和变换，使它适合在信道中传输。不同通信系统中，发送设备对信源输出信号的处理方式是不同的，所以发送设备所包含的部件也是不同的。但不管进行什么样的处理，目的只有一个，即使信源输出的信号适合在信道上传输。



3. 信道和噪声

信道是指信号传输的通道。目前常用的信道有双绞线、电缆、光纤等有线信道和短波电离层反射信道、微波视距中继信道、卫星中继信道、陆地移动信道等无线信道。

噪声来源于多个方面,如通信设备内部由于电子作不规则运动而产生的热噪声、雷电及宇宙辐射产生的干扰、邻近通信系统带来的干扰、各种电器开关通断时产生的短促脉冲干扰等。一般来说,噪声主要来自于信道,为了分析方便,将系统中的各种噪声抽象为一个噪声源并集中在信道上加入。

4. 接收设备

接收设备的主要作用是从接收到的混有噪声的信号中,最大限度地抑制噪声,恢复出原始信号。

5. 输出转换器和信宿

输出转换器的功能与输入转换器的功能相反,完成电量到非电量的变换,即将电信号转换成受信者能够识别的信号,如扬声器进行电-声转换,显示屏完成电-光转换等。信宿是信息的接收者,通常将输出转换器与信宿合称为信宿,是信号传输的目的地。

图 1-1 概括地描述了通信系统的组成,它反映了通信系统的共性,通常把它称为通信系统的基本模型。在今后的学习和工作中,我们会碰到各种各样具体的通信系统。例如:

- ① 根据通信业务的不同,有电话通信系统、电报通信系统、图像通信系统、传真通信系统、广播电视系统等。
- ② 按信道的不同,可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。
- ③ 按工作波段的不同,可分为中长波通信系统、短波通信系统、超短波通信系统、微波通信系统等。

不同的通信系统,其组成模型是有差异的。由于对通信基本理论的研究,通常是以模拟通信系统模型和数字通信系统模型为基础展开的,因此下面介绍这两种更为具体的通信系统模型。

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1. 模拟信号与数字信号

信息通常寄托在电信号的某一个或几个参量上(如连续波的幅度、频率或相位;脉冲的幅度、宽度或位置等)。若携带信息的电信号参量的取值是连续的,即电信号携带的是连续信息,则这样的电信号称为模拟信号。反之,若携带信息的电信号参量的取值是离散的,即电信号携带的是离散信息,则此电信号称为数字信号。

由此可见,时间离散信号不一定是数字信号,而时间连续信号也不一定是模拟信号,关键是看携带信息的电信号参量是连续的还是离散的。

例如如图 1-2b 中的 $f(nT)$ 是对图 1-2a 中的连续信号 $f(t)$ 进行取样而得到的 PAM (脉冲幅度调制) 信号, $f(nT)$ 是时间离散信号,但其携带信息的参量(幅度)的取值仍是连续的,所以 $f(nT)$ 仍然是模拟信号。

再如图 1-3 所示的 2PSK (二进制相移键控) 信号, 时间上是连续的, 但代表信息的相位只取 0 和 π 二值, 是离散的, 所以是数字信号。

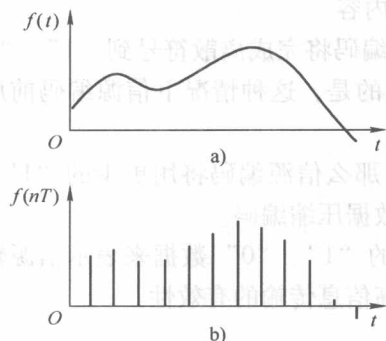


图 1-2 连续信号与 PAM 信号

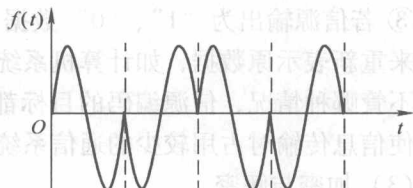


图 1-3 2PSK 信号

2. 模拟通信系统模型

常用的模拟通信系统包括中波/短波无线电广播、调频立体声广播等通信系统, 其组成模型如图 1-4 所示。

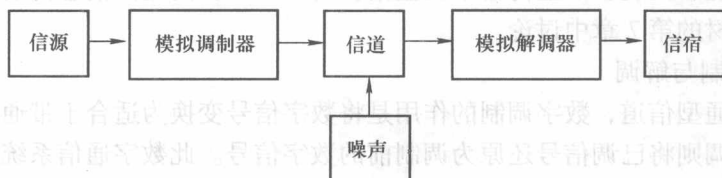


图 1-4 模拟通信系统模型

在模拟通信系统中, 信源输出模拟信号, 模拟信号需经过模拟调制转换成适合于信道传输的信号后送入信道, 相应地, 接收端对接收信号进行模拟解调, 恢复出发送端发送的信号, 送给信宿。需要注意的是, 发送和接收装置还应包括放大、滤波等, 这里都简化到了模拟调制解调器中。模拟调制与解调将在本教材的第 3 章中讨论。

3. 数字通信系统模型

数字通信系统的模型如图 1-5 所示。

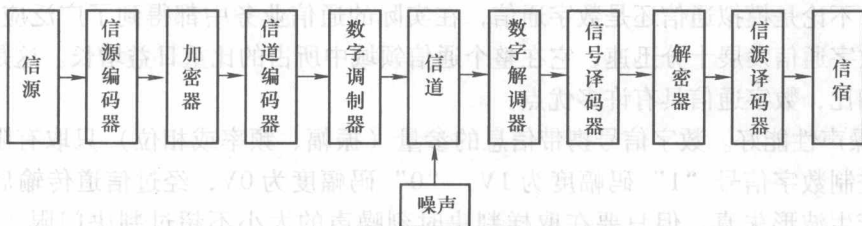


图 1-5 数字通信系统模型

(1) 信源

信源输出既可以是模拟信号, 也可以是数字信号。

(2) 信源编码与译码



信源编码的作用是用“1”、“0”码来表示信源输出的信号。有以下几种情况:

① 若信源输出模拟信号,如语音信号,那么信源编码将完成模拟信号到数字信号的转换,即模-数(A/D)转换,本教材第6章将讨论这一内容。

② 若信源输出离散信号,如键盘符号,那么信源编码将完成离散符号到“1”、“0”码组的映射,如ASCII编码、Huffman编码等。需要注意的是,这种情况下信源编码前后均为数字信号,只是形式不同而已。

③ 若信源输出为“1”、“0”数据,如数据文件,那么信源编码将用更少的“1”、“0”数据来重新表示原数据,如计算机系统中使用的各种数据压缩编码。

不管哪种情况,信源编码的目标都是用尽可能少的“1”、“0”数据来表示信源输出信号,使信息传输时占用较少的通信系统资源,从而提高信息传输的有效性。

(3) 加密与解密

加密是按一定的规则改变原有信息,解密时再将其还原。通过加密和解密能够提高信息传输的安全性。需要加密的通信系统才需要加(解)密器。

(4) 信道编码与译码

信道编码也称为纠错编码。它将需要传输的数字信号按照一定的规律加入冗余码元,以便使信道译码器能够发现和纠正传输中发生错误的码元,从而提高信息传输的可靠性。这部分内容将在本教材的第7章中讨论。

(5) 数字调制与解调

若信道是带通型信道,数字调制的作用是将数字信号变换为适合于带通型信道传输的已调信号,数字解调则将已调信号还原为调制前的数字信号。此数字通信系统也称为数字频带系统。

若信道是低通型的,则不需要数字调制与解调,代替它们的是码型及波形变换等部件,此时的数字通信系统称为数字基带系统。

数字通信系统是本课程一个十分重要的内容,本教材的第4、5章将分别讨论数字基带系统和数字频带系统。

为实现数字信息的正确传输,收、发双方需步调一致,因此数字通信系统还有一个必不可少的组成部分,即同步系统。同步系统的实现原理、方法等将在第8章讨论。

4. 数字通信的优缺点

目前,不论是模拟通信还是数字通信,在实际的通信业务中都得到了广泛应用。不过,近年来,数字通信发展十分迅速,它在整个通信领域中所占的比重日益增长。这是因为,与模拟通信相比,数字通信具有许多优点:

① 抗噪声性能好。数字信号携带信息的参量(振幅、频率或相位)只取有限个值,如单极性二进制数字信号“1”码幅度为1V,“0”码幅度为0V,经过信道传输后叠加有噪声,从而产生波形失真,但只要在取样判决时刻噪声的大小不超过判决门限 V_d (这里为0.5V),就能正确恢复发送的“1”、“0”码元,从而可彻底消除噪声的影响,如图1-6所示,图中纵向虚线所示为取样判决时刻。

② 中继通信时无噪声积累。数字信号的中继通信原理框图如图1-7所示,设信源发出二进制数字信号,经信道传输后,会有噪声叠加在它上面,当噪声还不太大(不影响判决的正确性)时,再生器对混有噪声的信号进行取样判决,消除噪声的影响,恢复出发送的

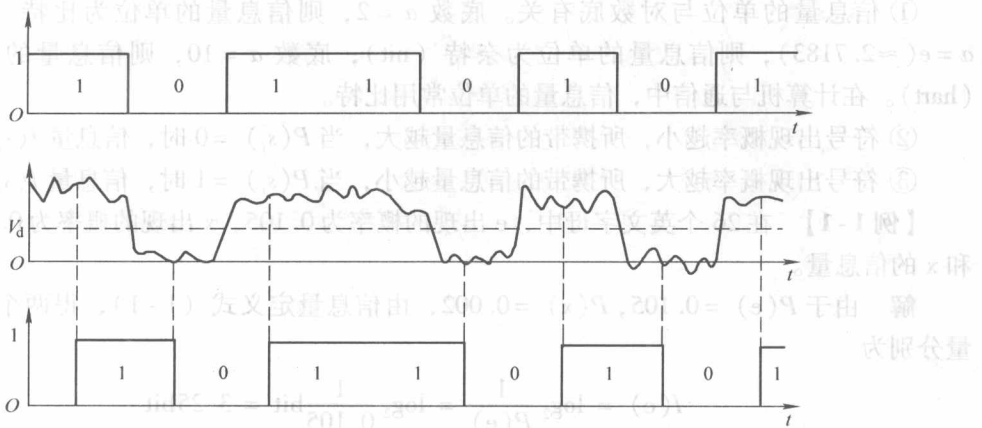


图 1-6

二进制数字信号。可见，再生器在再生过程中只要不发生错码，它输出的信号和信息源发出的信号是一样的。因此，远距离通信时，只要在适当距离上设置中继站，就不会因为通信距离的增加而使通信质量下降。



图 1-7 中继通信原理框图

- ③ 差错可控。数字通信中可以采用纠错编码技术来降低接收信息的错误概率。
- ④ 数字通信易于加密处理，保密性强。
- ⑤ 易于实现综合业务。即可以将语音、图像、文字、数据等多种信号变换成统一的数字信号在同一个网络中进行传输、交换和处理。
- ⑥ 数字通信系统易于集成，使通信设备体积小，成本低。

数字通信的主要缺点是它所占用的系统带宽要比模拟通信宽。以电话为例，一路模拟电话通常占用 4kHz 带宽，但一路数字电话可能要占用 20 ~ 60kHz 的带宽。但随着数据压缩技术的发展和宽带信道（卫星、光纤）的广泛应用，此缺点带来的影响越来越小。另外，数字通信系统涉及较多的同步问题，因而系统设备较复杂。

1.2 信息及其度量

1.2.1 信息量的定义

根据香农信息理论，信息是可以度量的。每个符号携带的信息量与符号的出现概率有关，若符号 s_i 的出现概率为 $P(s_i)$ ，则符号 s_i 携带的信息量定义为

$$I(s_i) = \log_a \frac{1}{P(s_i)} = -\log_a P(s_i) \quad (1-1)$$

几点说明：



① 信息量的单位与对数底有关。底数 $a = 2$ ，则信息量的单位为比特 (bit)；底数 $a = e (\approx 2.7183)$ ，则信息量的单位为奈特 (nit)；底数 $a = 10$ ，则信息量的单位为哈特 (hart)。在计算机与通信中，信息量的单位常用比特。

② 符号出现概率越小，所携带的信息量越大，当 $P(s_i) = 0$ 时，信息量 $I(s_i) = \infty$ 。

③ 符号出现概率越大，所携带的信息量越小，当 $P(s_i) = 1$ 时，信息量 $I(s_i) = 0$ 。

【例 1-1】 在 26 个英文字母中，e 出现的概率为 0.105，x 出现的概率为 0.002，试求 e 和 x 的信息量。

解 由于 $P(e) = 0.105$ ， $P(x) = 0.002$ ，由信息量定义式 (1-1)，得两个字母的信息量分别为

$$I(e) = \log_2 \frac{1}{P(e)} = \log_2 \frac{1}{0.105} \text{bit} = 3.25 \text{bit}$$

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 \frac{1}{0.002} \text{bit} = 8.97 \text{bit}$$

【例 1-2】 设有一个离散信源，输出 4 种不同的符号，已知符号 s_1 出现的概率为 0.5，符号 s_2 出现的概率为 0.25，其余两种符号 s_3 、 s_4 等概出现，求信源每种符号携带的信息量。

解 由题意及信息量定义式 (1-1) 得

$$P(s_1) = 0.5, \text{ 则 } I(s_1) = \log_2 \frac{1}{0.5} \text{bit} = 1 \text{bit}$$

$$P(s_2) = 0.25, \text{ 则 } I(s_2) = \log_2 \frac{1}{0.25} \text{bit} = 2 \text{bit}$$

$$P(s_3) = 0.125, \text{ 则 } I(s_3) = \log_2 \frac{1}{0.125} \text{bit} = 3 \text{bit}$$

$$P(s_4) = 0.125, \text{ 则 } I(s_4) = \log_2 \frac{1}{0.125} \text{bit} = 3 \text{bit}$$

1.2.2 信源熵的概念

设信源输出 M 种离散符号 s_1, s_2, \dots, s_M ，每种符号的出现概率是相互独立的，第 i 种符号 s_i 出现的概率为 $P(s_i)$ ，且 $\sum_{i=1}^M P(s_i) = 1$ ，则信源每个符号的平均信息量为

$$H(S) = \sum_{i=1}^M P(s_i) I(s_i) = - \sum_{i=1}^M P(s_i) \log_2 P(s_i) \quad (1-2)$$

其单位为比特/符号 (bit/sym)。由于 $H(S)$ 同热力学中熵的定义式相似，因此又称它为信源熵 (Entropy)。

可以证明，当信源的 M 种符号等概出现时，该信源每个符号的平均信息量最大，即信源熵有最大值，可表示为

$$H_{\max}(S) = \sum_{i=1}^M P(s_i) I(s_i) = \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} \log_2 M = \log_2 M \quad (1-3)$$

【例 1-3】 某离散信源由 0、1、2、3 四种符号组成，且各符号独立出现。

(1) 若符号“0”、“1”、“2”、“3”的出现概率分别为 1/2、1/4、1/8、1/8，求该信源

每个符号的平均信息量。

- (2) 求符号序列 1020 0100 0130 0130 0120 3210 1003 0101 0023 1000 0201 0310 0321 0012 0010 的信息量。
- (3) 若 4 种符号等概出现, 则信源熵为多少?

解 (1) 由式 (1-2) 求得信源每个符号的平均信息量为

$$\begin{aligned} H(S) &= \sum_{i=1}^M P(s_i) I(s_i) \\ &= \left(\frac{1}{2} \log_2 2 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{8} \log_2 8 + \frac{1}{8} \log_2 8 \right) \text{bit/sym} \\ &= 1.75 \text{bit/sym} \end{aligned}$$

(2) 此符号序列中, 符号“0”出现 31 次, 符号“1”出现 15 次, 符号“2”出现 7 次, 符号“3”出现 7 次, 共有 60 个符号, 故该符号序列的信息量为

$$\begin{aligned} I &= 31I(0) + 15I(1) + 7I(2) + 7I(3) \\ &= (31 \log_2 2 + 15 \log_2 4 + 7 \log_2 8 + 7 \log_2 8) \text{bit} \\ &= 103 \text{bit} \end{aligned}$$

也可用每个符号的平均信息量来求。由 (1) 得每个符号的平均信息量为 $H(S) = 1.75 \text{bit/sym}$, 故 60 个符号的总信息量为

$$I = 60H(S) = (60 \times 1.75) \text{bit} = 105 \text{bit}$$

可见, 两种算法的结果有一定误差, 但当符号序列很长时, 用平均信息量来计算比较方便, 而且随着符号序列长度的增加, 两种计算误差将趋于零。

- (3) 当 4 种符号等概时, 每个符号携带相同的信息量, 信源熵达最大值, 即

$$H_{\max}(S) = \log_2 M = \log_2 4 \text{bit/sym} = 2 \text{bit/sym}$$

1.3 通信系统的性能指标

性能指标也称质量指标, 用来衡量系统性能的优劣。通信系统的性能指标涉及有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及易维护使用性等。尽管对通信系统可有名目繁多的实际要求, 但是, 从研究信息传输的角度来说, 有效性与可靠性是通信系统主要的性能指标。其中有效性是指信息传输的“速度”, 而可靠性是指信息传输的“质量”。

对于模拟通信系统和数字通信系统, 衡量有效性和可靠性的具体指标是不同的。

1.3.1 模拟通信系统的性能指标

1. 有效性

模拟通信系统的有效性通常用每路信号所占用的信道带宽来衡量。这是因为, 当信道的带宽给定后, 每路信号占用的带宽越窄, 信道内允许同时传送的信号路数越多, 这种系统的传输有效性就越好。如传输一路模拟电话, 单边带信号只需要 4kHz 带宽, 而双边带信号则需要 8kHz 带宽。显然, 单边带系统比双边带系统具有更高的有效性。

2. 可靠性

模拟通信系统的传输可靠性通常用通信系统的输出信噪比来衡量, 输出信噪比定义为输