

21世纪

高等学校通信类系列教材

通信原理学习指导

□ 张辉 曹丽娜 编著



西安电子科技大学出版社

[http:// www.xduph. com](http://www.xduph.com)

★ 21 世纪高等学校通信类系列教材

通信原理学习指导

张辉 曹丽娜 编著

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书以张辉教授等主编的,由西安电子科技大学出版社2002年1月出版的《现代通信原理与技术》教材为主要参考书,同时参考了其它教材。本书涵盖了本科生“通信原理”课程考试和硕士研究生“通信原理”课程入学考试的内容。每章由大纲要求、内容提要 and 习题解答三部分组成。大纲要求给出了本科生教学中每章所应掌握的重点内容;内容提要总结性地给出了每章的复习要点;习题解答对《现代通信原理与技术》教材的课后习题作了详尽解答。

本书可以作为本科生的课程学习辅导书和报考硕士研究生的复习指导书,还可以作为有关教师的教学参考书。

21 世纪高等学校通信类系列教材

通信原理学习指导

张辉 曹丽娜 编著

策 划 马乐惠

责任编辑 杨宗周

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)8242885 8201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2003年5月第1版 2003年10月第2次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17.5

字 数 414千字

印 数 4 001~10 000册

定 价 18.00元

ISBN 7-5606-1107-9/TN·0197

XDUP 1378A01-2

* * * 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

“通信原理”课程是通信与信息系统专业本科生的重要课程，也是该专业硕士研究生入学考试课程之一。该课程对学生在通信与信息系统领域的基础知识和独立工作能力有较高的要求。

本书以张辉教授等主编的，西安电子科技大学出版社 2002 年 1 月出版的《现代通信原理与技术》教材为主要参考书，同时参考了其它教材。全书共分 12 章：绪论、随机过程、信道与噪声、模拟调制系统、数字基带传输系统、模拟信号的数字传输、数字频带传输系统、数字信号的最佳接收、现代数字调制解调技术、复用和数字复接技术、同步原理、差错控制编码。每章由大纲要求、内容提要、习题解答三部分组成。全书涵盖了本科生“通信原理”课程考试和硕士研究生“通信原理”课程入学考试的内容。最后选编了西安电子科技大学通信与信息系统专业“通信原理”课程近几年的硕士研究生入学考试试题和本科生模拟考试试题。

本书由西安电子科技大学张辉教授、曹丽娜副教授合作编著。曹丽娜编写了其中第 1、2、3、4、5、11 章。张辉编写了其中第 6、7、8、9、10、12 章。张辉教授任主编，负责全书的统稿与定稿。王勇、李乐亭、景宾、曾吉全、张宏志、李永峰、张爱兵、陈小鹏、陈鹏、张岩、师文惠、牛晨曦、温小洁等同志为本书做了大量的工作，在此致以诚挚的谢意。对本书选用的参考文献的著作者，我们表示真诚的感谢。

在编写时我们力求文字通俗易懂，基本概念明确，内容重点突出，满足读者复习的需要。由于作者水平有限，编写时间仓促，各种错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2003 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 大纲要求	1
1.2 内容提要	1
1.2.1 通信系统的基本概念	1
1.2.2 信息及其度量	5
1.2.3 主要性能指标	6
1.3 习题解答	8
第 2 章 随机过程	11
2.1 大纲要求	11
2.2 内容提要	11
2.2.1 随机过程的基本概念	11
2.2.2 平稳随机过程	13
2.2.3 高斯随机过程	14
2.2.4 随机过程通过线性系统	16
2.2.5 窄带随机过程	18
2.2.6 正弦波加窄带高斯过程	19
2.3 习题解答	19
第 3 章 信道与噪声	32
3.1 大纲要求	32
3.2 内容提要	32
3.2.1 信道的定义和分类	32
3.2.2 信道的数学模型	33
3.2.3 恒参信道的特性及其对信号传输的影响	35
3.2.4 随参信道的特性及其对信号传输的影响	36
3.2.5 加性噪声	37
3.2.6 信道容量的概念	38
3.3 习题解答	39
第 4 章 模拟调制系统	47
4.1 大纲要求	47
4.2 内容提要	47
4.2.1 调制的目的、定义和分类	47
4.2.2 幅度调制(线性调制)的原理	47
4.2.3 线性调制系统的抗噪声性能	54
4.2.4 角度调制(非线性调制)的原理	57
4.2.5 调频系统的抗噪声性能	60

4.2.6 各种模拟调制系统的性能比较	61
4.3 习题解答	62
第5章 数字基带传输系统	77
5.1 大纲要求	77
5.2 内容提要	77
5.2.1 数字基带传输系统	77
5.2.2 数字基带信号及其频谱特性	78
5.2.3 基带传输的常用码型	78
5.2.4 基带脉冲传输与码间干扰	79
5.2.5 无码间干扰的基带传输特性	80
5.2.6 无码间干扰的基带系统的抗噪声性能	81
5.2.7 眼图	82
5.2.8 时域均衡	83
5.2.9 部分响应系统	84
5.3 习题解答	85
第6章 模拟信号的数字传输	106
6.1 大纲要求	106
6.2 内容提要	106
6.2.1 抽样定理	107
6.2.2 脉冲振幅调制(PAM)	108
6.2.3 脉冲编码调制(PCM)	109
6.2.4 自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)	115
6.2.5 增量调制(ΔM)	116
6.3 习题解答	118
第7章 数字频带传输系统	130
7.1 大纲要求	130
7.2 内容提要	131
7.2.1 二进制数字调制与解调原理	131
7.2.2 二进制数字调制信号的功率谱密度	137
7.2.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能	138
7.2.4 多进制数字调制系统	140
7.3 习题解答	142
第8章 数字信号的最佳接收	160
8.1 大纲要求	160
8.2 内容提要	160
8.2.1 匹配滤波器	160
8.2.2 最小差错概率接收准则	161
8.2.3 确知信号的最佳接收机	163
8.2.4 随相信号的最佳接收	165
8.2.5 实际接收机与最佳接收机的性能比较	166
8.2.6 最佳基带传输系统	167
8.3 习题解答	168

第 9 章 现代数字调制解调技术	182
9.1 大纲要求	182
9.2 内容提要	182
9.2.1 正交振幅调制(QAM)	182
9.2.2 最小移频键控(MSK)	184
9.2.3 高斯最小移频键控(GMSK)	187
9.2.4 $\frac{\pi}{4}$ -DQPSK	189
9.2.5 正交频分复用(OFDM)	191
9.2.6 扩频调制	193
9.2.7 数字化接收技术	195
9.3 习题解答	197
第 10 章 复用和数字复接技术	209
10.1 大纲要求	209
10.2 内容提要	209
10.2.1 频分复用(FDM)	209
10.2.2 时分复用(TDM)	211
10.2.3 数字复接技术	214
10.2.4 SDH 复用原理	215
10.3 习题解答	218
第 11 章 同步原理	223
11.1 大纲要求	223
11.2 内容提要	223
11.2.1 概述	223
11.2.2 载波同步	224
11.2.3 位同步	228
11.2.4 群同步	231
11.3 习题解答	234
第 12 章 差错控制编码	242
12.1 大纲要求	242
12.2 内容提要	242
12.2.1 纠错码的基本原理	243
12.2.2 常用的简单编码	244
12.2.3 线性分组码	244
12.2.4 循环码	246
12.3 习题解答	248
附录 A 西安电子科技大学本科生“通信原理”课程模拟考试题	256
附录 B 西安电子科技大学“通信原理”课程硕士研究生入学考试题选编	263
参考文献	272

第 1 章 绪 论

1.1 大 纲 要 求

常用通信术语；
模拟信号与数字信号的区别；
通信系统组成和分类，通信方式；
数字通信系统的主要特点；
离散消息的信息量、平均信息量(信源熵)；
码元速率，信息速率，频带利用率，误码率。

1.2 内 容 提 要

1.2.1 通信系统的基本概念

1. 通信、消息、信息、信号

通信：信息(或消息)的传输和交换。实现通信的方式很多，利用“电”来传递消息的方式称为“电通信”，简称通信。

消息：信息的物理表现形式。消息可分为两类：离散消息(消息状态是可数的或有限个，如文字、符号、数据等)和连续消息(消息的状态连续变化，如语音、活动图片等)。

信息：消息的内涵，即消息中所包含的受信者原来不知而待知的内容。因此，通信的根本目的在于传输含有信息的信息。基于这种认识，“通信”也就是“信息传输”或“消息传输”。

信号：消息的电的表示形式，或者说与消息相对应的电量或光量。在电通信系统中，消息的传递是通过它的物质载体——电信号来实现的，也就是说把消息寄托在电信号的某一参量上(如连续波的幅度、频率或相位；脉冲波的幅度、宽度或位置)。与消息相对应，可将信号分为数字信号和模拟信号：

数字信号：信号的该参量只能取有限个值，并且常常不直接与离散消息相对应。例如电报信号、计算机输入输出信号、PCM 信号等。(注意：数字信号不一定在时间上也离散，如 2PSK 信号。)

模拟信号：信号的该参量连续取值或无穷多个值，且直接与连续消息相对应。例如电话机送出的语音信号、电视摄像机输出的图像信号等。(注意：模拟信号不一定在时间上都连续，如 PAM 信号。)

2. 通信系统的组成

实现消息传递所需的一切技术设备和信道的总和称为通信系统。

1) 一般模型

通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

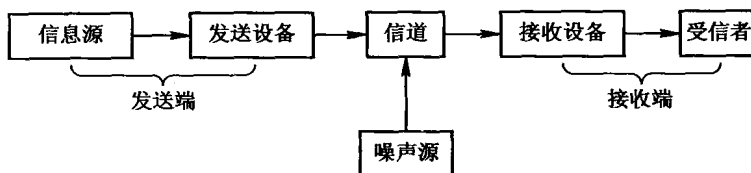


图 1-1 通信系统的一般模型

图 1-1 中各部分作用：

信源。信源是信息源的简称，它的作用是把消息转换成原始电信号（称为基带信号）。电话机、电视摄像机等属于模拟信源，送出的是模拟信号；电传机、计算机等各种数字终端设备是数字信源，输出的是数字信号。

发送设备。它将信源和信道匹配，把原始电信号变换成适合在信道中传输的信号（如调制成已调信号）。

信道。信道是信号传输的通道。分为有线和无线两大类。有线信道包括明线、同轴电缆、波导以及光纤等；无线信道可以是大气（自由空间）、真空及海水（包括地波传播、短波电离层反射）等。有线信道和无线信道均有多种物理媒质，媒质的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。

噪声源。噪声源不是人为加入的设备，而是通信系统中各种设备以及信道中噪声与干扰的集中表示。

接收设备。接收设备的任务是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始信号来，即进行与发送设备相对应的反变换。例如解调、译码、解码等等。

信宿。它是信息传输的归宿点。其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

图 1-1 所示的一般模型反映了通信系统的共性。根据研究的对象以及所关注的问题不同，图 1-1 模型中的各小方框的内容和作用将有所不同，因而相应有不同形式的更具体的通信模型。

2) 模拟通信系统的模型

利用模拟信号来传递信息的系统称为模拟通信系统，如图 1-2 所示。

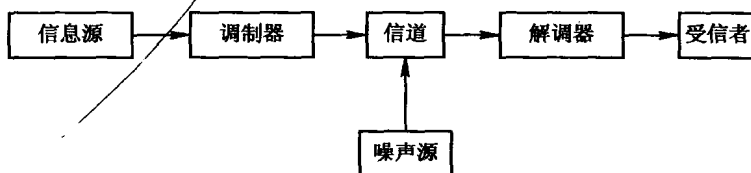


图 1-2 模拟通信系统模型

该系统中有两种重要变换：

- (1) 连续消息 $\leftrightarrow$ 基带信号，完成这种变换和反变换的是信源和信宿；
- (2) 基带信号 $\leftrightarrow$ 已调信号，完成这种变换和反变换的通常是调制器和解调器。

经过调制以后的信号称为已调信号。已调信号有三个基本特征：一是携带有信息；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，因而已调信号又称频带信号。

3) 数字通信系统的模型

利用数字信号来传递信息的系统称为数字通信系统，如图 1-3 所示。

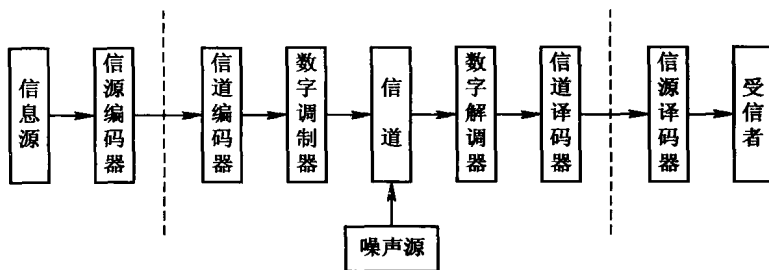


图 1-3 数字通信系统模型

图 1-3 中各部分作用：

- 信源编/译码器。信源编码器的作用之一是将模拟信号转换成数字信号，即模/数转换；二是设法降低数字信号的数码率，即数据压缩。编码比特率在通信中直接影响传输所占的带宽，而传输所占的带宽又直接反映了通信的有效性。信源译码是信源编码的逆过程。

- 信道编/译码器。信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分(监督元)，组成所谓的“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按一定规则进行解码，从解码的过程中发现错误或纠正错误，从而提高通信系统抗干扰能力，实现可靠通信。

- 加密/解密。为了保证数字信号与所传信息的安全，将输入明文信号人为扰乱，即加上密码，这种处理过程叫加密。在接收端对收到的信号进行解密，恢复明文。

- 数字调制/解调器。数字调制是把各种数字信息脉冲(基带信号)转换成适于信道传输的数字调制信号(已调信号)。数字解调是数字调制的逆过程。

- 同步与数字复接。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致，它是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提条件。按照同步的作用不同，分为载波同步、位同步、群同步和网同步。数字复接是依据时分复用基本原理把若干个低速数字信号合并成一个高速的数字信号，以扩大传输容量和提高传输效率。

【注意】 图 1-3 是数字通信系统的一般化模型，实际的数字通信系统不一定包括图 1-1 中的所有环节。

模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输，数字电话系统就是以数字方式传输模拟话音信号的例子。当然，数字信号也可以在模拟通信系统中传输，如计算机数据可以通过模拟电话线路传输，但这时必须使用调制解调器(Modem)将数字基带信号进行正弦调制，以适应模拟信道的传输特性。可见，模拟通信与数字通信的区别仅在于信道中传

输的是模拟信号还是数字信号。

3. 数字通信的主要特点

数字通信已成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信系统有以下许多优点:

(1) 抗干扰能力强,可消除噪声积累;

(2) 差错可控;

(3) 便于与各种数字终端接口,可用现代计算技术对信号进行处理、加工、变换、存储,形成智能网;

(4) 便于集成化,从而使通信设备微型化;

(5) 便于加密处理,且保密性好。

但是,数字通信系统也有以下不足:

(1) 占用带宽大;

(2) 需要同步。

4. 通信系统的分类

(1) 按消息物理特征,通信系统可分为电报通信、电话通信、数据通信和图像通信等。

(2) 按调制方式,通信系统可分为基带传输和调制传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送。调制传输是对各种信号变换方式后传输的总称。调制方式很多,参见教材第6页表1-1。

(3) 按信号特征(信道中所传输的是模拟信号还是数字信号),通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。

(4) 按传输媒介,通信系统可分为有线通信和无线通信两类。所谓有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的,如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息的,如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

(5) 按工作波段不同可分为长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信等。教材中表1-2列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

工作波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

式中, λ 为工作波长; f 为工作频率,单位为Hz; c 为光速,单位为m/s。

(6) 按信号复用方式,传输多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用、码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围;时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用是用正交的脉冲序列分别携带不同的信号。

传统的模拟通信中大都采用频分复用,随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用越来越广泛,码分复用多用于空间扩频通信中,目前又开始用于移动通信系统中。

5. 通信方式

1) 按消息传递的方向与时间关系分类

通信方式分为单工、半双工及全双工三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式。广播、遥测、遥控、无线寻呼等就是单工通信方式的例子。

半双工通信是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。使用同一载频的对讲机,收发报机以及问询、检索、科学计算等数据通信都是半双工通信方式。

全双工通信是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式。普通电话、手机都是最常见的全双工通信方式,计算机之间的高速数据通信也是这种方式。

2) 按数字信号排列顺序分类

在数字通信中,按数字信号代码排列的顺序可将通信方式分为并行传输和串行传输。

并行传输是将代表信息的数字序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输。

串行传输是数字序列以串行方式一个接一个地在一条信道上传输,远距离的数字通信都采用这种传输方式。

1.2.2 信息及其度量

消息是形式,信息是内涵。消息中所含的信息量与消息发生的概率密切相关。概率越小,信息量就越大。信息量 I 与消息 x 出现的概率 $P(x)$ 之间的关系为

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

信息量的单位与对数底 a 有关。 $a=2$ 时, $\log_2 = \text{lb}$, 信息量单位为比特(bit); $a=e$ 时, $\log_e = \ln$, 信息量单位为奈特(nit); $a=10$ 时, $\log_{10} = \lg$, 信息量单位为哈特莱(Hartly)。目前广泛使用的单位为比特,即

$$I = \text{lb} \frac{1}{P(x)} = -\text{lb} P(x) (\text{bit})$$

1. 离散消息的信息量

【例 1】 二进制信源(0, 1), 每一符号波形等概率独立发送, 求传送二进制波形之一的信息量。

解 由于每一波形出现的概率为 $P = 1/2$, 故其信息量

$$I = \text{lb} \frac{1}{P} = \text{lb} 2 = 1 (\text{bit})$$

评注 发送等概率的二进制波形之一的信息量为 1 bit。

【例 2】 四进制离散信源(0, 1, 2, 3), 独立等概率发送, 求传送每一波形的信息量。

解 由于每一波形出现的概率为 $P = 1/4$, 故其信息量

$$I = \text{lb} \frac{1}{P} = \text{lb} 4 = 2 (\text{bit})$$

评注 四进制的每一波形所含的信息量, 恰好是二进制每一波形包含信息量的 2 倍。这是由于每一个四进制波形需要用 2 个二进制波形表示。

推广 $M(M=2^K)$ 进制的每一波形所含的信息量, 恰好是二进制每一波形包含信息量的 K 倍。

【例 3】 二进制离散信源(0, 1), 若“0”出现概率为 $1/3$, 求出现“1”的信息量。

解 由于全概率为 1, 因此出现“1”的概率为 $2/3$, 故其信息量

$$I = \lg \frac{3}{2} = 0.585 \text{ (bit)}$$

2. 平均信息量(信源熵)

设离散信源的概率场为

$$\left[\begin{array}{cccc} x_1, & x_2, & \cdots, & x_n \\ p(x_1), & p(x_2), & \cdots, & p(x_n) \end{array} \right] \text{ 且有 } \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\lg P(x_1), -\lg P(x_2), \cdots, -\lg P(x_n)$ 。因此, 信源的熵(信源中每个符号所含信息量的统计平均值)为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \lg P(x_i) \text{ (bit/符号)} \quad (1-2)$$

显然, 当信源中每个符号等概率独立出现时, 信源的熵有最大值。此时, 若信源中有 M 个符号, 则信息源的最大熵

$$H_{\max} = - \sum_{i=1}^M \frac{1}{M} \lg \frac{1}{M} = \lg M \text{ (bit/符号)} \quad (1-3)$$

【例 4】一离散信源由 0, 1, 2, 3 四个符号组成, 它们出现的概率分别为 $3/8, 1/4, 1/4, 1/8$, 且每个符号的出现都是独立的。求消息

201020130213001203210100321010023102002010312032100120210

的信息量。

解 此消息中, 0 出现 23 次, 1 出现 14 次, 2 出现 13 次, 3 出现 7 次, 共有 57 个符号, 故该消息的信息量

$$I = 23 \lg 8/3 + 14 \lg 4 + 13 \lg 4 + 7 \lg 8 = 108 \text{ (bit)}$$

每个符号的算术平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{108}{57} = 1.89 \text{ (bit/符号)}$$

若用熵的概念来计算, 由式(1-2)得

$$\begin{aligned} H &= - \frac{3}{8} \lg \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} \\ &= 1.906 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

则该消息的信息量

$$I = 57 \times 1.906 = 108.64 \text{ (bit)}$$

评注 一条由 m 个符号构成的消息, 其总信息量 $I = mH$ bit。

对于由一串符号构成的消息, 可根据信息相加性概念来计算整个消息的信息量, 但当消息很长时, 用熵的概念来计算比较方便。而且随着消息序列长度的增加, 两种计算误差将趋于零。

1.2.3 主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此, 评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的有效性和可靠性。有效性是指传输的“速度”问题; 而可靠性是指传输的“质量”问题。

模拟通信系统的有效性可用有效传输频带来度量,可靠性用均方误差或接收端最终输出信噪比来度量。

数字通信系统的有效性可用传输速率和频带利用率来衡量。可靠性可用差错率来衡量。

1. 传输速率和频带利用率

码元传输速率 R_B 简称传码率,又称符号速率等。它定义为单位时间内传输码元的数目,单位是波特,可记为 Baud 或 B。例如,若 1 秒内传送 2400 个码元,则传码率为 2400 B。

【注意】 码元速率与进制数无关,仅与传输的码元长度 T_s 有关,即

$$R_B = \frac{1}{T_s} \quad (\text{B}) \quad (1-4)$$

由于 M 进制的的一个码元可以用 $\lg M$ 个二进制码元去表示,所以在保证信息速率不变的情况下, M 进制的码元速率 R_{BM} 与二进制的码元速率 R_{B2} 之间有以下转换关系

$$R_{B2} = R_{BM} \lg M \quad (1-5)$$

信息传输速率 R_b 简称传信率,又称比特率等。它定义为单位时间内传递的平均信息量或比特数,单位是比特/秒,可记为 bit/s 或 b/s。

每个码元或符号通常都含有一定 bit 数的信息量,因此码元速率和信息速率的关系为

$$R_b = R_B \cdot H \quad (\text{b/s}) \quad (1-6)$$

等概率传输时,熵有最大值 $\lg M$,信息速率也达到最大,则

$$R_b = R_B \lg M \quad (\text{b/s}) \quad (1-7)$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\lg M} \quad (\text{B}) \quad (1-8)$$

式中, M 为符号的进制数。例如码元速率为 1200 B,采用八进制($M=8$)时,信息速率为 3600 b/s;采用二进制($M=2$)时,信息速率为 1200 b/s,可见,二进制的码元速率和信息速率在数量上相等,有时统称它们为数码率。

频带利用率 η 定义为单位频带内的码元传输速率,即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{B/Hz}) \quad (1-9)$$

比较不同通信系统的有效性时,单看它们的传输速率是不够的,还应看有这样传输速率下所占的信道的频带宽度。所以,频带利用率 η 是衡量数字通信系统有效性的更为完善的指标。

数字信号的传输带宽 B 取决于码元速率 R_B ,而码元速率和信息速率 R_b 有着确定的关系。为了比较不同系统的传输效率,又可定义频带利用率为

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/(s} \cdot \text{Hz)}) \quad (1-10)$$

2. 差错率

误码率(码元差错率) P_e ,是指码元在传输系统中被传错的概率,其定义为

$$P_e = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传送总码元数}} = \frac{N_e}{N} \quad (1-11)$$

误信率(信息差错率) P_b ,是指发生差错的比特数在传输总比特数中所占的比例,其定义为

$$P_b = \frac{\text{错误接收比特数}}{\text{传送总比特数}} \quad (1-12)$$

显然,二进制时有

$$P_b = P_e \quad (1-13)$$

1.3 习题解答

1-1 已知英文字母 e 和 v 出现的概率分别为 0.105 和 0.008,试求 e 和 v 的信息量各为多少。

解 e 的信息量

$$I_e = \lg \frac{1}{P(e)} = -\lg P(e) = -\lg 0.105 = 3.25 \text{ (bit)}$$

v 的信息量

$$I_v = \lg \frac{1}{P(v)} = -\lg P(v) = -\lg 0.008 = 6.96 \text{ (bit)}$$

评注 概率越小,信息量越大。

1-2 已知二进制信源(0, 1),若 0 符号出现的概率为 1/4,求出现 1 符号的信息量。

解 因为全概率 $P(0)+P(1)=1$,所以 $P(1)=3/4$,其信息量为

$$I = \lg \frac{1}{P(1)} = \lg \frac{4}{3} = 0.412 \text{ (bit)}$$

1-3 某信源符号集由 A、B、C、D、E、F 组成,设每个符号独立出现,其概率分别为 1/4、1/4、1/16、1/8、1/16、1/4,试求该信息源输出符号的平均信息量。

解 平均信息量(熵)

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \lg P(x_i) \\ &= -3 \times \frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} - 2 \times \frac{1}{16} \lg \frac{1}{16} = 2.375 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

1-4 一个由字母 A、B、C、D 组成的字,对于传输的每一个字母用二进制脉冲编码,00 代替 A,01 代替 B,10 代替 C,11 代替 D,每个脉冲宽度为 5 ms。

(1) 不同的字母是等可能出现时,试计算传输的平均信息速率;

(2) 若每个字母出现的可能性分别为

$$P_A = \frac{1}{5}, P_B = \frac{1}{4}, P_C = \frac{1}{4}, P_D = \frac{3}{10}$$

试计算传输的平均信息速率。

解 一个字母对应两个二进制脉冲,属于四进制符号,故一个字母的持续时间为 $2 \times 5 \text{ ms}$ 。传送字母的符号速率为

$$R_B = \frac{1}{2 \times 5 \times 10^{-3}} = 100 \text{ (B)}$$

等概率时的平均信息速率

$$R_b = R_B \lg M = R_B \lg 4 = 200 \text{ (b/s)}$$

(2) 平均信息量为

$$\begin{aligned} H &= \frac{1}{5} \lg 5 + \frac{1}{4} \lg 4 + \frac{1}{4} \lg 4 + \frac{3}{10} \lg \frac{10}{3} \\ &= 1.985 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

则平均信息速率为

$$R_b = R_B \cdot H = 100 \times 1.985 = 198.5 \text{ (b/s)}$$

评注 等概率时才能获得最大信息速率, 这是因为等概率时有最大熵。

1-5 设一数字传输系统传送二进制码元的速率为 2400 B, 试求该系统的信息速率; 若该系统改为传送十六进制信号码元, 码元速率不变, 则这时的系统信息速率为多少? (设各码元独立等概率出现。)

解 (1) $R_b = R_B = 2400 \text{ (b/s)}$

(2) $R_b = R_B \lg 16 = 2400 \times 4 = 9600 \text{ (b/s)}$

评注 码元速率不变时, 通过增加进制数 M , 可以增加信息速率。

1-6 某信息源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成, 设每一符号独立出现, 其出现概率分别为 $1/4$, $1/8$, $1/8$, $3/16$ 和 $5/16$; 信息源以 1000 B 速率传送信息。

(1) 求传送 1 小时的信息量;

(2) 求传送 1 小时可能达到的最大信息量。

解

(1) 先求信息源的熵, 由式(1-2)得

$$\begin{aligned} H &= -\frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} - \frac{3}{16} \lg \frac{3}{16} - \frac{5}{16} \lg \frac{5}{16} \\ &= 2.23 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

则平均信息速率

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

故传送 1 小时的信息量

$$I = T \times R_b = 3600 \times 2.23 \times 10^3 = 8.028 \times 10^6 \text{ (bit)}$$

(2) 等概率时有最大信息熵, 由式(1-3)得

$$H_{\max} = \lg 5 = 2.33 \text{ (bit/符号)}$$

此时平均信息速率最大, 故有最大信息量

$$I_{\max} = T \cdot R_B \cdot H_{\max} = 3600 \times 1000 \times 2.33 = 8.352 \times 10^6 \text{ (bit)}$$

1-7 设有四个消息符号, 其前三个符号出现的概率分别是 $1/4$, $1/8$, $1/8$ 。各消息符号出现是相对独立的。求该符号集的平均信息量。

解 因为各符号的概率之和等于 1, 所以第四个符号的概率为 $1/2$, 则该符号集的平均信息量为

$$H = -\frac{1}{4} \lg \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \lg \frac{1}{8} - \frac{1}{2} \lg \frac{1}{2} = 1.75 \text{ (bit/符号)}$$

1-8 已知二进制数字信号的传输速率为 2400 b/s, 试问变换成四进制数字信号时, 传输速率为多少波特?

解 若信息速率保持不变, 则传码率为

$$R_B = \frac{R_b}{\lg M} = \frac{2400}{\lg 4} = 1200 \text{ (B)}$$

评注 信息速率不变时, 通过增加进制数 M , 可以降低码元传输速率。

△ 1-9 已知某四进制数字传输系统的传信率为 2400 b/s, 接收端在半小时内共收到 216 个错误码元, 试计算该系统的误码率 P_e 。

解 传码率为

$$R_B = \frac{R_b}{\lg M} = \frac{2400}{\lg 4} = 1200 \text{ (B)}$$

半小时(1800 秒)内传送的码元个数为

$$N = T \cdot R_B = 1800 \times 1200 = 2.16 \times 10^6$$

错误码元数 $N_e = 216$ 个, 因此误码率 P_e 为

$$P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{216}{2.16 \times 10^6} = 10^{-4}$$

△ 1-10 某系统经长期测定, 它的误码率 $P_e = 10^{-5}$, 系统码元速率为 1200 B, 问在多长时间可能收到 360 个误码元。

解 由 $P_e = \frac{N_e}{N}$ 和 $N = T \cdot R_B$ 可得时间为

$$T = \frac{N_e}{P_e \cdot R_B} = \frac{360}{10^{-5} \times 1200} = 3 \times 10^4 \text{ (s)}$$