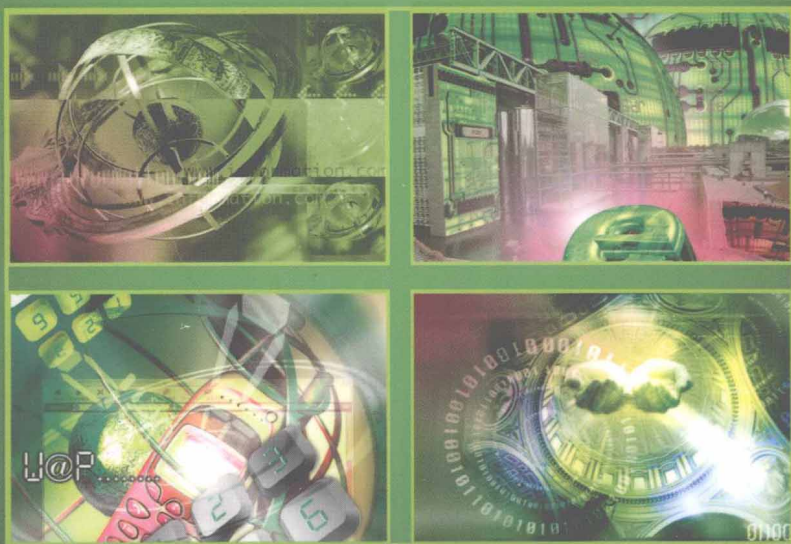


❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

通信原理基础教程 学习指导及习题解答

LEARNING GUIDE AND SOLUTIONS TO PROBLEMS OF
BASIC COURSE IN COMMUNICATION PRINCIPLES



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育电子信息类规划教材

通信原理基础教程学习 指导及习题解答

黄葆华 沈忠良 张伟明 张宝富 编著

机械工业出版社

本书是以《通信原理基础教程》(ISBN 978-7-111-24005-1)为基础,同时参考了其他相关教材而编写的通信原理学习指导书。它涵盖了课程学习和研究生入学考试所涉及的主要知识点,并汇集了许多选自国内名校的期末和考研真题。

全书共分9章,每章包括学习目标、内容概要、教材习题详解、提高拓展题解析和本章自测自评5个部分。附录中还提供了5套不同难度的模拟测试卷与参考答案。

本书可作为高等院校通信原理课程的学习指导书,也可作为研究生入学考试的复习用书,还可供有关技术人员和大学教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理基础教程学习指导及习题解答/黄葆华等编著. —北京:机械工业出版社, 2012.4

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-37389-6

I. ①通… II. ①黄… III. ①通信原理—高等学校—教学参考资料
IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第018226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

版式设计:刘 岚 责任校对:樊钟英

封面设计:鞠 杨 责任印制:乔 宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012年5月第1版第1次印刷

184mm×260mm · 19.25印张 · 474千字

0001—2500册

标准书号:ISBN 978-7-111-37389-6

定价:38.00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、电子工程和信息工程等相关专业的一门重要的专业基础课，也是诸多院校相关专业硕士研究生入学考试课程之一。本书旨在帮助读者学好通信原理课程，并满足读者的考研需求。

本书是以《通信原理基础教程》(ISBN 978-7-111-24005-1)为基础，同时参考了其他相关教材而编写的通信原理学习指导书，它涵盖了课程学习和研究生入学考试所涉及的主要知识点，并汇集了许多选自国内名校的期末和考研真题。可与教材配套使用，也可单独作为高等学校通信原理课程的教学、学习和考研参考书。

全书共分9章，编排结构与《通信原理基础教程》一致，分别为绪论、信号与噪声、信道、模拟调制系统、数字信号的基带传输、数字调制技术、模拟信号的数字传输、同步原理和信道编码。每章均包括5个部分：

- 学习目标：指出了每章应该掌握的知识要点。
 - 内容概要：梳理了基本概念和基本原理、突出了重要结论、归纳了基本方法。
 - 教材习题详解：给出了教材各习题详细的解答，包括解题方法、步骤和相关的解释或评注。
 - 提高拓展题解析：拓展了教材内容、深化了教材习题。
 - 本章自测自评：提供了由填空题、选择题、简答题和综合题组成的自测试卷及答案。
- 本书主要由黄葆华编写，沈忠良、张伟明、张宝富参加了1~5章教材习题解答的编写，并参与了目录的制作工作，全书由黄葆华统稿。

本书在编写过程中参考了许多相关书籍及网上资料，由于无法一一列出，在此谨向这些参考资料的作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，恳切希望广大读者提出宝贵的意见和建议。

作者联系方式 E-mail: hbh_nj6300@yahoo.com.cn

编著者

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 内容概要	2
1.1.1 消息、信息、信号、通信、通信系统	2
1.1.2 通信系统的模型	3
1.1.3 通信系统的分类	5
1.1.4 信息及其度量	5
1.1.5 通信系统的主要性能指标	6
1.2 教材习题详解	7
1.3 提高拓展题解析	9
1.4 本章自测自评	11
1.4.1 自测自评试题	11
1.4.2 自测自评试题参考答案	13
第2章 信号与噪声	16
2.1 内容概要	17
2.1.1 确知信号的频谱分析	17
2.1.2 能量信号与功率信号的帕塞瓦尔定理、信号带宽	22
2.1.3 波形的相关	23
2.1.4 概率论初步	24
2.1.5 随机过程	27
2.1.6 平稳随机过程及各态历经性	28
2.1.7 高斯随机过程	30
2.1.8 随机过程通过线性系统	31
2.1.9 几种典型的噪声模型	32
2.1.10 匹配滤波器	35
2.2 教材习题详解	36
2.3 提高拓展题解析	51
2.4 本章自测自评	54
2.4.1 自测自评试题	54
2.4.2 自测自评试题参考答案	56
第3章 信道	60
3.1 内容概要	61



3.1.1 信道的定义、分类和模型	61
3.1.2 恒参信道的传输特性及其对信号传输的影响	63
3.1.3 随参信道的特性及其对信号传输的影响	64
3.1.4 信道容量	66
3.2 教材习题详解	67
3.3 提高拓展题解析	68
3.4 本章自测自评	70
3.4.1 自测自评试题	70
3.4.2 自测自评试题参考答案	73
第4章 模拟调制系统	75
4.1 内容概要	76
4.1.1 调制的作用与分类	76
4.1.2 幅度调制	77
4.1.3 角度调制	82
4.1.4 频分复用	87
4.2 教材习题详解	88
4.3 提高拓展题解析	91
4.4 本章自测自评	94
4.4.1 自测自评试题	94
4.4.2 自测自评试题参考答案	96
第5章 数字信号的基带传输	99
5.1 内容概要	100
5.1.1 数字基带传输的基本概念	100
5.1.2 数字基带信号的码型和波形	101
5.1.3 数字基带信号的传输及码间干扰	103
5.1.4 无码间干扰时噪声对传输性能的影响	106
5.1.5 多进制数字基带信号的传输	108
5.1.6 眼图	108
5.1.7 均衡	109
5.2 教材习题详解	110
5.3 提高拓展题解析	115
5.4 本章自测自评	129
5.4.1 自测自评试题	129
5.4.2 自测自评试题参考答案	132
第6章 数字调制技术	135
6.1 内容概要	136
6.1.1 数字调制基本概念	136
6.1.2 二进制振幅调制	137

6.1.3	二进制频率调制	139
6.1.4	二进制绝对相位调制	141
6.1.5	二进制相对相位调制	143
6.1.6	二进制调制性能比较	146
6.1.7	多进制数字调制技术	147
6.2	教材习题详解	156
6.3	提高拓展题解析	165
6.4	本章自测自评	177
6.4.1	自测自评试题	177
6.4.2	自测自评试题参考答案	179
第7章	模拟信号的数字传输	183
7.1	内容概要	184
7.1.1	模拟信号数字传输系统的基本概念	184
7.1.2	脉冲编码调制	184
7.1.3	增量调制	191
7.1.4	PCM 与 ΔM 的比较	194
7.1.5	时分复用	195
7.2	教材习题详解	196
7.3	提高拓展题解析	201
7.4	本章自测自评	207
7.4.1	自测自评试题	207
7.4.2	自测自评试题参考答案	209
第8章	同步原理	213
8.1	内容概要	214
8.1.1	同步的种类和同步的实现方法	214
8.1.2	载波同步	215
8.1.3	位同步	218
8.1.4	群同步	220
8.2	教材习题详解	224
8.3	提高拓展题解析	227
8.4	本章自测自评	232
8.4.1	自测自评试题	232
8.4.2	自测自评试题参考答案	234
第9章	信道编码	237
9.1	内容概要	238
9.1.1	信道编码的基本概念	238
9.1.2	常用检错码	240
9.1.3	线性分组码	240



9.1.4 其他纠错码介绍	247
9.1.5 m 序列	248
9.2 教材习题详解	251
9.3 提高拓展题解析	258
9.4 本章自测自评	265
9.4.1 自测自评试题	265
9.4.2 自测自评试题参考答案	267
附录	271
附录 A 通信原理模拟试卷	272
附录 B 模拟试卷参考答案	285
参考文献	299

第1章

绪 论

- 1.1 内容概要
- 1.2 教材习题详解
- 1.3 提高拓展题解析
- 1.4 本章自测自评



学习目标

通过本章的学习，应掌握如下要点：

- 常用通信术语。
- 模拟信号与数字信号。
- 模拟通信与数字通信。
- 通信系统的组成及各部分的作用。
- 数字通信的优缺点。
- 信息量及平均信息量（熵）的概念及计算。
- 通信系统的主要性能指标及衡量方法。
- 码元速率、信息速率的定义及关系。
- 频带利用率的定义。
- 误码率和误比特率的定义及计算。

1.1 内容概要

1.1.1 消息、信息、信号、通信、通信系统

(1) 消息

由信源产生的含有信息的语音、图像、文字或符号等称为消息。消息有连续和离散之分，原始的语音和图像是连续消息，而文字或符号则是离散消息。

(2) 信息

消息中包含的对受信者（信宿）有用或有意义的内容称为信息。可见消息是信息的载体。信息是可以度量的，香农信息论给出了它的定义和单位。

(3) 信号

电信号简称为信号，是与消息一一对应的电量，是消息的载体。如人发出的声音是消息，通过扬声器转换为电信号。实际上消息通常寄托在电信号的某一个或几个参量（如幅度、频率或相位等）上，若消息是连续的，电信号的参量就连续取值，为模拟信号；若消息是离散的，电信号的参量就离散取值，为数字信号。

(4) 通信

广义地讲，通信就是信息的传递。用电信号来传递信息的通信称为电通信，本书所讲的通信是指电通信。

(5) 通信系统

实现信息传递所需要的一切设备和传输媒介的总和称为通信系统。

需要指出，信号是消息的电量形式，传递信号就是传递消息，而消息中含有信息，传递消息的目的是传递消息中包含的信息。有时也可以将通信定义为传递消息，但严格地讲，将通信定义为传递信息比较准确，因为信息才是受信者真正需要的。

1.1.2 通信系统的模型

1. 一般模型

点对点通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

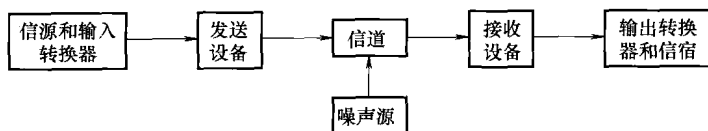


图 1-1 通信系统的一般模型

(1) 信源和输入转换器

信源是信息的来源，如语音、文字、图像、数据等。输入转换器的作用是将信源输出的消息转换成电信号，完成非电量到电量的变换。常见的例子有：话筒完成声/电转换（语音变换到音频信号）、摄像机完成光/电转换（图像到视频信号）、计算机键盘完成键盘符号到“1”、“0”信号的转换等。通常将信源和输入转换器合称为信源，信源输出电信号。

(2) 发送设备

发送设备对信号进行变换，使之适合于信道的传输。变换包括放大、编码、调制和滤波等。

(3) 信道和噪声

信道是指信号传输的通道。通常情况下，信号在信道中传输会产生衰减、畸变，同时还会受到噪声的干扰。

(4) 接收设备

接收设备的任务是对接收到的受到信道衰减、畸变且混合有噪声的信号进行处理，恢复发送端发送的有用信号。这些处理主要包括放大和反变换。经过信道传输后到达接收端的信号往往很弱，需要做放大。反变换完成与发送设备相反的功能，如译码、解调等。

(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，它完成电量到非电量的变换，即将电信号变成受信者能够识别的信号，如扬声器进行电/声变换，显示屏完成电/光变换等。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，是信息传输的目的地。

2. 模拟通信系统模型

信道中传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统，其模型如图 1-2 所示。

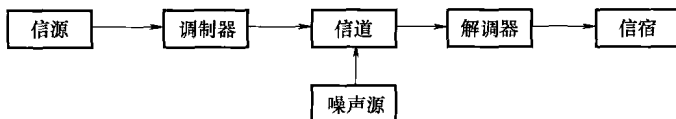


图 1-2 模拟系统通信模型

与图 1-1 相比，图 1-2 中的调制器和解调器分别替代了发送设备和接收设备。在实际模拟系统中，发送端和接收端除了调制器和解调器外还应有放大、滤波、混频等环节，这里都合并到了调制解调部件中。信源产生模拟电信号；调制器将模拟信号的频谱搬移到信道的通

带范围内,使其适合于信道传输;解调器的作用是将接收信号的频谱反搬移回来,恢复原模拟信号;信宿中的输出转换器将模拟电信号转换为受信者能够识别的物理消息。

3. 数字通信系统模型

信道上传输数字信号的系统称为数字通信系统,其模型如图 1-3 所示。

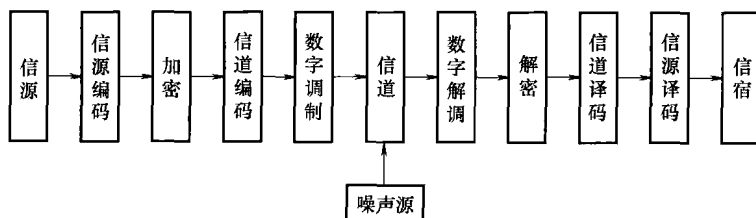


图 1-3 数字通信系统模型

(1) 信源

信源产生电信号,可以是数字信号,如计算机输出的“1”、“0”信号;也可以是模拟信号,如声音通过扬声器转换而来的音频信号。

(2) 信源编码

信源编码的作用有两个:①当信源输出模拟信号时,信源编码器完成模拟信号数字化(A/D转换),如后面将要学习的PCM和 ΔM 等。②当信源是数字信源时,为降低数字信号的数码率要进行压缩编码,如哈夫曼编码、常用的文件压缩编码等。信源编码可提高信息传输的有效性。

(3) 加密

按一定的算法将数据打乱,将明文变为密文的做法称为加密,加密可提高信息传输的安全性。

(4) 信道编码

信道编码是将信息按一定的规律加入冗余度,以便在接收端的信道译码中发现或纠正传输中出现的错误,提高信息传输的可靠性。

(5) 数字调制

数字调制是对发送信号进行频谱搬移,使发送信号适合于信道传输。基本的调制方式有数字振幅调制(ASK)、数字频率调制(FSK)和数字相位调制(PSK)。

信源译码、解密、信道译码、数字解调和信宿分别完成与上述相反的功能。

说明:①信源编/译码、加/解密、信道编/译码不一定都需要。②如果信道是低通型信道,则不需要数字调制/解调器,但需要码型变换和波形变换,此情况下的系统为数字基带传输系统。

4. 数字通信系统的主要优缺点

数字通信系统的主要优点如下:

1) 抗噪声性能好。数字通信系统发送的信号取值有限,当噪声的大小不影响接收信号的判决时,通过判决可彻底消除接收信号中的噪声。

2) 接力(中继)通信时无噪声积累,所以远距离通信时不会因为距离远而使通信质量下降。

- 3) 差错可控。可采用信道编码技术降低误码率。
- 4) 数字通信易于加密处理。
- 5) 便于综合传输。语音、图像、文字、数据等可变换成统一的数字信号在同一个通信系统中传输、存储和处理。
- 6) 数字通信系统中绝大部分电路为数字电路,因而易于集成、体积小、成本低、可靠性高。

数字通信系统的主要缺点如下:

1) 占用信道频带宽。如采用模拟通信,传输一路电话仅占用4kHz的信道带宽,而采用数字传输时,一路PCM电话需要占用64kHz的信道带宽。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。

2) 对同步要求高。模拟通信只涉及载波同步,而数字通信可能涉及载波同步、位同步、群同步等,从而使数字通信系统更为复杂。

数字通信系统的优点是主要的,因而数字通信得到了快速发展,而且模拟信源发出的模拟信号也常采用数字传输,只要用信源编码将模拟信号转换成数字信号即可,数字电话就是一例。

1.1.3 通信系统的分类

- 1) 按信号特征分为模拟通信系统和数字通信系统。
- 2) 按通信业务分为电话通信系统、电报通信系统、图像通信系统、数据通信系统和广播电视系统等。
- 3) 按是否采用调制分为频带(带通)传输系统和基带传输系统。频带传输系统又分成模拟调制系统和数字调制系统,模拟调制系统还可分成调幅(AM)系统、调频(FM)系统和调相(PM)系统。数字调制系统也有幅移键控(ASK)系统、频移键控(FSK)系统和相移键控(PSK)系统等。
- 4) 按传输媒介分为有线通信系统和无线通信系统两大类。
- 5) 按信号复用方式分为频分系统、时分系统和码分系统等。
- 6) 按工作波段分为中长波通信、短波通信、超短波通信和微波通信系统等。

1.1.4 信息及其度量

1. 信息量的定义

信息是消息中包含的有意义的内容。信息是有大小的,是可以度量的。消息中含有的信息量的大小与消息出现的概率有关,具体表现为:

- 1) 消息出现的概率越小,所包含的信息量就越大。
- 2) 消息出现的概率为1,则包含的信息量为0。
- 3) 不可能出现的消息,所包含的信息量为无穷大。

所以,香农给出的信息量的定义为

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

式中, $P(s)$ 是消息 s 出现的概率; $I(s)$ 是消息 s 携带的信息量,其单位: $a=2$ 时,为比特



(bit), $a = e$ 时, 为奈特 (nat), $a = 10$ 时, 为哈特 (hat)。在通信和计算机中常用的单位为比特。

2. 信源的信息熵

设有信源 S 输出 M 种离散符号, 各种符号的出现概率为 $P(s_i)$, 且统计独立, 即信源是无记忆的, 则每个符号平均 (统计平均) 携带的信息量为

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

式中, $H(S)$ 为信源 S 的熵, 可简写为 H , 其单位为 bit/符号。

注意: 当信源各种符号等概出现, 即 $P(s_i) = 1/M$ 时, 信源熵达到最大值 $H_{\max} = \log_2 M$ bit/符号, 数值上等于单个符号携带的信息量。例如, 当 $M=2$ 时, 为二进制信源, $H_{\max} = 1$ bit/符号, 即每个二进制符号携带 1bit 信息; 当 $M=4$ 时, 为四进制信源, $H_{\max} = 2$ bit/符号, 即每个四进制符号携带 2bit 信息。

1.1.5 通信系统的主要性能指标

通信系统的性能指标用来衡量通信系统的优劣。通信系统涉及的性能指标很多, 包括有效性、可靠性、标准性、适应性、经济性和可维护性等, 其中有效性和可靠性是通信系统的两个主要性能指标。有效性是指传输一定信息量时所占用的信道资源数量 (带宽或时间长度); 可靠性是指信息传输的准确程度。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. 模拟通信系统的性能指标

1) 有效性: 用信号所占用的带宽来衡量。如 DSB 系统传输一路电话需要 8kHz 的信道带宽, 而一路 SSB 电话只需占用 4kHz 的信道带宽, 故 SSB 有效性更好。

2) 可靠性: 用接收信号的信噪比 S/N 来衡量, 常用分贝表示, $(S/N)_{\text{dB}} = 10 \lg (S/N)$ 。

2. 数字通信系统的性能指标

(1) 有效性

有效性用码元速率 R_s 或信息速率 R_b 或频带利用率 η 来衡量。

1) 码元速率 R_s : 又称为传码率、符号速率等。

定义: 每秒钟内传输的码元数目, 与码元宽度 T_s 的关系为 $R_s = 1/T_s$ 。

单位: 码元/s 或波特 (Baud)。

2) 信息速率 R_b : 又称为传信率、比特率等。

定义: 每秒钟内传输的信息量。

单位: 比特/秒 (bit/s)。

3) 码元速率 R_s 与信息速率 R_b 之间的关系:

一般表达式: $R_b = H(S) \cdot R_s$ (1-3)

当信源符号等概 (通常满足) 时: $R_b = R_s \log_2 M$ (1-4)

特别: $M=2$ 时, $R_b = R_s$, 数值相同, 但单位不同。

结论: 码元速率给定时, 进制越大, 信息速率越高; 反之, 当信息速率给定时, 进制越高, 码元速率越低。

4) 频带利用率 (带宽效率):

定义：单位频带上传输的码元速率或单位频带上传输的信息速率，即

$$\eta = \frac{R_s}{B} (\text{单位: Baud/Hz}) \text{ 或 } \eta = \frac{R_b}{B} (\text{单位: bit/(s} \cdot \text{Hz)}) \quad (1-5)$$

意义：将带宽与传输速率相联系，可更好地衡量通信系统的有效性。

注意： $\eta = R_s/B$ 常称做码元频带利用率，只能用于比较相同进制系统的有效性；比较不同进制系统的有效性时应使用信息频带利用率 $\eta = R_b/B$ ，否则无法得到多进制系统比二进制系统有效性更高的结论。

(2) 可靠性

可靠性用差错率表示，差错率有误码率和误比特率两种。

1) 误码率：码元在传输过程中发生错误的比例，可表示为

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-6)$$

2) 误比特率：信息在传输过程中发生错误的比例，可表示为

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-7)$$

可见，二进制时， $P_b = P_e$ ；多进制时， $P_b < P_e$ 。

1.2 教材习题详解

1. 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：用离散信源熵的计算式 (1-2) 得

$$\begin{aligned} H(S) &= \sum_{i=1}^6 P(s_i) I(s_i) \\ &= \left(\frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{16} \log_2 16 + \frac{1}{8} \log_2 8 + \frac{1}{16} \log_2 16 + \frac{1}{4} \log_2 4 \right) \text{bit/符号} \\ &= 2.375 \text{bit/符号} \end{aligned}$$

2. 国际莫尔斯电码用“点”和“划”的序列发送英文字母，“点”用持续一单位的电流脉冲表示，“划”用持续三单位的电流脉冲表示，且“划”出现的概率是“点”出现概率的 1/3，求：

(1) “点”和“划”的信息量。

(2) “点”和“划”的平均信息量。

解：(1) “划”出现的概率是“点”出现概率的 1/3，即 $P_1 = (1/3)P_2$ ，且 $P_1 + P_2 = 1$ ，所以 $P_1 = 1/4$ ， $P_2 = 3/4$ 。故有

$$\text{“划”的信息量} \quad I_1 = -\log_2 \frac{1}{4} \text{bit} = 2 \text{bit}$$

$$\text{“点”的信息量} \quad I_2 = -\log_2 \frac{3}{4} \text{bit} = 0.415 \text{bit}$$

$$(2) \text{平均信息量} \quad H = \left(\frac{3}{4} \times 0.415 + \frac{1}{4} \times 2 \right) \text{bit/符号} = 0.81 \text{bit/符号}$$



3. 设一数字传输系统传送二进制码元的速率为 2400Baud, 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是多少 (设各码元独立等概出现)?

解: (1) $M=2$, $R_s=2400\text{Baud}$, 信息速率为

$$R_b = R_s \log_2 M = 2400 \times \log_2 2 \text{ bit/s} = 2400 \text{ bit/s}$$

(2) $M=16$, $R_s=2400\text{Baud}$, 信息速率为

$$R_b = R_s \log_2 M = 2400 \times \log_2 16 \text{ bit/s} = 9600 \text{ bit/s}$$

可见, 当码元速率相同时, 多进制系统的信息速率更高。在以后的学习中会发现, 信号传输时占用信道带宽与码元速率有关。所以多进制系统具有更高的有效性。

4. 某信息源的符号集由 A、B、C、D 组成, 对于传输的每一个符号用二进制脉冲编码表示, 00 对应 A, 01 对应 B, 10 对应 C, 11 对应 D, 每个二进制脉冲的宽度为 5ms。假设每一符号独立出现。

(1) 不同符号等概率出现时, 试计算传输的平均信息速率。

(2) 若每个符号出现的概率分别为 $P_A=1/5$, $P_B=1/4$, $P_C=1/4$, $P_D=3/10$, 试计算传输的平均信息速率。

解: (1) 信源符号共有 4 种, 是四进制信源。每个符号用两位二进制码表示, 每个二进制码元宽度为 5ms, 故一个四进制信源符号占据的时间宽度为 $T_s=10\text{ms}$, 所以四进制信源的符号速率为

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{10 \times 10^{-3}} \text{ Baud} = 100 \text{ Baud}$$

独立等概时, 四进制信源的熵 $H = \log_2 4 \text{ bit/符号} = 2 \text{ bit/符号}$, 故平均信息速率

$$R_b = R_s \cdot H = (100 \times 2) \text{ bit/s} = 200 \text{ bit/s}$$

(2) 各个符号的出现不等概时, 信源熵和平均信息速率分别为

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{i=1}^4 P_i \log_2 P_i = \left(-\frac{1}{5} \log_2 \frac{1}{5} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{10} \log_2 \frac{3}{10} \right) \text{ bit/符号} \\ &= 1.985 \text{ bit/符号} \end{aligned}$$

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

5. 已知某四进制数字传输系统的信息传输速率为 2400bit/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: 根据误码率公式 $P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输码元总数}}$, 已知半小时内收到的错误码元数为 216 个, 故只要求出半小时内传输的总码元数即可。总码元数等于码元速率与时间长度的乘积。

由信息速率可求出码元速率为

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 M} = \frac{2400}{\log_2 4} \text{ Baud} = 1200 \text{ Baud}$$

半小时内传输的总码元数为

$$N = R_s t = (1200 \times 30 \times 60) \text{ 个} = 2.16 \times 10^6 \text{ 个}$$

求得误码率为

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

1.3 提高拓展题解析

1. 设 A 系统为二进制传输系统, 码元速率为 2000Baud, 占用信道带宽为 2000Hz; B 系统为四进制传输系统, 码元速率为 1000Baud, 占用信道带宽为 1000Hz。试问: A、B 两个系统哪个系统的有效性更高?

解: 信息频带利用率能准确反映系统的有效性。

A 系统: 信息传输速率 $R_b = R_s \log_2 M = (2000 \times \log_2 2) \text{ bit/s} = 2000 \text{ bit/s}$

频带利用率 $\eta_A = \frac{R_b}{B} = \frac{2000}{2000} \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)} = 1 \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)}$

B 系统: 信息传输速率 $R_b = R_s \log_2 4 = (1000 \times \log_2 4) \text{ bit/s} = 2000 \text{ bit/s}$

频带利用率为 $\eta_B = \frac{R_b}{B} = \frac{2000}{1000} \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)} = 2 \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)}$

所以, B 系统的有效性更高。

评注: 尽管码元速率、信息速率、码元频带利用率、信息频带利用率都可用来衡量系统的有效性, 但前三者都需要特定的条件。例如, 若进制相同且占用相同的带宽, 则码元速率越高的系统其有效性越高; 若占用相同的系统带宽, 则信息传输速率越高的系统其有效性越高; 若进制相同, 则码元频带利用率越高, 系统的有效性越高。所以, 衡量不同系统的有效性, 最准确的指标是信息频带利用率。

2. 某信息源输出 A、B、C、D 四种符号, 独立等概, 传输时每个符号用两位二进制码表示, 如 A: 00, B: 01, C: 10, D: 11。已知信息传输速率 $R_b = 1 \text{ Mbit/s}$, 试求

(1) 该信源输出的码元速率。

(2) 该信息源工作 1h 发出的信息量。

(3) 若在 1h 内收到的信息中, 大致均匀地发现了 36bit 的错误信息, 求误比特率和误码(符号)率。

解: (1) 该信源是四进制信源, 即 $M=4$, 且独立等概, 故由信息速率即可求得码元速率为

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 M} = \frac{1 \times 10^6}{\log_2 4} \text{ Baud} = 5 \times 10^5 \text{ Baud}$$

(2) 信息速率乘以时间长度等于这段时间内的信息量, 故 1h 内发出的信息量为

$$I = R_b T = (1 \times 10^6 \times 60 \times 60) \text{ bit} = 3.6 \times 10^9 \text{ bit}$$

(3) 根据误比特率定义得

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{总比特数}} = \frac{36}{3.6 \times 10^9} = 1 \times 10^{-8}$$

码元速率乘以时间长度即为码元总数, 故 1h 内传输的总码元(符号)数为

$$N = R_s T = (5 \times 10^5 \times 3600) \text{ 个} = 1.8 \times 10^9 \text{ 个}$$

由于一个四进制码元由两个二进制码元组成, 在独立等概时, 每个二进制码元携带 1bit 信