



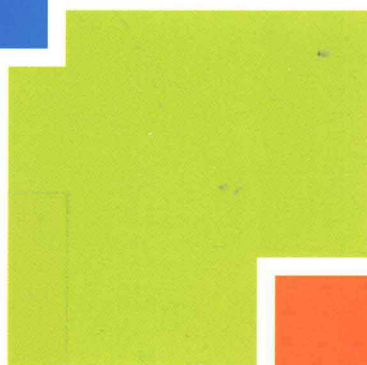
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

蒋青 于秀兰 王永范 馨月 编著

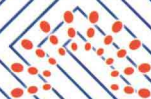
通信原理学习 与实验指导

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Instruction to Exercise and Experiment
For Communication Principle



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

蒋青 于秀兰 王永范 馨月 编著

通信原理学习 与实验指导

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Instruction to Exercise and Experiment
For Communication Principle

人民邮电出版社
北京



图书在版编目(CIP)数据

通信原理学习与实验指导 / 蒋青等编著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2012.7

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

ISBN 978-7-115-27624-7

I. ①通… II. ①蒋… III. ①通信原理—高等学校—教材②通信原理—实验—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第032156号

内 容 提 要

本书是学习通信原理课程的教辅用书,旨在为学习该课程的学生提供指导和帮助。

本书以蒋青、于秀兰、范馨月编著的《通信原理》(第3版)教材为主要参考书,同时参考了其他相关教材。

全书共分为三部分,第一部分为学习指导,涵盖了“通信原理”课程的重点内容,共10章,每章由重点难点分析和习题详解组成;第二部分为实验指导,给出了8个基于Matlab的通信系统仿真实验;第三部分为8套模拟试题,并给出了必要的解题过程和答案。

本书可作为高等学校通信工程、电子信息工程和其他相近专业本科生课程学习指导书,也可以作为报考硕士研究生的复习辅导书,还可作为有关教师的教学参考书。

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信原理学习与实验指导

-
- ◆ 编 著 蒋 青 于秀兰 王 永 范馨月
责任编辑 刘 博
 - ◆ 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 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17
字数: 424千字
- 2012年7月第1版
2012年7月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-27624-7

定价: 35.00 元

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

反盗版热线: (010)67171154

“通信原理”课程是通信工程、电子信息工程等专业的一门重要的专业基础课，也是通信与信息系统、信号与信息处理等专业硕士研究生入学考试科目之一。它是一门理论性和实践性都很强的课程，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都有较高的要求，学生不但应该掌握通信系统的基本原理和基本分析方法，还应该熟记重要结论并灵活应用。此书旨在帮助学生理解本课程的主要内容，熟悉多种题型，掌握解题技巧。

本书以蒋青、于秀兰、范馨月编著的《通信原理》（第3版）教材为主要参考书，同时也参考了其他相关教材。全书共分为三部分，第一部分涵盖了“通信原理”课程的重点内容，共10章，内容包括绪论、信号与噪声分析、模拟调制系统、模拟信号的数字传输、数字信号的基带传输、数字信号的载波传输、现代数字调制技术、信道、信道编码、扩频通信等。每章由重点、难点分析和习题详解组成；第二部分为实验指导，给出了8个基于Matlab的通信系统仿真实验；第三部分包含8套模拟试题，并给出了必要的解题过程和答案。

本书由蒋青担任主编，并编写第一部分第1章、第2章、第3章、第5章、第6章、第8章，于秀兰编写第4章、第7章、第8章、第9章；范馨月编写第10章，第二部分实验指导由王永老师编写；第三部分由于秀兰、蒋青和范馨月三位老师合作编写。在本书的编写过程中得到雷维嘉教授、陈善学教授等多位同行的帮助，在此一并表示诚挚的谢意。

本书编者都是长期在一线从事“通信原理”课程教学的教师，在编写时注重突出基本理论、基本概念、基本方法和重要结论的应用，同时注重通信系统的整体知识和解题的思路与技巧。所选题目内容广泛、难度适中，力求文字通俗易懂，概念清楚明了，内容重点突出。

书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编者
2012年5月

目 录

第一部分 学习指导

第 1 章 绪论	2	4.1.3 量化	62
1.1 重点与难点	2	4.1.4 编码	63
1.1.1 基本概念	2	4.1.5 PCM 系统的性能分析	65
1.1.2 通信系统模型	2	4.1.6 语音压缩编码	66
1.1.3 信息及其度量	4	4.1.7 时分复用和多路数字电话系统	67
1.1.4 通信系统的主要性能指标	4	4.2 习题详解	68
1.1.5 通信系统运载信息的能力	6	第 5 章 数字信号的基带传输	80
1.2 习题详解	6	5.1 重点与难点	80
第 2 章 信号与噪声分析	11	5.1.1 数字基带信号的码型	80
2.1 重点与难点	11	5.1.2 数字基带信号的功率谱密度	81
2.1.1 确知信号分析	11	5.1.3 数字基带信号的传输与码间串扰	82
2.1.2 随机变量分析	13	5.1.4 无码间串扰基带传输系统的抗噪声性能	85
2.1.3 随机过程的分析	15	5.1.5 最佳基带传输系统	86
2.1.4 随机过程通过系统的分析	18	5.1.6 眼图	87
2.1.5 窄带高斯噪声	19	5.1.7 改善数字基带系统性能的措施	87
2.1.6 正弦波加窄带高斯噪声	20	5.1.8 位同步	89
2.2 习题详解	21	5.2 习题详解	89
第 3 章 模拟调制系统	36	第 6 章 数字信号的载波传输	104
3.1 重点与难点	36	6.1 重点与难点	104
3.1.1 线性调制	36	6.1.1 二进制数字调制原理	104
3.1.2 线性调制系统的解调	39	6.1.2 二进制数字调制系统的抗噪声性能	111
3.1.3 线性调制系统的抗噪声性能分析	39	6.1.3 多进制数字调制系统	111
3.1.4 非线性调制系统的原理及抗噪声性能	42	6.2 习题详解	113
3.1.5 载波同步	44	第 7 章 现代数字调制技术	127
3.1.6 频分复用	45	7.1 重点与难点	127
3.2 习题详解	46	7.1.1 改进型四相相移键控	127
第 4 章 模拟信号的数字传输	59		
4.1 重点与难点	59		
4.1.1 PCM 基带传输系统的组成	59		
4.1.2 抽样	60		

7.1.2 恒包络连续相位 的频移键控.....	129	9.1.1 信道编码的基本概念.....	153
7.1.3 正交幅度调制 (QAM)	132	9.1.2 线性分组码.....	153
7.1.4 正交频分复用多载波调制.....	133	9.1.3 循环码.....	155
7.2 习题详解.....	135	9.1.4 卷积码.....	157
第 8 章 信道	144	9.1.5 纠突发错误的码.....	158
8.1 重点与难点.....	144	9.1.6 Turbo 码.....	158
8.1.1 信道的定义和分类.....	144	9.2 习题详解.....	158
8.1.2 信道的数学模型.....	144	第 10 章 扩频通信	173
8.1.3 恒参信道特性及其对信号 传输的影响.....	145	10.1 重点与难点.....	173
8.1.4 随参信道特性及其对信号传输 的影响.....	146	10.1.1 扩频通信的基本原理.....	173
8.1.5 信道衰减.....	147	10.1.2 伪随机序列.....	173
8.2 习题详解.....	148	10.1.3 直接序列扩频系统.....	176
第 9 章 信道编码	153	10.1.4 跳频系统.....	176
9.1 重点与难点.....	153	10.1.5 码分复用.....	177
		10.2 习题详解.....	179

第二部分 实验指导

第 11 章 基于 Matlab 的通信系统仿真	184	仿真实验.....	198
11.1 香农信道容量定理仿真实验.....	184	11.6 匹配滤波器仿真实验.....	200
11.2 高斯白噪声特性仿真实验.....	185	11.7 卷积码抗噪性能仿真实验.....	203
11.3 模拟线性调制仿真实验.....	189	11.8 正交幅度调制系统特性 仿真实验.....	205
11.4 数字基带传输系统特性仿真实验.....	193		
11.5 数字频带系统的谱分析			

第三部分 模拟试题与参考答案

模拟试题一.....	208	模拟试题一答案.....	231
模拟试题二.....	211	模拟试题二答案.....	235
模拟试题三.....	214	模拟试题三答案.....	238
模拟试题四.....	217	模拟试题四答案.....	241
模拟试题五.....	220	模拟试题五答案.....	244
模拟试题六.....	224	模拟试题六答案.....	247
模拟试题七.....	227	模拟试题七答案.....	251
模拟试题八.....	229	模拟试题八答案.....	254
附录一 英文缩写词对照表.....	256	函数表.....	263
附录二 傅里叶变换.....	259	附录五 常用数学公式.....	265
附录三 贝塞尔函数表 $J_n(x)$	262	参考文献.....	266
附录四 误差函数、互补误差			

第一部分 学习指导

第 1 章 绪论

第 2 章 信号与噪声分析

第 3 章 模拟调制系统

第 4 章 模拟信号的数字传输

第 5 章 数字信号的基带传输

第 6 章 数字信号的载波传输

第 7 章 现代数字调制技术

第 8 章 信道

第 9 章 信道编码

第 10 章 扩频通信

1.1 重点与难点

1.1.1 基本概念

(1) 通信：通信就是异地间人与人、人与机器、机器与机器进行信息的传递和交换。通信的目的在于信息的传递和交换。

(2) 信息：信息是人类社会和自然界中需要传递、交换、存储和提取的抽象内容。由于信息是抽象的内容，为了传递和交换信息，必须通过语言、文字、图像和数据等将它表示出来，即信息通过消息来表示。

(3) 消息：消息是信息的载荷者。消息有不同的形式，例如语言、文字、符号、数据、图片等。

(4) 信号：信号是消息的表现形式，消息是信号的具体内容。信号是消息的载体，是表示消息的物理量。

(5) 通信系统：我们把实现信息传输过程的全部设备和传输介质所构成的总体称为通信系统。

1.1.2 通信系统模型

1. 一般模型

我们把实现信息传输所需的一切设备和传输介质所构成的总体称为通信系统。以点对点通信为例，通信系统的一般模型，如图 1-1 所示。

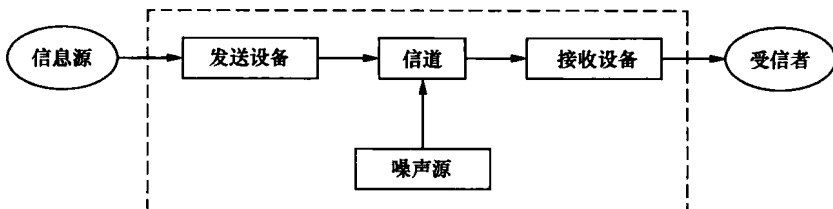


图 1-1 通信系统的一般模型

发送设备的作用一方面是把信息转换成原始电信号(称为基带信号);另一方面将原始电信号处理成适合在信道中传输的信号。

信道是指传输信号的通道,按传输介质的不同,可分为有线信道和无线信道两大类。

接收设备的功能与发送设备相反,即进行解调、译码等。它的任务是从带有干扰的接收信号中恢复出相应的原始电信号,并将原始电信号转换成相应的信息,提供给受信者。

2. 模拟通信系统模型

传输模拟信号的系统称为模拟通信系统,如图1-2所示。

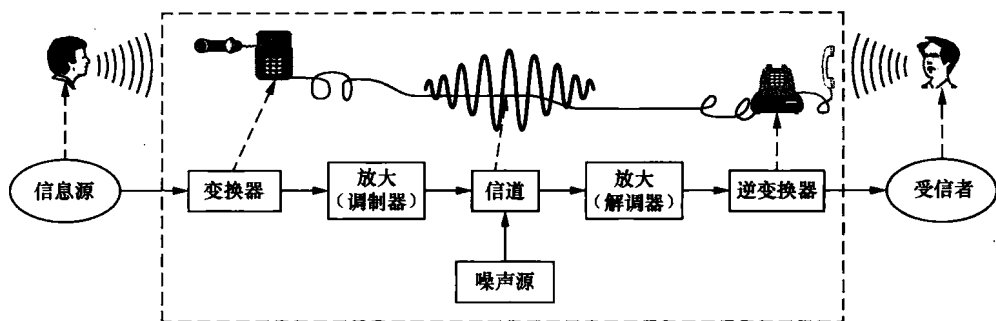


图 1-2 模拟通信系统模型

变换器将语音信息变成电信号(模拟信源),然后电信号经放大设备后可以直接在信道中传输。为了提高频带利用率,使多路信号在同一信道中传输,原始的电信号(基带信号)一般要进行调制才能传输到信道中去。

调制是信号的一种变换,通常是将不便于信道直接传输的基带信号变换成适合信道中传输的信号。这一过程由调制器完成,经过调制后的信号称为已调信号。在接收端,已调信号经解调器和逆变换器还原成语音信息。

3. 数字通信系统模型

数字通信系统是传递数字信号的通信系统,如图1-3所示。

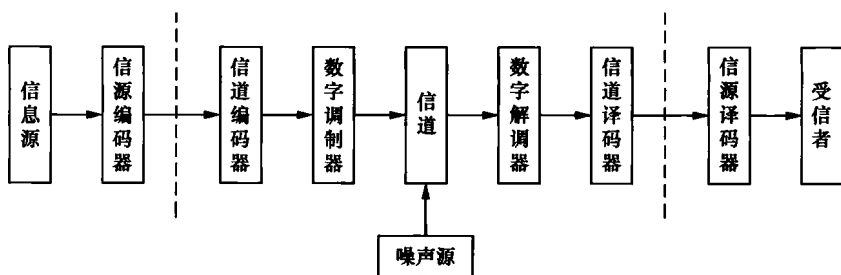


图 1-3 数字通信系统模型

信源编码器的作用主要有两个,其一是当信息源给出的是模拟信号时,信源编码器将其转换成数字信号,以实现模拟信号的数字化传输;其二就是设法用适当的方法降低数字信号的码元速率以压缩频带。信源编码的目的是提高数字信号传输的有效性。接收端信源译码则是信源编码的逆过程。

信道编码的任务是提高数字信号传输的可靠性。其基本做法是在信息码组中按一定的规则附加一些监督码元,以使接收端根据相应的规则进行检错和纠错。信道编码也称纠错编码。

接收端信道译码是其相反的过程。

数字调制是把所传输的数字序列的频谱搬移到适合信道传输的频带范围内,使之适应信道传输的要求。基本的数字调制方式有幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)等。

数字通信系统还有一个非常重要的控制单元,即同步系统(图 1-3 没有画出)。它对通信系统的收、发两端或整个通信系统提供时钟同步,使接收端接收的数据流能与发送端同步,从而有序而准确地接收与恢复原信息。

1.1.3 信息及其度量

通信系统中传输信息的多少采用“信息量”来度量。

1. 单符号离散消息 x 的信息量

单符号离散消息 x 的信息量 I 与消息 x 出现的概率 $p(x)$ 的关系式为

$$I = \log_a \frac{1}{p(x_i)} = -\log_a p(x_i) \quad (1-1)$$

I 代表两种含义:当事件 x 发生以前,表示事件 x 发生的不确定性;当事件 x 发生以后,表示事件 x 所含有(或所提供)的信息量。

信息量的单位由对数底 a 的取值决定。若对数以 2 为底时单位是“比特”(bit —— binary unit 的缩写);若以 e 为底时单位是“奈特”(nat——nature unit 的缩写);若以 10 为底时单位是“哈特”(Hart —— Hartley 的缩写)。通常采用“比特”作为信息量的实用单位。

2. 多符号离散消息序列的信息量

设离散信息源是由 n 个符号组成的集合,称符号集。符号集中的每一个符号 x_i 在消息中是按一定概率 $p(x_i)$ 独立出现的,又设符号集中各符号出现的概率为

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

于是,该信源每个符号所含信息量的统计平均值,即平均信息量为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \quad (1-2)$$

当离散信源的每一个符号等概率出现时,即 $p(x_i) = 1/n$ ($i = 1, 2, \dots, n$),此时的熵最大。最大熵值为 $\log_2 n$ (bit/符号)。

1.1.4 通信系统的主要性能指标

通信的有效性和可靠性是通信系统中最主要的性能指标。

所谓有效性,是指消息传输的“速度”问题。

可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。在实际通信系统中,对有效性和可靠性这两个指标的要求经常是矛盾的,提高系统的有效性会降低可靠性,反之亦然。因此,在设计通信系统时,对两者应统筹考虑。

模拟通信系统的有效性指标用所传信号的有效传输带宽来表征。模拟通信系统的可靠性指标用整个通信系统的输出信噪比来衡量。信噪比是信号的平均功率 S 与噪声的平均功率 N 之比。信噪比越高,说明噪声对信号的影响越小。显然,信噪比越高,通信质量就

越好。

数字通信系统的有效性指标用传输速率和频带利用率来表征。

1. 传输速率

传输速率有两种表示方法：码元传输速率 R_B 和信息传输速率 R_b 。

(1) 码元传输速率 R_B (又称为码元速率或符号速率)，简称传码率，它是指系统每秒钟传送码元的数目，单位是波特 (Baud)。

(2) 信息传输速率 R_b (又称为信息速率)，简称传信率，它是指系统每秒钟传送的信息量，单位是比特/秒，常用符号 “bit/s” 表示。

在 N 进制下，设信息速率为 R_b (bit/s)，码元速率为 R_{BN} (Baud)，由于每个码元或符号通常都含有一定比特的信息量，因此码元速率和信息速率有确定的关系，即

$$R_b = R_{BN} H(x) \quad (\text{bit/s}) \quad (1-3)$$

式中， $H(X)$ 为信源中每个符号所含的平均信息量 (熵)。当离散信源的每一符号等概率出现时，熵有最大值为 $\log_2 N$ (bit/符号)，信息速率也达到最大，即

$$R_b = R_{BN} \log_2 N \quad (\text{bit/s}) \quad (1-4)$$

或

$$R_{BN} = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad (\text{Baud}) \quad (1-5)$$

式中， N 为符号的进制数。在二进制下，码元速率与信息速率数值相等，但单位不同。

2. 频带利用率 η

在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，还应看在这样的传输速率下所占信道的频带宽度。频带利用率有两种表示方式：码元频带利用率和信息频带利用率。

码元频带利用率是指单位频带内的码元传输速率，即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Baud/Hz}) \quad (1-6)$$

信息频带利用率是指每秒钟在单位频带上传输的信息量，即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad \text{bit/(s} \cdot \text{Hz)} \quad (1-7)$$

数字通信系统的可靠性指标用差错率来衡量。差错率越小，可靠性越高。差错率也有两种表示方法：误码率和误信率。

3. 误码率

误码率指接收到的错误码元数和总的传输码元个数之比，即在传输中出现错误码元的概率，记为

$$P_e = \frac{\text{接收的错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-8)$$

4. 误信率

误码率又叫误比特率，是指接收到的错误比特数和总的传输比特数之比，即在传输中出现错误信息量的概率，记为

$$P_b = \frac{\text{接收的错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-9)$$

1.1.5 通信系统运载信息的能力

信息是通过信道传输的，如果信道受到加性高斯白噪声的干扰，传输信号的功率和带宽又都受到限制，这时信道的传输能力如何？对于这个问题，香农在信息论中已经给出了回答，这就是著名的香农公式。其表达式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/s}) \quad (1-10)$$

式中， C 为信道容量，是指以任意小的差错率传输时信道可能传输的最大信息速率，它是信道能够达到的最大传输能力； B 为信道带宽； S 为信号的平均功率； N 为高斯白噪声的平均功率； S/N 为信噪比。

由于噪声功率 N 与信道带宽 B 有关，若设单位频带内的噪声功率为 n_0 ，单位为 W/Hz (n_0 又称为单边功率谱密度)，则噪声功率 $N = n_0 B$ 。因此，香农公式的另一种形式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (\text{bit/s}) \quad (1-11)$$

式 (1-10) 或式 (1-11) 给出了通信系统运载能力的极限值 C ，它也常被称为“香农极限”。

1.2 习题详解

1-1 设有 4 个消息 A, B, C, D 分别以概率 1/4, 1/8, 1/8 和 1/2 传送，每一个消息的出现是互相独立的。试计算其平均信息量。

解：平均信息量为

$$H(x) = -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} = 1.75 \text{ bit/符号}$$

1-2 掷两粒骰子，当其向上的面的小圆点数之和是 3 时，该消息所包含的信息量是多少？当小圆点数之和是 7 时，该消息所包含的信息量是多少？

解：(1) 两粒骰子向上面的小圆点数之和为 3 时，有 (1, 2) 和 (2, 1) 两种可能，总的组合数为 $C_6^1 \times C_6^1 = 36$ ，则圆点数之和为 3 出现的概率为

$$p_3 = \frac{2}{36} = \frac{1}{18}$$

故包含的信息量为

$$I(3) = -\log_2 p_3 = -\log_2 \frac{1}{18} = 4.17 (\text{bit})$$

(2) 小圆点数之和为 7 的情况有 (1, 6) (6, 1) (2, 5) (5, 2) (3, 4) (4, 3)，则圆点数之和为 7 出现的概率为

$$p_7 = \frac{6}{36} = \frac{1}{6}$$

故包含的信息量为

$$I(7) = -\log_2 p_7 = -\log_2 \frac{1}{6} = 2.585(\text{bit})$$

1-3 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代替, 00 代替 A, 01 代替 B, 10 代替 C, 11 代替 D, 每个脉冲宽度为 10 ms。

(1) 不同的字母是等可能出现的, 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: (1) 每个字母的持续时间为 $2 \times 10\text{ms}$, 所以字母传输速率为

$$R_{B4} = \frac{1}{2 \times 10 \times 10^{-3}} = 50 (\text{Baud})$$

不同字母等可能出现时, 每个字母的平均信息量为

$$H(x) = \log_2 4 = 2 (\text{bit/符号})$$

平均信息速率为

$$R_b = R_{B4} \cdot H(x) = 100(\text{bit/s})$$

(2) 每个字母的平均信息量为

$$H(x) = -\frac{1}{5} \log_2 \frac{1}{5} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{10} \log_2 \frac{3}{10} = 1.985 (\text{bit/符号})$$

所以平均信息速率为

$$R_b = R_{B4} \cdot H(X) = 99.25 (\text{bit/s})$$

1-4 设有一个离散无记忆信源, 其概率空间为

$$\begin{bmatrix} X \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 3/8 & 1/4 & 1/4 & 1/8 \end{bmatrix}$$

(1) 求每个符号的信息量;

(2) 信源发出一消息符号序列为 (202 120 130 213 001 203 210 110 321 010 021 032 011 223 210) 求该消息序列的信息量和平均每个符号携带的信息量。

解: (1) 根据题意, 可得

$$I(0) = -\log P(0) = -\log_2 \frac{3}{8} \approx 1.415 (\text{bit})$$

$$I(1) = -\log P(1) = -\log_2 \frac{1}{4} = 2 (\text{bit})$$

$$I(2) = -\log P(2) = -\log_2 \frac{1}{4} = 2 (\text{bit})$$

$$I(3) = -\log P(3) = -\log_2 \frac{1}{8} = 3 (\text{bit})$$

(2) 方法一: 因为离散信源是无记忆的, 所以其发出的消息序列中各符号是无依赖的、统计独立的。因此, 此消息的信息量就等于消息中各个符号的信息量之和。此消息中共有 14 个“0”符号, 13 个“1”符号, 12 个“2”符号, 6 个“3”符号, 则该消息的信息量是

$$\begin{aligned}
 I &= 14I(0) + 13I(1) + 12I(2) + 6I(3) \\
 &\approx 14 \times 1.415 + 13 \times 2 + 12 \times 2 + 6 \times 3 \\
 &\approx 87.81 \text{ (bit)}
 \end{aligned}$$

此消息中共含 45 个信源符号，这 45 个信源符号携带有 87.81bit 信息量，则此消息中平均每个符号携带的信息量为

$$I_2 = 87.81 / 45 \approx 1.95 \text{ (bit/符号)}$$

方法二：若用熵的概念计算，有

$$H(X) = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - 2 \times \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \text{ (bit/符号)}$$

说明：以上两种结果略有差别的原因在于，它们平均处理方法不同，前一种按算术平均的方法进行计算，后一种是按熵的概念进行计算，结果可能存在误差。这种误差将随消息中符号数的增加而减少。

1-5 国际莫尔斯电码用点和划的序列发送英文字母，划用持续 3 个单位的电流脉冲表示，点用持续 1 个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。

(1) 计算点和划的信息量；

(2) 计算点和划的平均信息量。

解：(1) 设点和划出现的概率分别为 $p_{\text{点}}$ 和 $p_{\text{划}}$ ，由已知条件知 $p_{\text{划}} = \frac{1}{3} p_{\text{点}}$ ，且 $p_{\text{划}} + p_{\text{点}} = 1$ ，

所以 $p_{\text{划}} = \frac{1}{4}$ ， $p_{\text{点}} = \frac{3}{4}$ ，则点的信息量为

$$I_{\text{点}} = \log_2 \frac{1}{p_{\text{点}}} = \log_2 \frac{4}{3} = 0.415 \text{ (bit)}$$

划的信息量为

$$I_{\text{划}} = \log_2 \frac{1}{p_{\text{划}}} = \log_2 4 = 2 \text{ (bit)}$$

(2) 点和划的平均信息量为

$$H(X) = -\left[\frac{3}{4} \log_2 \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4}\right] = 0.81 \text{ (bit/符号)}$$

1-6 某一无记忆信源的符号集为 $\{0, 1\}$ ，已知 $p_0 = 1/4$ ， $p_1 = 3/4$ 。

(1) 求信源符号的平均信息量；

(2) 由 100 个符号构成的序列，求某一特定序列（例如， m 个 0 和 $100-m$ 个 1）的信息量的表达式；

(3) 计算 (2) 中的序列熵。

解：(1) $H(X) = -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{4} \log_2 \frac{3}{4} \approx 0.811 \text{ (bit/符号)}$

(2) 某一特定序列（例如， m 个 0 和 $100-m$ 个 1）出现的概率为

$$P(X^L) = P(X_1, X_2, \dots, X_{100}) = [P(0)]^m [P(1)]^{100-m} = \left(\frac{1}{4}\right)^m \left(\frac{3}{4}\right)^{100-m}$$

所以，信息量为

$$I(X_1, X_2, \dots, X_{100}) = -\log P(X^L) = -\log \left\{ \left(\frac{1}{4} \right)^m \left(\frac{3}{4} \right)^{100-m} \right\}$$

$$= 200 - (100 - m) \log_2 3 \quad (\text{bit})$$

(3) 序列的熵

$$H(X^L) = 100H(X) = 81 \text{ (bit/序列)}$$

1-7 若一个通信系统 2 秒内传送了 1.2×10^8 个码元, 求它的码元传输速率。若该段时间共有 3 个码元的错误, 试求出该时间段的误码率。

$$\text{解: } R_B = \frac{1.2 \times 10^8}{60 \times 2} = 10^6 \text{ (Baud)}, \quad P_e = \frac{3}{1.2 \times 10^8} = 2.5 \times 10^{-8}$$

1-8 设一个数字传输系统传送二进制码元的速率为 1 200Baud, 试求该系统的信息速率; 若该系统改成传送十六进制信号码元, 码元速率为 2 400Baud, 则这时的系统信息速率为多少?

解: 若系统传送二进制码元的速率为 1 200Baud, 则系统的信息速率为

$$R_b = 1\,200 \times \log_2 2 = 1\,200 \text{ (bit/s)}$$

若系统传送十六进制码元的速率为 2 400Baud, 则系统的信息速率为

$$R_b = 2\,400 \times \log_2 16 = 9\,600 \text{ (bit/s)}$$

1-9 若一个信号源输出四进制等概数字信号, 其码元宽度为 $1\mu\text{s}$ 。试求其码元速率和信息速率。

$$\text{解: } R_B = \frac{1}{T_s} = \frac{1}{1 \times 10^{-6}} = 10^6 \text{ (Baud)}, \quad R_b = R_B \log_2 4 = 2 \times 10^6 \text{ (bit/s)}$$

1-10 若题 1-9 中数字信号在传输过程中 2 秒误 1 bit, 求误码率。

$$\text{解: } P_e = \frac{1}{2 \times 10^6 \times \log_2 4} = 0.25 \times 10^{-6}$$

1-11 计算机终端通过电话信道传输数据。

(1) 设要求信道的 $S/N = 30\text{dB}$, 试求该信道的信道容量是多少?

(2) 设线路上的最大信息传输速率为 4 800bit/s, 试求所需最小信噪比为多少?

$$\text{解: (1) 因为 } S/N = 30\text{dB}, \text{ 即 } 10 \log_{10} \frac{S}{N} = 30 \text{ (dB)},$$

得: $S/N = 1000$

由香农公式得信道容量

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

$$= 3\,400 \times \log_2 (1 + 1\,000)$$

$$\approx 33.89 \times 10^3 \text{ (bit/s)}$$

(2) 因为最大信息传输速率为 4 800bit/s, 即信道容量为 4 800bit/s。由香农公式得

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

得: $\frac{S}{N} = 2^{\frac{C}{B}} - 1 = 2^{\frac{4800}{3400}} - 1 \approx 2.66 - 1 = 1.66$

则所需最小信噪比为 1.66。

1-12 具有 6.5MHz 带宽的某高斯信道，若信道中信号功率与噪声功率谱密度之比为 45.5MHz，试求其信道容量。

解：由香农公式得信道容量

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \\ &= 6.5 \times 10^6 \times \log_2 \left(1 + \frac{45.5}{6.5} \right) \\ &= 1.95 \times 10^7 \text{ (bit/s)} \end{aligned}$$

1-13 设高斯信道的带宽为 4kHz，信号与噪声的功率比为 63，试确定利用这种信道的理想通信系统之传信率和差错率。

解：该信道的容量为

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \\ &= 4 \times 10^3 \times \log_2 (1 + 63) \\ &= 2.4 \times 10^4 \text{ (bit/s)} \end{aligned}$$

理想通信系统是指传信率 $R_b = C$ ，差错率 $P_e = 0$ 的通信系统。

第 2 章 信号与噪声分析

2.1 重点与难点

2.1.1 确知信号分析

1. 周期信号的傅里叶级数

任何一个周期为 T 的周期信号 $f(t)$ ，只要满足狄里赫利条件，则可展开为傅里叶级数

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega_0 t} \quad (2-1)$$

式中， $F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt$ ($n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)； $F_0 = c_0 = a_0$ ； $F_n = \frac{c_n}{2} e^{-j\varphi_n}$ (称为复振幅)；

$F_{-n} = \frac{c_n}{2} e^{j\varphi_n} = F_n^*$ (是 F_n 的共轭)。

一般地， F_n 是一个复数，由 F_n 确定周期信号 $f(t)$ 的第 n 次谐波分量的幅度，它与频率之间的关系图形称为信号的幅度频谱。由于它不连续，仅存在于 ω_0 的整数倍处，故这种频谱是离散谱。

许多情况下，利用信号的频谱进行分析比较直观方便。

2. 非周期信号的傅里叶变换

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2-2)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2-3)$$

式 (2-2) 和式 (2-3) 分别称为傅里叶正变换和傅里叶反变换，两式称为 $f(t)$ 傅里叶变换对，表示为

$$f(t) \Leftrightarrow F(\omega)$$

信号的傅里叶变换具有一些重要的特性，灵活运用这些特性可较快地求出许多复杂信号的频谱密度函数，或从谱密度函数中求出原信号，因此掌握这些特性是非常有益的。其中较为重要且经常用到的一些性质和傅里叶变换对见附录二。