

十一五规划理工类主干课程辅导丛书

通信原理

习题与解析

周 为 编著

Exercise

&
Analysis

十一五规划理工类主干课程辅导丛书

通信原理习题与解析

周 为 编著

科学出版社

内 容 提 要

本书根据通信原理课程的最新教学大纲要求,总结作者多年一线授课经验编写而成。书中通过对知识点概念和习题的讲解与分析,帮助读者了解和掌握该课程的难点、要点,提高读者分析问题与解决问题的能力。

全书按照通行教材的章节安排,对通信原理课程内容进行归纳分类。每章分成若干个知识点,每个知识点又分为“要点归纳”和“例题解析”。“要点归纳”是对重要知识点的提炼总结;“例题解析”部分精选出一些具有代表性的例题(包括疑难习题、课程考试试题以及近年考研真题),给出了解题思路与解答步骤,明示了解题过程中需要注意的问题。全书最后提供了课程测试题和考研真题各一套,并附有参考答案,以提高读者的应试水平和对知识的综合应用能力。

本书可作为本、专科学生学习通信原理课程的辅导教材,对准备考研的学生也是一本很好的考研复习资料。书中提供的海量习题为从事课程教学的老师提供了宝贵的教学资源,可供教师作为教学参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理习题与解析 / 周为编著. —北京: 科学出版社, 2008

(十一五规划理工类主干课程辅导丛书)

ISBN 978-7-03-022786-7

I. 通… II. 周… III. 通信理论—解题 IV. TN911-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 123936 号

责任编辑: 田龙美/责任校对: 杨慧芳

责任印刷: 科 海/封面设计: 林 陶

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市鑫山源印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 9 月第 一 版

开本: 16 开

2008 年 9 月第 一 次印刷

印张: 20

印数: 0 001~5 000

字数: 486 千字

定价: 32.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

本书是为读者学习通信原理课程而编写的教学辅导书，力争使读者在尽可能短的时间内巩固课程基本概念，加深理解基本理论并融会贯通，熟练掌握基本分析计算方法并举一反三，不断提高读者的应试水平和知识的综合应用能力。

阅读指南

全书共分 12 章。

第 1 章主要介绍通信发展史及其技术未来的发展趋势和特征，通信的一般系统模型，模拟通信的系统模型，数字通信的系统模型，通信网系统模型，通信系统的一般分类方法和分类依据，通信系统的主要性能指标，数字通信系统的主要特点，信息源的统计特性描述及信息的度量方法，信息源的信源熵计算，条件熵、联合熵、互信息及其相互关系等。

第 2 章主要介绍确定信号的分类方法，周期信号的傅立叶级数分析，傅立叶变换，能量谱密度和功率谱密度，确定信号的相关函数，卷积运算，确定信号通过线性系统的分析，希尔伯特变换，解析信号、频带信号、带通系统的相关概念及理论分析等。

第 3 章主要介绍随机过程的统计（概率）特性，高斯随机过程（正态），平稳随机过程通过线性系统，窄带随机过程，余弦波加窄带平稳高斯随机过程，匹配滤波器及其在最佳数字基础接收理论中的应用，循环平稳随机过程等。

第 4 章主要介绍通信信道的基本定义与分类方式，通信信道实例，通信信道的数学模型，分集接收原理和实现方式，分集信号的合并方式，恒参信道特性及其对信号传输的影响，随参信道特性及其对信号传输的影响，通信系统的常见噪声形式，信道容量及香农公式等。

第 5 章主要介绍模拟幅度调制的基本概念，信号的时域、频域表示式及频谱分析，调制与解调原理，标准幅度调制（AM），双边带幅度调制（DSB），单边带幅度调制（SSB），残留边带幅度调制（VSB），各类幅度调制在信道加性白高斯噪声干扰下的抗噪声性能分析等。

第 6 章主要介绍非线性调制的分类，调相波和调频波的概念及表达式，窄带角度调制系统和宽带角度调制系统，调频信号的产生与解调方法，角度调制系统的抗噪声性能，角度调制系统的门限效应，预加重与去加重，频分复用技术等。

第 7 章主要介绍抽样定理，脉冲调制的分类，脉冲振幅调制，抽样的分类，模拟信号的量化，脉冲编码调制，A 律 PCM 编码原理，简单增量调制，预测编码的概念，差分脉冲编码调制，时分复用技术的概念及运用等。

第 8 章主要介绍数字基带信号常用码型的特点及功率谱密度，常用线路传输码的种类及编码规则，数字基带信号的接收分类及不同接收方法的噪声性能分析，限带基带信道，最佳基带传输，无码间干扰的奈奎斯特准则，眼图的意义，信道均衡的作用和种类，部分响应系统的特点等。

第 9 章主要介绍二进制数字信号正弦载波调制的种类，各种二进制数字信号调制的原理

和性质,二进制数字信号的解调方式,二进制数字信号的各种解调方式的误码率分析,多进制数字调制的概念及分类,正交幅度调制,最小频移键控,高斯滤波最小频移键控等。

第10章主要介绍同步的概念及分类,载波同步的概念、意义及信号的提取方式,位同步的概念、意义及信号的提取方式,帧同步的概念及意义,网同步的概念及意义。

第11章主要介绍差错控制的分类,信道编码的基本思想及分类,码重、码距及最小码距的意义,奇偶校验码的原理,线性分组码的概念,线性分组码的一致监督矩阵和生成矩阵,校正子的计算方法,汉明码的性质,循环码的概念,循环码的生成多项式,循环码的生成矩阵和监督矩阵,循环码检错码,卷积码的编码及描述方法,卷积码的译码算法,BCH码、纠正突发错误码、交织码、级联码、Turbo码及高效率信道编码等。

第12章给出课程测试题和考研真题各一套,并给出了解题思考。

特色与优点

编写本书的指导思想是:在内容上重视基础理论,覆盖课程全部基本教学要求;在体系上照顾不同专业学生,反映通信原理面向21世纪教学内容和课程体系改革的成果;在形式上根据教学实践经验和对相关内容的思考理解,简明描述课程的基本知识点、重点和难点内容,使学生迅速把握重点。

本书每章内容均包括各基本知识点的要点归纳,并精选一些具有代表性的例题,给出了解题思路和分析方法,题后提示了解题中应注意的问题。这样编写的目的在于:力争使读者在尽可能短的时间内,巩固课程基本概念,加深理解基本理论并融会贯通,熟练掌握基本分析计算方法,并举一反三,不断提高读者的应试水平和知识的综合应用。本书最后给出了一套课程测试题和考研真题,并提供了参考答案,供学生自测和考前练习。

本书定位

本书可供通信原理课程的读者和考研读者学习,也可供从事课程教学的教师参考,对于准备考研的学生,本书也是一本极好的备考指导。

本书由周为编写,全书框架结构由何光明和吴婷拟定。感谢侯金龙等同志给予的支持和帮助,另外还要感谢王珊珊、陈玉旺、许娟、陈芳、范荣钢、钱阳勇、杨明、丁善祥、张凌云、陈智等同志的关心和帮助。

由于编者水平和经验有限,加之编写时间仓促,本书难免会有不尽完善之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2008年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 知识点 1: 通信和通信系统	1
1.1.1 要点归纳	1
1.1.2 例题解析	5
1.2 知识点 2: 信息论初步	9
1.2.1 要点归纳	9
1.2.2 例题解析	12
第 2 章 确定信号分析理论	16
2.1 知识点 1: 傅立叶级数和傅立叶变换	16
2.1.1 要点归纳	16
2.1.2 例题解析	21
2.2 知识点 2: 确定信号分析	24
2.2.1 要点归纳	24
2.2.2 例题解析	30
第 3 章 随机过程分析理论	38
3.1 知识点 1: 随机过程分析	38
3.1.1 要点归纳	38
3.1.2 例题解析	44
3.2 知识点 2: 平稳随机过程通过线性系统	54
3.2.1 要点归纳	54
3.2.2 例题解析	55
第 4 章 信道与噪声	64
4.1 知识点 1: 信道	64
4.1.1 要点归纳	64
4.1.2 例题解析	70
4.2 知识点 2: 通信系统中的噪声及信道容量	80
4.2.1 要点归纳	80
4.2.2 例题解析	83
第 5 章 模拟幅度调制	90
5.1 知识点 1: 标准幅度调制 (AM)	90



5.1.1	要点归纳	90
5.1.2	例题解析	93
5.2	知识点 2: 双边带幅度调制(DSB)	96
5.2.1	要点归纳	96
5.2.2	例题解析	97
5.3	知识点 3: 单边带幅度调制(SSB)	99
5.3.1	要点归纳	99
5.3.2	例题解析	100
5.4	知识点 4: 残留边带幅度调制(VSB)	106
5.4.1	要点归纳	106
5.4.2	例题解析	107
5.5	知识点 5: 模拟线性幅度调制系统噪声性能分析	110
5.5.1	要点归纳	110
5.5.2	例题解析	111
第 6 章	非线性调制	120
6.1	知识点 1: 非线性调制的基本概念	120
6.1.1	要点归纳	120
6.1.2	例题解析	121
6.2	知识点 2: 窄带和宽带角度调制系统	126
6.2.1	要点归纳	126
6.2.2	例题解析	130
6.3	知识点 3: 调频信号的产生和解调及噪声性能分析	134
6.3.1	要点归纳	134
6.3.2	例题解析	138
6.4	知识点 4: 预加重 / 去加重及频分复用技术	145
6.4.1	要点归纳	145
6.4.2	例题解析	147
第 7 章	模拟信号的数字传输	150
7.1	知识点 1: 模拟信号的数字传输原理及抽样	150
7.1.1	要点归纳	150
7.1.2	例题解析	153
7.2	知识点 2: 模拟信号的量化	160
7.2.1	要点归纳	160
7.2.2	例题解析	161
7.3	知识点 3: 脉冲编码调制	166
7.3.1	要点归纳	166
7.3.2	例题解析	167

7.4	知识点 4: 简单增量调制及差分脉冲编码调制	171
7.4.1	要点归纳	171
7.4.2	例题解析	174
7.5	知识点 5: 时分多路复用	178
7.5.1	要点归纳	178
7.5.2	例题解析	179
第 8 章	数字信号的基带传输	183
8.1	知识点 1: 基带传输系统概念和数字基带信号波形	183
8.1.1	要点归纳	183
8.1.2	例题解析	189
8.2	知识点 2: 数字基带传输系统的抗噪声性能分析	198
8.2.1	要点归纳	198
8.2.2	例题解析	200
8.3	知识点 3: 码间干扰和部分响应系统	207
8.3.1	要点归纳	207
8.3.2	例题解析	210
8.4	知识点 4: 眼图和信道均衡	218
8.4.1	要点归纳	218
8.4.2	例题解析	220
第 9 章	数字信号的频带传输	224
9.1	知识点 1: 频带传输系统概念和二进制调制	224
9.1.1	要点归纳	224
9.1.2	例题解析	227
9.2	知识点 2: 二进制数字调制的解调和抗噪性能	230
9.2.1	要点归纳	230
9.2.2	例题解析	234
9.3	知识点 3: 多进制数字调制	248
9.3.1	要点归纳	248
9.3.2	例题解析	249
第 10 章	同步原理	256
10.1	知识点: 同步原理	256
10.1.1	要点归纳	256
10.1.2	例题解析	261
第 11 章	差错控制和信道编码	268
11.1	知识点 1: 差错控制及信道编码的基本概念	268



11.1.1 要点归纳	268
11.1.2 例题解析	270
11.2 知识点 2: 线性分组码.....	272
11.2.1 要点归纳	272
11.2.2 例题解析	275
11.3 知识点 3: 循环码.....	283
11.3.1 要点归纳	283
11.3.2 例题解析	285
11.4 知识点 4: 卷积码及其他信道编码	292
11.4.1 要点归纳	292
11.4.2 例题解析	296
第 12 章 课程测试及考研真题.....	302
12.1 课程测试	302
12.2 课程测试参考答案.....	304
12.3 重点大学硕士研究生入学考试试题	308
12.4 重点大学硕士研究生入学考试试题参考答案	309
参考文献.....	312

第1章 绪论

【基本知识点】通信发展史及其技术未来的发展趋势和特征；通信的一般系统模型；模拟通信的系统模型；数字通信的系统模型；通信网系统模型；通信系统的一般分类方法和分类依据；通信系统的主要性能指标；数字通信系统的主要特点；信息源的统计特性描述及信息的度量方法；信息源的信源熵计算；条件熵、联合熵、互信息及其相互关系等。

【重点】通信的一般系统模型；模拟通信的系统模型；数字通信的系统模型；通信系统的主要性能指标；数字通信系统的主要特点；信息论基础知识；信息源的统计特性描述及信息的度量方法；信息源的信源熵计算；信道容量及香农公式等。

1.1 知识点 1：通信和通信系统

1.1.1 要点归纳

1. 通信、消息、信息、信号

- (1) 通信：信息的传输和交换称为通信，其目的是传输消息。
- (2) 消息：通信中传输的语言、图片、文字、数据等，包括连续消息和离散消息。
- (3) 信息：包含在消息中的有意义的内容。
- (4) 信号：与消息一一对应的电量，是消息的物理载体，消息的变化引起信号的某一参量随同变化，信号可分为模拟信号和数字信号。

2. 模拟通信和数字通信

(1) 模拟通信与模拟通信系统

信道中传输的是模拟信号（特征为幅度连续，时间可连续也可以不连续）时称为模拟通信，利用模拟信号传递消息的通信系统则称为模拟通信系统。

(2) 数字通信与数字通信系统

信道中传输的是非连续的数字信号（特征为幅度离散，一般时间也离散）时称为数字通信，利用数字信号传递消息的通信系统则称为数字通信系统。

3. 通信系统的组成

通信系统是指通信中所需要的一切技术设备和传输媒质构成的总体，一般指点到点通信所需要的全部设施，包括软、硬两个方面。根据信道中所传输的信号种类，可以分为模拟通信系统和数字通信系统。

(1) 通信系统的一般模型

点到点通信系统的一般模型如图 1.1 所示。

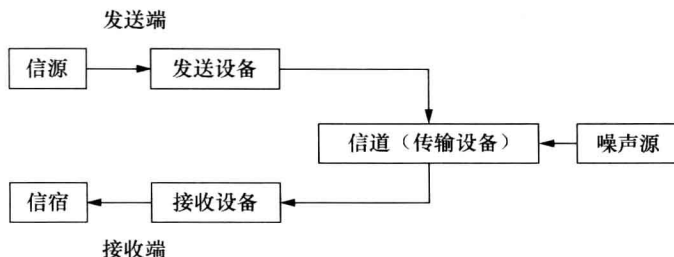


图 1.1

① 信源和信宿：信源是信息的来源，它把消息通过相应设备转换成原始的电信号。信宿是信息的接收者，它把传输后的电信号转换成相应的消息。

② 发送设备：将信源输出的原始电信号变换成适合信道传输的信号。变换可包括调制和编码。

③ 信道：信号传输的通道（传输媒质），可分为有线和无线两种。

④ 接收设备：将接收的信号恢复成相应的原始电信号，完成发送设备的反变换。变换可包括解调和译码。

⑤ 噪声源：信道中的噪声以及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。

(2) 模拟通信系统的模型

模拟通信系统的一般模型如图 1.2 所示。

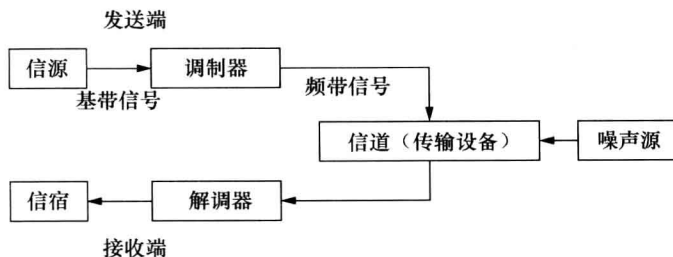


图 1.2

① 基带信号（调制信号）：没有经过调制的原始信号。

② 频带信号（已调信号）：经过调制后的信号。

③ 基带传输：基带信号直接通过有线传输。

④ 调制：将信号从低频端搬移到高频端的过程。

⑤ 解调：将信号从高频端搬移到低频端的过程。

(3) 数字通信系统的模型

数字通信系统的一般模型如图 1.3 所示。

① 信源编码和信宿解码：信源编码有两个作用，一是对信源信号进行 A/D 转换，二是压

缩数据。信宿解码是信源编码的逆过程。

② 信道编码和信道解码：信道编码是使数字信号适应信道传输的变换，它能够提高通信系统的抗干扰能力。信道解码是信道编码的逆过程。

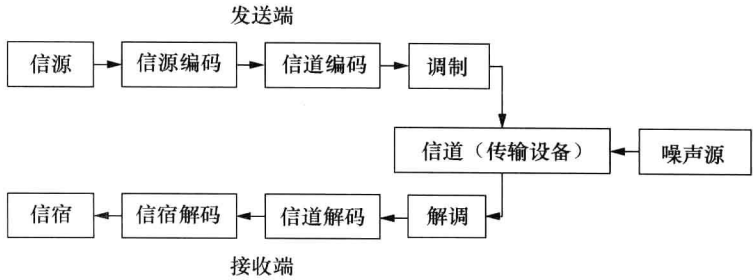


图 1.3

4. 数字通信系统的特点

与模拟通信系统比较，数字通信系统具有如下优点：

- (1) 抗干扰能力强，数字信号可以再生而消除噪声积累；
- (2) 传输差错可以控制，改善了传输质量；
- (3) 便于加密处理，增强保密性；
- (4) 便于通信系统的集成化、微型化；
- (5) 便于利用现代计算技术对信息进行处理，等等。

同时，数字通信系统也具有系统设备较复杂、频带利用率不高、对同步要求高等缺点。

5. 通信系统的分类

按消息物理特征分类：电报、电话、数据、图像等。

按调制方式分类：连续波调制、脉冲波调制等。

按传输信号的特征分类：模拟通信、数字通信。

按通信工作波段分类：长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信、可见光通信等。

按信号传输介质分类：有线、无线等。

按传送信号的复用方式分类：频分复用（FDM/FDMA）、时分复用（TDM/TDMA）、码分复用（CDM/CDMA）、波分复用（WDM/WDMA）、空分复用（SDM）等。

按通信方式分类：根据消息传送的方向与时间关系，可分为单工通信、半双工通信和全双工通信；根据数字信号码元排列方法，可分为串行传输和并行传输；根据信道占用方式，可分为专线和通信网。

注意：调制的主要作用是将消息变换为便于传送的信号形式，可以实现频分多路复用，可以改善通信系统的性能。



6. 通信系统的性能指标

(1) 一般性能指标

通信系统的一般性能指标主要包括有效性指标和可靠性指标。

① 模拟通信系统质量的性能指标:

有效性——有效频带 (B);

可靠性——信噪比 (SNR)。

② 数字通信系统质量的性能指标:

有效性——传码率和传信率;

可靠性——误码率和误信率。

(2) 传输速率

码元传输速率 R_B (简称传码率) 是指系统每秒传送的码元数目, 其单位为波特(Baud), 又称波特率。码元速率与进制数无关, 只与传输的码元长度 T 有关, 即

$$R_B = \frac{1}{T} \text{ (Baud)}$$

信息传输速率 R_b (简称传信率) 是指系统每秒内传输的平均信息量, 单位为比特/秒 (bit/s) 可简记为 bps。

码元速率和信息速率之间的关系为

$$R_b = R_B \cdot H \text{ (bit/s)}$$

其中, H 为信源中每个符号所含的平均信息量 (熵)。若等概率传输时, 熵具有最大值 $\log_2 M$, 信息传输速率也达到最大值, 即

$$R_b = R_B \cdot \log_2 M \text{ (bit/s)}$$

M 为符号的进制数。

(3) 频带利用率

频带利用率是指单位频带内的传输速率, 即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \text{ (Baud/Hz)}$$

对二进制传输的频带利用率可表示为

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

(4) 差错率

误码率 P_c 是指错误接收的码元数在传送总码元数中所占的比例, 即码元在传输系统中被传错的概率。

$$P_c = \frac{\text{单位时间内错误接收的码元数}}{\text{单位时间内传输的总码元数}}$$

误信率 P_b 是指错误接收的信息量在传送总信息量中所占的比例，即码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。

$$P_b = \frac{\text{单位时间内错误接收的比特数}}{\text{单位时间内传输的总比特数}}$$

注意：对于二进制系统，误码率 P_e 与误信率 P_b 相等。

1.1.2 例题解析

【例 1-1】 数字通信有哪些特点？

答：与模拟通信相比，数字通信的优势主要有：抗干扰能力强，数字信号可以再生而消除噪声积累；传输差错可控，能改善传输质量；易于使用现代数字信号处理技术对数字信号进行处理；易于加密，可靠性高；易于实现各种信息的综合传输。数字通信的缺点是：系统设备复杂，对同步要求高，比模拟通信占据更宽的频带等。

【例 1-2】 通信方式是如何确定的？

答：对于点与点之间的通信，按消息传送的方向与时间关系，通信方式可分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种。若消息只能单向传输，这种工作方式则为单工通信方式；若通信双方都能收发消息，但不能同时进行收发，这种工作方式则为半双工通信方式；若通信双方可同时收发消息，这种工作方式则为全双工通信方式。

【例 1-3】 衡量通信系统的主要性能指标是什么？

答：通信系统的主要性能指标是传输信息的有效性和可靠性。有效性是指传输一定的信息量所消耗的信道资源的多少，信道的资源包括信道的带宽和时间；而可靠性是指传输信息的准确程度。有效性和可靠性始终是相互矛盾的，只能在一定可靠性指标下，尽量提高消息的传输速率；或在一定有效性条件下，使消息的传输质量尽可能提高。根据香农公式，在信道容量一定时，可靠性和有效性之间可以彼此互换。

【例 1-4】 已知某数字传输系统传送八进制信号。信息速率为 3600bit/s，试问码元速率应是多少？

分析：主要考察码元速率与信息速率的相互关系。

答：设该数字传输系统的传码率为 R_b ，信息速率为 R_b ，二者的转换关系为

$$R_b = R_b / \log_2 8 \text{ (Baud)}$$

已知 $R_b = 3600 \text{ bit/s}$ ，于是可得

$$R_b = 3600 / 3 = 1200 \text{ (Baud)}$$

可得码元速率为 1200Baud。

【例 1-5】 已知二进制数字信号在 2min 内共传送了 72000 个码元。(1) 问其码元速率和信息速率各为多少？(2) 若码元宽度不变（即码元速率不变），但改为传送八进制数字信号，则其码元速率为多少？信息速率又为多少？



答: (1) 该系统的码元速率为

$$R_B = 72000 / 120 = 600 \text{ (Baud)}$$

信息速率为

$$R_b = R_B = 600 \text{ (bit/s)}$$

(2) 在系统码元速率不变时, 若为八进制数字信号, 则其码元速率为

$$R_B = 600 \text{ (Baud)}$$

但其信息速率为

$$R_b = R_B \times \log_2 8 = 600 \times 3 = 1800 \text{ (bit/s)}$$

【例 1-6】 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 5ms。

(1) 不同的字母等概率出现时, 试计算传输的平均信息速率。

(2) 若每个字母出现的概率分别为 $P(A) = \frac{1}{5}$, $P(B) = \frac{1}{4}$, $P(C) = \frac{1}{4}$, $P(D) = \frac{3}{10}$, 试计算

传输的平均信息速率。

分析: 根据公式 $R_b = R_B \times H$ 计算, 其中 R_B 为波特率, 而 H 是信源的熵, 即信号源符号的平均信息量。

答: (1) 一个字母用 2 个二进制脉冲代替, 属于四进制符号, 所以一个字母的持续时间为 $2 \times 5 \text{ ms}$ 。传送字母的波特率为

$$R_{B4} = \frac{1}{2 \times 5 \times 10^{-3}} = 100 \text{ (Baud)}$$

等概时, 平均信息速率为 $R_b = R_{B4} \cdot \log_2 4 = 200 \text{ (bit/s)}$ 。

(2) 每个字母的平均信息量为

$$H = \frac{1}{5} \cdot \log_2 5 + \frac{1}{4} \cdot \log_2 4 + \frac{1}{4} \cdot \log_2 4 + \frac{3}{10} \cdot \log_2 \frac{10}{3} = 1.985 \text{ (bit/symbol)}$$

则

$$R_b = R_{B4} \times H = 100 \times 1.985 = 198.5 \text{ (bit/s)}$$

由此可知, 等概时才能获得最大可能的信息速率。

【例 1-7】 已知某四进制数字信号传输系统的信息速率为 2400bit/s, 接收端在 0.5h 之内共收到 216 个错误码元, 试计算该系统的误码率的近似值。

答: 已知该系统的信息速率为

$$R_b = 2400 \text{ (bit/s)}$$

对于四进制数字信号, 则其码元速率为

$$R_B = R_b / 2 = 1200 \text{ (Baud)}$$

可知 0.5h 内共收到码元为

$$I_B = R_B \times 3600 \times 0.5 = 2.16 \times 10^6 \text{ 个}$$

则该系统的误码率近似值为

$$P_e \approx 216 / (2.16 \times 10^6) = 10^{-4}$$

【例 1-8】 某离散信息源输出 $x_1, x_2, \dots, x_8$ 8 个不同符号, 符号速率为 2400Baud, 其中 4 个符号的出现概率分别为

$$P(x_1) = P(x_2) = \frac{1}{16}, \quad P(x_3) = \frac{1}{8}, \quad P(x_4) = \frac{1}{4}$$

其余符号等概率出现。

- (1) 求该信息源的平均信息速率;
- (2) 求传送 1h 的信息量;
- (3) 求传送 1h 可能达到的最大信息量。

分析: 某时间内的总信息量可以根据信息速率 R_b 与时间 T 相乘得到。

答: (1) 根据已知条件得到

$$P(x_5) = P(x_6) = P(x_7) = P(x_8) = \frac{1}{8}$$

信息源的熵为

$$\begin{aligned} H &= -\sum P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\left(2 \times \frac{1}{16} \log_2 \frac{1}{16} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + 4 \times \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8}\right) \\ &= 2.875 \text{ (Baud)} \end{aligned}$$

则平均信息速率为

$$R_b = R_B \times H = 2400 \times 2.875 = 6900 \text{ (bit/s)}。$$

- (2) 传送 1h 的信息量为

$$I = T \times R_b = 3600 \times 6900 = 2.484 \times 10^7 \text{ (bit)}$$

- (3) 等概率时有最大信息熵, 为

$$H_{\max} = \log_2 8 = 3 \text{ (bit/symbol)}$$

此时平均信息速率最大, 故有最大信息量为

$$I_{\max} = T \times R_B \times H_{\max} = 3600 \times 2400 \times 3 = 2.592 \times 10^7 \text{ (bit)}$$

【例 1-9】 设一信息源的输出由 128 个不同符号组成。其中 16 个出现的概率为 1/32, 其余 112 个出现概率为 1/224。信息源每秒发出 1000 个符号, 且每个符号彼此独立。试计算该信息源的平均信息速率。

答: 每个符号的平均信息量为



$$H = 16 \times \frac{1}{32} \log_2 \frac{1}{32} + 112 \times \frac{1}{224} \log_2 \frac{1}{224} \\ = 6.404 (\text{bit/symbol})$$

已知码元速率 $R_B = 1000 \text{ B}$ ，故该信息源的平均信息速率为

$$R_b = R_B H = 1000 \times 6.404 = 6404 (\text{bit/s})$$

【例 1-10】 如要二进制独立等概率信号的码元宽度为 0.5ms ，求 R_B 和 R_b ；有四进制信号，码元宽度为 0.5ms ，求码元速率 R_B 和独立等概率时的信息速率 R_b 。

答：对于二进制信号，由于码元宽度为 $T = 0.5 \text{ ms}$ ，则码元速率为

$$R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.5 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^3 (\text{Baud})$$

当符号独立等概率出现时，每个符号的平均信息量为

$$H = \log_2 2 = 1 (\text{bit/symbol})$$

则信息速率为

$$R_b = R_B H = 2000 \times 1 = 2000 (\text{bit/s})$$

对于四进制信号，由于码元宽度为 $T = 0.5 \text{ ms}$ ，则码元速率为

$$R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.5 \times 10^{-3}} = 2 \times 10^3 (\text{Baud})$$

当符号独立等概率出现时，每个符号的平均信息量为

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

则信息速率为

$$R_b = R_B H = 2000 \times 2 = 4000 (\text{bit/s})$$

【例 1-11】 在强干扰环境下，某电台在 5min 内共接收到正确信息量为 355Mbit ，假定系统信息速率为 1200Kbit/s 。

- (1) 试问系统误信率 P_b 是多少？
- (2) 若具体指出系统所传数字信号为四进制信号， P_b 值是否改变？为什么？
- (3) 若假定信号为四进制信号，系统码元传输速率为 1200KBaud ，则 P_b 是多少？

分析：误信率 $P_b = \frac{\text{单位时间内错误接收的比特数}}{\text{单位时间内传输的总比特数}}$ 。

答：(1) 已知信息速率 R_b 为 1200Kbit/s ，可知 5min 内电台共接收到的总比特数为 $1200\text{Kbit/s} \times 5\text{min} \times 60\text{s/min} = 360\text{Mbit}$ 。 5min 内接收到的正确信息量为 355Mbit ，则错误的信息量为 $360\text{Mbit} - 355\text{Mbit} = 5\text{Mbit}$ ，则误信率 P_b 为 $5\text{Mbit} \div 360\text{Mbit} = 0.01389$ 。

(2) P_b 值不改变，因为已知信息速率，计算误信率 P_b 时与信号进制数是无关的。

(3) 若信号为四进制信号，则当符号独立等概率出现时，每符号平均信息量为

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