

通信原理学习辅导

经典 Classics

经典教材辅导用书 ■ 电子信息系列

知识要点

重点与难点

疑难解析

习题解答

■ 樊昌信等《通信原理》·曹志刚等《现代通信原理》·王福昌等《通信原理》

王福昌 编

华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

经典教材辅导用书·电子与信息类丛书

通信原理学习辅导

樊昌信等《通信原理》

曹志刚等《现代通信原理》

王福昌等《通信原理》

王福昌 编

华中科技大学出版社

中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

通信原理学习辅导/王福昌 编. —武汉:华中科技大学出版社,2009年6月
ISBN 978-7-5609-5205-5

I. 通… II. 王… III. 通信理论-高等学校-教学参考资料 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 037987 号

通信原理学习辅导

王福昌 编

策划编辑:周芬娜

责任编辑:王汉江

责任校对:刘 竣

封面设计:潘 群

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉佳年华科技有限公司

印 刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:14.75

字数:365 000

版次:2009年6月第1版

印次:2009年6月第1次印刷

定价:22.00 元

ISBN 978-7-5609-5205-5/TN·136

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

通信原理属于电子信息类各专业的专业基础课,是通信工程、电子信息工程专业学生的必修课,也是电子科学与技术、计算机、自动控制以及光电子等各专业学生的必修课或选修课,还是相关专业硕士研究生入学考试科目之一。

现代通信包括传输、复用与多址、交换及网络等四大技术,在大部分院校的通信原理课程中主要涉及传输和复用与多址技术。

通信原理是一门理论性和实践性都很强的课程。学生不但应该掌握通信系统的基本原理和基本分析方法,还应该深刻理解通信系统重要的概念并牢记重要的结论。学习这门课时,首先要注意所用的数学工具及分析方法,然后尽可能地将分析结论与实际的物理概念联系在一起,再做一定数量的习题和实验以加深对理论、方法和结论的理解。本门课程的本科生期终考试试题及硕士研究生入学考试试题,其重点是考查学生对通信系统基本概念和重要结论的理解和掌握程度,以及运用基本理论和方法分析通信系统具体问题的能力。上述各点,是编写本书的指导思想。

本书包含了樊昌信等编著的《通信原理》、曹志刚等编著的《现代通信原理》以及王福昌等编著的《通信原理》的主要内容。其典型例题及自测试题也选自这三本教材。

本书的第2章是数学基础,一般不属于本门课程的教学内容;第11章及第12章,由于学时限制,许多学校将它们安排到其他课程中。考虑到内容的完整性,作者仍将上述3章编入本书。

本书的特点是:突出通信系统概念,突出物理概念,突出重要结论,题目内容广泛,难度适中。

潘晓明、李津、黄佳庆等三位老师参加了例题及自测题的解答工作和校对工作。

编者感谢潘晓明老师、李津老师、黄佳庆老师,感谢华中科技大学出版社的周芬娜老师及其他工作人员,没有他们的大力支持和辛勤工作,本书将难以如期与读者见面。

本书可能有不妥或错误之处,敬请读者赐教,编者将不胜感激!

编 者

2008年8月于华中科技大学喻园

Wang.fuchang@hotmail.com

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 学习要点	(1)
1.1.1 通信的定义与分类方式	(1)
1.1.2 模拟通信的基本概念	(1)
1.1.3 数字通信的基本概念	(2)
1.1.4 信息及其度量	(3)
1.1.5 通信系统的主要性能指标	(3)
1.2 典型例题	(4)
1.3 自测自评	(6)
1.3.1 自测试题	(6)
1.3.2 自测试题解答	(7)
第2章 确知信号与随机信号分析	(8)
2.1 学习要点	(8)
2.1.1 确知信号分析	(8)
2.1.2 随机变量分析	(11)
2.1.3 随机过程分析	(11)
2.2 典型例题	(16)
2.3 自测自评	(20)
2.3.1 自测试题	(20)
2.3.2 自测试题解答	(21)
第3章 信道	(24)
3.1 学习要点	(24)
3.1.1 信道的定义与分类	(24)
3.1.2 信道数学模型	(24)
3.1.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响	(25)
3.1.4 变参信道特性及其对信号传输的影响	(25)
3.1.5 信道的加性噪声	(26)
3.1.6 信道容量	(27)
3.2 典型例题	(28)
3.3 自测自评	(30)
3.3.1 自测试题	(30)
3.3.2 自测试题解答	(30)
第4章 模拟调制系统	(32)
4.1 学习要点	(32)
4.1.1 基本概念	(32)

4.1.2 幅度调制原理	(33)
4.1.3 角度调制原理	(36)
4.1.4 模拟调制系统的抗噪性能	(38)
4.1.5 复合调制与多级调制	(40)
4.2 典型例题	(40)
4.3 自测自评	(47)
4.3.1 自测试题	(47)
4.3.2 自测试题解答	(48)
第5章 数字基带系统	(53)
5.1 学习要点	(53)
5.1.1 常用的数字基带信号码型	(53)
5.1.2 数字基带信号的功率谱密度	(55)
5.1.3 数字基带系统无码间串扰条件	(56)
5.1.4 常见的无码间串扰基带系统	(57)
5.1.5 基带传输系统的抗噪声性能	(59)
5.1.6 眼图	(60)
5.1.7 时域均衡	(61)
5.1.8 扰码与解扰	(62)
5.2 典型例题	(62)
5.3 自测自评	(70)
5.3.1 自测试题	(70)
5.3.2 自测试题解答	(72)
第6章 数字调制系统	(78)
6.1 学习要点	(78)
6.1.1 二进制调制原理	(78)
6.1.2 四进制移相键控(4PSK)及四进制差分移相键控(4DPSK)调制原理	(82)
6.1.3 M 进制正交振幅调制(MQAM)原理	(85)
6.1.4 最小移频键控(MSK)及高斯最小移频键控(GMSK)调制基本概念	(86)
6.1.5 无码间串扰数字调制系统	(86)
6.1.6 数字调制系统的抗噪性能	(88)
6.2 典型例题	(89)
6.3 自测自评	(97)
6.3.1 自测试题	(97)
6.3.2 自测试题解答	(98)
第7章 模拟信号的数字传输	(105)
7.1 学习要点	(105)
7.1.1 引言	(105)
7.1.2 脉冲编码调制(PCM)基本原理	(105)
7.1.3 均匀量化与线性 PCM	(108)
7.1.4 非均匀量化与对数 PCM	(109)

7.1.5 A 律 PCM	(110)
7.1.6 差分脉码调制(DPCM)	(111)
7.1.7 增量调制(ΔM)	(112)
7.1.8 PCM 系统与 ΔM 系统的性能比较	(113)
7.2 典型例题	(115)
7.3 自测自评	(120)
7.3.1 自测试题	(120)
7.3.2 自测试题解答	(121)
第 8 章 数字信号的最佳接收	(123)
8.1 学习要点	(123)
8.1.1 最佳接收准则	(123)
8.1.2 确知信号的最佳相干接收	(123)
8.1.3 确知信号的匹配滤波器接收	(126)
8.1.4 随相信号的最佳接收	(126)
8.1.5 最佳数字传输系统	(127)
8.2 典型例题	(128)
8.3 自测自评	(131)
8.3.1 自测试题	(131)
8.3.2 自测试题解答	(132)
第 9 章 复用与多址	(136)
9.1 学习要点	(136)
9.1.1 基本概念	(136)
9.1.2 频分复用(FDM)与频分多址(FDMA)	(136)
9.1.3 时分复用(TDM)与时分多址(TDMA)	(137)
9.1.4 码分复用(CDM)与码分多址(CDMA)	(138)
9.2 典型例题	(139)
9.3 自测自评	(140)
9.3.1 自测试题	(140)
9.3.2 自测试题解答	(141)
第 10 章 同步原理	(142)
10.1 学习要点	(142)
10.1.1 引言	(142)
10.1.2 载波同步	(143)
10.1.3 位同步	(145)
10.1.4 帧同步(群同步)	(148)
10.1.5 网同步	(149)
10.2 典型例题	(149)
10.3 自测自评	(152)
10.3.1 自测试题	(152)
10.3.2 自测试题解答	(153)

第 11 章 扩频通信原理	(154)
11.1 学习要点	(154)
11.1.1 基本概念	(154)
11.1.2 直扩通信	(154)
11.1.3 跳频通信	(155)
11.1.4 扩频码	(156)
11.1.5 扩频码的同步	(160)
11.2 典型例题	(160)
11.3 自测自评	(164)
11.3.1 自测试题	(164)
11.3.2 自测试题解答	(164)
第 12 章 差错控制编码	(167)
12.1 学习要点	(167)
12.1.1 引言	(167)
12.1.2 差错控制的基本概念	(167)
12.1.3 线性分组码	(168)
12.1.4 循环码	(170)
12.1.5 交织码	(171)
12.1.6 卷积码	(171)
12.1.7 网格编码调制(TCM)、级联码与 Turbo 码	(173)
12.2 典型例题	(174)
12.3 自测自评	(176)
12.3.1 自测试题	(176)
12.3.2 自测试题解答	(177)
第 13 章 试题及解答 (I)	(180)
试题 1	(180)
试题 1 解答	(181)
试题 2	(182)
试题 2 解答	(184)
试题 3	(185)
试题 3 解答	(187)
试题 4	(188)
试题 4 解答	(189)
试题 5	(190)
试题 5 解答	(192)
第 14 章 试题及解答 (II)	(194)
试题 1	(194)
试题 1 解答	(195)
试题 2	(196)
试题 2 解答	(197)

试题 3	(200)
试题 3 解答	(201)
试题 4	(204)
试题 4 解答	(205)
试题 5	(208)
试题 5 解答	(210)
试题 6	(214)
试题 6 解答	(215)
附录 A 常用三角公式	(218)
附录 B Q 函数表、 Q 函数曲线、误差函数和互补误差函数表	(219)
参考文献	(223)

第 1 章 绪 论

1.1 学习要点

1.1.1 通信的定义与分类方式

1. 通信的定义

通信就是以语言、图像、数据为媒体,通过电(或光)信号将信息由一方传输到另一方的技术。

2. 模拟通信系统与数字通信系统

信道中传输模拟信号的通信系统为模拟通信系统,信道中传输数字信号的通信系统为数字通信系统。

3. 模拟信号与数字信号

(1) 模拟信号

模拟基带信号(一般指未调制过的信号)的瞬时值的状态数是无限的,如低频正弦信号、语音信号、图像信号等。

在模拟已调信号(载波一般为正弦信号)的三个参数(振幅 A 、频率 F 、相位 P)中至少有一个参数的状态数是无限的,如 AM、FM、PM 信号等。

(2) 数字信号

数字基带信号的瞬时值的状态数是有限的,如计算机和电报机的输出信号等。

在数字已调信号(有时也称载波为正弦波的数字已调信号为连续信号,因为它们的瞬时值在某一范围内连续变化)的参数 A 、 F 、 P 中至少有一个参数的状态数是有限的。

二进制代码

二进制数字基带信号

二进制振幅键控信号(2ASK)

二进制频率键控信号(2FSK)

二进制相位键控信号(2PSK)

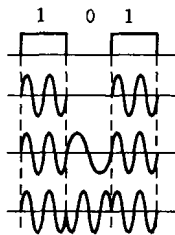


图 1-1 二进制数字信号

4. 通信系统分类方式

根据信道中传输的信号种类可将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。还可以根据其他特点来分类,如根据消息的物理特征、工作频率、传输媒介、信号复用方式、信号传输方向等来分类。

1.1.2 模拟通信的基本概念

1. 点对点单路模拟通信系统

图 1-2 为点对点单路模拟通信系统模型。图中有关单元的功能如下。

(1) 调制器与解调器

调制器可将模拟基带信号转换成适合于信道传输的信号,对已调信号可以进行频分复用(FDM)处理。解调是调制的逆过程。

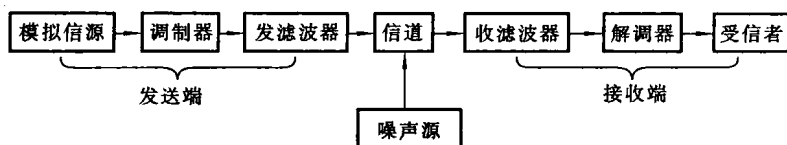


图 1-2 点对点单路模拟通信系统模型

(2) 发滤波器

滤除调制器输出中的无用信号。

(3) 收滤波器

滤除带外噪声,提高解调器输入信噪比。

发滤波器及收滤波器的带宽不能小于已调信号带宽。

模拟通信系统也可以不用调制解调器,此种模拟基带通信系统比较简单,本书不予讨论。

点对点单路通信系统需要解决的主要问题是,如何快速高质量地将信息由一方传输到另一方。

2. 点对点多路通信系统

点对点多路通信系统除要解决信息传输技术外,还必须解决信息复用技术,即在发端将多路信号复接在一起、在收端将已复接在一起的多路信号进行分接处理。而模拟通信只能用频分复用技术。

3. 通信网

通信网涉及传输、复用与多址、交换、网络等四大技术。通信原理这门课程只介绍传输和复用与多址等技术。

1.1.3 数字通信的基本概念

图 1-3 为点对点单路数字通信系统模型,有关单元的功能如下。

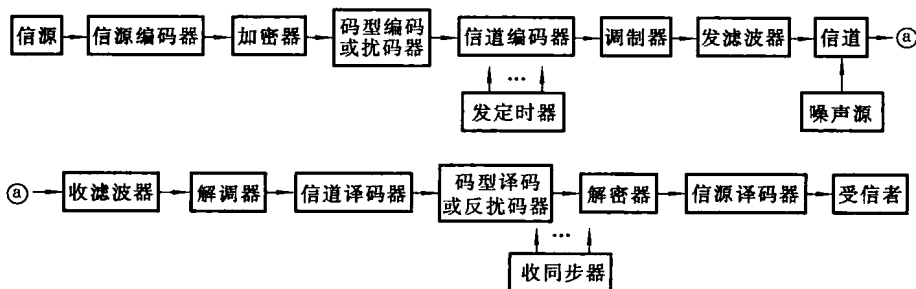


图 1-3 点对点单路数字通信系统模型

(1) 信源

信源可以是模拟信源,也可以是数字信源(又称离散信源)。

(2) 信源编、译码

当信源是模拟信源时,信源编码器要将模拟信源输出的模拟信号变为数字信号(A/D转换),再将数字信号进行压缩处理。当信源是数字信源时,信源编码器将信源输出的数字信号进行压缩处理。信源译码是信源编码的逆过程。

(3) 加密与解密

加密器与解密器是实现通信保密的前提条件。在模拟通信系统中也可以进行加密与解密,但比较麻烦,现在已较少研究。

(4) 码型编码或扰码

码型编码用来形成适合于信道中传输的码型,扰码主要是为了消除比特流中的长1码或长0

码对接收机同步系统带来的不利影响。

(5) 信道编、译码

信道编码器和信道译码器可以提高数字通信系统的抗干扰能力。

(6) 调制与解调

调制器和解调器的作用同模拟通信中的调制器与解调器。

(7) 发滤波器

数字信号的频率范围在理论上是无限的,发滤波器将数字信号的频率范围限制在某一允许范围内,以减少占用的信道频带。

(8) 收滤波器

滤除带外噪声且与发滤波器、信道一起保证收端的信号无码间串扰。

(9) 发定时器

为调制器提供载波信号,为信源编码器、加密器、码型编码或扰码器、信道编码器等单元提供各种时钟信号。

(10) 收同步器

从收信号中提取各种同步信号,如载波同步信号、位同步信号、帧同步信号等。这些同步信号使收、发信机步调一致地工作,以正确地传输信息。

在实际通信系统中,一般可以根据具体情况省略掉图 1-3 中的某些单元。若无调制解调器,该系统则为数字基带系统。

与模拟通信类似,多路数字通信系统除采用上述数字传输技术外,还需采用复用技术,在通信网中还需采用复用与多址技术、交换技术及网络技术。目前在数字通信系统中,常用的复用技术是 FDM 和 TDM(时分复用)技术。

在模拟通信和数字通信系统中,还常采用扩展频谱技术,它属于传输技术范畴。

1.1.4 信息及其度量

1. 离散消息的信息量

设某离散消息 x 发生的概率为 $P(x)$,则它所携带的信息量为

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

当 $a=e$ 时,信息量的单位为奈特(nit);当 $a=2$ 时,信息量的单位为比特(bit)。目前广泛使用的单位为 bit。

2. 离散信源的平均信息量

设信源输出 M 个统计独立的符号 $x_1, x_2, \dots, x_M$,它们出现的概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_M)$,则每个符号所含信息量的统计平均值即离散信源的平均信息量为

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

信源的平均信息量又称为信源熵。可以证明,最大信源熵发生在信源的每个符号等概独立出现时,即

$$H_{\max}(X) = \log_2 M \quad (\text{bit/符号}) \quad (1-3)$$

1.1.5 通信系统的主要性能指标

通信的目的是快速、准确地传输信息。快速可以用有效性来描述,准确可以用可靠性来描述。信道的频率资源是有限的(即信道带宽是有限的),显然为传输某一种信息而占用的信道带宽

越小,信道所能传输的这种信息的路数就越多,越能有效地利用信道的频率资源,通信系统的有效性越好。

信道传输信息时叠加了噪声,可靠性用来描述通信系统抗噪声能力,可靠性越高,越能准确地传输信息。

1. 模拟通信系统的性能指标

模拟信号占用的信道带宽必须等于或大于信号带宽,因此信号带宽越小,有效性越好。

模拟信号的质量用信噪比表示,因此解调器输出信号的信噪比越大,可靠性越好。

2. 数字通信系统的性能指标

(1) 码速率(R_s)、信息速率(R_b)

R_s 表示每秒钟传输的码元数目,单位为波特(Bd),又称 R_s 为符号速率。

R_b 表示每秒钟传输的信息量,单位为每秒比特(bit/s),又称 R_b 为传信率。

码元宽度(或码元周期)为 T 秒时,有

$$R_s = \frac{1}{T} \quad (\text{Bd})$$

信息速率与码速率之间的关系为

$$R_b = R_s \cdot H(X) \quad (\text{bit/s}) \quad (1-4)$$

当信源各个符号等概独立时,有 $R_b = R_s \log_2 M \quad (\text{bit/s}) \quad (1-5)$

(2) 误码率(P_e)与误比特率(P_b)

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

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

误比特率也称为误信率。在通信系统中传输的各符号一般是独立等概的,因此常用式(1-5)来表示 R_b 与 R_s 之间的关系,在二进制系统中 $R_b = R_s$ 、 $P_e = P_b$,在多进制($M > 2$)系统中 $P_b < P_e$ 。

(3) 有效性与可靠性

在数字通信系统中,信号占用的信道带宽 B_c 可以小于信号带宽且信号带宽与进制数有关,故不用信号带宽来描述有效性,而用频带利用率(η_s 或 η_b)来描述有效性。

$$\eta_s = \frac{R_s}{B_c} \quad (\text{Bd/Hz}) \quad (1-8)$$

$$\eta_b = \frac{R_b}{B_c} \quad (\text{bit/(s} \cdot \text{Hz)}) \quad (1-9)$$

当式(1-5)成立时,有 $\eta_b = \eta_s \log_2 M \quad (1-10)$

显然, η_s 越大, η_b 越大,有效性越好;采用多进制可以提高 η_b 。

在数字通信系统中,接收机最终输出的信号可能是数字信号也可能是模拟信号。接收机输出信噪比只适于用来描述传输模拟信号的可靠性,传输数字信号的可靠性可用误码率来表示。另外,接收机输出的模拟信号是由数字信号经数模转换得到的,数字信号的误码率越小,所对应的模拟信号的信噪比越大。

总之,在数字通信系统中,误码率越小,可靠性越高。

1.2 典型例题

【例 1-1】 四进制离散信源输出四个独立符号 A、B、C、D。

(1) A, B, C, D 出现的概率分别为 $\frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}, \frac{1}{2}$, 求 A, B, C, D 每个符号所携带的信息量和信源熵;

(2) A, B, C, D 等概, 求信源熵。

解 (1) 根据式(1-1), 有

$$I(A) = -\log_2 \frac{1}{4} \text{ bit} = 2 \text{ bit}, \quad I(B) = I(C) = -\log_2 \frac{1}{8} \text{ bit} = 3 \text{ bit}$$

$$I(D) = -\log_2 \frac{1}{2} \text{ bit} = 1 \text{ bit}$$

根据式(1-2), 有

$$H(X) = \left(\frac{1}{4} \times 2 + \frac{1}{8} \times 3 + \frac{1}{8} \times 3 + \frac{1}{2} \times 1 \right) \text{ bit/符号} = 1 \frac{3}{4} \text{ bit/符号}$$

(2) 根据式(1-3), 有

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

【例 1-2】 某数字通信系统用正弦载波的四个相位 $0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$ 来传输信息, 这四个相位是互相独立的。(1) 每秒钟内这四个相位出现的次数分别为 500, 125, 125, 250, 求此通信系统的码速率和信息速率;(2) 每秒钟内这四个相位出现的次数都为 250, 求此通信系统的码速率和信息速率。

解 (1) 每秒钟传输 1 000 个相位, 即每秒钟传输 1 000 个符号, 故

$$R_s = 1\,000 \text{ Bd}$$

每个符号出现的概率分别为

$$P(0) = \frac{1}{2}, \quad P\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{8}, \quad P(\pi) = \frac{1}{8}, \quad P\left(\frac{3\pi}{2}\right) = \frac{1}{4},$$

每个符号所含的平均信息量为

$$H(X) = \left(\frac{1}{2} \times 1 + \frac{2}{8} \times 3 + \frac{1}{4} \times 2 \right) \text{ bit/符号} = 1 \frac{3}{4} \text{ bit/符号}$$

$$\text{信息速率} \quad R_b = 1\,000 \times 1 \frac{3}{4} \text{ bit/s} = 1\,750 \text{ bit/s}$$

(2) 每秒钟传输的相位个数仍为 1 000, 故

$$R_s = 1\,000 \text{ Bd}$$

此时四个符号出现的概率相等, 故

$$H(X) = 2 \text{ bit/符号}, \quad R_b = 1\,000 \times 2 \text{ bit/s} = 2\,000 \text{ bit/s}$$

【例 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, 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

$$P(A) = \frac{1}{5}, \quad P(B) = \frac{1}{4}, \quad P(C) = \frac{1}{4}, \quad P(D) = \frac{3}{10}$$

试计算传输的平均信息速率。

解 (1) 四个字母构成四进制符号, 每个符号由两个脉冲构成, 故一个符号的持续时间即码元宽度为 $2 \times 5 \text{ ms}$ 。码速率为

$$R_s = \frac{1}{2 \times 5 \times 10^{-3}} \text{ Bd} = 100 \text{ Bd}$$

等概时, 平均信息速率为

$$R_b = R_s \log_2 4 = 200 \text{ bit/s}$$

(2) 每个符号的平均信息量为

$$H(X) = \left(\frac{1}{5} \log_2 5 + \frac{2}{4} \log_2 4 + \frac{3}{10} \log_2 \frac{10}{3} \right) \text{ bit/符号}$$

$$= (0.2 \times 2.32 + 0.5 \times 2 + 0.3 \times 1.74) \text{ bit/符号} = 1.985 \text{ bit/符号}$$

则平均信息速率为

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

【例 1-4】某信源的符号集由 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; 信源以 1 000 Bd 速率传送信息。(1) 求传送 1 h 的信息量; (2) 求传送 1 h 可能达到的最大信息量。

解 (1) 信源熵为

$$H(X) = \left(\frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{2}{8} \log_2 8 + \frac{3}{16} \log_2 \frac{16}{3} + \frac{5}{16} \log_2 \frac{16}{5} \right) \text{ bit/符号} = 2.23 \text{ bit/符号}$$

平均信息速率为

$$R_b = R_s \cdot H(X) = 1\,000 \times 2.23 \text{ bit/s} = 2.23 \times 10^3 \text{ bit/s}$$

1 h 传输的信息量为

$$I = 2.23 \times 10^3 \times 3\,600 \text{ bit} = 8.028 \text{ Mbit}$$

(2) 等概时信源熵为最大值, 即

$$H_{\max} = \log_2 5 \text{ bit/符号} = 2.322 \text{ bit/符号}$$

1 h 传输的最大信息量为

$$I_{\max} = 2.322 \times 1\,000 \times 3\,600 \text{ bit} = 8.359 \text{ Mbit}$$

1.3 自测自评

1.3.1 自测试题

1-1 设载波为正弦信号。

(1) AM 信号与 4ASK 信号在波形上有何区别?

(2) FM 信号与 4FSK 信号在波形上有何区别?

(3) PM 信号与 4PSK 信号在波形上有何区别?

1-2 如何衡量模拟通信系统的有效性和可靠性?

1-3 为什么不用信号带宽而用频带利用率衡量数字通信系统的有效性?

1-4 在多进制通信系统中, 为什么误比特率小于误码率? 试以四进制系统为例加以说明。

1-5 设英文字母 c、e、o、x 出现的概率分别为 0.023、0.105、0.001、0.002, 试分别求出它们的信息量。

1-6 已知等概独立的二进制数字信号的信息速率为 2 400 bit/s。(1) 求此信号的码速率和码元宽度; (2) 将此信号变为四进制信号, 求此四进制信号的码速率和码元宽度。

1-7 某 4ASK 系统的四个振幅值分别为 0、1、2、3, 且这四个振幅是互相独立的。(1) 振幅 0、1、2、3 出现的概率分别为 0.4、0.3、0.2、0.1, 求各种振幅信号的平均信息量; (2) 设每个振幅的持续时间(即码元宽度)为 1 μs, 求此系统的信息速率。

1-8 一个四进制数字通信系统, 码速率为 1 kBd, 连续工作 1 h 后, 接收端收到的错码为 10 个。(1) 求误码率; (2) 四个符号独立等概且错一个码元时发生 1 bit 信息错误, 求误信率。

1.3.2 自测试题解答

1-1 (1) AM 信号的振幅连续变化,振幅的状态个数无限。4ASK 信号仅有四个振幅,振幅变化不连续。

(2) FM 信号的频率连续变化,频率的状态数无限。4FSK 信号的频率数仅四个,频率变化不连续。

(3) PM 信号的相位连续变化,相位的状态数无限。4PSK 信号仅有四个相位,相位变化不连续。

1-2 用信号带宽衡量模拟通信系统的有效性,且带宽越小,有效性越好。用解调器输出信噪比衡量模拟通信系统的可靠性,且信噪比越大,可靠性越好。

1-3 因为传输数字信号占用的信道带宽可以小于数字信号带宽,并且数字信号带宽与进制数有关。频带利用率表示每赫兹带宽信道所能传输的码速率或信息速率。显然,频带利用率越大,数字通信系统的有效性越好。

1-4 在四进制系统中,若四个符号独立等概,则每个符号携带 2 bit 信息量,这四个符号可以用二进制符号 00、01、11、10 来表示。当 00 错为 11 时有 2 bit 信息量发生错误,当 00 错为 01 或 10 时仅有 1 bit 信息量错误。只有当一个码元中的 2 bit 全部错误时,误信率才等于误码率,实际上这种情况出现的概率比较小,故误信率小于误码率。

$$1-5 \quad I(c) = -\log_2 0.023 \text{ bit} = 5.44 \text{ bit}, \quad I(e) = -\log_2 0.105 \text{ bit} = 3.25 \text{ bit}$$

$$I(o) = -\log_2 0.001 \text{ bit} = 9.97 \text{ bit}, \quad I(x) = -\log_2 0.002 \text{ bit} = 8.96 \text{ bit}$$

$$1-6 \quad (1) \quad R_s = R_b / \log_2 M = 2400 / \log_2 2 \text{ Bd} = 2400 \text{ Bd}, \quad T = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{2400} \text{ s} = 0.42 \text{ ms}$$

$$(2) \quad R_s = 2400 / \log_2 4 \text{ Bd} = 1200 \text{ Bd}, \quad T = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{1200} \text{ s} = 0.83 \text{ ms}$$

$$1-7 \quad (1) \quad H(X) = (-0.4 \log_2 0.4 - 0.3 \log_2 0.3 - 0.2 \log_2 0.2 - 0.1 \log_2 0.1) \text{ bit/符号}$$

$$= (0.4 \times 1.32 + 0.3 \times 1.74 + 0.2 \times 2.32 + 0.1 \times 3.32) \text{ bit/符号} = 1.846 \text{ bit/符号}$$

此即为各种振幅信号的平均信息量。

$$(2) \text{ 码速率为 } R_s = \frac{1}{T} = 1 \text{ MBd}$$

故信息速率为

$$R_b = R_s \cdot H = 1 \times 10^6 \times 1.846 \text{ bit/s} = 1.846 \text{ Mbit/s}$$

1-8 (1) 1 h 传输的码元数为

$$1 \times 1000 \times 3600 = 36 \times 10^5$$

误码率为

$$P_e = 10 / (36 \times 10^5) = 2.8 \times 10^{-6}$$

(2) 1 h 传输的信息量为

$$36 \times 10^5 \times 2 \text{ bit} = 7.2 \times 10^6 \text{ bit}$$

因错误信息量为 10 bit,故误信率为

$$P_b = 10 / (7.2 \times 10^6) = 1.4 \times 10^{-6}$$

推而广之,若独立等概的 M 进制信号在传输过程中发生一个码元错误时仅错 1 bit 信息量,则误信率与误码率之间的关系为

$$P_b = P_e / \log_2 M$$

第2章 确知信号与随机信号分析

2.1 学习要点

2.1.1 确知信号分析

1. 信号的傅里叶(傅氏)变换

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

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

式(2-1)和式(2-2)为一个傅氏变换对,常用双箭头表示它们的关系:

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

为使用方便,将一些常用信号的傅氏变换对列于表 2-1 中,将傅氏变换的主要运算特性列于表 2-2 中。

表 2-1 常用信号的傅氏变换表

序 号	$f(t)$	$F(\omega)$
1	$e^{-a}u(t)$	$\frac{1}{a+j\omega}$
2	$te^{-a}u(t)$	$\frac{1}{(a+j\omega)^2}$
3	$ t $	$\frac{-2}{\omega^2}$
4	$\delta(t)$	1
5	1	$2\pi\delta(\omega)$
6	$u(t)$	$\pi\delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}$
7	$(\cos\omega_0 t)u(t)$	$\frac{\pi}{2}[\delta(\omega-\omega_0) + \delta(\omega+\omega_0)] + \frac{j\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$
8	$(\sin\omega_0 t)u(t)$	$\frac{\pi}{2j}[\delta(\omega-\omega_0) - \delta(\omega+\omega_0)] + \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$
9	$\cos\omega_0 t$	$\pi[\delta(\omega-\omega_0) + \delta(\omega+\omega_0)]$
10	$\sin\omega_0 t$	$j\pi[\delta(\omega+\omega_0) - \delta(\omega-\omega_0)]$
11	$\frac{w}{2\pi} \text{Sa}\left(\frac{wt}{2}\right)$	$D_w(\omega)$
12	$D_\tau(t)$	$\tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$