

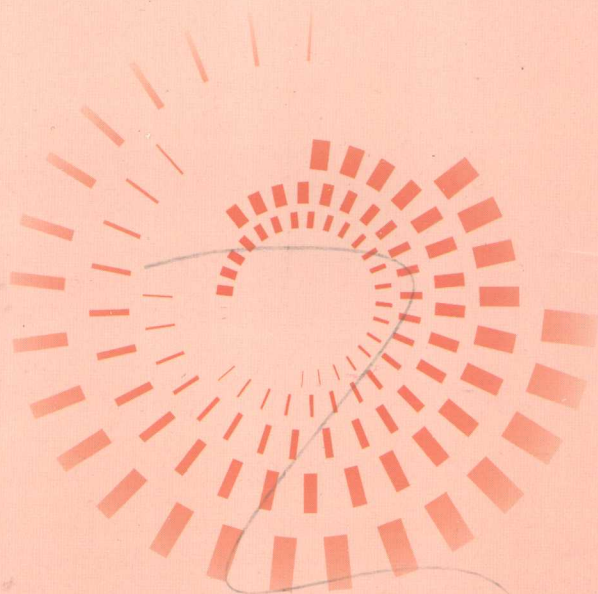
通信原理

(第6版)

学习辅导与考研指导

(修订版)

曹丽娜 樊昌信 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TN911/42=2C2

2008

通信原理(第6版) 学习辅导与考研指导 (修订版)

曹丽娜 樊昌信 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是以樊昌信教授和曹丽娜教授编著的《通信原理(第6版)》教材为主要参考书,同时参考其他相关材料而编写的一本学习辅导和考研指导书。全书共分14章,与《通信原理(第6版)》的各章一致。每章包括学习目标、内容提要、难点·疑点、重点·考点、典型例题、习题解答、期末试题精选与答案、考研试题精选与答案。“学习目标”指出了每章应掌握的基本内容;“内容提要”归纳性和贯穿性地给出了每章的复习要点;“难点·疑点”帮助读者剖析难懂点,提醒易错点;“重点·考点”具体给出了每章必须掌握的知识点和考点;“典型例题”通过对例题的分析和解答,引导读者掌握解题思路、分析方法、解题技巧,并对结论进行了评注;“习题解答”对《通信原理(第6版)》教材的课后习题进行提示和解答。“期末试题精选与答案”和“考研试题精选与答案”可供读者及时巩固和检测每章的学习效果。本书附录A和附录B分别提供了几套本科期末试题及其答案和硕士研究生入学考试题及其答案,以帮助读者熟悉多种题型,了解命题动态。

本书可作为高等院校通信技术及相关专业的学习指导书,也可作为通信技术专业硕士研究生入学考试参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理(第6版)学习辅导与考研指导/曹丽娜,樊
昌信编著. —修订版. —北京:国防工业出版社,2008.7
ISBN 978-7-118-05794-2

I. 通... II. ①曹...②樊... 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(2008)第084717号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本787×1092 1/16 印张20¼ 字数468千字

2008年7月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价32.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

通信原理是通信工程与电子信息类专业本科生的一门重要专业基础课程,也是诸多院校相关专业硕士研究生入学考试课程之一,这门课程对于进一步学习通信领域的相关专业知识起着承上启下的“桥梁”作用。由于该课程的理论性和实践性都很强,涉及的知识面也很广泛,因而难以掌握和融会贯通。本书旨在帮助读者整理知识,归纳结论,剖析难点,解惑疑点,强化重点;使复杂内容简明化;把相关内容系统化和条理化;使读者在深入理解通信原理的基本概念,轻松掌握分析方法和解题技巧的基础上,提高分析问题和解决问题的能力,从容应对期末考试和硕士研究生入学考试。

本书是以樊昌信教授和曹丽娜教授编著的《通信原理》(第6版)教材为主要参考书,同时参考其他相关教材而编写的一本学习辅导和考研指导书。全书共分14章,与《通信原理》(第6版)的各章一致,包括绪论、确知信号、随机过程、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字带通传输系统、新型数字带通传输系统、模拟信号的数字传输、数字信号的最佳接收、差错控制编码、正交编码与伪随机序列、同步原理、通信网。每章包括学习目标、内容提要、难点·疑点、重点·考点、典型例题、习题解答、期末试题精选与答案、考研试题精选与答案。“学习目标”指出了每章应掌握的基本内容;“内容提要”归纳性和贯穿性地给出了每章的复习要点;“难点·疑点”帮助读者剖析难懂点,提醒易错点;“重点·考点”具体给出了每章必须掌握的知识点和考点;“典型例题”通过对例题的分析和解答,引导读者掌握解题思路、分析方法、解题技巧,并对结论进行了评注;“习题解答”对《通信原理》(第6版)的课后习题进行提示和解答。“期末试题精选与答案”和“考研试题精选与答案”可供读者及时巩固和检测每章的学习效果。本书附录A和附录B分别提供了几套本科期末试题及其答案和硕士研究生入学考试题及其答案,以帮助读者熟悉多种题型,了解命题动态。

本次修订对书中部分章节做了删减,使本书更加精练、实用。

本书由曹丽娜教授和樊昌信教授合作完成,其中第1章~第11章以及第13章由曹丽娜教授编写;第12章和第14章由樊昌信教授编写;樊昌信教授对全书进行了审核。

最后,对于选用《通信原理》(第6版)和本书的单位、教师和读者表示衷心的感谢,真诚希望对于两本书中的缺点和错误给予指正,并希望与编者联系,编者的电子函件地址:

曹丽娜 ccllna@sohu.com

樊昌信 chxfan@xidian.edu.cn

编 者

2008年6月

目 录

第1章 绪论	1	3.1.4 平稳随机过程通过线性系统	34
1.1 内容提要	1	3.1.5 窄带随机过程	35
1.1.1 常用术语	1	3.1.6 正弦波加窄带高斯噪声	36
1.1.2 通信系统的组成	1	3.1.7 高斯白噪声和带限白噪声	36
1.1.3 通信系统的分类	3	3.2 难点·疑点	38
1.1.4 通信方式	3	3.3 重点·考点	40
1.1.5 信息及其度量	4	3.4 典型例题	40
1.1.6 主要性能指标	4	3.5 习题解答	41
1.2 难点·疑点	6	3.6 期末试题精选与答案	49
1.3 重点·考点	7	3.6.1 期末试题精选	49
1.4 典型例题	8	3.6.2 期末试题答案	49
1.5 习题解答	10	3.7 考研试题精选与答案	49
1.6 期末试题精选与答案	12	3.7.1 考研试题精选	49
1.6.1 期末试题精选	12	3.7.2 考研试题答案	49
1.6.2 期末试题答案	12	第4章 信道	51
1.7 考研试题精选与答案	12	4.1 内容提要	51
1.7.1 考研试题精选	12	4.1.1 信道定义与分类	51
1.7.2 考研试题答案	13	4.1.2 信道模型	52
第2章 确知信号	14	4.1.3 恒参信道特性及其对信号传输的影响	52
2.1 内容提要	14	4.1.4 随参信道特性及其对信号传输的影响	53
2.1.1 信号的分类和特性	14	4.1.5 信道噪声	54
2.1.2 确知信号的频域分析	15	4.1.6 信道容量	55
2.1.3 确知信号的时域分析	18	4.2 难点·疑点	56
2.2 难点·疑点	20	4.3 重点·考点	57
2.3 重点·考点	22	4.4 典型例题	58
2.4 典型例题	23	4.5 习题解答	59
2.5 习题解答	25	4.6 期末试题精选与答案	60
第3章 随机过程	30	4.6.1 期末试题精选	60
3.1 内容提要	30	4.6.2 期末试题答案	61
3.1.1 随机过程的基本概念	30	4.7 考研试题精选与答案	61
3.1.2 平稳随机过程	31		
3.1.3 高斯随机过程	33		

4.7.1	考研试题精选	61	6.6	期末试题精选与答案	120
4.7.2	考研试题答案	61	6.6.1	期末试题精选	120
第5章	模拟调制系统	62	6.6.2	期末试题答案	120
5.1	内容提要	62	6.7	考研试题精选与答案	120
5.1.1	调制的定义、目的和 分类	62	6.7.1	考研试题精选	120
5.1.2	幅度调制的原理	63	6.7.2	考研试题答案	121
5.1.3	线性调制系统的抗噪声 性能	66	第7章	数字带通传输系统	122
5.1.4	角度调制的原理	69	7.1	内容提要	122
5.1.5	调频系统的抗噪声性能	72	7.1.1	基本概念	122
5.1.6	模拟调制系统性能比较	74	7.1.2	二进制数字调制原理	122
5.1.7	频分复用(FDM)	75	7.1.3	二进制调制信号的功率谱 密度	128
5.1.8	复合调制和多级调制	75	7.1.4	二进制数字调制系统的抗噪声 性能	130
5.2	难点·疑点	75	7.1.5	二进制数字调制系统的性能 比较	131
5.3	重点·考点	76	7.1.6	多进制数字调制原理	132
5.4	典型例题	76	7.2	难点·疑点	134
5.5	习题解答	78	7.3	重点·考点	135
5.6	期末试题精选与答案	89	7.4	典型例题	136
5.6.1	期末试题精选	89	7.5	习题解答	137
5.6.2	期末试题答案	89	7.6	期末试题精选与答案	148
5.7	考研试题精选与答案	89	7.6.1	期末试题精选	148
5.7.1	考研试题精选	89	7.6.2	期末试题答案	149
5.7.2	考研试题答案	90	7.7	考研试题精选与答案	149
第6章	数字基带传输系统	91	7.7.1	考研试题精选	149
6.1	内容提要	91	7.7.2	考研试题答案	150
6.1.1	数字基带传输系统	91	第8章	新型数字通带调制技术	151
6.1.2	数字基带信号及其频谱 特性	92	8.1	内容提要	151
6.1.3	基带传输的常用码型	93	8.1.1	正交振幅调制(QAM)	151
6.1.4	基带传输和码间干扰	95	8.1.2	最小频移键控(MSK)	153
6.1.5	无ISI的基带传输特性	95	8.1.3	高斯最小频移键控 (GMSK)	156
6.1.6	无ISI基带系统的抗噪声 性能	99	8.1.4	正交频分复用(OFDM)	157
6.1.7	眼图和均衡	101	8.2	难点·疑点	159
6.2	难点·疑点	103	8.3	重点·考点	160
6.3	重点·考点	104	8.4	典型例题	160
6.4	典型例题	104	8.5	习题解答	161
6.5	习题解答	105	8.6	期末试题精选与答案	163

8.6.1	期末试题精选	163	10.4	典型例题	196
8.6.2	期末试题答案	163	10.5	习题解答	198
8.7	考研试题精选与答案	163	10.6	期末试题精选与答案	204
8.7.1	考研试题精选	163	10.6.1	期末试题精选	204
8.7.2	考研试题答案	163	10.6.2	期末试题答案	204
第9章	模拟信号的数字传输	165	10.7	考研试题精选与答案	204
9.1	内容提要	165	10.7.1	考研试题精选	204
9.1.1	概述	165	10.7.2	考研试题答案	205
9.1.2	抽样定理	166	第11章	差错控制编码	207
9.1.3	脉冲振幅调制(PAM)	166	11.1	内容提要	207
9.1.4	脉冲编码调制(PCM)	167	11.1.1	概述	207
9.1.5	DPCM 和 ADPCM	172	11.1.2	纠错编码的基本概念	208
9.1.6	增量调制(ΔM 或 DM)	172	11.1.3	几种简单的实用编码	208
9.1.7	PCM 与 ΔM 的比较	174	11.1.4	线性分组码	209
9.1.8	时分复用(TDM)	175	11.1.5	循环码	212
9.2	难点·疑点	177	11.1.6	卷积码	214
9.3	重点·考点	179	11.1.7	网格编码调制	216
9.4	典型例题	179	11.2	难点·疑点	216
9.5	习题解答	180	11.3	重点·考点	217
9.6	期末试题精选与答案	186	11.4	典型例题	217
9.6.1	期末试题精选	186	11.5	习题解答	221
9.6.2	期末试题答案	187	11.6	期末试题精选与答案	235
9.7	考研试题精选与答案	187	11.6.1	期末试题精选	235
9.7.1	考研试题精选	187	11.6.2	期末试题答案	235
9.7.2	考研试题答案	188	11.7	考研试题精选与答案	236
第10章	数字信号的最佳接收	189	11.7.1	考研试题精选	236
10.1	内容提要	189	11.7.2	考研试题答案	236
10.1.1	最佳接收准则	189	第12章	正交编码与伪随机序列	238
10.1.2	二进制确知信号的最佳接收	190	12.1	内容提要	238
10.1.3	二进制随相信号的最佳接收	192	12.1.1	正交编码	238
10.1.4	数字信号的匹配滤波接收机	193	12.1.2	伪随机序列	240
10.1.5	实际接收机与最佳接收机的性能比较	194	12.1.3	扩展频谱通信	243
10.1.6	最佳基带传输系统	194	12.1.4	伪随机序列的其他应用	243
10.2	难点·疑点	195	12.2	难点·疑点	245
10.3	重点·考点	196	12.3	重点·考点	247
			12.4	习题解答	247
			第13章	同步原理	250
			13.1	内容提要	250

13.1.1	概述	250	14.1.3	数据通信网	273
13.1.2	载波同步	251	14.1.4	开放系统互连参考 模型	273
13.1.3	码元同步	254	14.1.5	因特网的体系结构	275
13.1.4	群同步	257	14.1.6	高级数据链路控制 规程	275
13.1.5	扩谱通信系统 的同步	261	14.1.7	局域网	276
13.1.6	网同步	261	14.1.8	ALOHA 网	277
13.2	难点·疑点	261	14.1.9	综合业务数字网 (ISDN)	279
13.3	重点·考点	263	14.1.10	移动通信网	282
13.4	典型例题	263	14.2	难点·疑点	284
13.5	习题解答	266	14.3	重点·考点	285
13.6	期末试题精选与答案	267	14.4	习题解答	285
13.6.1	期末试题精选	267	附录 A	本科期末考试试题与参考 答案	287
13.6.2	期末试题答案	268	附录 B	硕士研究生入学考试试题 与参考答案	298
13.7	考研试题精选与答案	268	附录 C	常用数学公式	315
13.7.1	考研试题精选	268	参考文献		316
13.7.2	考研试题答案	269			
第 14 章	通信网	271			
14.1	内容提要	271			
14.1.1	通信网	271			
14.1.2	电话网	271			

第1章 绪 论

学习目标

通过对本章的学习,应该掌握如下要点:

- 常用通信术语;
- 模拟信号与数字信号的区别;
- 基带信号与已调信号的区别;
- 通信系统的组成、分类和通信方式;
- 数字通信系统的优缺点;
- 离散信源的信息量、平均信息量(熵)的计算;
- 码元速率、信息速率和频带利用率的定义、计算及其关系;
- 误码率和误信率的定义及其关系。

1.1 内 容 提 要

1.1.1 常用术语

- (1) 通信: 利用电(或光)信号将消息中所包含的信息从信源传递到一个或多个目的地。
- (2) 消息: 信息的物理表现形式,如文字、符号、数据、语音和活动图片等。
- (3) 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有效内容。
- (4) 信号: 消息的载体。消息搭载在电信号的某一参量上,若电信号的该参量是离散取值的,这样的信号称为**数字信号**;若该参量连续取值,则称为**模拟信号**。

1.1.2 通信系统的组成

通信系统是指传递信息所需的一切技术设备(包括信道)的总和。通信系统的作用就是将信息从信源发送到一个或多个目的地。

1. 一般模型

点对点通信系统的一般模型如图 1-1 所示,图中各部分的作用如下。

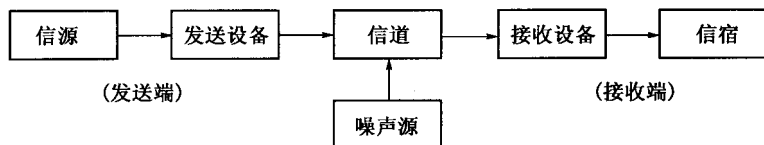


图 1-1 通信系统一般模型

信源的作用是把各种消息转换成原始电信号(基带信号),即完成非电量—电量的转换。

发送设备的作用是将信源和信道匹配起来,其目的是把信源产生的消息信号变换成适合在信道

中传输的信号。变换方式有多种,如调制、放大、滤波、编码等。

信道是指传输信号的通道,可分为有线和无线两大类。信道既给信号以通路,也会对信号产生损耗和干扰。

噪声源是信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。

接收设备的作用是将信号放大和反变换(如译码、解调等),其目的是从受到减损的接收信号中正确恢复出原始电信号。

信宿是传送消息的目的地,其功能与信源相反,即把原始电信号还原成相应的消息,如扬声器等。

2. 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统,其模型如图 1-2 所示。该系统包含两种重要变换:

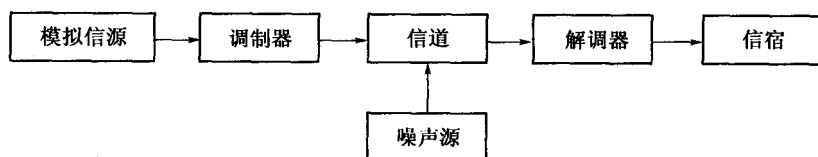


图 1-2 模拟通信系统模型

(1) 消息 $\rightleftharpoons$ 基带信号,完成这种变换和反变换的设备是信源和信宿;

(2) 基带信号 $\rightleftharpoons$ 已调信号,完成这种变换和反变换的设备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,它应有两个基本特征:一是携带有信息,二是适合在信道中传输。

3. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统,如图 1-3 所示。

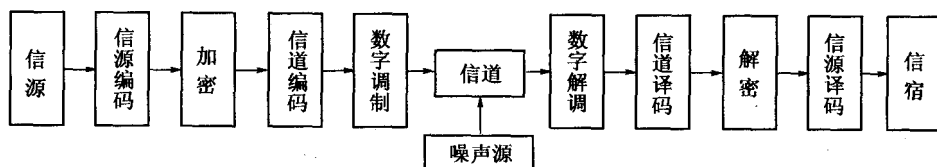


图 1-3 数字通信系统模型

(1) 信源与信宿。可以是模拟的,也可以是数字的。

(2) 信源编码与译码。信源编码有两个基本功能:一是完成模/数(A/D)转换;二是将数字信号进行压缩处理,以提高信息传输的有效性。信源译码是信源编码的逆过程。

(3) 信道编码与译码。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“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按相应的规则进行解码,从中发现错误或纠正错误,从而提高通信系统的可靠性。

(4) 加密与解密。加密(Encryption)是为了提高所传信息的安全性。在传输重要信息时,按照某加密算法,即密钥(Secret key),对明文(Plain text)进行加密,使其变成密文(Cryptograph)后再发送出去。接收时,利用密钥进行解密,从而恢复原来信息。

(5) 数字调制与解调。数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处,形成适合在信道中传输的带通信号。数字解调是数字调制的逆过程。

(6) 同步。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致。按照同步的功用不同,分为载波

同步、码元同步、群(帧)同步和网同步。因为不同功能的同步器在系统中所处的位置也不同,所以在图1-3中未画出同步器的具体位置(详见第13章)。

两点说明:①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中的所有环节。例如,数字基带传输系统(详见第6章)中,无需调制和解调。②模拟信号经过数字编码后也可以在数字通信系统中传输。

4. 数字通信的优缺点

与模拟通信相比,数字通信具有以下主要优点:

- (1) 抗干扰能力强,且噪声不积累(利用中继技术)。
- (2) 传输差错可控(利用信道编码技术)。
- (3) 便于进行信号加工、处理、变换和存储,从而可以将来自不同信源的信号综合到一起传输。
- (4) 易于集成,使通信设备小型化。
- (5) 易于加密处理,且保密性好。

数字通信的缺点:

- (1) 占用较大的传输带宽。
- (2) 对同步要求高,因而系统设备较复杂。

1.1.3 通信系统的分类

通信系统的类别可从不同的角度来划分,如表1-1所列。

表1-1 通信系统的分类

按通信业务 分 类	按信号特征 分 类	按传输媒质 分 类	按工作波段 分 类	按信号复用 方式分类	按传输方式 分 类
电话通信 数据通信 图像通信 遥控通信等	模拟通信 数字通信	有线通信 无线通信	长波通信 短波通信 微波通信 光通信等	频分复用 时分复用 码分复用	基带传输 带通传输

1.1.4 通信方式

通信方式是指通信的双方(或多方)之间的工作方式,其常见分类如表1-2所列。

表1-2 通信方式的分类

按消息传递的方向 与时间关系分类	按数据代码排列的 时序分类	按系统结构分类	按同步方式分类
单工通信 半双工通信 全双工通信	并行传输 串行传输	点到点通信(专线通信) 点到多点通信 多点之间通信(网通信)	同步通信 异步通信

(1) 单工(Simplex)通信:指消息只能单方向传输的工作方式。例如,广播、遥测、遥控、无线寻呼等都是单工通信方式。

(2) 半双工(Half-duplex)通信:指通信双方都能收或发消息,但不能同时进行收发的工作方式。例如,使用同一载频的普通对讲机、问询及检索等都是半双工通信方式。

(3) 全双工(Duplex)通信:指通信双方可同时进行收发消息的工作方式。例如,电话通信、计

算机之间的高速数据通信。

(4) 并行传输: 将代表消息的数字信号码元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。

(5) 串行传输: 将数字信号码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输。

注意: 一种通信方式可以具有多种类型, 如广播电视既是一种单工通信方式, 也是一种点到多点的通信方式。

1.1.5 信息及其度量

1. 信息

对接收者来说, 只有消息中不确定的内容才构成信息, 而这种不确定程度可以用概率来描述。因此, 消息中所含的信息量与消息发生的概率密切相关, 而与消息的种类和重要程度无关。

不同形式的消息, 可以包含相同的信息。

消息出现的概率越小, 所包含的信息量就越大。

2. 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

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.1-1)$$

信息量的单位与对数的底 a 有关: $a = e$ 时, 单位为奈特 (nit); $a = 10$ 时, 单位为哈特莱 (Hartly); 当 $a = 2$ 时, 单位为比特 (bit), 可简记为 b, 这是目前广泛使用的单位, 这时有

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \text{ (bit)} \quad (1.1-2)$$

对于等概信源, 二进制的每个码元含 1bit 的信息量。在工程应用中, 习惯把一个二进制码元称作 1bit。

对于等概信源, M 进制的每个码元含有 $\log_2 M$ 比特, 因为每一个 M 进制波形需要用 $\log_2 M$ 个二进制码元表示。

3. 离散信源的平均信息量(熵)

设离散信源为 $\left[\begin{matrix} x_1, & x_2, & \cdots, & x_M \\ P(x_1), & P(x_2), & \cdots, & P(x_M) \end{matrix} \right]$, 且 $\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$

则离散信源的平均信息量(信源中每个符号所含信息量的统计平均值)为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{ (bit/符号)} \quad (1.1-3)$$

显然, 当每个符号等概地独立出现 ($P(x_i) = 1/M$) 时, 信源的熵有最大值, 即

$$H_{\max} = \log_2 M \text{ (bit/符号)} \quad (1.1-4)$$

4. 总信息量

设某信源的熵为 $H(x)$, 则当该信源发送 m 个符号(构成一条消息)时, 所发送的总信息量为

$$I = m \cdot H(x) \text{ (bit)} \quad (1.1-5)$$

1.1.6 主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息, 因此传输信息的有效性和可靠性是通信系统的主要性能

指标。

有效性——传输一定信息量时所占用的信道资源(频率范围或时间间隔);可靠性——接收信息的准确程度。这两者是相互矛盾而又相互联系的,通常也是可以互换的。

1. 模拟通信系统

(1) 有效性指标: 传输带宽 B 。传送同样的消息(可用不同的调制方式)所需的带宽越小,通信的有效性就越好。例如,SSB 信号占用的带宽只是 DSB 信号的 $1/2$,故 SSB 系统的有效性比 DSB 的好。对多路复用系统来说,在给定带宽 B 内,复用的用户路数越多,有效性就越好。

(2) 可靠性指标: 输出信噪比 S_o/N_o 。不同的通信业务,对信噪比 S_o/N_o 的要求也不同。

2. 数字通信系统

(1) 有效性指标: 传输速率和频带利用率。

① 码元传输速率 R_b ,简称码元速率、传码率,又称波特率。

- 定义: 单位时间(每秒)传送码元的数目。

- 单位: 波特(Baud)。

- 注意: 码元速率仅仅表征单位时间传送码元的数目,而没有限定码元是何种进制。因此,只要知道每个码元的持续时间(码元宽度) T (秒),就可得

$$R_b = \frac{1}{T} \quad (\text{Baud}) \quad (1.1-6)$$

② 信息传输速率 R_b ,简称信息速率、传信率,又称比特率。

- 定义: 单位时间内传递的平均信息量或比特数。

- 单位: 比特/秒(bit/s),简记为 b/s。

- R_b 与 R_b 的关系: 因为每个码元所含的平均信息量为 H ,所以有

$$R_b = R_b \cdot H \quad (\text{b/s}) \quad (1.1-7)$$

等概率时, $H = \log_2 M$ (即 M 进制的每个码元携带 $\log_2 M$ 比特的信息量),这时有

$$R_b = R_b \log_2 M \quad (\text{b/s}) \quad (1.1-8)$$

或
$$R_b = \frac{R_b}{\log_2 M} \quad (\text{Baud}) \quad (1.1-9)$$

二进制($M = 2$)时
$$R_b = R_b \quad (1.1-10)$$

③ 频带利用率。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,还应考虑所占用的频带宽度,因为两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。所以,真正衡量数字通信系统的有效性指标是频带利用率,它定义为单位带宽(每赫)内的传输速率,即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (\text{Baud/Hz}) \quad (1.1-11)$$

或
$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/(s} \cdot \text{Hz)}) \quad (1.1-12)$$

当式(1.1-8)成立时,有
$$\eta_b = \eta_b \log_2 M \quad (1.1-13)$$

(2) 可靠性指标: 差错率。

① 误码率:
$$P_e = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{传输的总码元数}} = \frac{N_e}{N} \quad (1.1-14)$$

即指码元在传输过程中被传错的概率。误码率越低,则数字通信系统的可靠性越高。

$$\textcircled{2} \text{ 误信率(误比特率): } P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1.1-15)$$

即指错误接收的比特数在传输总比特数中所占的比例。

$$\text{二进制时,有} \quad P_b = P_e \quad (1.1-16)$$

$$M \text{ 进制时,有} \quad P_b < P_e \quad (1.1-17)$$

1.2 难点·疑点

1. 模拟信号和数字信号的区别

按信号参量的取值方式不同,可把信号分为两类:模拟信号和数字信号。若信号的参量取值连续(不可数、无穷多),则称为模拟信号;若信号的参量取值离散(可数的、有限个),则称为数字信号。

区别模拟信号和数字信号的关键,是看携带消息的信号参量(如幅值、频率、相位)的取值是连续的还是离散的,而不是看时间。

例如:图1-4(a)所示的话音信号,按抽样定理对其进行抽样,抽样后的信号(图1-4(b))尽管在时间上是离散的,但它仍属于模拟信号。实际上,这是一个PAM(脉冲调幅)信号。

又如:图1-5所示的信号(2FSK信号),尽管该信号波形在时间上和幅度上都是连续变化的,但它携带消息的参量是频率,而频率参量只有两种变化状态(离散取值),因此,它是一个数字信号。

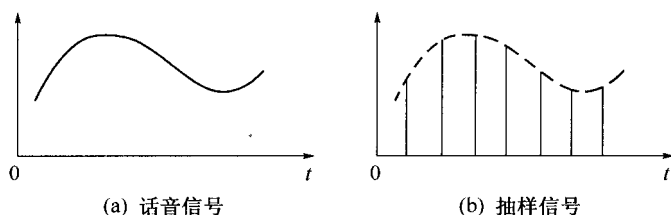


图1-4 模拟信号

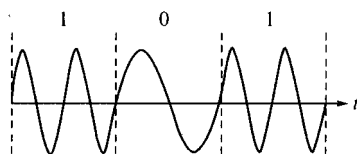


图1-5 数字信号

2. 基带信号、载波信号和已调信号

基带信号是指来自信源的消息信号,即原始电信号(也称调制信号)。它可以是模拟的,也可以是数字的。**基带的含义**是指信号的频谱从零频附近开始,如话音信号的频率范围为300Hz~3400Hz(注意:这是滤波后的频率范围),图像信号的频率范围为0~6MHz。

载波信号是指未受调制的高频振荡信号。它可以是正弦波,也可以是非正弦波(如方波、矩形或三角形的脉冲串)。

已调信号是指参量受到调制后的已调载波信号。由于已调信号的频谱通常具有带通形式,所以已调信号又称**带通信号**(注:许多教材都习惯把它称为**频带信号**。但本书作者认为“带通”一词比“频带”一词的含义更精准,故在本书中统一用“带通”一词)。

3. 离散、等概和独立的含义

(1) 离散:指信源中的符号个数是有限的、可数的。

(2) 等概:指信源中各符号 $x_i (i=1,2,3,\dots,M)$ 出现的概率相等,即有 $P(x_i) = \frac{1}{M}$ 。

(3) 独立:指信源中各符号 $x_i (i=1,2,3,\dots,M)$ 按一定的概率 $P(x_i)$ 相互统计独立出现。

4. 比特率和波特率的区别

比特率,即信息速率——每秒传送的平均信息量或比特数,用符号 R_b 表示。它与码元进制数有关,单位为 bit/s,简记为 b/s。

波特率,即码元速率——每秒传送的码元个数,用符号 R_B 表示。它与码元制数无关,仅与码元宽度有关,单位为波特(Baud),简记为 B。

为了便于理解,我们可以用类比区别波特和比特的概念。如在运输中,波特类似轿车,比特类似乘客。一辆轿车可载运一个或多个乘客。轿车的辆数(而不是乘客人数)确定了交通情况。类似地,波特数(而不是比特数)确定了所要求的传输带宽。所以,波特率 $\leq$ 比特率。

5. 关系式 $R_b = R_B \log_2 M$ 的物理意义

由比特率 R_b 、波特率 R_B 和进制数 M 之间的关系式可知:

(1) $R_b \leq R_B$, 二进制 ($M=2$) 时, $R_b = R_B$ (数值相同,单位不同)。

(2) R_b 一定时,增加进制数 M ,可以降低 R_B ,从而减小信号带宽,节约频带资源,提高系统频带利用率。

(3) R_B 一定时(即带宽一定),增加进制数 M ,可以增大 R_b ,从而在相同的带宽中传输更多的信息量。

结论 从传输的有效性考虑,多进制比二进制好。但从传输的可靠性考虑,二进制比多进制好。

6. 误信率 P_b 、误码率 P_e 和进制数 M 之间的关系

二进制时, $P_b = P_e$; M 进制时, $P_b < P_e$ 。

可以证明:当考虑一个特定的错误码元可以有 $(M-1)$ 种不同的错误样式,且这些错误样式以等概率出现时,误信率 P_b 和误码率 P_e 存在如下关系:
$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e \quad (1.2-1)$$

在某些通信系统中,如第7章中采用格雷码的多相制系统中,错误码元中仅发生 1bit 错误的概率最大。这时,近似有
$$P_b \approx P_e / \log_2 M \quad (1.2-2)$$

7. 为什么 $M (>2)$ 进制时, $P_b < P_e$ 。

以八进制为例来解释。等概独立时,八进制的每个码元需要用 3 个二进制码元表示,即八进制的每个码元含有 3bit。若考察一个八进制码元中仅发生 1bit (即一个二进制码元) 错误的情形,则当“000”错为“001”、“010”或“100”时,仅有 1bit 信息量错误,故误信率小于误码率。

8. 若已知比特率 R_b , 则 t 秒内传送的总信息量为

$$I = R_b \cdot t \quad (1.2-3)$$

9. 若已知波特率 R_B , 则 t 秒内发送的码元总数为

$$N = R_B \cdot t \quad (1.2-4)$$

1.3 重点·考点

1. 概念

信号区别、通信系统的组成和分类、数字通信的特点、通信方式、主要性能指标等。考试的可能形式:填空、简答题、画图题。

2. 计算

信息量、信源熵、总信息量的计算;信息速率、码元速率、频带利用率、误码率、误信率的计算。

1.4 典型例题

例 1-1 设有一个二进制离散信源(0,1),每个符号独立发送。

(1) 若“0”、“1”等概出现,求每个符号的信息量和平均信息量(熵);

(2) 若“0”出现概率为 1/3,重复(1)。

解 (1) 由等概独立条件可知, $P(0) = P(1) = 1/2$,故其信息量

$$I_0 = I_1 = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 2 = 1 \quad (\text{bit})$$

平均信息量(熵) $H(x) = - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) = P(0)I_0 + P(1)I_1 = 1 \quad (\text{bit/符号})$

或用式(1.1-4)来计算 $H = \log_2 M = \log_2 2 = 1 \quad (\text{bit/符号})$

(2) 已知 $P(0) = 1/3$,且 $P(0) + P(1) = 1$,则 $P(1) = 2/3$,故每个符号的信息量

$$I_0 = \log_2 \frac{1}{P(0)} = \log_2 3 = 1.584 \quad (\text{bit})$$

$$I_1 = \log_2 \frac{1}{P(1)} = \log_2 3/2 = 0.585 \quad (\text{bit})$$

平均信息量(熵) $H = P(0)I_0 + P(1)I_1 = 0.918 \quad (\text{bit/符号})$

评注: 等概时,二进制的每个波形所含的信息量为 1bit;

等概时,信源的平均信息量(熵)就等于每个符号的信息量;

非等概时,概率越小的符号,其信息量越大;

对比(1)和(2)可知:等概时,信源的熵有最大值 $H_{\max} = \log_2 M$ 。

例 1-2 设有一个四进制离散信源(0,1,2,3),独立等概发送,求传送每一符号的信息量。

解 由于每个符号出现的概率为 $P(x) = 1/4$,故其信息量 $I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 4 = 2 \quad (\text{bit})$

评注: 独立等概时,四进制的每个码元所含的信息量,恰好是二进制每个码元包含信息量的 2 倍。这是因为四进制的每个码元需要用两个二进制码元来表示。

推广 若 $M = 2^K$,则 M 进制的每个码元所含的信息量为 $K(\text{bit})$,恰好是二进制的 K 倍,即 M 进制的每个码元所含的信息量等于用二进制码元表示时所需的二进制码元数目 K 。

例 1-3 已知某四进制离散信源(0,1,2,3)中各符号出现的概率分别为 3/8,1/4,1/4,1/8,且每个符号的出现都是独立的,试求:

(1) 信源的平均信息量(熵);

(2) 信源发送 200101020130201030012...消息的信息量。其中,0 出现 38 次,1 出现 25 次,2 出现 24 次,3 出现 13 次,共有 100 个符号。

解 (1) 由式(1.1-3)可得

$$\begin{aligned} H &= - \sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i) = \\ &= - \frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

(2) 若用信息相加性概念来计算,这条消息的总信息量为

$$I = 38I_0 + 25I_1 + 24I_2 + 13I_3 =$$

$$38\log_2 8/3 + 25\log_2 4 + 24\log_2 4 + 13\log_2 8 = 190.7 \quad (\text{bit})$$

每个符号的算术平均信息量为 $\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{190.7}{100} = 1.907 \quad (\text{bit/符号})$

若用熵的概念来计算,则由式(1.1-5)可得这条消息的总信息量

$$I = m \cdot H = 100 \times 1.906 = 190.6 \quad (\text{bit})$$

评注:求一条消息(m 个符号组成)的总信息量,可利用信息相加性的概念来计算,也可利用熵的概念来计算,即 $I = m \cdot H$ 。

当消息序列较长时,用熵的概念计算更为方便。而且,随着消息序列长度的增加,两种计算误差将更小(参考并比较原教材中的【例 1.4-2】)。

例 1-4 设 A 系统以 2000b/s 的比特率传输 2PSK 调制信号的带宽为 2000Hz, B 系统以 2000b/s 的比特率传输 4PSK 调制信号的带宽为 1000Hz。试问:哪个系统更有效?

解 两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。因为,真正衡量数字通信系统的有效性指标是频带利用率:

$$\text{A 系统} \quad \eta_b = \frac{R_b}{B} = \frac{2000}{2000} = 1 \quad (\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz}))$$

$$\text{B 系统} \quad \eta_b = \frac{R_b}{B} = \frac{2000}{1000} = 2 \quad (\text{b}/(\text{s} \cdot \text{Hz}))$$

所以, B 系统的有效性更好。

例 1-5 设某数字传输系统传送二进制码元的速率为 1200B,试求该系统的信息速率;若该系统改为传送八进制信号码元,码元速率不变,则这时系统的信息速率为多少?

$$\text{解} \quad (1) R_b = R_B \log_2 2 = 1200 \quad (\text{b/s})$$

$$(2) R_b = R_B \log_2 8 = 1200 \times 3 = 3600 \quad (\text{b/s})$$

评注: R_b 一定时(即带宽一定),增加进制数 M ,可以增大 R_b ,从而在相同的带宽中传输更多的信息量。

例 1-6 设某四进制数字传输系统的每个码元的持续时间(宽度)为 $833 \times 10^{-6}\text{s}$,连续工作 1h 后,接收端收到 6 个错码,且错误码元中仅发生 1bit 的错误。

(1) 求该系统的码元速率和信息速率;

(2) 求该系统的误码率和误信率。

$$\text{解} \quad (1) \text{码元速率} \quad R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{833 \times 10^{-6}} = 1200 \quad (\text{Baud})$$

$$\text{信息速率} \quad R_b = R_B \log_2 M = 1200 \times 2 = 2400 \quad (\text{b/s})$$

(2) 由式(1.2-4)可求出 1h 传送的码元数

$$N = R_B \cdot t = 1200 \times 3600 = 432 \times 10^4 \quad (\text{个})$$

$$\text{误码率为} \quad P_e = \frac{N_e}{N} = \frac{6}{432 \times 10^4} = 1.39 \times 10^{-6}$$

若每个错误码元中仅发生 1bit 的错误,则可由式(1.2-2)计算误信率,即

$$P_b \approx P_e / \log_2 M = 6.94 \times 10^{-7}$$