

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

主 编 杜 青 乔延华
主 审 刘正光 冯 芳

主 编 杜 青 乔延华
主 审 刘正光 冯 芳



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

中国电子教育学会高教分会推荐

普通高等教育电子信息类“十三五”课改规划教材

现代通信原理习题解析

主编	杜 青	乔延华
参编	沈振惠	苗艳华
主审	刘正光	冯 芳

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是与乔延华和杜青编著的《现代通信原理》(西安电子科技大学出版社出版)一书相配套的辅导用书,涵盖了《现代通信原理》中的全部习题。

全书共分10章,前9章内容与《现代通信原理》一书相对应,第10章为模拟试题。每章由重点知识、课后习题详解和基本训练题三部分组成。本书附录A提供了各章基本训练题的答案,附录B提供了几套硕士研究生入学考试试题,以帮助读者熟悉多种题型,了解考研命题动态。

本书可以作为相关专业学生的课程学习辅导书,也可作为有关教师的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理习题解析/杜青,乔延华主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2017.7

普通高等教育信息类“十三五”课改规划教材

ISBN 978-7-5606-4497-4

I. ① 现… II. ① 杜… ② 乔… III. ① 通信原理—高等学校—题解 IV. ① TN911-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 160986 号

策 划 毛红兵

责任编辑 万晶晶

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2017年7月第1版 2017年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 12

字 数 277千字

印 数 1~3000册

定 价 24.00元

ISBN 978-7-5606-4497-4/TN

XDUP 4789001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

中国电子教育学会高教分会 教材建设指导委员会名单

主 任 李建东 西安电子科技大学副校长
副主任 裘松良 浙江理工大学校长
韩 焱 中北大学副校长
颜晓红 南京邮电大学副校长
胡 华 杭州电子科技大学副校长
欧阳缮 桂林电子科技大学副校长
柯亨玉 武汉大学电子信息学院院长
胡方明 西安电子科技大学出版社社长

委 员(按姓氏笔画排列)

于凤芹 江南大学物联网工程学院系主任
王 泉 西安电子科技大学计算机学院院长
朱智林 山东工商学院信息与电子工程学院院长
何苏勤 北京化工大学信息科学与技术学院副院长
宋 鹏 北方工业大学信息工程学院电子工程系主任
陈鹤鸣 南京邮电大学贝尔英才学院院长
尚 宇 西安工业大学电子信息工程学院副院长
金炜东 西南交通大学电气工程学院系主任
罗新民 西安交通大学电子信息与工程学院副院长
段哲民 西北工业大学电子信息学院副院长
郭 庆 桂林电子科技大学教务处处长
郭宝龙 西安电子科技大学教务处处长
徐江荣 杭州电子科技大学教务处处长
蒋 宁 电子科技大学教务处处长
蒋乐天 上海交通大学电子工程系
曾孝平 重庆大学通信工程学院院长
樊相宇 西安邮电大学教务处处长

秘书长 吕抗美 中国电子教育学会高教分会秘书长
毛红兵 西安电子科技大学出版社社长助理

前 言

“现代通信原理”这门课程一直都是高等学校电子、通信与信息大类各专业的一门重要的专业基础课，该课程既要为后续专业技术课程提供必要的通信系统基础知识和理论依据，又要为提高学生的专业素质和毕业后的继续学习、更新知识打好基础。

本书是以乔延华和杜青编著的《现代通信原理》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书。全书共分 10 章，包括绪论、信号分析基础和信道、模拟调制传输系统、信源编码、数字基带传输系统、数字调制传输系统、同步原理、信道编码、现代调制技术和模拟试题及其详解。每章主要由重点知识、课后习题详解和基本训练题三部分组成。“重点知识”归纳性和贯穿性地给出了每章的知识要点；“课后习题详解”通过对《现代通信原理》一书课后习题的详细解答，引导读者掌握解题思路、解题技巧。“基本训练题”可供读者及时巩固和检测每章的学习效果。本书附录 A 提供了各章基本训练题的答案，附录 B 提供了几套硕士研究生入学考试试题，以帮助读者熟悉多种题型，了解考研命题动态。

本书由杜青、乔延华担任主编。杜青编写了第 2、4、6、8、10 章及附录，乔延华编写了第 1、3、5、7 章，沈振惠编写了第 9 章，苗艳华参与了第 4 章的部分编写工作。全书由杜青负责统稿，由刘正光、冯芳担任主审。

在本书的编写过程中，得到了学校各位领导的大力支持，刘正光教授、常振云副院长、冯芳老师更为本书提出了很多宝贵的意见，在此表示衷心的感谢；苗艳华、沈振惠、郝张红、李建娜等全体电子、通信教研室的同志为本书的成稿做了大量的工作，在此致以诚挚的谢意。对本书选用的参考文献的著作者，在此一并表示真诚的感谢。

由于编者时间和水平有限，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2017 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 重点知识	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 信息及其度量	2
1.1.3 衡量通信系统的性能指标	2
1.2 课后习题详解	3
1.3 基本训练题	6
第 2 章 信号分析基础和信道	8
2.1 重点知识	8
2.1.1 信号分析基础	8
2.1.2 信道	10
2.1.3 恒参信道	11
2.1.4 变参信道	12
2.1.5 信道中的噪声	13
2.1.6 信道容量	14
2.2 课后习题详解	15
2.3 基本训练题	17
第 3 章 模拟调制传输系统	21
3.1 重点知识	21
3.1.1 基本概念	21
3.1.2 幅度调制系统及其抗噪声性能	21
3.1.3 角度调制系统及其抗噪声性能	23
3.1.4 频分复用(FDM)	25
3.2 课后习题详解	25
3.3 基本训练题	30
第 4 章 信源编码	33
4.1 重点知识	33
4.1.1 基本概念	33
4.1.2 抽样	33
4.1.3 脉冲幅度调制	34
4.1.4 抽样信号的量化	35
4.1.5 脉冲编码调制	37
4.1.6 增量调制	39
4.1.7 自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)	40

4.1.8 时分复用和多路数字电话系统	42
4.2 课后习题详解	42
4.3 基本训练题	46
第 5 章 数字基带传输系统	49
5.1 重点知识	49
5.1.1 数字基带传输系统的常用码型	49
5.1.2 数字基带信号的功率谱密度	49
5.1.3 基带传输与码间串扰	49
5.1.4 部分响应系统	51
5.1.5 基带传输系统的抗噪声性能分析	52
5.1.6 眼图	52
5.1.7 均衡	52
5.2 课后习题详解	52
5.3 基本训练题	57
第 6 章 数字调制传输系统	61
6.1 重点知识	61
6.1.1 二进制数字调制	61
6.1.2 数字信号的最佳接收	71
6.1.3 多进制数字调制	75
6.2 课后习题详解	83
6.3 基本训练题	94
第 7 章 同步原理	98
7.1 重点知识	98
7.1.1 载波同步	98
7.1.2 位同步	99
7.1.3 帧同步	100
7.1.4 网同步	100
7.2 课后习题详解	101
7.3 基本训练题	103
第 8 章 信道编码	104
8.1 重点知识	104
8.1.1 信道编码的基础	104
8.1.2 几种常用的检错码	106
8.1.3 线性分组码	106
8.1.4 循环码	108
8.1.5 卷积码	111
8.2 课后习题详解	112
8.3 基本训练题	120

第 9 章 现代调制技术 123

9.1 重点知识 123

9.1.1 OQPSK 123

9.1.2 $\pi/4$ -QPSK 124

9.1.3 MSK 125

9.1.4 QAM 127

9.2 课后习题详解 128

9.3 基本训练题 131

第 10 章 模拟试题及其详解 133

10.1 模拟试题 133

10.2 模拟试题详解 145

附录 A 各章基本训练题答案 159

附录 B 硕士研究生入学考试试题选编 170

附录 C 常用数学公式 179

参考文献 182

第1章 绪 论

1.1 重点知识

1.1.1 基本概念

(1) 通信的定义：通信就是把消息从一地传送到另一地。

电通信：是指利用“电”来传递信息的方式，即指利用有线电、无线电、光和其他电磁系统，对消息、情报、指令、文字、图像、声音或任何性质的消息进行传输。

(2) 通信系统的定义：是指完成信息传输过程的全部设备和传输媒介的总和。

1. 通信系统的基本模型

通信系统的模型如图 1-1 所示。

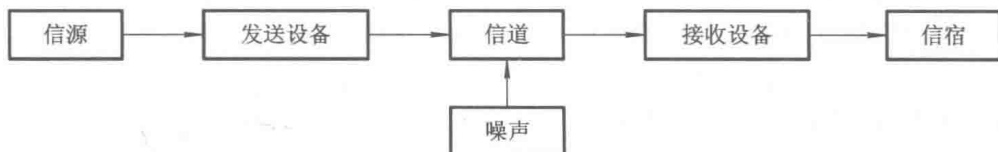


图 1-1 通信系统的基本模型

信源：消息的产生地，其作用是把各种消息转换成原始电信号。

发送设备：将原始电信号转换为适于在信道中传输的信号。

信道：将信号由发送设备传输到接收设备的媒介或途径，可分为有线信道和无线信道。

接收设备：将信号转换为原始电信号。

信宿：信息的归宿点，其作用是将接收设备恢复出的电信号转换成相应的消息。

噪声：通信系统中各种噪声干扰的集中表示。

2. 模拟通信系统的模型

模拟通信系统的模型如图 1-2 所示。

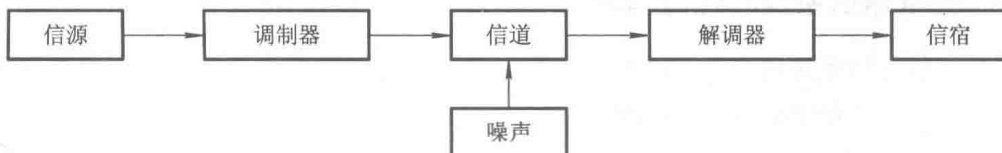


图 1-2 模拟通信系统的模型

3. 数字通信系统的模型

数字通信系统的模型如图 1-3 所示。

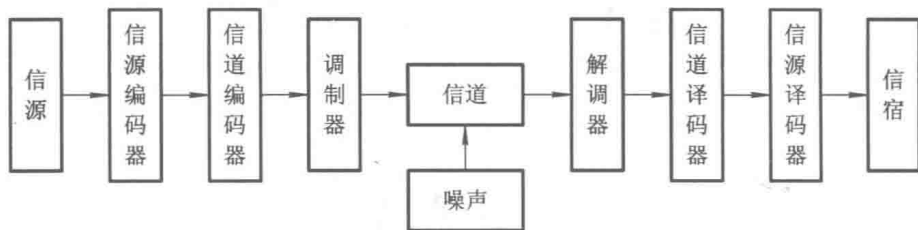


图 1-3 数字通信系统的模型

1.1.2 信息及其度量

通信的目的在于传递信息，每一个消息信号必定包含有接收者所需要知道的信息，消息是以具体信号形式表现出来的，而信息则是抽象的、本质的内容。只有消息中有不确定的内容才构成信息，所以信息就是对这种不确定性的定量描述。

1. 信息量的计算

事件的不确定程度，可以用其出现的概率来描述。消息出现的可能性越小，则消息中包含的信息量就越大，当消息出现的概率为 1 时，则它传递的信息量为 0。若干独立事件构成的消息所含的信息量等于各个消息所含信息量的线性叠加，即信息具有相加性。传输信息的多少，用信息量去衡量。

综上所述，某离散消息 x 发生的概率为 $P(x)$ ，其所携带的信息量为

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

当公式(1-1)中的对数以 2 为底时信息量的单位为比特(bit)；对数以 e 为底时信息量的单位为奈特(nit)；对数以 10 为底时信息量单位为哈特莱(hartley)。目前应用最广泛的单位是比特。

2. 平均信息量(熵)的计算

所谓平均信息量，是指信源中每个符号所含信息量的统计平均值。统计独立的 N 个符号的离散信息源的平均信息量可用公式(1-2)表示为

$$\begin{aligned} H(x) &= P_1(x)[- \lg P_1(x)] + P_2(x)[- \lg P_2(x)] + \cdots + P_n(x)[- \lg P_n(x)] \\ &= \sum_{i=1}^n P_i(x)[- \lg P_i(x)] \text{ (比特 / 符号)} \end{aligned} \quad (1-2)$$

1.1.3 衡量通信系统的性能指标

衡量一般通信系统的两个主要性能指标是传输信息的有效性和可靠性。有效性指消息传输的“速度”；可靠性指消息传输的“质量”。

1. 模拟通信系统性能指标

对于模拟通信系统来说，有效性可以用消息占用的有效带宽来度量，可靠性可以用接收端输出的信噪比来度量。

2. 数字通信系统性能指标

对于数字通信系统来说,度量其有效性的主要性能指标是传输速率,表示可靠性的主要指标是差错率。

1) 传输速率

传输速率可分为码元传输速率和信息传输速率。

码元传输速率(R_B)是指每秒钟传输的码元个数,单位为波特(Baud),记为 B。码元传输速率简称传码率,或称符号速率,可用公式表示为

$$R_B = \frac{1}{T_B} \text{ (Baud)} \quad (1-3)$$

式(1-3)中, T_B 为码元间隔。

信息传输速率(R_b)是指单位时间内传输的信息量或比特数,单位为比特/秒,可记为 bit/s, 或 b/s, 或 bps。信息传输速率简称传信率,或称比特率。

对于 M 进制数字系统,传信率和传码率可互换,如果 M 种不同的码元等概率出现,则信息速率与码元速率之间的关系可用公式(1-4)表示为

$$R_b = R_B \times \lg M \text{ (b/s)} \quad (1-4)$$

如果 M 种码元出现的概率不相等,则信息速率与码元速率之间的关系为

$$R_B = R_b \times H(x) \text{ (b/s)} \quad (1-5)$$

2) 差错率

差错率可分为误码率和误信率。

误码率(P_e)是指接收的错误码元数在传输总码元数中所占的比例,或者更确切地说,误码率是码元在传输系统中被传错的概率,即

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

误信率(P_b)又称误比特率,是指接收的错误码元比特数在传输总比特数中所占的比例,或者说,它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率,即

$$P_b = \frac{\text{接收的错误码元比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-7)$$

1.2 课后习题详解

1-1 试画出数字通信系统的模型,并简要说明各部分的作用。

解 数字通信系统的模型如图 1-4 所示。

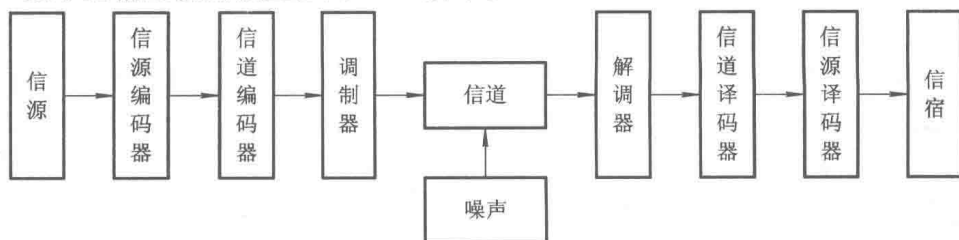


图 1-4 数字通信系统的一般模型

各部分的作用如下：

信源：即信息的来源，其作用是把消息转换成原始电信号的形式。

信源编码的目的是为了提高系统的有效性，其作用主要有两个：一是数据压缩，二是模数转换。

信道编码的目的是为了提高系统的可靠性，信道编码就是利用差错控制技术使系统具有检错、纠错能力，以提高系统的可靠性。

调制器的作用是频谱搬移，即将原来不适合直接在信道中传输的基带信号变换成适合在信道中传输的形式。

信道即信息传输的通道，它既可以是有线的，也可以是无线的。

解调器是调制的逆过程。

信道译码是信道编码的逆过程。

信源译码是信源编码的逆过程。

信宿的作用是将恢复的原始信号转换成相应的消息形式。

1-2 设英文字母 A 出现的概率为 0.023，B 出现的概率为 0.105，试求 A 与 B 的信息量。

解

$$I_A = \lg \frac{1}{P(x)} = \lg \frac{1}{0.023} = 5.44 \text{ bit}$$

$$I_B = \lg \frac{1}{0.105} = 3.25 \text{ bit}$$

1-3 设某地方的天气预报晴占 4/8，阴占 2/8，小雨占 1/8，大雨占 1/8，试求各个消息的信息量 I 。

解 $I_{\text{晴}} = \lg \frac{8}{4} = 1 \text{ bit}, I_{\text{阴}} = 2 \text{ bit}, I_{\text{小雨}} = 3 \text{ bit}, I_{\text{大雨}} = 3 \text{ bit}$

1-4 设有四个信息 A、B、C、D 分别以概率 1/4、1/8、1/8 和 1/2 传递，每一消息的出现是相互独立的。试计算其平均信息量。

解
$$\begin{aligned} H(X) &= P(A) \lg \frac{1}{P(A)} + P(B) \lg \frac{1}{P(B)} + P(C) \lg \frac{1}{P(C)} + P(D) \lg \frac{1}{P(D)} \\ &= \frac{1}{4} \lg \frac{1}{(1/4)} + \frac{1}{8} \lg \frac{1}{(1/8)} + \frac{1}{8} \lg \frac{1}{(1/8)} + \frac{1}{2} \lg \frac{1}{(1/2)} \\ &= 1.75 \text{ bit/符号} \end{aligned}$$

1-5 某信息源由 A、B、C、D、E 五个信息符号组成，发送 A 的概率为 1/2，发送其余符号概率相等，且设每一符号的出现是相互独立的，则每一个符号的平均信息量是多少？

解 由题可知

$$P(A) = \frac{1}{2}, P(B) = P(C) = P(D) = P(E) = \frac{1}{8}$$

则每一个符号的平均信息量为

$$\begin{aligned} H &= P(A)[- \lg P(A)] + P(B)[- \lg P(B)] + P(C)[- \lg P(C)] \\ &\quad + P(D)[- \lg P(D)] + P(E)[- \lg P(E)] \\ &= P(A)[- \lg P(A)] + 4P(B)[- \lg P(B)] \\ &= 2 \text{ bit/符号} \end{aligned}$$

1-6 一个离散信号源每毫秒发出 4 种符号中的一个，各相互独立符号出现的概率分

别为 0.4、0.3、0.2、0.1。求该信号源的平均信息量与信息传输速率。

$$\text{解} \quad H(X) = 0.4 \lg \frac{1}{0.4} + 0.3 \lg \frac{1}{0.3} + 0.2 \lg \frac{1}{0.2} + 0.1 \lg \frac{1}{0.1} = 1.84 \text{ bit/符号}$$

$$R = \frac{1.84}{10^{-6}} = 1840 \text{ b/s}$$

1-7 设一信息源的输出由 128 个不同的符号组成, 其中 16 个出现的概率为 $1/32$, 其余 112 个出现的概率为 $1/224$, 信息源每秒钟发出 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。

$$\text{解} \quad H(X) = 16 \times \left(\frac{1}{32}\right) \lg \frac{1}{(1/32)} + 112 \times \left(\frac{1}{224}\right) \lg \frac{1}{(1/224)} = 6.405 \text{ bit/符号}$$

$$R_b = 6.405 \times 1000 = 6405 \text{ b/s}$$

1-8 八进制数字信号在 2 分钟内共传送 72 000 个码元, 则每个码元所含信息量为多少? 信息速率为多少?

解 每个码元所含信息量为

$$H = \lg M = \lg 8 = 3 \text{ bit}$$

由题可知该系统的传码率为

$$R_B = \frac{72\,000}{120} = 600 \text{ B}$$

信息速率为

$$R_b = R_B \times H = 600 \times 3 = 1800 \text{ b/s}$$

1-9 设一数字传输系统传递二进制码元的速率为 1200 B, 试求该系统的信息传输速率, 若该系统改为八进制码元传递, 传码率仍为 1200 B, 此时信息传输速率又为多少?

$$\text{解} \quad R_{b2} = R_{B2} = 1200 \text{ b/s}$$

$$R_{b8} = R_{B8} \lg M = 1200 \times \lg 8 = 1200 \times 3 = 3600 \text{ b/s}$$

1-10 已知二进制数字信号的传输速率为 2400 b/s。试问变换成 4 进制数字信号时, 传输速率为多少波特?

$$\text{解} \quad R_B = \frac{R_b}{\lg M} = \frac{2400}{2} = 1200 \text{ B}$$

1-11 四进制数字信号的信息传输速率为 800 b/s, 若传送 1 小时后, 接收到 40 个错误码元, 其误码率为多少?

解 由题可有 $R_b = 800 \text{ b/s}$, 则由 $R_b = R_B \lg 4$ 可得

$$R_B = \frac{800}{2} = 400 \text{ B}$$

传送 1 小时后, 共传送码元个数为 $400 \times 3600 = 1\,440\,000$ 个, 误码率为 $P_e = \frac{40}{1\,440\,000} = 2.8 \times 10^{-5}$ 。

1-12 若二进制信号以 40 000 B 速率传送, 则 30 秒钟可传输的信息量为多少? 若在 100 秒的时间内, 接收到 4 个错误码元, 则其系统误码率为多大?

解 由题可有 $R_b = R_B = 40\,000 \text{ b/s}$, 则 30 s 可传输的信息量为

$$I = R_b \times 30 = 1.2 \times 10^6 \text{ bit}$$

在 100 s 时共传输的码元个数为 $40\,000 \times 100 = 4 \times 10^6$ 个, 误码率为 $P_e = \frac{4}{4\,000\,000} = 10^{-6}$ 。

1.3 基本训练题

一、单项选择题

- 数字通信相对于模拟通信具有()。
 - 占用频带小
 - 抗干扰能力强
 - 传输容量大
 - 易于频分复用
- 以下属于模拟信号是()。
 - PAM 信号
 - PCM 信号
 - ΔM 信号
 - DPCM 信号
- 以下属于数字信号是()。
 - PAM 信号
 - PDM 信号
 - PPM 信号
 - PCM 信号
- 对于 M 进制的离散消息源, 其平均信息量最大时的概率分布为()。
 - 均匀分布
 - 正态分布
 - 瑞利分布
 - 指数分布
- 通信系统可分为基带传输和频带传输, 以下属于频带传输方式的是()。
 - PAM 传输方式
 - PCM 传输方式
 - PSK 传输方式
 - ΔM 传输方式
- 通信系统可分为基带传输和频带传输, 以下属于基带传输方式的是()。
 - PSK 传输方式
 - PCM 传输方式
 - QAM 传输方式
 - SSB 传输方式
- 按信号特征通信系统可分为模拟和数字通信系统, 以下为数字通信系统的是()。
 - 采用 PAM 方式的通信系统
 - 采用 SSB 方式的通信系统
 - 采用 VSB 方式的通信系统
 - 采用 PCM 方式的通信系统
- 在数字通信系统中, 传输速率属于通信系统性能指标中的()。
 - 有效性
 - 可靠性
 - 适应性
 - 标准性
- 以下属于码元速率单位的是()。
 - 波特
 - 比特
 - 波特/秒
 - 比特/秒
- 在模拟通信系统中, 传输带宽属于通信系统性能指标中的()。
 - 可靠性
 - 有效性
 - 适应性
 - 标准性

二、填空题

- 由通信系统模型可知信号传输需经过两个变换, 分别是_____变换和_____变换。
- 在独立等概的条件下, M 进制码元的信息量是二进制码元的_____倍; 在码元速率相同情况下, M 进制码元的信息速率是二进制的_____倍。
- “在码元速率相等的情况下, 四进制的信息速率是二进制的 2 倍。”此话成立的条件是_____。
- 通常将信道中传输模拟信号的通信系统称为_____; 将信道中传输数字信号的通信系统称为_____。
- 主要用来度量通信系统性能的参量为_____和_____。

- _____。
6. 在数字通信系统中对应于有效性和可靠性的具体指标分别是_____和_____。
7. 在数字通信系统中,信源编码是为了_____,信道编码是为了_____。
8. 通信系统以传输媒质分类可以分为_____和_____。按调制与否分类可以分为_____和_____。按信号复用方式分类可以分为_____、_____和_____。

三、判断题

1. 数字信号是指具有时间上和幅度取值上离散的信号。 ()
2. 事件出现的概率越大表示该事件的信息量越大。 ()
3. 当离散信源中每个符号等概出现,而且各符号的出现为统计独立时,该信源的平均信息量最大。 ()

四、简答题

1. 数字通信系统与模拟通信系统相比具有哪些特点?
2. 什么是误码率?什么是误信率?它们之间的关系如何?
3. 什么是码元速率?什么是信息速率?它们的单位分别是什么?它们之间关系如何?

第2章 信号分析基础和信道

2.1 重点知识

2.1.1 信号分析基础

1. 信号的分类

1) 确知信号和随机信号

根据信号参数的确知程度,可将信号分为确知信号和随机信号两大类。

确知信号是指无论是过去、现在和未来的任何时间,其取值总是唯一确定的,例如正弦波形。

随机信号是指其全部或某个参量具有随机性的时间信号,亦即信号的某一个或多个参量具有不确定取值,因此在它未发生之前或未对它具体测量之前,这种取值是不可预测的。例如通信系统中传输的信号和噪声。

2) 周期信号和非周期信号

对于信号 $f(t)$,若存在某一最小值 T ,满足条件

$$f(t) = f(t - T) \quad -\infty < t < \infty \quad (2-1)$$

则称该信号为周期信号。若 T 值不存在,则称该信号为非周期信号。

3) 基带信号与频带信号

从信源发出的信号是原始的电波形,主要能量集中在低频段,甚至含有丰富的直流分量,没有经过任何调制(频谱搬移),因此称为基带信号(又称为低通型信号)。

为了适应绝大多数信道的传输,特别是无线通信信道,需将携带源信息的基带信号频谱搬移到某一指定的高频载波附近,称为频带信号(又称为带通型信号)。

4) 能量信号和功率信号

当 $f(t)$ 在无限长时间内能量有限且不为 0 时,该信号被称为能量信号。数学描述公式为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f^2(t) dt \quad (2-2)$$

实际应用中发送信号的能量多是有限的,如非周期的确定信号是能量信号。

如果信号在整个时间域中都存在,其能量是无限的,则称之为功率信号。数学描述公式为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f^2(t) dt \quad (2-3)$$

一般周期信号和随机信号都属于功率信号,通信系统中的信号和噪声的模型是随机信号,其能量也是无限的,属于功率信号。

2. 能量谱密度、功率谱密度和相关概念

1) 能量谱密度

假设能量信号 $f(t)$ 的频谱为 $F(\omega)$, 则信号的能量谱密度定义为

$$E_f(\omega) = |F(\omega)|^2 (\text{J/Hz}) \quad (2-4)$$

可见, 信号的能量谱密度只与信号幅度谱有关, 而与其相位谱无关。于是, 能量信号 $f(t)$ 的能量为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E_f(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} E_f(f) df \quad (2-5)$$

2) 功率谱密度

对时间信号 $f(t)$ 在区间 $(-T/2, T/2)$ 上截取短函数 $f_T(t)$, 且有 $f_T(t) \leftrightarrow F_T(\omega)$, 则信号 $f(t)$ 的平均功率为

$$S = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_T(\omega)|^2}{T} d\omega \quad (2-6)$$

一般定义

$$P_f(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|F_T(\omega)|^2}{T} (\text{W/Hz}) \quad (2-7)$$

为信号的功率谱密度, 它代表了信号功率沿频率轴的分布, 则功率信号的平均功率为

$$S = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} P_f(\omega) d\omega = \int_{-\infty}^{\infty} P_f(f) df \quad (2-8)$$

3) 相关的概念

相关是描述信号波形之间相似性或关联性的一种测度。相关有自相关和互相关之分。所谓自相关, 是指一个信号与延迟之后的同一个信号的关联程度; 所谓互相关, 是指一个信号与延迟之后的另一个信号的关联程度。

若 $f(t)$ 为能量信号, 则其自相关函数定义为

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) f(t+\tau) dt \quad (2-9)$$

若 $f(t)$ 为功率信号, 则其自相关函数定义为

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) f(t+\tau) dt \quad (2-10)$$

设 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 为两个不同的能量信号, 则其互相关函数定义为

$$R_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_2(t+\tau) dt \quad (2-11)$$

设 $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$ 为两个不同的功率信号, 则其互相关函数定义为

$$R_{12}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_1(t) f_2(t+\tau) dt \quad (2-12)$$

4) 自相关函数与能量谱密度函数、功率谱密度函数的关系

自相关函数和能量谱密度是一对傅里叶变换对, 即

$$R(\tau) \leftrightarrow E_f(\omega) \quad (2-13)$$

对于功率信号, 其自相关函数和功率谱密度也是一对傅里叶变换对, 即

$$R(\tau) \leftrightarrow P_f(\omega) \quad (2-14)$$