



普通高等教育“十一五”国家级规划教材·配套用书

国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材

# 通信原理学习指导 与考研辅导

(第2版)

郭爱煌 陈睿 钱业青 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材·配套用书  
国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材

# 通信原理学习指导 与考研辅导 (第2版)

郭爱煌 陈睿 钱业青 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书为樊昌信教授编著的《通信原理教程》(第3版)一书的配套参考书。

本书内容包括通信原理课程的基本要求、核心内容、知识体系、重要公式、解题指导、考研辅导和习题解答。

为满足读者的不同要求,本书列出了《通信原理教程》一书各章应该了解、熟悉和掌握的内容,重点归纳了各章的主要内容,给出了各章中内容的知识体系关系;以填空、简答和精选例题等方式提供了从基础到提高的精选范例,给出了解题的指导;并从题型、解答和分析等方面进行研究生入学考试辅导;给出了8套硕士研究生入学考试题及参考答案。

本书可作为高等院校有关专业通信原理课程的学习指导书,也可作为报考相关专业硕士研究生的复习备考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理学习指导与考研辅导 / 郭爱煌, 陈睿, 钱业青编著. —2版. —北京: 电子工业出版社, 2014.11

国家级特色专业·通信工程·核心课程规划教材

ISBN 978-7-121-20341-1

I. ①通… II. ①郭… ②陈… ③钱… III. ①通信原理—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 250537 号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 李佩乾

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.25 字数: 520 千字

版 次: 2007 年 3 月第 1 版

2014 年 11 月第 2 版

印 次: 2014 年 11 月第 1 次印刷

印 数: 2 500 册 定价: 40.00 元



凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

目前,通信技术已深入到电子与信息工程的各个学科领域,“通信原理”是电子信息类专业的主干课程,是进一步学习有关专业课程的重要基础。该课程也是研究生入学考试的必考内容。另外,该课程具有原理性、系统性强,数学分析多,概念抽象,以及与先修课程联系密切等特点,因而比较难以掌握和融会贯通。

为了帮助读者学好通信原理课程,并满足硕士研究生入学考试备考的需求,我们精心编写了这本课程学习指导与考研辅导书。

本书以樊昌信教授编著的国内主流教材《通信原理教程》(第3版)(电子工业出版社,书号:978-7-121-17596)的知识点、章节结构为主线,全书共14章。每章包括4部分内容:

(1) 学习指导,包括课程要求、核心内容、知识体系和主要公式,给出了本章的基本概念、基本原理、基本分析方法和重要结论,归纳了本章知识点的基本关系,列出了重要的计算公式和应用条件;

(2) 解题指导,包括基础理论和例题精解,有基本题、计算题、综合分析提高题,并给出相应的说明、分析或结论;

(3) 考研辅导,给出了考研题型和解答分析指导;

(4) 习题解答,樊昌信教授编著的《通信原理教程》(第3版)各章的全部习题解答。

最后一章(第14章)给出了8套硕士研究生入学考试试题及解答。

本书由郭爱煌、陈睿、钱业青共同编写。郭爱煌负责全书的整体安排和统稿,具体编写第7,10,12,13,14章;陈睿编写第1,2,5,6,11章,钱业青编写第3,4,8,9章。

本书以樊昌信教授编著的《通信原理教程》(第3版)为主要参考书,同时也参考了其他文献和著作,在此谨向这些书的作者表示衷心的感谢。编者还要诚挚地感谢电子工业出版社韩同平编辑,他为本书的出版做了大量指导和具体的工作。

编 著 者

# 目 录

|              |      |               |       |
|--------------|------|---------------|-------|
| 第1章 概论       | (1)  | 3.3.2 考研试题解答  | (49)  |
| 1.1 学习指导     | (1)  | 3.4 习题解答      | (50)  |
| 1.1.1 基本要求   | (1)  | 第4章 模拟信号的数字化  | (56)  |
| 1.1.2 核心内容   | (1)  | 4.1 学习指导      | (56)  |
| 1.1.3 知识体系   | (8)  | 4.1.1 课程要求    | (56)  |
| 1.1.4 重要公式   | (8)  | 4.1.2 重点内容    | (56)  |
| 1.2 解题指导     | (9)  | 4.1.3 知识体系    | (63)  |
| 1.2.1 基础理论   | (9)  | 4.1.4 重要公式    | (63)  |
| 1.2.2 例题精解   | (9)  | 4.2 解题指导      | (64)  |
| 1.3 考研辅导     | (11) | 4.2.1 基础理论    | (64)  |
| 1.3.1 考研试题精选 | (11) | 4.2.2 例题精解    | (65)  |
| 1.3.2 考研试题解答 | (12) | 4.3 考研辅导      | (69)  |
| 1.4 习题解答     | (14) | 4.3.1 考研试题精选  | (69)  |
| 第2章 信号       | (16) | 4.3.2 考研试题解答  | (69)  |
| 2.1 学习指导     | (16) | 4.4 习题解答      | (70)  |
| 2.1.1 基本要求   | (16) | 第5章 基带数字信号的表示 |       |
| 2.1.2 核心内容   | (16) | 和传输           | (74)  |
| 2.1.3 知识体系   | (24) | 5.1 学习指导      | (74)  |
| 2.1.4 重要公式   | (24) | 5.1.1 基本要求    | (74)  |
| 2.2 解题指导     | (25) | 5.1.2 核心内容    | (74)  |
| 2.2.1 基础理论   | (25) | 5.1.3 知识体系    | (81)  |
| 2.2.2 例题精解   | (26) | 5.1.4 重要公式    | (81)  |
| 2.3 考研辅导     | (28) | 5.2 解题指导      | (82)  |
| 2.3.1 考研试题精选 | (28) | 5.2.1 基础理论    | (82)  |
| 2.3.2 考研试题解答 | (29) | 5.2.2 例题精解    | (83)  |
| 2.4 习题解答     | (30) | 5.3 考研辅导      | (88)  |
| 第3章 模拟调制系统   | (38) | 5.3.1 考研试题精选  | (88)  |
| 3.1 学习指导     | (38) | 5.3.2 考研试题解答  | (89)  |
| 3.1.1 课程要求   | (38) | 5.4 习题解答      | (90)  |
| 3.1.2 重点内容   | (38) | 第6章 基本的数字调制系统 | (99)  |
| 3.1.3 知识体系   | (44) | 6.1 学习指导      | (99)  |
| 3.1.4 重要公式   | (44) | 6.1.1 基本要求    | (99)  |
| 3.2 解题指导     | (44) | 6.1.2 核心内容    | (99)  |
| 3.2.1 基础理论   | (44) | 6.1.3 知识体系    | (105) |
| 3.2.2 例题精解   | (45) | 6.1.4 重要公式    | (105) |
| 3.3 考研辅导     | (49) | 6.2 解题指导      | (106) |
| 3.3.1 考研试题精选 | (49) | 6.2.1 基础理论    | (106) |

|              |                   |       |               |                  |       |
|--------------|-------------------|-------|---------------|------------------|-------|
| 6.2.2        | 例题精解              | (107) | 9.3.2         | 考研试题解答           | (175) |
| 6.3          | 考研辅导              | (113) | 9.4           | 习题解答             | (176) |
| 6.3.1        | 考研试题精选            | (113) | <b>第 10 章</b> | <b>信道编码和差错控制</b> | (180) |
| 6.3.2        | 考研试题解答            | (114) | 10.1          | 学习指导             | (180) |
| 6.4          | 习题解答              | (116) | 10.1.1        | 课程要求             | (180) |
| <b>第 7 章</b> | <b>同步</b>         | (126) | 10.1.2        | 重点内容             | (180) |
| 7.1          | 学习指导              | (126) | 10.1.3        | 知识体系             | (190) |
| 7.1.1        | 课程要求              | (126) | 10.1.4        | 重要公式             | (190) |
| 7.1.2        | 重点内容              | (126) | 10.2          | 解题指导             | (190) |
| 7.1.3        | 知识体系              | (133) | 10.2.1        | 基础理论             | (190) |
| 7.1.4        | 重要公式              | (134) | 10.2.2        | 例题精解             | (191) |
| 7.2          | 解题指导              | (134) | 10.3          | 考研辅导             | (197) |
| 7.2.1        | 基础理论              | (134) | 10.3.1        | 考研试题精选           | (197) |
| 7.2.2        | 例题精解              | (135) | 10.3.2        | 考研试题解答           | (197) |
| 7.3          | 考研辅导              | (137) | 10.4          | 习题解答             | (200) |
| 7.3.1        | 考研试题精选            | (137) | <b>第 11 章</b> | <b>先进的数字带通调制</b> | (210) |
| 7.3.2        | 考研试题解答            | (138) | 和             | <b>解调</b>        | (210) |
| 7.4          | 习题解答              | (140) | 11.1          | 学习指导             | (210) |
| <b>第 8 章</b> | <b>数字信号最佳接收原理</b> | (142) | 11.1.1        | 基本要求             | (210) |
| 8.1          | 学习指导              | (142) | 11.1.2        | 核心内容             | (210) |
| 8.1.1        | 课程要求              | (142) | 11.1.3        | 知识体系             | (216) |
| 8.1.2        | 重点内容              | (142) | 11.1.4        | 重要公式             | (216) |
| 8.1.3        | 知识体系              | (148) | 11.2          | 解题指导             | (216) |
| 8.1.4        | 重要公式              | (148) | 11.2.1        | 基础理论             | (216) |
| 8.2          | 解题指导              | (149) | 11.2.2        | 例题精解             | (217) |
| 8.2.1        | 基础理论              | (149) | 11.3          | 考研辅导             | (219) |
| 8.2.2        | 例题精解              | (149) | 11.3.1        | 考研试题精选           | (219) |
| 8.3          | 考研辅导              | (153) | 11.3.2        | 考研试题解答           | (219) |
| 8.3.1        | 考研试题精选            | (153) | 11.4          | 习题解答             | (220) |
| 8.3.2        | 考研试题解答            | (153) | <b>第 12 章</b> | <b>信源压缩编码</b>    | (224) |
| 8.4          | 习题解答              | (154) | 12.1          | 学习指导             | (224) |
| <b>第 9 章</b> | <b>多路复用和多址技术</b>  | (159) | 12.1.1        | 课程要求             | (224) |
| 9.1          | 学习指导              | (159) | 12.1.2        | 重点内容             | (224) |
| 9.1.1        | 课程要求              | (159) | 12.1.2        | 知识体系             | (227) |
| 9.1.2        | 重点内容              | (159) | 12.1.3        | 重要公式             | (227) |
| 9.1.3        | 知识体系              | (168) | 12.2          | 解题指导             | (227) |
| 9.1.4        | 重要公式              | (168) | 12.2.1        | 基础理论             | (227) |
| 9.2          | 解题指导              | (169) | 12.2.2        | 例题精解             | (227) |
| 9.2.1        | 基础理论              | (169) | 12.3          | 考研辅导             | (228) |
| 9.2.2        | 例题精解              | (171) | 12.3.1        | 考研试题精选           | (228) |
| 9.3          | 考研辅导              | (174) | 12.3.2        | 考研试题解答           | (229) |
| 9.3.1        | 考研试题精选            | (174) | 12.4          | 习题解答             | (230) |

|                          |       |                      |       |
|--------------------------|-------|----------------------|-------|
| <b>第 13 章 通信安全</b> ..... | (233) | 14.1.3 试题三 .....     | (248) |
| 13.1 学习指导 .....          | (233) | 14.1.4 试题四 .....     | (249) |
| 13.1.1 课程要求 .....        | (233) | 14.1.5 试题五 .....     | (251) |
| 13.1.2 重点内容 .....        | (233) | 14.1.6 试题六 .....     | (252) |
| 13.1.3 知识体系 .....        | (238) | 14.1.7 试题七 .....     | (254) |
| 13.1.4 重要公式 .....        | (238) | 14.1.8 试题八 .....     | (257) |
| 13.2 解题指导 .....          | (239) | 14.2 研究生入学考试试题       |       |
| 13.2.1 基础理论 .....        | (239) | 答案要点 .....           | (260) |
| 13.2.2 例题精解 .....        | (239) | 14.2.1 试题一答案要点 ..... | (260) |
| 13.3 考研辅导 .....          | (243) | 14.2.2 试题二答案要点 ..... | (263) |
| 13.3.1 考研试题精选 .....      | (243) | 14.2.3 试题三答案要点 ..... | (266) |
| 12.3.2 考研试题解答 .....      | (243) | 14.2.4 试题四答案要点 ..... | (269) |
| 13.4 习题解答 .....          | (244) | 14.2.5 试题五答案要点 ..... | (271) |
| <b>第 14 章 研究生入学考试试题</b>  |       | 14.2.6 试题六答案要点 ..... | (275) |
| <b>及答案</b> .....         | (245) | 14.2.7 试题七答案要点 ..... | (277) |
| 14.1 研究生入学考试试题 .....     | (245) | 14.2.8 试题八答案要点 ..... | (279) |
| 14.1.1 试题一 .....         | (245) | <b>参考文献</b> .....    | (281) |
| 14.1.2 试题二 .....         | (246) |                      |       |

# 第1章 概 论

## 1.1 学习指导

### 1.1.1 基本要求

1. 了解通信的基本概念及常用通信术语。
2. 理解通信系统的组成、分类及通信方式。
3. 掌握模拟信号与数字信号的概念及特点。
4. 掌握基带信号与已调信号的区别。
5. 掌握数字通信系统的优缺点。
6. 掌握信息的概念及其度量方法。
7. 理解通信系统的主要性能指标并掌握其计算方法。
8. 了解信道的概念、分类、模型及特点，并掌握信道容量计算公式。

### 1.1.2 核心内容

#### 1. 通信系统的基本概念

(1) **通信**：信息(或消息)的传输和交换。利用电或光信号将消息中包含的信息从信源传送到一个或多个目的地。

(2) **消息**：信源所产生的信息的物理表现形式。可分为两类：离散消息(消息状态是可数的或有限个，如文字、符号、数据等)和连续消息(消息的状态连续变化，如语音、图像等)。

(3) **信息**：消息的内涵，即消息中所包含的对受信者(信宿)有意义的内容。因此，通信的根本目的在于传输含有信息的信息。基于这种认识，“通信”也就是“信息传输”或“消息传输”。

(4) **信号**：信息的物理载体。在通信系统中，信息的传递常常是通过它的物质载体——电信号来实现的，即把消息承载在电信号的某一参量(振幅、频率或相位)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。

#### 2. 通信系统模型

实现消息传递所需的一切技术与信道的总和称为通信系统。

##### (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 通信系统的一般模型



**信源：**其功能是把消息转换成原始电信号(称为基带信号)，即完成非电量到电量的变换。

**发送设备：**其主要功能是将信源和信道匹配起来，把信源产生的原始电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：**是信号传输的通道，分为有线和无线两大类。信道既给信号传输以通路，也会对信号产生损耗和干扰。因此，在通信系统模型中，信道是噪声(干扰)集中加入之处。

**噪声源：**是通信系统中各种设备，以及信道中噪声与干扰的集中表示。

**接收设备：**其任务是从带有干扰的接收信号中正确恢复出原始电信号来。即进行与发送设备相对应的反变换。例如，解调、译码、解码等。

**信宿：**信息传输的目的地或通信系统的终点。其作用与信源相反，即把原始电信号还原成相应的消息，如扬声器、显示器等。

### (2) 模拟通信系统模型

利用模拟信号来传递信息的系统称为模拟通信系统，如图 1-2 所示。

该系统中包含两种重要变换：

- 非电信号(消息) ↔ 基带信号，完成这种变换和反变换的是信源和信宿；

- 基带信号 ↔ 已调信号，完成这种变换和反变换的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。已调信号有三个基本特征：一是携带有信息；二是适合在信道中传输；三是信号的频谱具有带通形式，并且中心频率远离零频，因而已调信号又称频带信号。

### (3) 数字通信系统模型

利用数字信号来传递信息的系统称为数字通信系统，如图 1-3 所示。

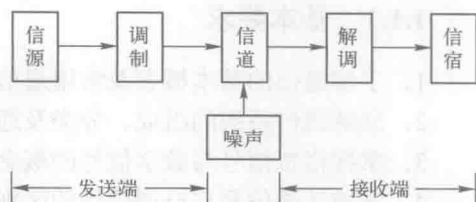


图 1-2 模拟通信系统模型

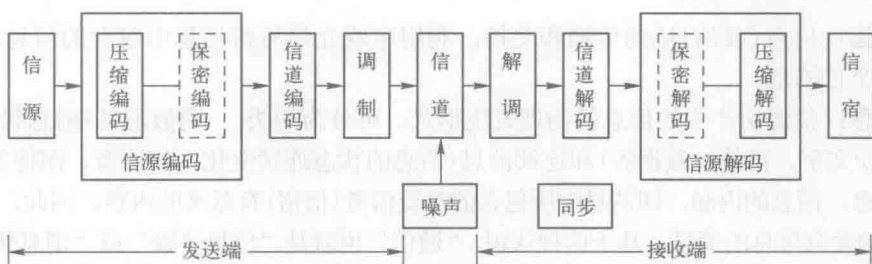


图 1-3 数字通信系统模型

**信源与信宿** 可以是模拟的，也可以是数字的。

**信源编码与解码** 信源编码的功能有两个：一是将模拟信号转换成数字信号，即模/数转换，以进入数字通信系统传输；二是通过数据压缩设法降低数字信号的数码率，从而提高消息传输的有效性。信源解码是信源编码的逆过程。

**保密编码与解码** 在某些系统中，信源编/解码还包含加密功能，即在压缩后进行保密编码，以提高数字信息传输的安全性。

**信道编码与解码** 信道编码是对传输的信息码元按一定的规则加入监督码元，组成所谓的“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按相应规则进行解码，从中发现错误或纠正错误，从而提高数字通信系统的抗干扰能力，实现可靠通信。

**数字调制与解调** 数字调制是把各种数字基带信号的频谱搬移到高频处，形成适于信道传输的带通信号(频带信号)。数字解调是数字调制的逆过程。

**同步** 是使收发两端的信号在时间上保持步调一致,它是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提条件。按照同步的作用不同,分为载波同步、位同步、群(帧)同步和网同步。

### 3. 数字通信的主要优缺点

#### (1) 优点

数字通信已成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信系统有以下主要优点:

- ① 抗干扰能力强,可消除噪声积累,因此可中继,可多次复制(再生);
- ② 可采用信道编码技术,实现传输差错可控,降低传输误码率;
- ③ 便于与各种数字终端接口,便于进行数字信号加工、处理、变换和存储,形成智能网;
- ④ 便于加密处理,且保密性好;
- ⑤ 便于集成化,从而使通信设备小型化、微型化,降低成本。

其中,①和②两点使数字通信的可靠性得以提高。

#### (2) 缺点

- ① 占用较大的传输带宽。
- ② 同步要求高(需要位同步、帧同步等),因而系统设备比较复杂。

### 4. 信息及度量

#### (1) 信息

信息是消息中不确定的内容,或者说有效内容。而这种不确定程度可以用概率来描述。信息包含在消息之中。不同消息包含的信息量不同,不同受信者从同一消息中所获得的信息量亦不同,从而需要对信息进行度量。

#### (2) 信息量 $I$

- ① 信息量是消息出现概率的函数;
- ② 消息出现的概率越小,所包含的信息量越大;
- ③ 若某离散消息  $x$  发生的概率为  $P(x)$ ,则它所携带的信息量为

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

信息量的单位与对数的底  $a$  有关:  $a=2$  时,信息量单位为比特(bit),这是目前广泛使用的单位;  $a=e$  时,单位为奈特(nat);  $a=10$  时,信息量单位为哈特莱(Hartly)。

#### (3) 离散独立等概消息的信息量

消息集由  $M$  个可能的消息(事件)所组成,每次只取其中之一。各消息出现的概率相等 ( $P(x)=1/M$ )。

#### ① 二进制 ( $M=2$ ):

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

**结论:** 对于等概信源,二进制的每个码元(符号)含 1bit 的信息量。工程应用中,习惯把一个二进制码元称作 1 bit。

#### ② $M$ 进制 ( $M=2^N$ ):

$$P(x)=1/M=2^{-N} \\ I = -\log_2 P(x) = \log_2 M = N \text{ bit} \quad (1-3)$$

**结论:** 对于等概信源,  $M$  进制的每个码元(符号)含有  $\log_2 M$  bit,是二进制的  $N$  倍。

#### (4) 离散独立非等概信源的信息量(信源熵)

#### ① 平均信息量——信源熵 $H(X)$

信源符号集中每个符号所包含的平均(统计平均)信息量,称为信源熵。

设离散信源的概率为  $\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_M \\ p(x_1) & p(x_2) & \cdots & p(x_M) \end{bmatrix}$ , 且有  $\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$

信源的熵为 
$$H(X) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{ bit/符号} \quad (1-4)$$

重要结论: 当信源中每个符号等概率独立出现时, 信源的熵有最大值。此时,  $P(x_i) = 1/M$ , 因此

$$H_{\max} = \log_2 M \text{ bit/符号} \quad (1-5)$$

## ② 总信息量

若某信源的熵为  $H(X)$ , 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

$$I = m \cdot H(X) = -m \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{ bit} \quad (1-6)$$

## 5. 通信系统主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此, 评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的有效性和可靠性。有效性是指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), 而可靠性则是指接收消息的准确程度。

### (1) 模拟通信系统

有效性指标: 传输带宽  $B$ 。传送相同的消息所需的带宽越小, 通信系统的有效性越好。对多路复用来说, 在给定带宽  $B$  内, 复用的用户路数越多, 有效性越好。

可靠性指标: 输出信噪比  $S/N$ ; 用分贝(dB)表示时,  $\text{SNR} = 10 \lg(S/N) \text{ dB}$ 。

### (2) 数字通信系统

● 有效性指标: 传输速率和频带利用率

#### ① 码元传输速率 $R_B$ (码元速率、传码率、波特率)

定义: 每秒钟传送的码元个数。  $R_B = 1/T_B$ ,  $T_B$  为码元持续时间。

单位: 波特(Baud, 可简称为 Bd)。

注意: 码元传输速率是指单位时间内传送码元的数目, 与码元采用的进制无关。

#### ② 信息传输速率 $R_b$ (信息速率、传信率、比特率)

定义: 每秒钟传送的信息量或比特数。

单位: 比特/秒(bit/s, 可简称为 b/s)。

$R_b$  与  $R_B$  的关系: 若每个码元所含的平均信息量为  $H$ , 则有

$$R_b = R_B H \text{ (b/s)} \quad (1-7)$$

等概率时,  $H = \log_2 M$  ( $M$  为码元的进制), 则有

$$R_b = R_B \log_2 M \text{ (b/s)} \quad (1-8)$$

或 
$$R_B = R_b / \log_2 M \quad (1-9)$$

二进制 ( $M=2$ ) 时 
$$R_b = R_B \quad (1-10)$$

#### ③ 频带利用率(带宽效率)

定义: 单位频带提供的码元传输速率或信息传输速率, 即

$$\eta_B = \frac{R_B}{B} \text{ Bd/Hz, 或 } \eta_b = \frac{R_b}{B} \text{ b/(s} \cdot \text{Hz)}$$

意义: 把带宽与传输速率相联系, 以便更好地考虑有效性。

结论：当等概率且码元速率相同时，有

$$\eta_b = \eta_B \log_2 M \quad (1-11)$$

因此从传输有效性方面考虑，多进制比二进制好。

● 可靠性指标：差错率

① 误码率： $P_e = \text{错误接收码元数} / \text{传输总码元数}$  (1-12)

即码元在传输过程中被传错的概率。误码率越低，数字通信系统的可靠性越高。

② 误信率(误比特率)： $P_b = \text{错误接收比特数} / \text{传输总比特数}$  (1-13)

即码元在传输过程中，其信息量丢失的概率。

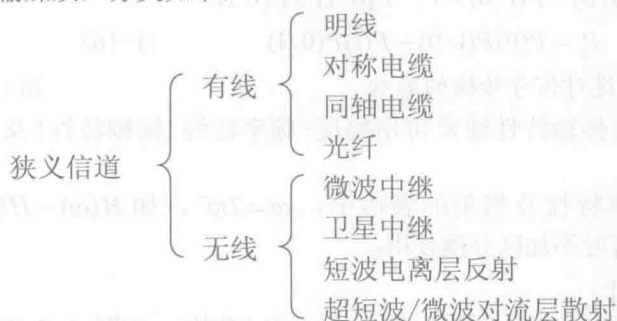
③ 两者关系：二进制时， $P_b = P_e$ ； $M$ 进制时， $P_b < P_e$ 。

## 6. 信道

信道：信号传输的通道。它可以是有形的(有线信道)，也可以是无形的(自由空间或无线信道)。有狭义信道和广义信道之分。

### (1) 狭义信道

狭义信道是指信号的传输媒质，分类如下：



### (2) 广义信道

定义：除了传输媒质外，还包括有关转换设备，如发送设备、接收设备、馈线与天线、调制器、解调器等。

应用：常用于通信系统性能分析。

分类：调制信道和编码信道，如图 1-4 所示。

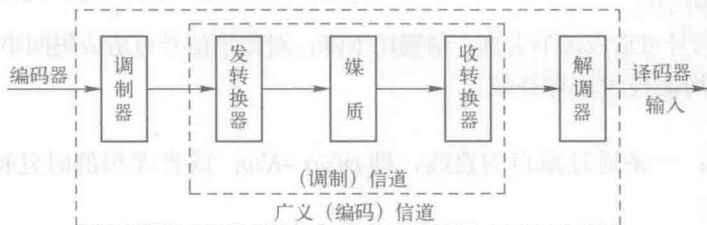


图 1-4 调制信道和编码信道

### ① 调制信道

它用来研究调制与解调问题，其范围从调制器输出端至解调器输入端。

最基本的调制信道有一对输入端和一对输出端(见图 1-5)，其输入端电压  $e_i(t)$  和输出端电压  $e_o(t)$  间的关系可以表示为：

$$e_o(t) = f[e_i(t)] + n(t) \quad (1-14)$$

式中， $n(t)$  为加性噪声电压。

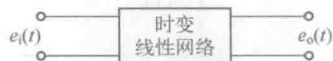


图 1-5 调制信道模型

通常假设  $f[e_i(t)] = k(t)e_i(t)$ ，则

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad (1-15)$$

式中， $k(t)$ 为乘性干扰。

根据  $k(t)$ 的性质，调制信道又可分为：恒参信道和随参信道。

恒参信道：信道的传输参数(特性) $k(t)$ 恒定或变化缓慢——时不变；

随参信道：信道的传输参数(特性) $k(t)$ 随时间不断变化——时变。

在式(1-15)的两种干扰中，乘性干扰会引起信号的畸变，影响较大，需采用专门的技术克服或减小。一般而言，对于恒参信道，常采用均衡技术；对于随参信道，则需采用分集技术。本书今后在分析通信系统抗噪性能时，只考虑加性噪声。

## ② 编码信道

它用来研究编码与译码问题，其范围从编码器输出端至解码器输入端。

编码信道模型特点：为数字信道，有二进制或多进制；编码信道模型用转移概率描述。二进制无记忆编码信道模型如图 1-6 所示。其中， $P(0/0)$ ， $P(1/1)$ 为正确转移概率； $P(0/1)$ ， $P(1/0)$ 为错误转移概率。

且有  $P(0/0) + P(1/0) = 1$ ， $P(0/1) + P(1/1) = 1$

$$\text{误码率} \quad P_e = P(0)P(1/0) + P(1)P(0/1) \quad (1-16)$$

## (3) 恒参信道对信号传输的影响

恒参信道的传输特性通常可用幅度-频率特性(幅频特性)及相位-频率特性(相频特性)来表征。

在讨论频率特性及相关的表达中， $\omega = 2\pi f$ ，如  $H(\omega) = H(2\pi f)$ 。本书后续内容中， $H(\omega)$ ， $H(f)$ 有时不加区分地使用。

### ① 幅频特性

理想幅频特性：水平直线，即  $|H(\omega)| = K_0$ (常数)，如图 1-7 所示。其含义是指信号的不同频率成分经过信道传输后具有相同的衰减。

实际幅频特性：产生幅频失真。即  $|H(\omega)| \neq K$ ，信号中不同频率的分量分别受到信道不同的衰减。

成因：由信道中可能存在的各种滤波器、混合线圈、串联电容、分路电感等元件造成信道的幅频特性不理想所引起。

影响：对模拟信号可造成波形失真，信噪比下降；对数字信号可造成码间串扰，误码率上升。

克服：多采用均衡技术进行补偿。

### ② 相频特性

理想相频特性：一条通过原点的直线，即  $\varphi(\omega) = K\omega$ ；或者理想群时延特性  $\tau(\omega)$ 为水平直线，如图 1-8 所示。

$$\tau(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = K$$

含义：信号的不同频率成分经过信道传输后具有相同的时延。

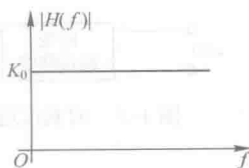


图 1-7 理想信道幅频特性

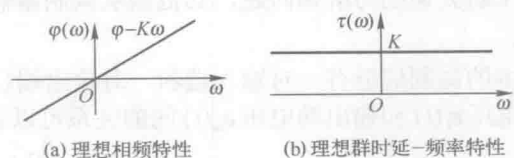


图 1-8 理想相频特性及群时延特性

实际相频特性： $\tau(\omega) \neq K$  表示信号中不同频率的分量分别受到信道不同的时延。

成因及克服：同幅频特性。

影响：对模拟话音信号影响不大，对模拟视频信号影响大；对数字信号可造成码间串扰，误码率上升。

#### (4) 随参信道对信号传输的影响

随参信道具有三个特点：信号的传输衰减随时间而变化；传输时延随时间而变化；多径传播。

所谓多径传播，是指由发射点发出的信号经过多条路径到达接收端。由于每条路径的长度（时延）和衰减都随时间而变，所以接收信号将是衰减和时延随时间变化的各路径信号的合成。

设发射信号为  $A \cos \omega_0 t$ ，它经过  $n$  条路径传播到接收端，则接收信号  $R(t)$  可表示为

$$R(t) = V(t) \cos[\omega_0 t + \varphi(t)] \quad (1-17)$$

式中， $V(t)$  是  $R(t)$  的随机包络； $\varphi(t)$  是  $R(t)$  的随机相位。 $V(t)$  服从瑞利分布， $\varphi(t)$  服从均匀分布。因此  $R(t)$  可视为一个包络和相位随机缓慢变化的平稳高斯窄带信号。

结论：

① 瑞利型衰落：从波形上看，确知等幅波变成了包络缓慢起伏的随机调幅波（衰落信号）。

② 频率弥散（频率扩展）：从频谱上看，单根线谱变成了窄带频谱。

③ 频率选择性衰落（快衰落）：例如，两径传播时，系统的幅频特性  $|H(\omega)| \propto 2 \left| \cos \frac{\omega\tau}{2} \right|$ ，如

图 1-9 所示。

由图 1-9 可知：当  $\omega = 2n\pi/\tau$ ，或者  $f = n/\tau$  ( $n$  为整数) 时，出现传输极点；当  $\omega = (2n+1)\pi/\tau$ ，或者  $f = (2n+1)/2\tau$  时，出现传输零点。

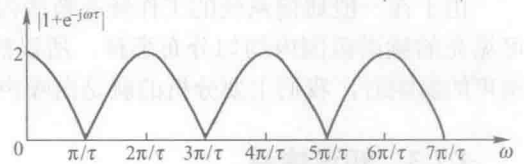


图 1-9 两径传播网络的幅频特性

因此，若传输信号的带宽  $B > 1/\tau$ ，将产生强烈的频率选择性衰落。为避免之，应要求  $B < 1/\tau$ 。

多径传播时，结论与两径传播时相仿，但需考虑最大时延差  $\tau_{\max}$ 。定义相邻传输零点或极点的频率间隔  $\Delta f = 1/\tau_{\max}$  为多径传播媒质的相关带宽。

如果传输信号的带宽大于  $\Delta f$ ，则该信号将产生明显的频率选择性衰落。为了不引起选择性衰落，传输信号的频带必须小于多径传播媒质的相关带宽  $\Delta f$ 。

因此数字传输时，为减小码间干扰的影响，通常要限制数字信号的传输速率。

#### (5) 连续信道的信道容量

信道容量是信道的极限传输能力。定义为信道无差错传输时的最大平均信息速率，记作  $C$ 。

香农公式：对于带宽受限、平均功率受限的高斯白噪声连续信道，其信道容量为

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \text{ bit/s} \quad (1-18)$$

式中， $B$  为信道带宽 (Hz)； $S$  为信号功率 (W)； $n_0$  为噪声单边功率谱密度 (W/Hz)； $N = n_0 B$ ，为噪声功率 (W)。

结论：①  $C$  受“三要素”  $B$ 、 $S$ 、 $n_0$  的限制；

②  $C$  随着  $S/N$  的增大而增大；

③ 若  $n_0 \rightarrow 0$ ，则  $C \rightarrow \infty$ ，说明无扰信道的信道容量为无穷大；

④ 若  $S \rightarrow \infty$ ，则  $C \rightarrow \infty$ ，说明当信号功率不受限时，信道容量为无穷大；

⑤  $C$  随着  $B$  的适当增大而增大，但不能无限增大，即

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1-19)$$

- ⑥  $C$  一定时,  $B$  与  $S/N$  可以互换;  
 ⑦ 若信息传输速率  $R_b \leq C$ , 则理论上可实现无差错传输。

### 7. 信道中的加性噪声

加性噪声: 以相加的方式对信号进行干扰的噪声。

#### (1) 按来源分类

人为噪声: 由人类的活动产生的噪声, 如其他电台信号干扰、电火花、开关通断噪声等。

自然噪声: 自然界存在的各种电磁波源, 如闪电、大气噪声等。

内部噪声: 系统设备内部产生的各种噪声, 如热噪声、散弹噪声等。

#### (2) 按性质分类

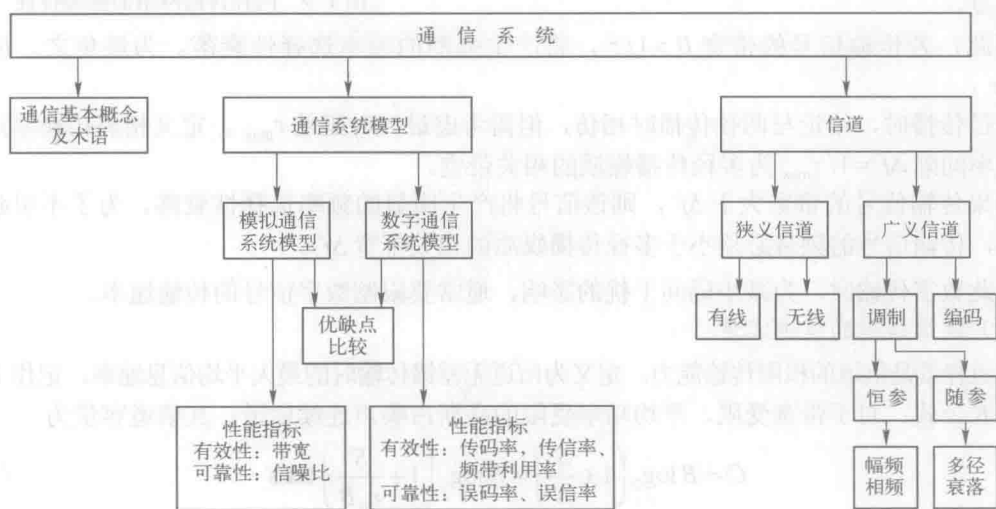
窄带噪声: 占有频率很窄的连续波噪声, 可以测量、防止, 如其他电台信号等;

脉冲噪声: 突发性地产生的幅度很大、持续时间很短、间隔时间很长的干扰, 如闪电、电火花等。其特点是, 突发性、持续时间短、出现频率低、所占频谱较宽, 但随频率升高能量降低。

起伏噪声: 以热噪声、散粒噪声和宇宙噪声为代表的噪声。其特点是, 无论在时域还是频域内它们都是普遍存在和不可避免的, 是影响通信质量的主要因素之一, 是研究噪声的主要对象。

由于在一般通信系统的工作频率范围内热噪声的频谱是均匀分布的, 就好像白光的频谱在可见光的频谱范围内均匀分布那样, 所以热噪声常被称为“白噪声”。在讨论通信系统性能受噪声的影响时, 我们主要分析的就是白噪声的影响。

### 1.1.3 知识体系



### 1.1.4 重要公式

- 某离散消息  $x$  所含的信息量:  $I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x)$
- 离散信源的熵:  $H(X) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i)$  比特/符号
- 频带利用率:  $\eta_B = \frac{R_B}{B}$  Bd/Hz, 或  $\eta_b = \frac{R_b}{B}$  b/(s·Hz)

- 码元传输速率与信息传输速率间的关系:  $R_b = R_B \log_2 M$  ( $M$  为进制)
- 误码率:  $P_c = \text{错误接收码元数} / \text{传输总码元数}$
- 信道容量:  $C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{n_0 B} \right)$  bit/s

## 1.2 解题指导

### 1.2.1 基础理论

#### 1. 填空题

- (1) 四元信源的四个符号出现的概率分别为  $1/2, 1/4, 1/8, 1/8$ , 信源熵为\_\_\_\_\_。理论上, 四元信源的最大熵为\_\_\_\_\_。(1.75 比特/符号, 2 比特/符号)
- (2) 通信系统一般模型的五个组成部分是\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_。(信源、发送设备、信道、接收设备、信宿)
- (3) 出现概率越\_\_\_\_\_的消息, 其所含信息量越大。(小)
- (4) 已知八进制数字信号的传输速率为 1600 波特, 若信息速率保持不变, 转换成二进制数字信号的传输速率为\_\_\_\_\_波特。(4800)
- (5) 某离散信源输出二进制符号, 在\_\_\_\_\_条件下, 每个二进制符号携带 1 比特信息量; 在\_\_\_\_\_条件下, 每个二进制符号携带的信息量小于 1 比特。(等概, 不等概)
- (6) 调制信道分为\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_, 短波电离层反射信道属于\_\_\_\_\_信道。(恒参信道, 随参信道, 随参)
- (7) 信源编码的目的是\_\_\_\_\_信息冗余度, 提高传输\_\_\_\_\_性; 信道编码的目的是\_\_\_\_\_信息冗余度, 提高传输\_\_\_\_\_性。(降低, 有效, 增加, 可靠)

#### 2. 简答题

- (1) 什么是通信系统的误码率和误信率? 两者是否相等?  
答: 误码率是指码元在传输系统中被传错的概率。误信率是指码元携带的信息在传输系统中被丢失的概率。对二进制码元传输系统, 两者在数值上相等。多进制时, 误码率和误信率在数值上不等。
- (2) 衰落产生的原因是什么?  
答: 多径传播随参信道的时变特性。信号经过随参信道多径传播后的接收信号将是衰减和时延都随时间变化的各路径信号的合成, 因而产生衰落。

### 1.2.2 例题精解

【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,  $P(0)=P(1)=1/2$ , 故其信息量为

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



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

或者用式(1-5)计算, 即  $H = \log_2 M = \log_2 2 = 1 \text{ bit/符号}$ 。

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

$$I_0 = \log_2 \frac{1}{P(0)} = \log_2 3 = 1.584 \text{ bit} \quad I_1 = \log_2 \frac{1}{P(1)} = \log_2 3/2 = 0.585 \text{ bit}$$

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

**【例 1-2】** 已知某四进制离散信源(A, B, C, D)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 BAACADAABBCBA...消息的信息量。其中 A 出现 38 次, B 出现 25 次, C 出现 24 次, D 出现 13 次, 共有 100 个符号。

解: (1)  $H(x) = -\sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i)$

$$= -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \text{ bit/符号}$$

(2) 如果用信息量相加性概念计算, 这条消息的总信息量为

$$I = 38I_A + 25I_B + 24I_C + 13I_D$$
$$= 38 \log_2 8/3 + 25 \log_2 4 + 24 \log_2 4 + 13 \log_2 8 = 190.7 \text{ bit}$$

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

若用熵的概念来计算, 则这条消息的总信息量为

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

分析: 求一条消息(由  $m$  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。

**【例 1-3】** 设 A 系统以 2000 bit/s 的速率传输 2PSK 调制信号, 占用 2000 Hz 带宽, B 系统以 2000 bit/s 的速率传输 4PSK 调制信号, 占用 1000 Hz 带宽。试问, 哪个系统有效性更好?

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, 衡量数字通信系统有效性的真正指标是频带利用率:

A 系统:  $\eta_b = R_b / B = 2000 / 2000 = 1 \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)}$

B 系统:  $\eta_b = R_b / B = 2000 / 1000 = 2 \text{ bit/(s} \cdot \text{Hz)}$

因此, B 系统的有效性更好。

**【例 1-4】** 设某数字通信系统传输二进制码元的速率为 1200 B, 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是多少?

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

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

分析:  $R_B$  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 1-5】** 设某四进制数字传输系统的每个码元持续时间(宽度)为  $833 \times 10^{-6} \text{ s}$ , 连续工作 1 小时后, 接收端收到 6 个错码, 且错误码元中仅发生 1bit 的错误。求: (1) 该系统的码元速率和信息速率; (2) 该系统的误码率和误信率。