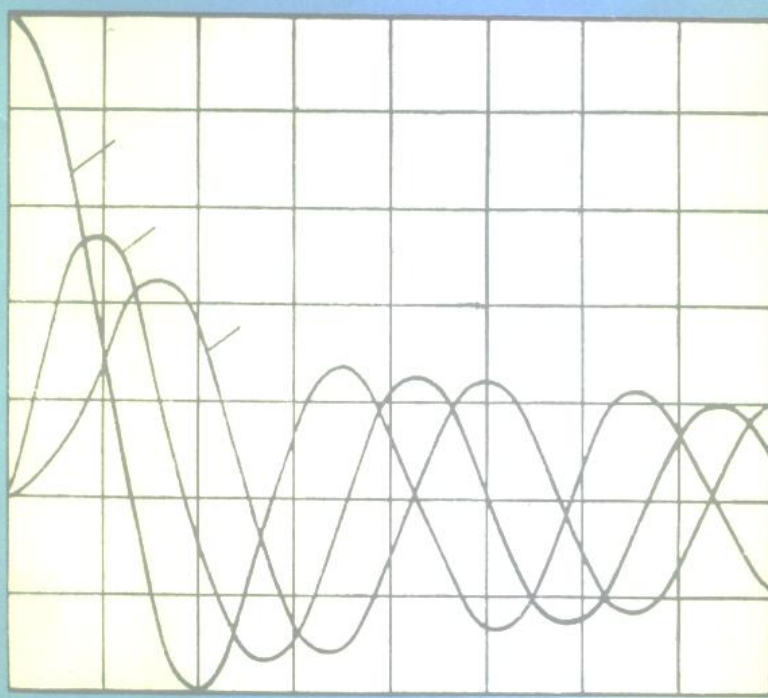


# 通信原理

王慕坤 刘文贵 编著



哈尔滨工业大学出版社

911  
31  
2)

TN911

W31

(2)

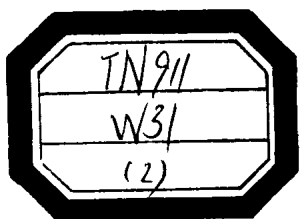
433762

# 通 信 原 理

王慕坤 刘文贵 编著



00433762



哈尔滨工业大学出版社

## 内 容 简 介

本书着重介绍通信系统中的基本理论,包括信息传输引论、模拟信号的调制与解调、信道复用、数字信号和传输方式、同步技术和差错控制等

本书作为通信工程专业及其它有关专业本科生的教材,也可供从事通信科研和工程工作的技术人员参考。

DV46/24

## 通 信 原 理

Tongxin Yuanli

王慕坤 刘文贵 编著

\*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

东北林业大学印刷厂印刷

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17.375 字数 401 千字

1995 年 10 月第 2 版 1998 年 3 月第 3 次印刷

印数 8 001—13 000

ISBN 7-5603-0533-4/TN·30 定价: 15.00 元

# 前 言

近年来, 由于大规模集成电路及计算机的迅速发展普及, 导致了数字通信、计算机通信、移动通信与空间通信的实际应用。计算机和通信的紧密结合, 可以构成灵活多样的通信系统, 这将对社会的发展产生深刻的影响。各种新的通信系统的出现与发展, 不仅迫使工程技术人员在实践的基础上研究统一的理论, 用以指导科研, 而且也应在大学本科通信工程专业的教材上进行改革。本着这样的思路, 结合多年的教学、科研实践, 编写这本《通信原理》。这本教材的特点是力求具有理论性、系统性和一定的方向性。本书重点介绍各种通信系统的基本原理和传输性能, 在内容上兼顾模拟通信和数字通信。

全书共分六章。第一章扼要介绍了通信系统的基本模型, 信息论中有关信息传输的基础知识, 信号分析方法及有关噪声问题。第二章的内容是连续波调制系统。具体地说, 介绍了调幅、调频、脉冲调制的数学描述及频谱特性; 并对调幅和调频信号的产生与解调方法做了介绍; 对连续波调制系统中噪声的影响进行了数学分析。第三章主要介绍群频信道和射频信道的复用问题。对信道复用的理论基础做了探讨, 并对 FDM、TDM、CDM、FDMA、TDMA、CDMA 系统的构成方法通过方框图进行了说明。信道中非线性对系统的影响进行了一定的分析。第四章介绍数字基带传输系统与数字频带系统。研究了码间串扰及均衡问题。推导出传输噪声、量化噪声对 PCM 系统的影响。对二元信号的最佳接收给出匹配滤波器接收的时域与频域特性, 并推导出与相关接收的等价关系。第五章讨论了同步技术对通信系统的可靠性起到的重要作用, 并对载波同步、位同步和群同步的实现方法做了介绍。第六章主要研究差错控制、纠错编码的基本概念, 常用纠错码、线性分组码的数学结构及实现方案, 并对各种检错码和纠错码的性能评价进行了理论分析。

本书的第一、二、三章由王慕坤编写; 第四、五、六章由刘文贵编写。

本书由哈尔滨工业大学周延显教授主审并提出宝贵意见。在编写过程中哈尔滨工业大学通信工程教研室许多同志给予了大力支持, 并提出宝贵意见, 在此表示感谢。

限于作者的水平, 书中一定会有许多错误或不足之处, 欢迎批评指正。

作 者

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第一章 信息传输引论 .....      | (1)  |
| 1.1 通信系统模型 .....      | (1)  |
| 1.1.1 通信系统基本模型 .....  | (1)  |
| 1.1.2 对通信的基本要求 .....  | (3)  |
| 1.2 信息的度量 .....       | (3)  |
| 1.2.1 消息的信息量 .....    | (3)  |
| 1.2.2 平均信息量 .....     | (5)  |
| 1.2.3 信息速率 .....      | (6)  |
| 1.3 信道及其容量 .....      | (6)  |
| 1.3.1 信道的基本参量 .....   | (6)  |
| 1.3.2 信道的容量 .....     | (8)  |
| 1.4 调制定理 .....        | (10) |
| 1.5 取样定理 .....        | (11) |
| 1.5.1 傅里叶级数的一般式 ..... | (12) |
| 1.5.2 取样定理的证明 .....   | (13) |
| 1.5.3 带通型信号的取样 .....  | (15) |
| 1.6 信号通过线性四端网络 .....  | (16) |
| 1.6.1 时间响应 .....      | (16) |
| 1.6.2 频率响应 .....      | (17) |
| 1.6.3 无失真传输 .....     | (20) |
| 1.7 相关 .....          | (21) |
| 1.7.1 互相关 .....       | (21) |
| 1.7.2 自相关 .....       | (22) |
| 1.8 希尔伯特变换 .....      | (23) |
| 1.8.1 一般描述 .....      | (23) |
| 1.8.2 希尔伯特变换性质 .....  | (24) |
| 1.9 解析信号 .....        | (25) |
| 1.10 带通信号 .....       | (26) |
| 1.11 带通系统 .....       | (28) |
| 1.12 噪声 .....         | (36) |

|            |                            |              |
|------------|----------------------------|--------------|
| 1.12.1     | 随机过程的基本概念                  | (36)         |
| 1.12.2     | 噪声                         | (41)         |
| 1.12.3     | 窄带高斯噪声                     | (45)         |
| 1.13       | 小结                         | (47)         |
| <b>第二章</b> | <b>模拟信息的传输方式</b>           | <b>(49)</b>  |
| 2.1        | 通信质量的评定                    | (49)         |
| 2.1.1      | 输出信噪比                      | (49)         |
| 2.1.2      | 载噪比                        | (49)         |
| 2.1.3      | 优值                         | (50)         |
| 2.2        | 调幅信号                       | (50)         |
| 2.2.1      | 调幅波(AM)                    | (50)         |
| 2.2.2      | 双边带抑制载波调幅信号(DSBSC 或 AM-SC) | (54)         |
| 2.2.3      | 单边带调幅信号(SSB)               | (61)         |
| 2.2.4      | 余迹边带调幅信号(VSB)              | (67)         |
| 2.3        | 调频信号                       | (72)         |
| 2.3.1      | 角调波的定义                     | (72)         |
| 2.3.2      | 单音调频                       | (74)         |
| 2.3.3      | 窄带调频                       | (74)         |
| 2.3.4      | 宽带调频                       | (75)         |
| 2.3.5      | 多音调频                       | (79)         |
| 2.3.6      | 调频波的传输带宽                   | (80)         |
| 2.3.7      | FM 波的产生方法                  | (81)         |
| 2.3.8      | FM 波的解调方法                  | (84)         |
| 2.3.9      | FM 系统中的噪声                  | (87)         |
| 2.3.10     | FM 的门限效应                   | (92)         |
| 2.3.11     | FM 中的预加重和去加重               | (95)         |
| 2.3.12     | 连续调制系统的噪声性能和带宽的比较          | (97)         |
| 2.4        | 脉冲调制                       | (99)         |
| 2.4.1      | 脉幅调制(PAM)                  | (99)         |
| 2.4.2      | 脉时调制                       | (102)        |
| 2.5        | 模拟信息的加密措施                  | (107)        |
| 2.5.1      | 频谱扰乱的加密方式                  | (108)        |
| 2.5.2      | 时间扰乱的加密方式                  | (108)        |
| 2.6        | 小结                         | (111)        |
| <b>第三章</b> | <b>信道的复用</b>               | <b>(115)</b> |
| 3.1        | 复用的理论基础                    | (116)        |
| 3.2        | 群频信道的复用                    | (120)        |
| 3.2.1      | 频分多路                       | (120)        |

|            |                             |              |
|------------|-----------------------------|--------------|
| 3.2.2      | 时分多路 .....                  | (123)        |
| 3.2.3      | 码分多路 .....                  | (125)        |
| 3.3        | 射频信道的复用 .....               | (129)        |
| 3.3.1      | 频分多址 .....                  | (129)        |
| 3.3.2      | 时分多址 .....                  | (135)        |
| 3.3.3      | 码分多址 .....                  | (136)        |
| 3.4        | 小结 .....                    | (140)        |
| <b>第四章</b> | <b>数字信息的传输方式 .....</b>      | <b>(141)</b> |
| 4.1        | 脉冲编码调制 .....                | (141)        |
| 4.1.1      | 取样 .....                    | (141)        |
| 4.1.2      | 量化 .....                    | (141)        |
| 4.1.3      | 编码 .....                    | (147)        |
| 4.1.4      | 再生 .....                    | (152)        |
| 4.1.5      | 解码 .....                    | (153)        |
| 4.1.6      | 滤波 .....                    | (154)        |
| 4.2        | 基带传输系统 .....                | (154)        |
| 4.2.1      | 基带信号的码形 .....               | (154)        |
| 4.2.2      | 带宽、码元脉冲波形和符号间干扰 .....       | (155)        |
| 4.2.3      | 均衡技术 .....                  | (159)        |
| 4.2.4      | 眼图 .....                    | (167)        |
| 4.3        | PCM 系统中的噪声 .....            | (168)        |
| 4.3.1      | 传输噪声和差错概率 .....             | (168)        |
| 4.3.2      | 量化噪声 .....                  | (171)        |
| 4.4        | PCM 系统的信息容量 .....           | (174)        |
| 4.5        | 差分脉码调制(DPCM)和增量调制(DM) ..... | (176)        |
| 4.6        | 最佳接收问题 .....                | (181)        |
| 4.6.1      | 最佳接收的描述 .....               | (181)        |
| 4.6.2      | 最大输出信扰比 .....               | (181)        |
| 4.6.3      | 最小差错概率 .....                | (183)        |
| 4.6.4      | 匹配滤波器的主要性质 .....            | (188)        |
| 4.6.5      | 匹配滤波器设计中的近似 .....           | (191)        |
| 4.7        | 载波数字系统 .....                | (194)        |
| 4.7.1      | 数字调制 .....                  | (195)        |
| 4.7.2      | 数字解调 .....                  | (204)        |
| 4.8        | 小结 .....                    | (222)        |
| 习题         | .....                       | (226)        |
| <b>第五章</b> | <b>同步技术 .....</b>           | <b>(227)</b> |
| 5.1        | 载波同步 .....                  | (227)        |

|            |                     |              |
|------------|---------------------|--------------|
| 5.1.1      | 非线性变换——滤波法 .....    | (227)        |
| 5.1.2      | Costas 环 .....      | (229)        |
| 5.2        | 位同步 .....           | (229)        |
| 5.2.1      | 滤波法 .....           | (229)        |
| 5.2.2      | 模拟锁相法 .....         | (230)        |
| 5.2.3      | 数字锁相环法 .....        | (230)        |
| 5.3        | 群同步 .....           | (232)        |
| 5.3.1      | 起止式同步法 .....        | (232)        |
| 5.3.2      | 集中插入法 .....         | (233)        |
| 5.3.3      | 群同步系统的性能 .....      | (236)        |
| 5.4        | 小结 .....            | (242)        |
|            | 习题 .....            | (242)        |
| <b>第六章</b> | <b>差错控制 .....</b>   | <b>(243)</b> |
| 6.1        | 概述 .....            | (243)        |
| 6.1.1      | 差错控制方式的分类 .....     | (243)        |
| 6.1.2      | 差错的分类 .....         | (244)        |
| 6.1.3      | 常用检错码 .....         | (245)        |
| 6.1.4      | 码的距离 .....          | (246)        |
| 6.2        | 线性分组码 .....         | (247)        |
| 6.2.1      | 线性分组码的基本概念 .....    | (247)        |
| 6.2.2      | 译码原理 .....          | (250)        |
| 6.2.3      | 汉明码 .....           | (253)        |
| 6.3        | 循环码 .....           | (254)        |
| 6.3.1      | 循环码的基本概念 .....      | (254)        |
| 6.3.2      | 实际的循环码 .....        | (257)        |
| 6.3.3      | 多项式除法电路 .....       | (258)        |
| 6.3.4      | 纠一个错误的编码器 .....     | (260)        |
| 6.3.5      | 纠一个错误的译码器 .....     | (261)        |
| 6.4        | 卷积码 .....           | (263)        |
| 6.4.1      | 卷积码的基本概念 .....      | (263)        |
| 6.4.2      | 卷积码的监督矩阵和生成矩阵 ..... | (263)        |
| 6.5        | 检错重传 .....          | (266)        |
| 6.5.1      | 发送等候方式 .....        | (267)        |
| 6.5.2      | 退 N 方式 .....        | (267)        |
| 6.5.3      | 选择性重传方式 .....       | (268)        |
| 6.6        | 小结 .....            | (268)        |
|            | 习题 .....            | (269)        |
|            | <b>参考文献 .....</b>   | <b>(269)</b> |

# 第一章 信息传输引论

## 1.1 通信系统模型

### 1.1.1 通信系统基本模型

在人类社会中，人与人之间要经常互通情报，交换消息，从一般意义上讲这就是通信。因此，简单地说，通信就是互通信息。传递信息就是通信的根本目的。

不管所传输信息的特征如何，也不管实际传输的方法是怎样的，我们总可以用图 1-1 所示的模型来描述通信系统。图中表示一个通信系统所必须具备的基本功能块。

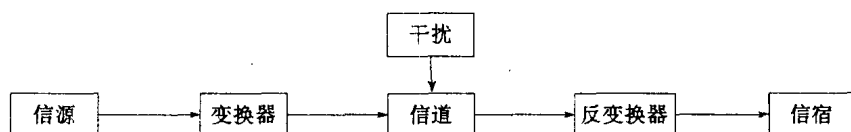


图1-1 通信系统的一般模型

通信系统的任务是从一地点向另一地点传送消息，传送端为信源，而接收端称为用户或信宿。

在通常情况下，为了使信息在信道中有效地传输，往往在发端要对信息进行必要的加工或处理，统称为变换。在接收端为了还原信息，相应地要进行反变换。最简单的情况，如人与人面对面的讲话，这是一种直接通信方式，不需要任何变换与反变换过程，但通信距离甚短。人们早已大量使用了电报、电话、传真、电视等方式来实现通信，克服了时间和空间的限制，它们都属间接通信方式。这种通信方式信息需要进行适当的变换和反变换，并借助电信号来实现信息的传输，这就是近代通信方式，通常称为电信。这种情况下，信源和信宿可以是人，也可以是机器（如计算机等）。

信息的变换和反变换包括多样的终端处理设备，相应完成能量变换、编码与译码、调制和解调等功能。在近代通信中，要传输的信息形式是多种多样的，如：文字、语言、图片、图象以及各种数据等。通信方式几乎大都采用电信方式，即用电信号传输信息。这就需要采用能量变换装置将非电量的信息变成电信号，然后利用电信号的传输实现通信。完成能量变换的装置通常称为换能器。例如：电话通信中的话筒、耳机或喇叭就是完成声电变换的换能器。变换前后两种能量形式变化状况要相互完全对应，也就是不失真变换。把由声能或光能形式变换成的电振荡（电能）统称为电信号，或简称为信号。这种信号充分代表了原始信息。因此在分析信源时，可以不去分析真正的原始信源，而只分析和研究由它变换过来的信号就可以了。

模数变换是数字或数据通信中特有的变换形式。它是对电信号实行的一种变换。由换能器得到的信号是对原始信号的逼真的摹写，因此常称为模拟信号。传输模拟信号的通信系统通常称为模拟通信系统。这种模拟信号在任意时刻的取值是连续的，且是时间的连续函数。在数字通信中，信号只能取有限个离散值，而且出现的时间也是离散的。但是模拟信号和数字信号是可以互相转换的。例如，数字电话通信中，就是把模拟话音变成数字信号后进行传送，在接收端再把数字信号还原成模拟信号。这两种变换过程，就称为模数变换和数模变换。

编码也是一种变换过程，通常是用来对数字信号进行处理。

电信系统的编码主要有两种目的：一种为了改善信息的传输效率；一种为了提高信息传输的可靠性。前者称为有效性编码，主要针对信源特性进行处理，所以有时也称为信源编码。后者称为可靠性编码或抗干扰编码，它主要是针对信道特性进行处理，所以有时也称为信道编码。译码则是对应编码的反过程。

信号的调制也是一种变换过程。调制的目的可以归结如下几点：

- (1) 使信号特性与信道特性相匹配；
- (2) 减少噪声和干扰的影响；
- (3) 信道的复用；
- (4) 克服某些设备上的限制等等。

例如，当用微波信道传送信号时，就需要把信号的频谱搬移到指定的微波频段上。这种信号频谱搬移的过程，就是调制。模拟信号的调制方式通常有：调幅（AM）、单边带调制（SSB）、调频（FM）、调相（PM）。数字信号的调制方式通常有：幅度键控（ASK）、频移键控（FSK）、相移键控（PSK），以及一些新的数字调制方式，如参差正交相移键控（SQPSK），最小频移键控（MSK）等。

解调则是对应调制的反过程。

在近代通信中，信道就是电信号传输的通道和媒介。可以按不同的分类方法对信道进行分类：

#### 1. 按传输媒介划分

(1) 有线信道：这种信道是利用导体来传输电信号。常用的有线信道有架空明线、电缆、波导等，光纤通信中的光导纤维也是有线信道。

(2) 无线信道：这种信道是利用电磁波的传播来传输电信号。根据电磁波的传播特点，常用的无线信道可分为：短波电离层反射信道，微波接力信道，卫星中继信道，微波对流层散射信道等。

#### 2. 按信道特性划分

(1) 恒参信道：这种信道，其特性不随时间变化。常见的恒参信道有：有线信道，微波接力信道，卫星中继信道等。

(2) 变参信道：这种信道，其特性随时间变化。有时也称时变信道。常见的变参信道有：短波电离层反射信道，微波对流层散射信道等。

#### 3. 按信道传送信号的形式划分

(1) 离散信道：传送离散信号的信道称为离散信道。

(2) 连续信道：传送模拟信号的信道称为连续信道。

不论哪一种信息，在信息传输过程中总是伴随着干扰和噪声。干扰和噪声可以发生在变换和反变换过程中，也可以发生在信道传输过程中。干扰是多种多样的，来自多方面。属自然的，如雷电、宇宙线等；属人工的，如大功率电气开关火花、邻近电台的电磁辐射等；属于系统本身的，如电阻器的热噪声和有源器件的散粒噪声等。为了分析方便，通常把干扰和噪声都用等效的信道干扰来表示。

以上，对图 1-1 中的每个部分作了简要的介绍。图 1-2 所示的通信基本模型，则是图 1-1 一般模型的具体化数字通信系统的基本模型。

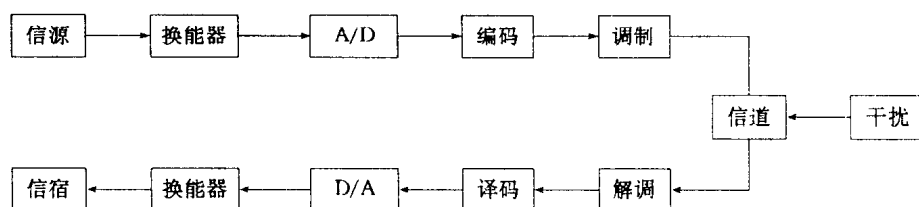


图1-2 数字通信系统的基本模型

### 1.1.2 对通信的基本要求

通信的基本目的就是传输信息。因此，人们对通信提出两个基本要求，一方面要求通信系统传输信息的速率愈大愈好，也就是要求单位时间内传输的信息量愈大愈好，即提高通信的效率，这就是通信的有效性问题。另一方面，要求信号在传输过程中由于受到干扰和噪声的影响所产生的畸变和错误愈小愈好，也就是要求通信系统有抗干扰的能力，以保证正确无误地传输信息，即通信的可靠性问题。

通信的有效性和可靠性，两者之间是矛盾的，又是统一的。人们总是希望在满足可靠性的基础上尽量提高通信的效率。而信息论的研究成果表明，在一定条件下通信系统能以任意小的差错率实现最大的传信率，这就使通信的有效性和可靠性得到了理论上的统一。

我们经常会看到，通信中可靠性与有效性是一对基本矛盾，两者不可兼得。如何正确处理两者之间的关系，以及如何在更高的水平上不断地把两者统一起来，这正是通信技术所面临的重要课题。

## 1.2 信息的度量

### 1.2.1 消息的信息量

信息的传输、交换和处理组成了现代通信系统。信息表现的形式可以是语言、文字、图象、计算机数据等。信息源可分为模拟和离散两大类。模拟信息源输出波形是时间的连续函数。例如对着话筒讲话或演奏音乐时，话筒输出的电压波形，就可以认为是一个连续信源的输出。离散信息源的输出是由有限个字母组成的符号序列，例如，电传打字

机的输出序列就可以认为是一个离散信息源的输出。根据通信系统的要求,还可以采用取样和分层技术,把模拟信号转变为离散数字信号。

离散信源输出的符号序列,组成了信息源所有可能的消息。通信的目的就是在接收端尽可能地复现信源发出的每一个消息。

信息源发出的每一个消息所包含的信息是不相等的,有的消息携带信息多,有的消息包含信息少,有的甚至几乎没有什么信息。那么,每个消息携带信息的多少,各个消息之间信息多少的比较,是如何来衡量呢?为了回答这些问题,先举个实际例子。

假设居住在北方的某甲,计划在冬天到昆明去度假,为了了解当地的天气,打电话到昆明气象局询问。他可能收到如下三种预报之一:

①温和晴朗;②天冷;③可能有小雪。从这三种预报来看,第一条消息所包含的信息最少。因为昆明的天气大部分时间是温和晴朗的。第二条消息携带的信息比第一条消息多。第三条消息所包含的信息最多。因为昆明很少下雪,下雪会使人感到意外。从这个简单例子可以看出,消息所含信息的多少与事件发生的可能性有关系。事件发生的可能性愈大,消息携带信息愈少;事件发生的可能性愈小,消息携带信息愈多。因此,消息所含信息量依赖于潜在事件的不确定性,而不是组成消息的符号数。

下面运用概率的工程定义来建立信息的概念。

假设在一个通信系统中,信息源可能发生出的消息为  $m_1, m_2, \dots, m_n$  每个消息出现的概率分别为  $P_1, P_2, \dots, P_n$ , 当然  $P_1 + P_2 + \dots + P_n = 1$ 。根据上面的实例可以知道,通信系统发端选送具有概率  $P_K$  的  $m_K$  的消息时,如果收端能准确地识别此消息,通信系统传输的信息量为  $I(m_K)$ 。它与消息  $m_K$  所出现的概率  $P_K$  有互逆关系,当  $P_K$  趋于 1 时,  $I(m_K)$  趋向零。即所传送的消息是必然事件,这时就不携带任何信息量。因为通信系统所传送的消息包含一定的信息,所以信息量  $I(m_K)$  是一个非负的值。概括上面这些概念,信息  $I(m_K)$  可以归纳为以下三点:

$$1. \text{ 当 } P_K < P_J \text{ 时, } I(m_K) > I(m_J) \quad (1-1)$$

$$2. \text{ 当 } P_K \rightarrow 1 \text{ 时, } I(m_K) \rightarrow 0 \quad (1-2)$$

$$3. \text{ 当 } 0 \leq P_K \leq 1 \text{ 时, } I(m_K) \geq 0 \quad (1-3)$$

如果通信系统发端传送两个统计独立的消息  $m_K$  和  $m_J$ ,在接收端准确识别时,传送的总信息是这两个消息携带的信息量之和。即

$$I(m_K, m_J) = I(m_K) + I(m_J) \quad (1-4)$$

现在要寻找一种数学公式,能够满足 (1-1) ~ (1-4) 关系式,那么这个函数是对数函数。所以信息定义为:

$$I(m_K) = \log\left(\frac{1}{P_K}\right) = -\log P_K \quad (1-5)$$

在式 (1-5) 中对数的底是任意的,它确定了不同的度量信息的单位。1928 年哈特莱 (R. V. Hartley) 首先运用以 10 为底的对数作为信息量度,信息量的单位叫哈特莱。当运用以  $e$  为底的对数作为信息量度时,对应的单位是奈特 (nat)。目前普遍应用以 2 为底的对数,与此相应的信息量单位称为比特 (bit)。

在数字通信系统中,信源发出的符号由 0 和 1 符号组成,如果发 0 和 1 符号的概率

相等,那么信源发出 0 符号和 1 符号的信息量  $I(m_0) = I(m_1) = -\log_2(1/2) = 1\text{bit}$ 。在下面的讨论中,除了特别指出外,我们都用以 2 为底的对数作为信息度量的单位。

### 1.2.2 平均信息量

信源随机选送  $S_i$  符号,接收端准确识别后就收到  $I(S_i)$  信息。在设计通信系统中,是要知道信源发出多少信息量,信道传送多少量,而不是某个特定消息的信息量,因此有必要讨论平均信息量。

设离散信息源有  $M$  个符号  $S_1, S_2, \dots, S_M$ , 它们组成的输出序列前后符号之间相互统计独立,即某个符号出现的概率完全不受前面出现什么符号的影响。 $P_1, P_2, \dots, P_M$  分别为  $M$  个符号出现的概率。现在来分析信源发出一串  $N$  个 ( $N > M$ ) 符号组成的消息。其中,符号  $S_1$  发生  $P_1 N$  次,符号  $S_2$  发生  $P_2 N$  次,符号  $S_i$  发生  $P_i N$  次。我们可以把一个符号认为是一个消息,第  $i$  个符号的信息量是  $\log_2(1/P_i)$  (bit)。〔由于在  $N$  个符号序列中,  $S_i$  发生  $P_i N$  次,因此  $P_i N$  个  $S_i$  符号的信息量为  $P_i N \log_2(1/P_i)$  (bit)。〕信源发出  $N$  个符号的总信息量就是每个符号信息量之和,可以表示为

$$I_t = \sum_{i=1}^M N P_i \log_2 \frac{1}{P_i} \text{ (bit)}$$

则平均信息量为

$$H = \frac{I_t}{N} = \sum_{i=1}^M P_i \log_2 \frac{1}{P_i} \text{ (bit/符号)} \quad (1-6)$$

平均信息量表达式 (1-6) 与热力学和统计力学中关于系统熵的公式相同。因此,我们也把信源输出的平均信息量称为信源的熵。

**例 1** 信源有三个符号  $A, B, C$ , 符号间相互统计独立,其概率分别为  $1/2, 1/4, 1/4$ , 求信源的熵。

**解** 给定  $S_1 = A, S_2 = B, S_3 = C, P_1 = 1/2, P_2 = P_3 = 1/4$

$$I(S_1) = \log_2 \frac{1}{P_1} = \log_2(2) = 1 \text{ (bit)}$$

$$I(S_2) = \log_2 \frac{1}{P_2} = \log_2(4) = 2 \text{ (bit)}$$

$$I(S_3) = \log_2 \frac{1}{P_3} = \log_2(4) = 2 \text{ (bit)}$$

信源熵 (或平均信息量)

$$\begin{aligned} H &= P_1 \log_2 \frac{1}{P_1} + P_2 \log_2 \frac{1}{P_2} + P_3 \log_2 \frac{1}{P_3} \\ &= \frac{1}{2} (1) + \frac{1}{4} (2) + \frac{1}{4} (2) \\ &= 1.5 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

从式 (1-6) 可以看出,信源熵仅与符号的概率分布有关,它是概率分布的函数。那么,什么样的概率分布,信源熵达到最大呢?我们以产生二进数信源为例加以说明。

设信源发出 0 和 1 符号,其概率分别为  $P$  和  $1-P$  ( $0 < P < 1$ ),按式 (1-6),信源熵为

$$H = P \log_2 \frac{1}{P} + (1-P) \log_2 \frac{1}{1-P}$$

$$= -P \log_2 P - (1-P) \log_2 (1-P)$$

此函数如图 1-3 所示。

从表达式  $dH/dP=0$ , 求得  $P=1/2$  时, 信源熵达到最大,  $H_{\max}=1$  (bit/符号)。并且可以看出, 最大熵出现在两个概率都等于  $1/2$  的地方。

如果信源有  $M$  个符号, 它们的概率都相等, 即

$$P_1 = P_2 = \dots = P_M = \frac{1}{M}$$

信源熵为最大, 即

$$H_{\max} = \log_2 M \text{ (bit/符号)} \quad (1-7)$$

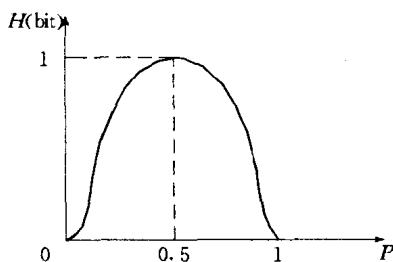


图1-3 二元信源的熵

### 1.2.3 信息速率

一个离散信息源的平均信息量可以用式 (1-6)

来计算, 它的单位为比特/符号。如果信源输出符号的速率用  $r_s$  (符号/秒) 表示, 则信源输出信息的速率可以表示为

$$R = r_s \cdot H = -r_s \sum_{i=1}^M P_i \log_2 P_i \text{ (b/s)} \quad (1-8)$$

**例 2** 离散信源输出 5 个不同符号, 符号速率  $r_s$  为每毫秒输出一个符号, 符号概率分别为  $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/16$ , 求信源熵和信息速率。

$$\begin{aligned} \text{解 } H &= \sum_{i=1}^5 P_i \log_2 \frac{1}{P_i} \\ &= \frac{1}{2} \log_2(2) + \frac{1}{4} \log_2(4) + \frac{1}{8} \log_2(8) + \frac{2}{16} \log_2(16) \\ &= 0.5 + 0.5 + 0.375 + 0.5 = 1.875 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

信息速率为

$$R = r_s \cdot H = (1000) \cdot (1.875) = 1875 \text{ (b/s)}$$

## 1.3 信道及其容量

信源输出的信息总是要通过信道传送给接收端的受信者, 因此, 我们需要量度信道传输信息的能力。所谓信道容量就是单位时间内该信道所能传输的最大信息量 (比特数)。显然, 如果实际传输的信息量小于信道容量, 就会使信道出现空闲, 造成浪费, 使信道的有效性变坏; 反之, 如果实际传输的信息量大于信道容量, 就会使信道溢出, 造成信息失真或丢失, 使通信的可靠性变坏。可见, 信道容量是信道一个重要指标。以下, 我们从参量和容量两个方面对信道加以叙述。

### 1.3.1 信道的基本参量

#### 一、模拟信道的三个基本参量

所谓模拟信道，就是指传输模拟信号的信道。它的三个基本参量是：

#### 1. 带宽 ( $F$ )

在无线电通信中，它的带宽主要由收、发信机的带宽和收发天线的带宽决定；在有线信道中，主要由导体的结构和线路放大器以及其它传输网络的带宽决定。

#### 2. 可用时间 ( $T$ )

指设备可用时间的长短。一般与通信设备的故障率有关。在短波信道中，还与电离层的状态密切相关。

#### 3. 最大容许功率范围 ( $H$ )

从实际出发，可分为平均功率和峰值功率两种。峰值功率超过容限会导致电信设备的电击穿，平均功率超过容限会导致电信设备过热而烧毁。

此外，这个指标与干扰还有密切关系，为了保证通信的可靠性，必须保证一定的信噪比（即信号功率与干扰功率的比值）。所以，一般来说，干扰大时必须  $H$  也大。反之，当干扰小时， $H$  可以小些。卫星通信，由于受卫星有效载荷的限制，通常  $H$  值比较小。故必须千方百计地降低干扰功率，以保证所需要的信噪比。

### 二、数字信道的基本参量

所谓数字信道，就是指传输数字信号的信道。它的三个基本参量是：

#### 1. 符号率

它相当于模拟信道的带宽。由于数字信道与模拟信道不同，所以参量的名称也不相同。

符号率，指该信道在每秒钟内能够传送最大符号数目。单位是波特 (baud) 要特别注意，这里的符号（即脉冲波形）可以是二元制的，也可以是四元制的、八元制的…。所以，波特数一般是不等于比特数的（二元制符号除外）。

#### 2. 差错率

它表示由于干扰的作用符号被传错的程度，是衡量传输质量的重要指标之一。具体可分为：

##### (1) 码元差错率

指在传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例（平均值）简称误码率。当统计的码元数很大时，它与理论上的码元差错概率很接近，故用同一符号  $p_e$  表示。

##### (2) 比特差错率

指在传输的比特总数中发生差错的比特数所占的比例（平均值）。当统计的比特数很大时，它与理论上的比特差错概率很接近，故用同一符号  $p_{eb}$  表示。 $p_{eb}=10^{-4}$ ，意味着平均每传送 10000bit，要发生 1bit 的差错。在二元制传输中，码元差错率即是比特差错率。而在多元制传输中，通过一定的转换运算，可由码元差错率求得比特差错率。

##### (3) 码组差错率

指在传输的码组总数中发生差错的码组数所占的比例（平均值）。码组差错率与比特差错率也存在一定的关系。

数据传输的使用者最关心的是比特差错率，对比特差错率的具体要求，决定于不同的应用场合。当传输人的书信（即电报）时，允许的比特差错率约为  $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，而传

输计算机数据时,一般要求比特差错率小于  $10^{-3} \sim 10^{-9}$ 。

为了使差错率满足使用要求,在数据传输系统的各个部分需要采取一系列的措施。这些将在以后的章节进行讨论。

### 3. 可靠性

可靠性是衡量传输系统质量的一个重要指标。传输系统的可靠性常用可靠度与中断率来衡量。

(1) 可靠度:指在全部工作时间内系统正常工作时间所占的百分数,记作  $P_r$ 。

(2) 中断率:指在全部工作时间内传输中断时间所占的百分数,记作  $\epsilon$ ,显然  $\epsilon = 1 - P_r$ 。

传输中断的原因可能是设备发生故障,也可能是传输媒质发生了问题。因此,应该明确区分设备可靠性与传输媒质可靠性,并把总的可靠性指标在两者之间作合理的分配。

顺便指出,可靠性也是数据网设计中要考虑的主要问题。网络结构应保证在网络的个别节点或个别链路发生故障时,仍能通过其它链路维持全网正常通信。

## 1.3.2 信道的容量

### 一、数字信道的容量

一般来说,信道容量与信道参量有着密切的关系。例如:差错率很大时,势必使每秒钟内传输的信息量下降,因而使信道容量变小了。

数字信道的情况比较复杂,我们只分析一个典型例子(等概、对称的二元信道),以见一般。

等概的含义指被传输的二元制符号序列(代表消息的随机序列)中,“0”符号和“1”符号出现的概率相等,各为50%。对称意指在传输过程中,“0”错成“1”与“1”错成“0”的概率相等,皆为  $P_e$ 。二元信道指被传输的信号是二元制符号序列。每传输一个符号就等于传送一比特的信息量。这种假定可以使分析简化,而且基本上是符合实际情况的。信息的模型如图1-4所示。

理论证明了在这种信道中,每传送一个符号所含有的信息量如下式:

$$I = 1 - P_e \log_2 \frac{1}{P_e} - (1 - P_e) \log_2 \frac{1}{(1 - P_e)} \text{ (bit)} \quad (1-9)$$

根据信道容量的定义,式(1-9)再乘上信道每秒钟内能够传输的最大符号数目就等于信道容量  $C$ 。

理论分析证明,如果信道的带宽为  $F$ ,那么它能够传输的最大符号率为每秒  $2F$  个符号。因此,等概、对称的二元信道容量为

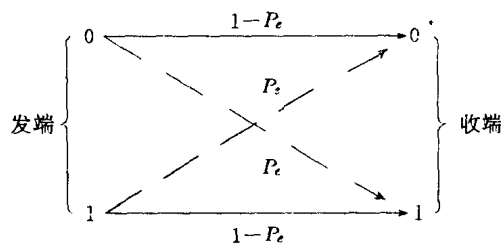


图1-4 等概、对称的二元信道模型

$$C = 2F \cdot \left[ 1 - P_e \log_2 \frac{1}{P_e} - (1 - P_e) \log_2 \frac{1}{1 - P_e} \right] \text{ (bit)} \quad (1-10)$$

从式(1-10)确实看到,信道容量  $C$  与信道参量(符号率和差错率)直接有关。

信息论中的编码定理指出：只要实际传输的信息比特率小于信道容量，并且编码足够长，就可几乎做到无差错地传输。

例如：上述的特定信道中，令  $P_s=0.1$  时，算出其信道容量  $C=2F \times 0.53$ 。即传送一个二元制符号只有 0.53bit 的信息量。那么，就可用两个符号（码组）去表示 1bit 的信息量。这样传输的比特率就下降了。就是说，可靠性的提高是用有效性的下降来换取的。以后，我们经常会看到，通信中可靠性与有效性是一对基本矛盾，两者不可兼得。

## 二、模拟信道的容量

前面已讲过，若模拟信道的带宽为  $F$ ，则它每秒内最多能传送  $2F$  个彼此独立的互不干扰的符号。对模拟信道来说，这  $2F$  个符号可以看作是  $2F$  个彼此独立的样值。一般来说，这些样值的取值是连续的（PAM 信号），所以具有无穷多个可能的取值。按公式 (1-5) 每个样值具有信息量  $I=\infty$ 。就是说，模拟信道的容量是无穷大。但是，这只能在无噪声干扰的条件下才能成立。理论分析证明，在白噪声干扰下的模拟信道中，每个独立样值所含有的最大信息量为

$$\frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N} \right) \quad (\text{bit}) \quad (1-11)$$

其中， $P$  是模拟信号的功率； $N$  是白噪声功率； $P/N$  是功率信噪比。

根据信道容量的定义，带宽为  $F$  的模拟信道的容量为

$$\begin{aligned} C &= 2F \cdot \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N} \right) \\ &= F \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P}{N} \right) \quad (\text{b/s}) \end{aligned} \quad (1-12)$$

这就是通信理论中著名的山农公式，也叫山农-哈特莱（Shannon-Hartley）公式。

上式是一个十分重要的公式，它在通信系统设计中两个重要意义。其一，式 (1-12) 给出了高斯白噪声信道上可靠传输速率的上限。显然，在设计实际通信系统中不可能达到这个速率。但是它给设计者一个界限，让设计者在设计过程中尽量接近上式。因而，能达到式 (1-12) 速率传送信息的系统是一种理想通信系统。其二，式 (1-12) 给出了信噪比与信道带宽的关系。例如，已知带宽  $F=3000\text{Hz}$ ，要求信道传输速率为  $10000\text{b/s}$  的数据，这时信噪比可以从式 (1-12) 解出为

$$\frac{P}{N} = 2^{3.333} - 1 \doteq 9$$

如果带宽  $F=10000\text{Hz}$ ，则  $P/N=1$ ，这就说明了带宽  $F$  从  $3000\text{Hz}$  增加到  $10000\text{Hz}$ ，信噪比从 9 减少到 1 仍能保持原来的传输速率。由此可得出：当  $C$  一定时，在  $F$  和  $P/N$  之间存在着互换关系。当信道带宽  $F$  增大时，信噪比  $P/N$  可以减小；当信道带宽  $F$  减小时，信噪比  $P/N$  必须增大。这对通信系统的设计有重大的指导作用。例如：在卫星通信系统中，信号功率  $P$  受到限制，要保证获得一定的信道容量  $C$ ，可以采用增大信道带宽  $F$  来解决。

我们知道噪声功率随着信道带宽  $F$  增大而增大，如果白噪声的双边功率谱密度为  $N_0/2$ ，则噪声平均功率  $N=N_0F$ 。另外，从式 (1-12) 可见，信道容量  $C$  随着带宽  $F$  增大而达到一个极限。如果固定信号平均功率为  $P$ ，可以导出这个极限。有