

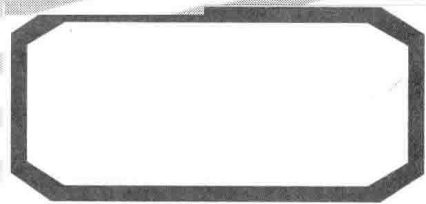
# 通信原理 (第2版)

TONGXIN YUANLI

张晓林 宁晓燕 周凯★主编



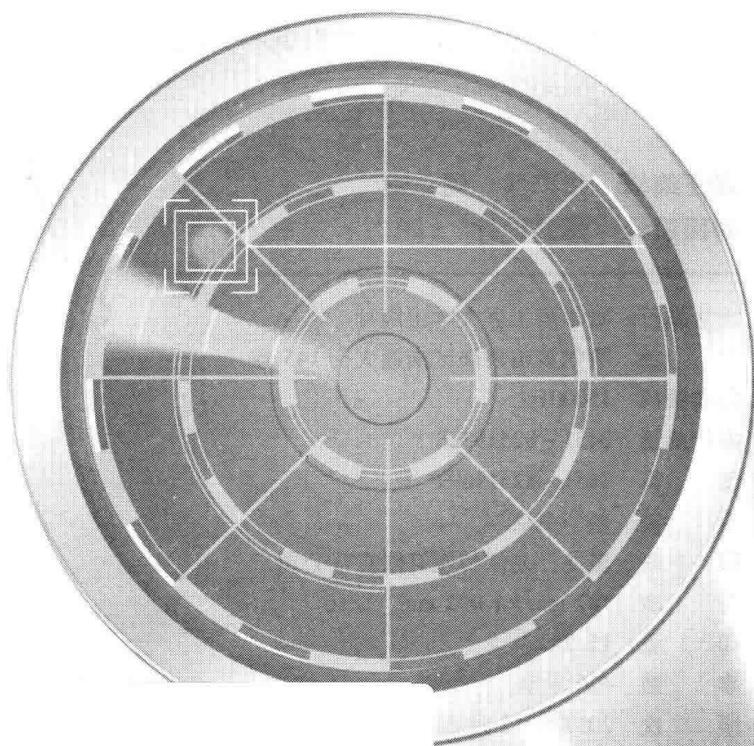
HEUP 哈尔滨工程大学出版社



# 通信原理 (第2版)

TONGXIN YUANLI

张晓林 宁晓燕 周 凯 ★ 主编



 哈尔滨工程大学出版社

## 内 容 简 介

本书以现代通信系统为背景,全面、深入地介绍通信系统的一般模型和通信技术的基本原理。本书内容简练,理论联系实际,侧重数字通信。

全书共分8章,内容包括绪论、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字调制系统、模拟信号的数字传输、同步原理和数字信号的最佳接收等。每章附有小结,并配有习题。

本书可作为高等院校工科通信工程、电子信息工程等专业的本科与专科教材,也可供从事通信工程业务的科技工作者参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

通信原理/张晓林,宁晓燕,周凯主编.—2版.—哈尔滨:  
哈尔滨工程大学出版社,2017.12  
ISBN 978-7-5661-1754-0

I. ①通… II. ①张… ②宁… ③周… III. ①通信原  
理 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第300996号

责任编辑 张忠远 周一瞳

封面设计 博鑫设计

---

出版发行 哈尔滨工程大学出版社  
社 址 哈尔滨市南岗区南通大街145号  
邮政编码 150001  
发行电话 0451-82519328  
传 真 0451-82519699  
经 销 新华书店  
印 刷 黑龙江龙江传媒有限责任公司  
开 本 787 mm×1 092 mm 1/16  
印 张 15.25  
字 数 426千字  
版 次 2017年12月第2版  
印 次 2017年12月第1次印刷  
定 价 38.00元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

---

# 前 言

本书是根据通信专业教学大纲编写的教材,主要介绍现代模拟通信与数字通信的基本原理,以数字通信为主。

本教材以当前广泛应用的通信系统和代表发展趋势的通信新技术为背景,在介绍传统技术基本原理的基础上,努力反映通信技术的最新发展。本书既总结了作者长期从事通信专业本科生与研究生的教学实践,又吸收、借鉴了国内多所大学的通信专业教材,还参考了国外的有关文献,力求条理清楚,深入浅出,循序渐进,理论联系实际。

由于已开设了“随机信号分析”“信息论”“编码技术”等课程,因此,有关这些方面的内容在本书中不再重复或仅做简要介绍。

本教材由绪论、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字调制系统、模拟信号的数字传输、同步原理、数字信号的最佳接收等8章组成。其中,张晓林编写第2章、第4章和第6章,宁晓燕编写第1章、第7章和第8章,周凯编写第3章和第5章。

由于作者水平所限,书中难免有不妥之处,欢迎读者批评指正。

编 者  
2017年7月

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 通信系统的组成 .....	1
1.3 通信系统的分类与通信方式 .....	3
1.4 信息及其度量 .....	5
1.5 主要性能指标 .....	6
本章小结 .....	7
习题 .....	8
第2章 信道 .....	9
2.1 信道的定义及分类 .....	9
2.2 信道数学模型 .....	10
2.3 恒参信道举例 .....	12
2.4 恒参信道特性及其对信号传输的影响 .....	15
2.5 随参信道举例 .....	17
2.6 随参信道特性及其对信号传输的影响 .....	19
2.7 随参信道特性的改善——分集接收 .....	24
2.8 信道的加性噪声 .....	26
本章小结 .....	30
习题 .....	30
第3章 模拟调制系统 .....	32
3.1 幅度调制的原理及抗噪声性能 .....	32
3.2 频分多路复用及线性调制应用举例 .....	45
3.3 非线性调制原理 .....	51
3.4 调频系统的抗噪声性能 .....	52
3.5 采用预加重/去加重技术改善信噪比 .....	57
本章小结 .....	59
习题 .....	60
第4章 数字基带传输系统 .....	63
4.1 数字基带信号的码型 .....	63
4.2 数字基带信号的频谱特性 .....	68
4.3 数字基带传输中的码间干扰 .....	73

4.4	无码间干扰的基带传输特性	75
4.5	部分响应基带传输系统	80
4.6	无码间干扰的基带系统的抗噪声性能	86
4.7	眼图	89
4.8	均衡	91
	本章小结	94
	习题	94
<b>第5章</b>	<b>数字调制系统</b>	<b>99</b>
5.1	二进制数字调制原理	99
5.2	二进制数字调制系统的抗噪声性能	110
5.3	二进制数字调制系统的性能比较	120
5.4	多进制数字调制系统	122
5.5	改进的数字调制方式	135
	本章小结	138
	习题	139
<b>第6章</b>	<b>模拟信号的数字传输</b>	<b>141</b>
6.1	抽样定理	141
6.2	脉冲振幅调制(PAM)	144
6.3	模拟信号的量化	147
6.4	脉冲编码调制(PCM)	156
6.5	增量调制	168
6.6	PCM和 $\Delta M$ 的性能比较	173
6.7	增量(差分)脉冲编码调制(DPCM)系统	174
6.8	时分复用PCM系统	176
	本章小结	181
	习题	181
<b>第7章</b>	<b>同步原理</b>	<b>184</b>
7.1	引言	184
7.2	载波同步的方法	184
7.3	载波同步系统的性能	190
7.4	载波相位误差对解调性能的影响	192
7.5	位同步方法	193
7.6	位同步系统的性能及其相位误差对性能的影响	199
7.7	群同步	201
	本章小结	209
	习题	209

第 8 章 数字信号的最佳接收 .....	211
8.1 最佳接收的一般概念 .....	211
8.2 二元假设检验和各种判决准则 .....	211
8.3 二进制确知信号的最佳接收 .....	215
8.4 实际接收机与最佳接收机的性能比较 .....	221
8.5 匹配滤波器 .....	222
本章小结 .....	229
习题 .....	229
附录 Q 函数和误差函数 .....	232
参考文献 .....	235



# 第1章 绪 论

## 1.1 引 言

通信的目的是传递消息,而消息的表达形式有语言、文字、图像、数据等。在当今信息化社会,通信是十分重要的。

实现通信的方式很多。目前使用最广泛的方式是电通信方式,即用电信号携带所要传递的消息,然后经过各种电信道进行传输,达到通信的目的。本书研究、讨论的都是电通信的范畴,因此,将电信号简称为信号。

## 1.2 通信系统的组成

### 1.2.1 通信系统模型

最基本的通信系统是点对点通信,其模型如图 1-1 所示。

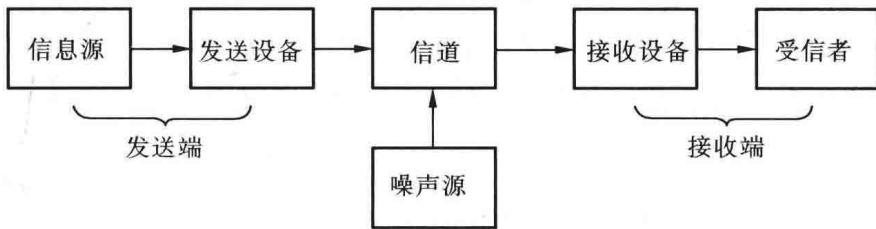


图 1-1 通信系统模型

图 1-1 中,信息源的作用是把需要传输的消息转换为原始电信号,例如通电话时,话筒就可将语言转换为话音信号。为了使这个原始信号适合在信道中传输,发送设备对原始信号完成某种变换,然后再送入信道。在接收端,接收设备的功能与发送设备的相反,它能从接收信号中恢复出相应的原始信息,例如,电话中的听筒将电信号转换成声音信号。图 1-1 中的噪声源是信道中的噪声以及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表现。

上述模型概括地反映了通信系统的共性,根据我们的研究对象和所关心的问题,将会在这个模型的基础上做适当的变动。本课程的主要内容都是围绕通信系统模型展开的。

### 1.2.2 模拟通信与数字通信系统模型

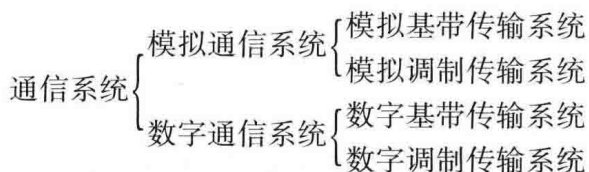
通常,通信系统中传输的消息可分为两类:一类称作连续消息(模拟消息),另一类称作离散消息(数字消息)。连续消息的消息状态是连续的,如连续变化的语音、图像等;而离散消息的状态是离散取值的,如文字、符号、数据等。与此对应,通信系统也分为两类:模拟通



信系统和数字通信系统。这种分类方法一般是以信道传输信号的差异为标准的,而不是根据信息源输出信号划分的,并不十分准确。

模拟信号和数字信号通常都要通过调制形成模拟调制信号和数字调制信号,以适应信道的传输特性。

综合以上情况,通信系统可分为



### 1. 模拟通信系统模型

如图 1 - 2 所示为模拟通信系统模型。

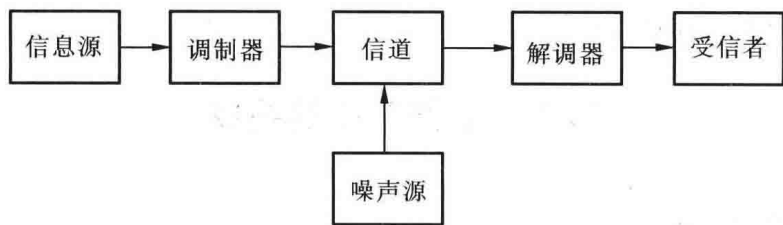


图 1 - 2 模拟通信系统模型

首先,发端的连续消息要变换成原始电信号(基带信号),通常这个信号很微弱且频率低,难以传送得很远,所以需要进行某种变换(调制),将基带信号转换成适合信道传输的信号,这个过程也叫作“频谱搬移”,然后,经过信道传输,在接收端须进行与发端相反的变换(解调),还原成基带信号。

### 2. 数字通信系统的模型

如图 1 - 3 所示为数字通信系统的模型。

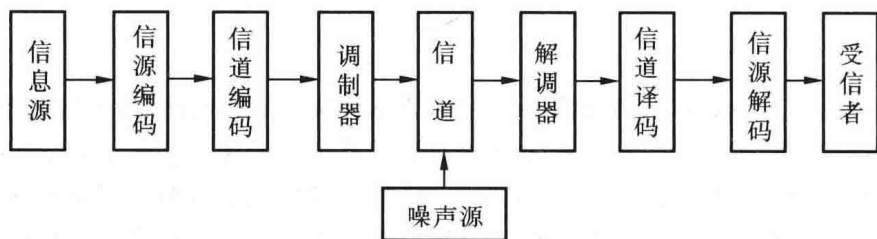


图 1 - 3 数字通信系统模型

信源编码是对模拟信号进行编码,得到相应的数字信号。信道编码是对数字信号再次编码,使之具有检错或纠错的能力(一般来说,高质量的数字通信系统要有信道编码部分)。调制器、信道、解调器的作用与模拟通信系统的类似。信道译码、信源译码具有与发端信源编码、信道编码相反的功能。这里需要注意的是,数字通信系统中有同步的问题。关于同步问题,将在以后的章节中介绍。

## 1.3 通信系统的分类与通信方式

### 1.3.1 通信系统的分类

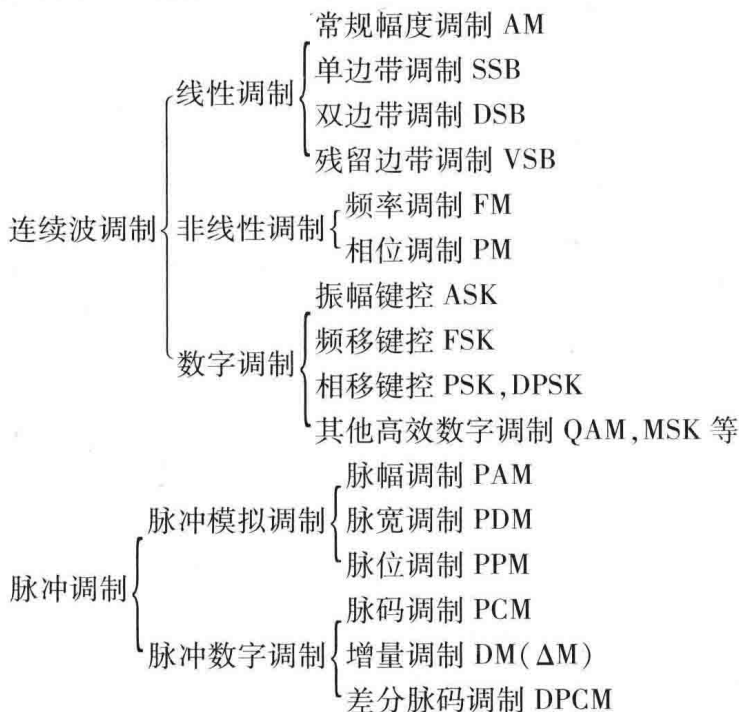
通信系统有不同的分类方法。

#### 1. 按消息的物理特征分类

根据消息的物理特征不同,通信系统可以分为电报、电话、数据、图像等通信系统。但随着信息与网络技术的发展,以上各种信息都可以在统一的综合业务通信网中传送。

#### 2. 按调制方式分类

如果通信系统采用了调制,则可以根据不同的调制方式进行如下分类。



#### 3. 按信号特征分类

前面已提到,按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

#### 4. 按传输媒介分类

根据传输媒介,通信系统可分为有线和无线两类。

#### 5. 按信号复用方式分类

传输多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用和码分复用。通信系统也可以按此分类。

### 1.3.2 通信方式

通信方式一般有点对点之间的通信,如常用的电话;点对面的通信,如广播、电视;网络中用户间的通信,如计算机网、电话交换网络。在本书中,主要讨论点对点之间的通信,因为这是其他通信方式的基础。

点对点之间的通信又可分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式,如广播、遥控等,如图1-4(a)所示;半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收发,只能分时工作,如使用同一载频工作的无线电对讲机,如图1-4(b)所示;全双工通信是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式,如普通电话,如图1-4(c)所示。

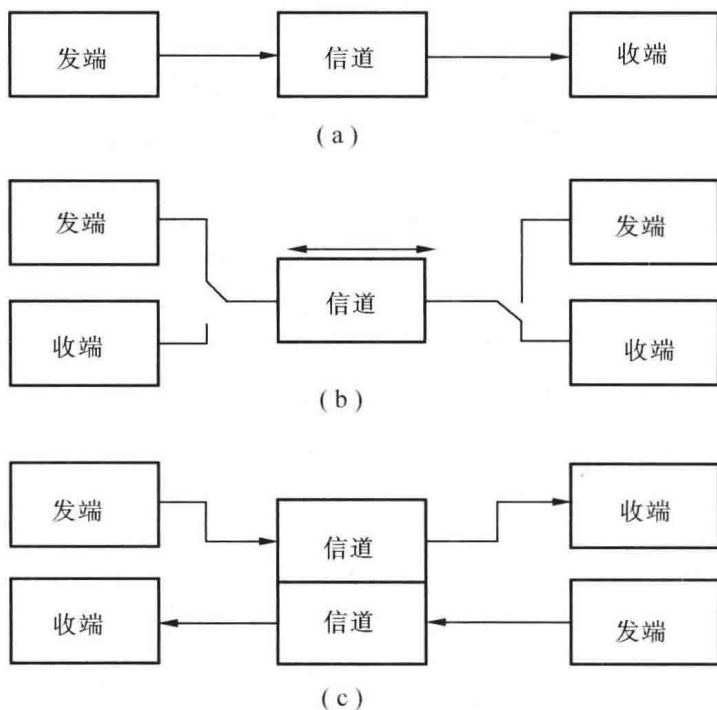


图1-4 通信方式示意图

(a) 单工通信方式;(b) 半双工通信方式;(c) 全双工通信方式

另外,在数字通信中,按照数字信号排列的顺序,有串行传输与并行传输之分。

串行传输是将数字信号码元序列按时间顺序一个一个地在信道中传输,如图1-5(a)所示;并行传输是将数字信号码元序列分割成两路或两路以上的数字信号码元序列同时在信道中传输,如图1-5(b)所示。

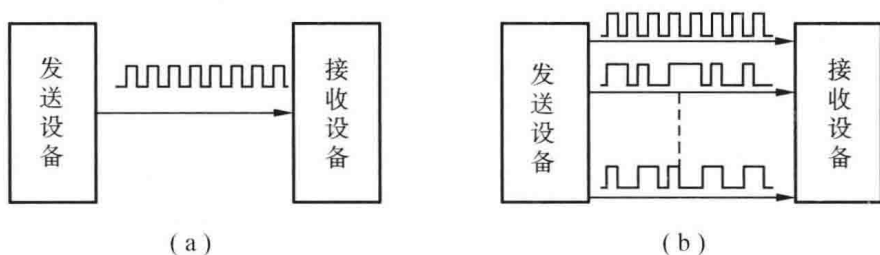


图1-5 串行和并行传输

(a) 串行传输;(b) 并行传输

## 1.4 信息及其度量

信息在概念上与消息的意义相似,但它的含义更抽象化。信息也可以理解为消息中包含的有意义的内容,而信息量是评价传输信息多少的一种度量。

从概率论的观点来看,事件的不确定程度可用其出现的概率描述,即事件出现的可能性越小,则概率就越小,反之,则概率就越大。从信息论的观点来看,消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关。消息出现的概率越小,则消息中包含的信息量就越大,反之亦然。如果事件是必然的(概率为1),则它传递的信息量应为0;如果事件是不可能的(概率为0),则它有无穷的信息量。

设消息中所含的信息量为 $I$ ,消息出现的概率为 $P(x)$ ,则它们之间的关系可表示为

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

其中,对数底 $a$ 可决定信息量的单位。若 $a=2$ ,则 $I$ 的单位为比特(b);若 $a=e$ ,则单位为奈特(nit);若 $a=10$ ,则 $I$ 的单位为十进制单位。

如果事件 $x$ 不是由一个事件构成而是由若干个独立事件构成的消息,那么,这时我们得到的总信息量就是若干个独立事件的信息量的总和。

先讨论等概率出现的离散消息的度量。

如果需要传递的离散消息是在 $M$ 个消息之中独立地选择其一,并且认为每一消息出现的概率都是相同的,那么,为了传递一个消息,只需采用一个 $M$ 进制的波形(符号)即可。也就是说,传递 $M$ 个消息之一这样一个事件与传送 $M$ 进制波形(符号)之一是完全等价的。考虑最简单的情况: $M=2$ (即二进制,这也是数字通信中最常用的),且两种状态出现的概率相等(等概率),即 $P(x) = \frac{1}{2}$ ,则信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \quad (\text{b})$$

再考虑 $M > 2$ 的情况,即 $M$ 个状态等概率出现, $P(x) = \frac{1}{M}$ ,则信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \quad (\text{b})$$

如果 $M$ 是2的幂次,即 $M = 2^k, k = 1, 2, 3, \dots$ ,则

$$I = \log_2 M = \log_2 2^k = k \quad (\text{b})$$

下面再讨论非等概率情况下的离散消息的度量。

设离散消息源是一个由 $n$ 个符号组成的集合(符号集),符号集中的每一个符号 $x_i$ 在消息中是按一定概率 $P(x_i)$ 独立出现的,又设符号集中各符号出现的概率为

$$\left( \begin{array}{cccc} x_1, & x_2, & \cdots, & x_n \\ P(x_1), & P(x_2), & \cdots, & P(x_n) \end{array} \right)$$

并且有 $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$ ,则 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别是 $-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$ ,那么每个符号所包含信息量的统计平均值为

$$\begin{aligned}
 H &= P(x_1)(-\log_2 P(x_1)) + P(x_2)(-\log_2 P(x_2)) + \cdots + P(x_n)(-\log_2 P(x_n)) \\
 &= -\sum_{i=1}^n P(x_i)\log_2 P(x_i) \quad (\text{比特/符号}) \quad (1-2)
 \end{aligned}$$

**【例 1-1】** 一个信息源由 4 种符号 0,1,2,3 组成,它们出现的概率分别是  $3/8, 1/4, 1/4, 1/8$ ,且每个符号的出现都是独立的。在一段时间内,信息源发出 57 个符号,其中,0 出现 23 次,1 出现 14 次,2 出现 13 次,3 出现 7 次,试求这段消息的信息量。

**解** 由式(1-1)可以分别求出这 57 个符号中 0 代表的信息量为  $23\log_2 \frac{8}{3} = 33 \text{ b}$ ,1 代表的信息量为  $14\log_2 4 = 28 \text{ b}$ ,2 代表的信息量为  $13\log_2 4 = 26 \text{ b}$ ,3 代表的信息量为  $7\log_2 8 = 21 \text{ b}$ 。因此,该消息的信息量为

$$I = 33 + 28 + 26 + 21 = 108 \quad (\text{b})$$

平均每个符号的信息量为

$$\bar{I} = I / \text{符号数} = 108 / 57 = 1.89 \quad (\text{比特/符号})$$

由式(1-2)也可以求得此消息中每个符号的信息量为

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

以上两个结果略有差别的原因在于它们平均处理的方法不同:前一种是算术平均的方法,而后一种是统计平均的方法。算术平均的方法便于工程计算,其误差可随消息中符号数的增加而减小。

## 1.5 主要性能指标

评价通信系统性能的指标有很多,包括有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及可维护性等。但是从研究信息的传输来说,最重要的指标是两个,即通信的有效性和可靠性:有效性是指传输一定的信息量所占用的信道资源(带宽或时间);可靠性是指接收信息的准确程度。

有效性和可靠性这两个要求通常是矛盾的,因此,只能根据实际要求和科技发展水平尽可能地取得适当的统一。

模拟通信和数字通信对这两个指标要求的具体内容有所区别,下面分别加以说明。

### 1.5.1 模拟通信系统的质量指标

#### 1. 有效性

模拟通信系统的有效性用有效传输带宽来衡量。同样的消息采用不同的调制方式,则需要不同的频带宽度。频带越窄,有效性越好。

#### 2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性用接收端最终的信噪比衡量。信噪比越大,通信质量越高。

### 1.5.2 数字通信系统的质量指标

数字通信系统的有效性用传输速率和频带利用率来衡量,可靠性用差错率来衡量。

### 1. 传输速率

数字信号由码元组成,码元携带一定的信息量。定义单位时间传输的码元数为码元速率  $R_B$ ,以波特(Baud)为单位,简称B。定义单位时间传输的信息量为信息速率  $R_b$ (b/s),一个二进制码元的信息量为1 b,一个  $N$ 进制码元的信息量为  $\log_2 N$ (b),码元速率  $R_B$  与信息速率  $R_b$  之间的关系为

$$\begin{aligned} R_b &= R_B \log_2 N \text{ (b/s)} \\ R_B &= R_b / \log_2 N \text{ (Baud)} \end{aligned} \quad (1-3)$$

### 2. 频带利用率

比较不同通信系统的有效性时,不能单看它们的传输速率,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。信道频带利用率是指单位带宽内所能达到的传输速率,它的定义为

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Baud/Hz})$$

或是

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Hz})$$

频带利用率通常与所采用的调制及编码方式有关。

### 3. 差错率

差错率是衡量数字通信系统传输消息可靠程度的重要性能指标,常用以下两种方法表述:误码率和误信率。

误码率是指码元在传输系统中被传错的概率,定义为

$$P_e = \text{错误码元} / \text{传输的码元总数}$$

误比特率是指码元所携带的信息量在传输过程中被丢失的概率,定义为

$$P_b = \text{错误比特数} / \text{传输总比特数}$$

在传输二进制码时,有

$$P_b = P_e$$

差错率越小,通信的可靠性越高。对  $P_b$  的要求与所传输的信号有关,如传输数字电话信号时要求  $P_b$  的范围为  $10^{-3} \sim 10^{-6}$ ,而传输计算机数据则要求  $P_b < 10^{-9}$ 。

## 本章小结

研究通信系统模型是本门课程的基本分析方法,它突出了影响通信质量的关键部件。在这里,强调了调制和解调在通信系统中的作用。对数字通信来说,编码和解码也是很重要的。

$M$  个等概率出现的离散消息的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M$$

$n$  个非等概率出现的离散消息中每符号的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i)$$

通常可以从信号传输的有效性和可靠性两方面衡量通信质量的好坏:对模拟通信系统,为有效传输带宽和输出信噪比;对数字通信系统,为信息传输速率和误码率。

## 习 题

1-1 设英文字母  $E$  出现的概率为 0.105,  $x$  出现的概率为 0.002。试求  $x$  及  $E$  的信息量。

1-2 某信息源的符号集由  $A, B, C, D$  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  $5/16$ 。试求该信息源符号的平均信息量。

1-3 设有四个消息  $A, B, C, D$  分别以概率  $1/4, 1/8, 1/8$  和  $1/2$  传送, 每一个消息的出现是相互独立的, 试计算其平均信息量。

1-4 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) 不同的字母是等可能出现时, 试计算传输的平均信息速率;

(2) 若每个字母出现的可能性分别为

$$P_A = 1/5, P_B = 1/4, P_C = 1/4, P_D = 3/10$$

试计算传输的平均信息速率。

1-5 设一信息源的输出由 128 个不同符号组成。其中, 16 个出现的概率为  $1/32$ , 其余 112 个出现概率为  $1/224$ 。信息源每秒发出 1 000 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。

1-6 设一数字传输系统传送二进制码元的速率为 1 200 B, 试求该系统的信息速率; 若该系统改成传送 16 进制信号码元, 码元速率为 2 400 B, 则这时的系统信息速率为多少?

1-7 若题 1-2 中信息源以 1 000 B 速率传送信息, 则传送 1 小时的信息量为多少? 传送 1 小时可能达到的最大信息量为多少?



# 第 2 章 信 道

## 2.1 信道的定义及分类

信道可以分为狭义信道和广义信道。狭义信道是发射端和接收端之间传输媒质的总称,是任何一个通信系统不可或缺的组成部分。按传输媒质的不同,狭义信道又可分为有线信道与无线信道两类。从研究消息传输的观点来说,信道的范围还可以扩大,除包括传输媒质外,还可以包括有关的变换装置(如发送设备、接收设备、馈线与天线、调制器、解调器等),这就是广义信道。本书中如不特殊说明,所指信道均为广义信道。

广义信道按照它包含的功能,可以划分为调制信道与编码信道。所谓调制信道,是指图 2-1 中调制器输出端到解调器输入端的部分。从调制和解调的角度来看,调制器输出端到解调器输入端的所有变换装置及传输媒质,不论其过程如何,只不过是已调信号进行某种变换。只需要关心变换的最终结果,而不需要关心其详细物理过程。因此,研究调制和解调时,采用这种定义是方便的。

所谓编码信道就是指编码器输出端到译码器输入端的部分。在数字通信系统中,如果重点讨论编码和译码,那么采用编码信道的概念是比较方便的。这样定义是因为从编译码的角度看,编码器的输出是某一数字序列,而译码器的输入同样也是某一数字序列,它们可能是不同的数字序列。因此,从编码器输出端到译码器输入端,可以用一个对数字序列进行变换的方框加以概括。图 2-1 为调制信道与编码信道的示意图。

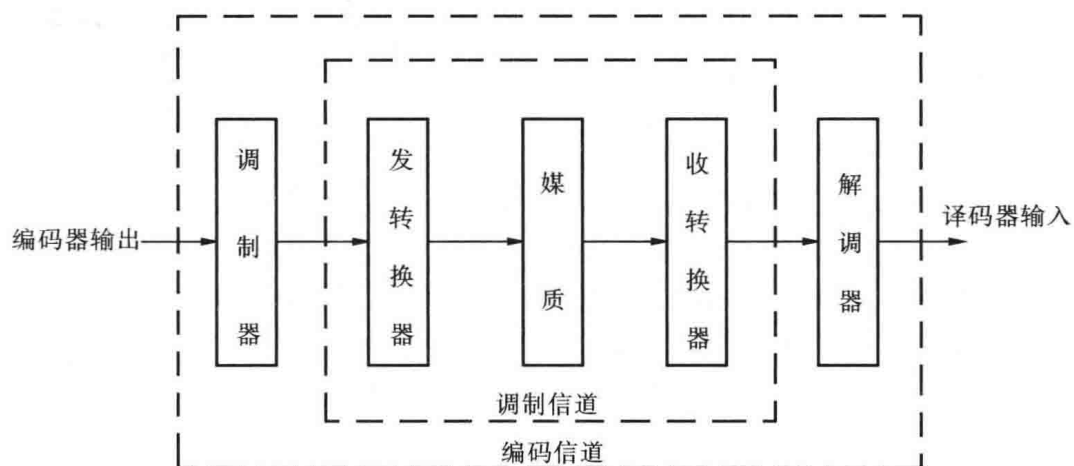


图 2-1 调制信道与编码信道

同理,根据研究的对象的不同,还可以定义其他范畴的广义信道。

## 2.2 信道数学模型

上一节中已将信道划分为调制信道和编码信道,接下来将分别建立二者的数学模型,以便分析其一般特性及其对信号传输的影响。

### 1. 调制信道模型

对调制信道进行大量的考察之后,可以发现它具有如下共性:

- ① 有一对(或多对)输入端和一对(或多对)输出端;
- ② 绝大多数的信道都是线性的,即满足叠加原理;
- ③ 信号通过信道具有一定的时延时间,而且它还会造成(固定的或时变的)损耗;
- ④ 即使没有信号输入,在信道的输出端仍有一定的功率输出(噪声)。

根据上述共性,我们可以用一个二对端(或多对端)的时变线性网络表示调制信道,这个网络便称为调制信道模型,如图 2-2 所示。对于二对端的信道模型,其输出与输入的关系应该有

$$s_o(t) = f[s_i(t)] + n(t) \quad (2-1)$$

式中  $s_i(t)$ ——输入的已调信号;  
 $s_o(t)$ ——信道总输出波形;  
 $n(t)$ ——加性噪声(或称加性干扰)。

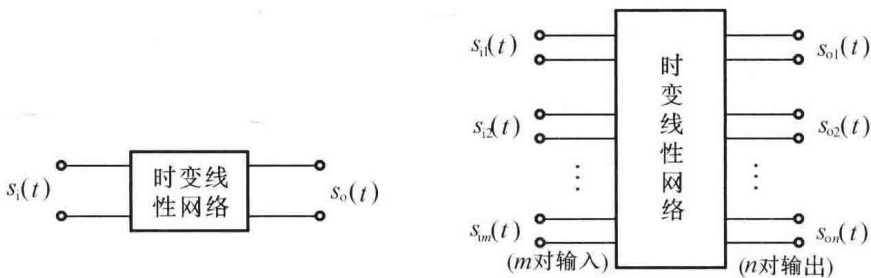


图 2-2 调制信道模型

这里,  $n(t)$  与  $s_i(t)$  无依赖关系,或者说,  $n(t)$  独立于  $s_i(t)$ 。  $f[s_i(t)]$  表示已调信号通过网络所发生的(时变)线性变换。现在,我们假定能把  $f[s_i(t)]$  写为  $k(t)s_i(t)$ , 其中,  $k(t)$  依赖于网络的特性,  $k(t)$  乘以  $s_i(t)$  反映网络特性对  $s_i(t)$  的作用。  $k(t)$  的存在对于  $s_i(t)$  来说是一种干扰,通常称其为乘性干扰。于是,式(2-1)可表示为

$$s_o(t) = k(t)s_i(t) + n(t)$$

即为二对端信道的数学模型。

由以上分析可见,信道对信号的影响可归结到两点:一是乘性干扰  $k(t)$ ,二是加性干扰  $n(t)$ 。如果我们了解  $k(t)$  与  $n(t)$  的特性,就能搞清楚信道对信号的具体影响。信道的不同特性反映在信道模型上仅为  $k(t)$  及  $n(t)$  不同而已。

通常,乘性干扰  $k(t)$  是一个复杂的函数,它可能包括各种线性畸变、非线性畸变。同时,由于信道的时延特性和损耗特性随时间作随机变化,故  $k(t)$  往往只能用随机过程表述。不过,经大量观察表明,有些信道的  $k(t)$  基本不随时间变化。也就是说,信道对信号的影响