



上海市普通高校“九五”重点教材

数字通信

SHUZI TONGXIN

戴善荣 叶家骏 陈惠民 编著

上海大学出版社

世界银行贷款资助项目
上海市教育委员会组编

数 字 通 信

戴善荣 叶家骏 陈惠民 编著

上海大学出版社

·上海·

F008/31

内 容 提 要

本书介绍数字通信的基础理论、基本技术和系统组成。按系统功能模块分为信源编码、数字基带传输、数字载波调制、复用技术、最佳接收、同步原理和差错控制编码等章节,并在绪论中介绍信息论基础知识。

本书既向信息工程技术人员提供有关数字通信的基础理论和技术知识,又给管理营销人员一个关于数字通信系统和关键技术的准确、清晰的概念。本书可作为大专院校电子工程、通信、自动控制、信息、计算机等专业的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信/戴善荣,叶家骏,陈惠民编著. —上海:上海大学出版社,2000.6

ISBN 7-81058-204-6

I.数… II.①戴…②叶…③陈… III.数字通信-基本知识 IV.TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 26876 号

上海大学出版社出版发行

(上海市延长路 149 号 邮政编码 200072)

复旦大学印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 17.25 字数 404 千字

2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

印数 1~2 100

定价:28.50 元

前 言

信息的数字化处理、数字化存贮与数字化传输,将是 21 世纪信息工程的特色。作为信息交流关键的数字通信正是这个特色的一个体现。有关数字通信的原理、技术和系统的知识,不仅为信息工程技术人员所必须,也为从事信息产业、管理和营销人员所关心。本书就是试图去满足这种需求,既向工程人员提供有关数字通信的基础理论和技术知识,又给管理营销人员一个关于数字通信系统和关键技术的准确、清晰的概念;同时,还可作为信息专业本科及大专学生的教学参考书。

这种普及与提高相结合的宗旨,主要体现在章节的安排与内容的选择中。几经推敲,还是选择了按功能块的章节编排。尽管看起来“面孔”不是太新,但它反映出一个数字通信系统的概貌,有“读一遍目录就可知全貌”的功效。

在内容选择方面,以求本、求实、求新为指导思想。求本就是对基本理论要讲清楚、讲准确、讲出本质,而不过多地追求数学论证。求实即讲求实用技术介绍。对实用的、常遇到的技术,即使从理论上论述有困难,也要通过易于接受的例子来介绍。如算术码、L-Z 码和维特比译码等等,就是这样处理的。求新自然是本书的目的之一。近年来,信息技术发展极快,力求将最为注目的新技术介绍给读者。JPEG, H.261, MPEG, L-Z 编码, CDMA, 网同步技术, 多载波调制, 部分响应技术……就是这样被选编于本书的。我们的指导思想是否正确,具体内容又编得怎么样,书中不足、不当,甚至错误之处,祈盼读书、爱书的读者予以批评指正。

本书由戴善荣主编,各章编写与审校分别为:一、二、八章由戴善荣、朱坚明编写,戴善荣审校;三、四章由陈惠民、蔡永青编写,陈惠民审校;五、六、七章由叶家骏、戴文蕾、潘卫国、钱赢编写,叶家骏审校。杭月与黄倩参加了部分章节的打印、绘图工作。编者对他们的辛劳表示感谢。

编 者

1999.3

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 数字通信的演进.....	(1)
1.2 数字通信系统的基本组成.....	(1)
1.3 信源及信息度量.....	(3)
1.3.1 信源的数学模型	(3)
1.3.2 信息的度量	(3)
1.4 信道及其容量.....	(6)
1.4.1 信道模型	(6)
1.4.2 信道容量	(9)
第二章 信源编码	(11)
2.1 信号数字化技术	(11)
2.1.1 引言	(11)
2.1.2 时域波形编码	(11)
2.1.3 频域波形编码	(23)
2.1.4 基于模型的信源编码	(28)
2.2 数据源的无失真压缩编码	(30)
2.2.1 变长度编码与唯一可译性	(30)
2.2.2 霍夫曼编码	(31)
2.2.3 算术码	(32)
2.2.4 Lempel - Ziv 码	(34)
2.3 视频信号编码标准	(35)
2.3.1 引言	(35)
2.3.2 JPEG 标准	(35)
2.3.3 会议电视编码标准 H.261	(40)
2.3.4 MPEG 编码标准	(44)
2.4 音频信号的压缩编码	(53)
2.4.1 语音数字编码标准	(53)
2.4.2 高保真立体声音频编码标准	(53)

2.4.3	杜比 AC-3 介绍	(55)
第三章	数字基带传输	(57)
3.1	数字基带传输系统的构成	(57)
3.2	数字基带信号	(58)
3.2.1	数字基带信号的常用码型	(58)
3.2.2	数字基带信号的功率谱	(61)
3.3	数字基带信号的传输	(67)
3.3.1	基带传输系统的组成	(67)
3.3.2	无码间干扰的基带传输特性	(69)
3.3.3	部分响应系统	(75)
3.4	数字基带传输的差错性能	(80)
3.5	扰码与解码	(82)
3.5.1	m 序列的产生和性质	(82)
3.5.2	扰码与解扰原理	(87)
3.6	眼图	(88)
3.6.1	什么是眼图	(88)
3.6.2	眼图的基本原理	(88)
3.6.3	眼图的模型	(90)
3.7	均衡技术	(91)
3.7.1	时域均衡原理	(91)
3.7.2	时域均衡器的实现	(95)
3.7.3	二维基带自适应判决反馈均衡器	(97)
第四章	数字载波调制	(105)
4.1	二进制数字调制	(105)
4.1.1	二进制数字调制及其频谱特性	(106)
4.1.2	二进制数字频带传输系统的抗噪声性能	(122)
4.1.3	二进制数字调制系统性能的比较	(131)
4.2	多进制数字调制	(133)
4.2.1	波特率与频带利用率	(133)
4.2.2	多进制幅移键控系统(MASK)	(134)
4.2.3	多进制相移键控系统(MPSK)	(137)
4.2.4	多进制频移键控系统(MFSK)	(147)
4.2.5	多电平正交幅度调制技术(MQAM)	(149)
4.3	改进的数字调制方式	(163)
4.3.1	多载波调制	(163)
4.3.2	最小频移键控系统(MSK)	(164)
4.3.3	平滑调频(TFM)	(168)

4.3.4	高斯预滤波的最小频移键控(GMSK)	(170)
第五章	复用技术	(173)
5.1	时分复用(TDM)	(173)
5.1.1	TDM 系统组成及工作原理	(173)
5.1.2	TDM 系统中的帧结构与调整	(174)
5.1.3	群路复接概念	(175)
5.1.4	TDMA 概念	(176)
5.2	频分复用(FDM)	(178)
5.2.1	FDM 工作原理和信号特性	(178)
5.2.2	FDM 的过调制门限	(181)
5.2.3	交叉干扰	(183)
5.3	CDMA 原理及应用	(186)
5.3.1	扩频通信基本原理	(186)
5.3.2	功率控制	(190)
5.3.3	CDMA 原理及应用	(191)
第六章	最佳接收	(194)
6.1	最佳接收机问题的提出	(194)
6.2	输出信噪比最大	(195)
6.3	概率的方法	(197)
6.4	匹配滤波器的特性	(202)
6.5	匹配滤波器设计	(205)
6.6	维纳滤波器	(206)
第七章	同步原理	(210)
7.1	载波同步的方法	(212)
7.1.1	直接法(自同步法)	(212)
7.1.2	插入导频法(外同步法)	(214)
7.1.3	载波同步方法的比较	(218)
7.2	码元同步	(218)
7.2.1	常见的码元同步技术	(219)
7.2.2	内插法同步的原理	(224)
7.3	帧同步(群同步)	(229)
7.3.1	起止式同步法	(230)
7.3.2	插入式同步法	(230)
7.3.3	帧同步保护技术	(236)
7.4	网同步	(237)
7.4.1	网同步方法	(238)

7.4.2	SRTS 法	(240)
第八章	差错控制编码	(245)
8.1	线性分组码	(245)
8.1.1	基本概念	(245)
8.1.2	线性分组码的编码与译码	(249)
8.1.3	汉明码的监督矩阵	(252)
8.1.4	循环码	(252)
8.1.5	纠突发错措施——交错码	(257)
8.1.6	BCH 码和 RS 码	(258)
8.2	卷积码	(259)
8.2.1	卷积码概念	(259)
8.2.2	维特比译码	(262)
	参考文献	(265)

第一章 绪 论

1.1 数字通信的演进

信息传输方式的发展与演进,是与人类社会生产力与生产关系的发展紧密相关的。利用听觉与视觉进行信息交换,应该说是最原始也是最基本的通信方式,或许也是动物与人赖以生存的一种本能反应。随着人类社会的发展,人们利用鼓声、火光、旗语等媒体来代表各种信息并进行交流,这就形成了人类特有的信息文化,发展了通信技术,直至近代形成了巨大的通信产业。

有趣的是通信方式的发展是从数字通信开始的,无论是公元前 2 世纪古希腊的火把联络通信,还是 18 世纪中叶由摩尔斯(Samuel Morse)开创的电通信,他们都仅使用了有限数量的符号代表信息进行通信,这样的通信系统实质上是数字方式的。直到 1876 年贝尔(Alexander Graham Bell)发明了电话,才开始使用模拟通信系统。由于模拟信号的频带窄,实现容易,在此后一个世纪的时间里发展很快。模拟通信的应用领域主要是电话、传真、广播及电视等方面。在 20 世纪 60 年代,首先在商业上开始使用数字通信,其代表系统为贝尔实验室推出的 T_1 通信系统。随后,在传真、电话等由模拟形式占统治地位的领域,出现了数字形式取代的趋势。70 年代后期出现的数字电视以至高清晰度电视技术的高速发展,开创了宽频带、高速率、高质量的数字通信新时代。90 年代初,关于信息高速公路的提法标志着一个信息革命时代的到来,它是由于微电子技术 with 计算机技术的革命性进展而促成的。整个信息革命是以数字通信技术为基础的。然而这个革命已不限于技术界与工业界,而变成了各国政府的行为。因为它将牵动着社会的各个方面,它将改变人类社会的生活面貌,表征人类文明又一次飞跃的开始。

经历了 20 个世纪的发展,通信方式又回到了数字方式,这是伴随着信息与信号理论的发展以及信源编码、信道编码、数字调制、数字同步等新技术的发展而产生回归的。这些基本技术和理论,也就构成了本书的基本内容。

1.2 数字通信系统的基本组成

数字通信的含义就是将信源产生的信息用数字的形式(或用有限个符号)传送到一个或多个目的地。这个过程可用图 1.1 表示。

信息源产生的信息,通常就是指图像、声音、文字或数据等,经过换能器(如摄像机、麦克

风、扫描仪等)处理成模拟的电信号(电压或电流形式)。在数字通信系统中,必须将该模拟信号变成二进制序列即数字信号。而且我们还希望所变成的二进制序列越短越好,或者说在某种失真限度下由模拟信号所变成的数据量越少越好。这就是信源编码(或数据压缩)所研究的理论与技术。完成此任务的设备称为信源编码器。从信源编码器输出的二进制数据序列(速率为 R_b)是代表原模拟信号的精髓(术语称去冗余度)。但是正如一个精瘦的人弱不禁风一样,这样的数字信号抗干扰能力很弱,只能在很好的信道条件中传输。为了使信号有抗干扰能力,必须按某种规则加上某些冗余度以便按规则去发现或纠正信号在传输中发生的错误,这就是纠错编码或信道编码。由于它增加了传输的可靠性,故有时候也称之为可靠性编码。经过信道编码以后,数据率也增大了,从 R_b 增加到 R_c 。

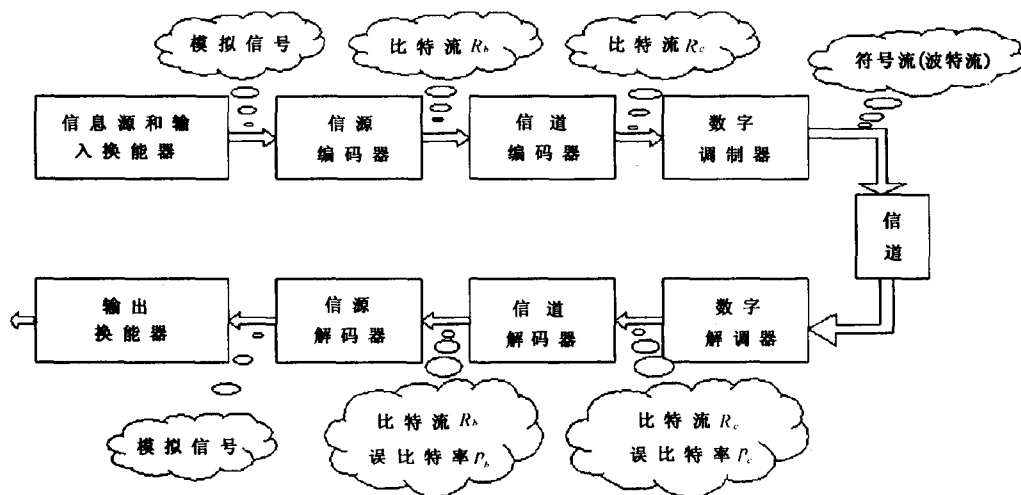


图 1.1 数字通信系统框图

从信道编码器输出的数字序列是二进制序列,在进行信道传输之前,还需要变成合适的波形,这就是数字调制器所要完成的工作。如果变换成的是低频波形信号,则称之为基带传输系统。当信道具有带通特性时,则必须借助于载波,将信号波形变换成带通信号,称之为载波调制。有时候,为了提高频带利用率,一个波形不止代表一个比特信号,而是代表 n 个比特。由于 n 个比特共有 2^n 种不同的组合,这就需要 $M = 2^n$ 种不同的波形去代表它,称之为 M 进制数字调制。它的输出不再是比特流,而是代表比特的波形符号流,速率单位也变成波特。

信道是指各种实际上用来传递波形的物理媒介。通常称之为有线信道、无线信道、卫星信道等。它们对通信性能的影响,就是对信号波形产生噪声污染,使接收发生错误。

接收端各功能框图是发送端各框图的反操作。最后经过信源解码及输出转换,变成看得见、听得着的物理信息。如何衡量一个数字通信系统的质量,也是人们所关心的一个问题。

1.3 信源及信息度量

1.3.1 信源的数学模型

上面已经提到,信源以信号的形式产生信息,只有两种形式,模拟波形或离散的数据,分别称为模拟信源或离散信源。这两种信号必须具有随机性,才能说有信息,才有必要采取各种技术措施来传送它。所以信源的数学模型必须反映出随机性。下面分别按离散的与模拟的形式来讨论。

对离散信源最简单的模型是一个有限个字符组成的集合及其相应的发送概率(表征随机性),记作

$$\begin{bmatrix} X \\ P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1, & x_2, & \cdots, & x_N \\ p_1, & p_2, & \cdots, & p_N \end{bmatrix}$$

x_i 代表第 i 个信源符号发送的随机变量,它的发生概率为 p_i ,即

$$\begin{aligned} p_i &= P(X = x_i), 1 \leq i \leq N \\ \sum_{i=1}^N p_i &= 1 \end{aligned} \quad (1.1)$$

最常见的例子是 $N=2$ 的二进制信源, x_1, x_2 分别为 0 和 1,如果各个字符的发生是彼此独立的,则称为无记忆的,这样的信源又称为离散的无记忆信源,用 DMS 表示。如果各个字符的发生是彼此相关联的,比如对模拟信号取样所得的样值序列,往往是互相关联的,则常常要求满足平稳条件,即不管取哪一段时间的样值序列,其联合概率密度总是一样的。

对模拟信源,输出波形为一个随机过程在时刻 t 的取样。假设为频带受限,平稳的随机过程,频带宽 W ,根据奈奎斯特(Nyquist)取样定理,其最低取样频率为 $f_s = 2W$ Hz,第 n 个取样值为 $x\left(\frac{n}{2W}\right)$,且与计时起点无关。表示信号的随机过程可用冲激响应来表示

$$X(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x\left(\frac{n}{2W}\right) \frac{\sin\left[2\pi W\left(t - \frac{n}{2W}\right)\right]}{2\pi W\left(t - \frac{n}{2W}\right)} \quad (1.2)$$

应该指出,这里所谓的模拟信号,在时间上是按 $T_s = \frac{1}{2W}$ 离散化了的(即每个抽样占时 $\frac{1}{2W}$ 秒),但 $x\left(\frac{n}{2W}\right)$ 值却有无穷多种,不是有限的。故它不是离散信源,更不是数字源。由此可见,要用数字手段传送该信源信息,还必须用有限种值去代表无限种可能的 $x\left(\frac{n}{2W}\right)$ 值。这就是量化编码的任务,将在第二章中讨论。

1.3.2 信息的度量

1.3.2.1 离散信源的信息度量

现代通信中的信息度量采用香农(Shannon)的基于概率统计的定义,信息量的大小,完

全由事件所含的不确定性所决定。很不可能发生的事件的出现会带来很大的信息量,意料中的事件发生不带来任何信息量。用概率来表示事件发生的可能性,则大概率事件的不确定性小于小概率事件,所以事件发生的概率大,该事件所包含的信息量就小。故定义事件 x_i 的自信息度量为

$$i_{x_i} = -\log P(x_i) \quad (1.3)$$

其中负号表明信息度量应为正值。至于单位则由对数的底而定。若以 2 为底,则用比特 (bit),就是常说的二进制位数。若以 e 为底,则用奈特 (Nat) 意为自然单位 (Natural units)。它们的关系为 $\ln P = \ln 2 \cdot \log_2 P = 0.69315 \log_2 P$ 。

一个信源 X 的平均不确定度称为熵,记作 $H(X)$,由定义(1.3)可知,其平均信息度量为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log P(x_i) \quad (1.4)$$

它代表了有 M 个符号的信源 X 中,每个符号所包含的平均自信息量,或者说每个符号是否发生的平均不确定度。

1.3.2.2 互信息

考察两个离散的随机变量集合 $X = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, M$ 及 $Y = \{y_j\}, j = 1, 2, \dots, N$, 各元素发生的概率分别为 $P(x_i)$ 及 $P(y_j)$ 。若一个集合中的某元素(比如设 y_j)发生会消除另一个集合中元素发生的不确定性(又称向另一个集合提供信息),则会改变另一个集合中元素的发生概率。比如从 $P(x_i)$ 改变为 $P(x_i/y_j) = P(X = x_i/Y = y_j)$, 其自信息也从 i_{x_i} 改变为 $i_{x_i/y_j} = -\log P(x_i/y_j)$, 它们的差值称作 y_j 向 x_i 提供的互信息,记作 $I(x_i; y_j)$, 即

$$\begin{aligned} I(x_i; y_j) &= -\log P(x_i) - [-\log P(x_i/y_j)] \\ &= \log \frac{P(x_i/y_j)}{P(x_i)} \end{aligned} \quad (1.5)$$

互信息的概念在通信中是一个起“主角”作用的概念,为加深理解,举生活中的例子予以说明。设发生的事件 y_j 是“闪电”,以不同的 x_i 事件来说明 y_j 对 x_i 不确定度的影响。

设 x_i 为“打雷”,则为必然事件,闪电就是打雷发出的光,故没有不确定性了。即 $I(x_i/y_j) = 0$, y_j 提供的互信息 $I(x_i; y_j) = I(x_i)$, $I(x_i; y_j)$ 为正值。

设 x_i 为事件“下雨”,则“闪电”会减少其不确定性,即“快下雨了”。

设 x_i 为事件“雾天”,则“闪电”与雾没有关系,此时 y_j 不向“是否有雾”这个不确定性提供任何信息,在 y_j 发生时 x_i 发生的概率 $P(x_i/y_j)$ 与原来 $P(x_i)$ 一样, $I(x_i; y_j) = 0$ 。

设 x_i 为事件“飞机正点起飞”,若由于天气的原因“飞机是否能正点起飞”存在不确定性,则由于“闪电”会使该不确定性更大了。即现在的正点起飞概率 $P(x_i/y_j)$ 要比原来的 $P(x_i)$ 还小。此时的 $I(x_i; y_j) < 0$, 而 $I(x_i/y_j) > I(x_i)$ 。可见,单一事件之间的互信息量可以为正,为零,也可以为负。

总体平均而言, X 集合的熵(平均信息量)也会从 $H(X)$ 变为 $H(X/Y)$, 称 $H(X/Y)$ 为在 Y 发生条件下 X 所保留的平均不确定度,它们的差值 $H(X) - H(X/Y)$ 记作 $I(X; Y)$, 称为平均互信息量。即

$$I(X;Y) = H(X) - H(X/Y) \quad (1.6)$$

平均互信息量表示两个符号集合 X 与 Y 之间互相提供的信息量。可以证明它们具有对称性,即 $I(X;Y) = I(Y;X)$ 。在通信应用中, $I(X;Y)$ 表示在接收到 Y 以后为 X 提供的信息量。或换一种说法,在接收到 Y 以后,为发送端发出的 X 集合解除了多少不确定性。当然,全部解除不确定性最为理想,但实际上是不可能,也并不需要。在信源编码中, $I(X;Y)$ 代表了编码输出集合 Y 为未编码信息集合 X 提供的信息,也就是 Y 为 X 所解除的不确定度。所以,平均互信息 $I(X;Y)$ 在数字通信理论中是起主角作用的一个量。

应该强调的是:与单一事件之间的互信息量不同,平均互信息量 $I(X;Y)$ 为非负量,即 $I(X;Y) \geq 0$, 不能有负值。

1.3.2.3 连续信源的信息度量

连续信息是指模拟信号波形按奈奎斯特(Nyquist)准则取样所得的样值序列,其特点是时间上离散而数值连续,可以取任何实数值。这就出现了信息度量的困难。先来考察离散信源的一个例子。设 0~7 这八个自然数发生的概率是一样的,即每个数发生的可能性都为 $1/8$,根据式(1.4)每个数含有自信息 $H(Z) = +\log_2 8 = 3$ 比特,比如自然数 5 的二进制表示为 101,也就是说只需作三次问答就可以确定一个数。比如问第一位为 1 是吗? 答是,第二位则答非,第三位又答是,于是可肯定为 5。现在要问对连续信源,平均需要作多少次问答才能确定其样值呢? 显然需作无穷次问答才行。这就意味着信息熵可以 $\rightarrow \infty$ 。可见按(1.4)式定义的信息度量在连续信源时没有物理意义,但作为离散信源关于自信息概念的自然推广,还是作为一种信息度量定义,并称之为微分熵或相对熵,仍用 $H(X)$ 记之,即

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx \quad (1.7)$$

其中 $p(x)$ 为连续随机变量 x 的概率密度函数。

平均互信息的度量也可推广至连续源,即

$$\begin{aligned} I(X;Y) &= H(X) - H(X/Y) \\ &= H(Y) - H(Y/X) \end{aligned} \quad (1.8)$$

在数字通信应用中,常常会遇到离散信源 X ,采用模拟方式传输,在接收端接收的是连续信号 Y 的情况。设 $X = \{x_i\}$, 符号概率为 $\{P_i\}$, $i = 1, 2, \dots, M$, 随机变量 Y 则由概率密度函数 $p(y)$ 描述,因 X 与 Y 是统计相关的,则有关系式

$$p(y) = \sum_{i=1}^M p(y/x_i) p(x_i) \quad (1.9)$$

从通信目的出发,所关心的是接收到 $Y = y$ 后能对 $X = x_i$ 提供多少信息或者说能否解除对某个 x_i 是否发生的不确定性。此时的互信息量为

$$\begin{aligned} I(x_i; y) &= H(y) - H(y/x_i) \\ &= \log \frac{p(y/x_i)}{p(y)} \\ &= H(x_i) - H(x_i/y) \end{aligned} \quad (1.10)$$

如果 $I(x_i; y) = H(x_i)$, 说明提供的互信息正好解除了 x_i 的不确定性, 此时的 $H(x_i/y) = 0$, 即没有剩余的不确定性了。

X 与 Y 之间的平均互信息为

$$I(X; Y) = \sum_{i=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} p(y/x_i) p(x_i) \log \frac{p(y/x_i)}{p(y)} dy \quad (1.11)$$

1.4 信道及其容量

1.4.1 信道模型

1.4.1.1 波形信道

在图 1.1 所描述的数字通信系统中, 连接数字调制器与数字解调器的是信道, 实际上它也是发信者与收信者之间的一条信息通道。由于构成信道的物理媒质的电磁特性与环境的不同, 对在其中传输的信号也会产生不同的影响。这些影响的综合效果表现为两方面: 其一是使到达接收端的信号变形, 即发生幅值、相位、频率的改变及波形迟延, 统称为失真。这种失真对某种信道往往以固有的虽不一定已知的形式产生。其二是将环境噪声波形叠加到信号波形上, 造成传输错误, 这种错误往往表现为随机的形式。通信工程的研究及人力物力的投入, 就是为了消除这两方面的影响。我们不讨论具体的物理信道而从信道特性出发建立一些信道模型, 以便采取相应的技术措施。这种信道模型有时候也叫调制信道模型, 其特性主要表现为一个线性转移函数与加性高斯噪声, 它的输入输出信号是模拟波形, 故有时候称该信道为波形信道。即

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (1.12)$$

其中 $x(t)$ 是调制器的输出, $y(t)$ 是解调器的输入, $n(t)$ 是高斯白噪声。

波形信道的一个重要参数是带宽。它对传输差错率及最大数据速率都有关系。由于实际的物理信道都存在分布电容与分布电感, 它们的效应与频率有关。随着频率的增加并联电容会趋于“短接”信号, 而串联电感则趋于“断开”信号的效应, 故所有的信道都有一个最高频率, 高于此频率的输入信号几乎全部被衰减, 相当于滤波器的截止频率。有些信道对低频率信号产生串联电容“断开”与并联电感的“短接”效应, 从而也有低端截止频率。此时的信道特性相当于一个带通滤波器。若只有高端截止频率而无低端截止频率的信道则相当于一个低通滤波器。信道的带宽就是等效滤波器的带宽。

根据奈奎斯特准则, 若信道带宽为 W , 则极限数据速率为 $2W$ 波特。这里的波特(Baud)是符号速率, 即每秒传送一个符号的速率便为 1 波特。对二进制符号来说, 波特数与比特数相等, 则最大二进制符号速率为 $2W$ b/s。对 M 进制符号来说, 每个符号需 $\log_2 M$ 比特二进制符号来表示。故极限速率便提高 $\log_2 M$ 倍, 达到 $2W \log_2 M$ b/s, 信道带宽与数据速率的这个关系, 在数字通信中极为重要。

波形信道的另一个重要参数是噪声功率。当信号通过信道时将被附加上带有一定功率的噪声, 噪声的种类及来源多而复杂。在数字通信的分析中, 常假定加性噪声为一高斯随机过程, 即如果噪声在一组时间点上被采样, 则这些样值的联合概率密度为一个高斯联合概率密度函数。这个假设对数字通信性能研究带来很大方便。

设 $n(t)$ 又为具有常值功率谱密度的随机过程, 则该过程包含所有频率成分且每个成分的功率大小一样, 设为 $N_0/2$ (如图 1.2)。由于白色光由所有相等的频率成分(色彩)组成, 故如上的噪声假设又形象地称为白噪声。如果该加性噪声随机过程又是高斯分布的, 则称为加性高斯白噪声(AWGN)。在数字通信系统性能分析中将会经常遇到。

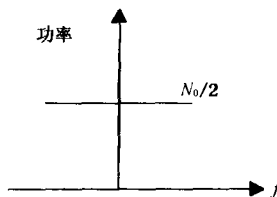


图 1.2 功率谱密度

在通信系统设计应用中, 常用以下几种模型来表征物理信道的特性。

1. 加性噪声信道

这是信道模型中最简单也是最基本的一种, 如图 1.3 所示。输入到信道的信号 $s(t)$ 仅仅遭受加性的随机噪声而变坏, 其输出信号即为接收机接收信号 $r(t) = \alpha s(t) + n(t)$, $n(t)$ 就是上述的高斯白噪声。 α 代表信号的衰减因子。

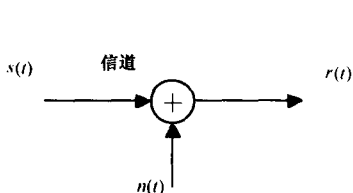


图 1.3 加性噪声信道

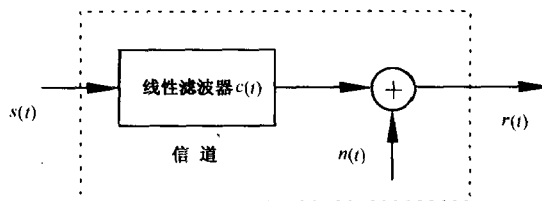


图 1.4 线性滤波器信道

2. 线性滤波器信道

某些实际信道, 比如电话线, 为了保证被传输的信号带宽在限定的范围内, 以至避免相互串扰, 往往需要加一个线性滤波器, 如图 1.4 所示。现在的信道输出 $r(t)$ 便为信号与线性滤波器的脉冲响应 $c(t)$ 的卷积再加上 $n(t)$, 即

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) * c(t) + n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau) s(t - \tau) d\tau + n(t) \end{aligned} \quad (1.13)$$

3. 线性时变滤波器信道

实际信道中有一类, 其特性是随一天的不同时间而变化的。比如由电离层反射的远距离通信信道(短波通信属于此类)则需用线性时变滤波器特性去表征。此时的滤波器脉冲响应也是时变的, 用 $c(\tau, t)$ 表示, 它表示在 τ 秒以前时刻, 即 $(t - \tau)$ 时刻, 施加的脉冲在 t 时刻的响应, 信道模型类似图 1.4, 输出信号为

$$\begin{aligned} r(t) &= s(t) * c(\tau, t) + n(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} c(\tau, t) s(t - \tau) d\tau + n(t) \end{aligned} \quad (1.14)$$

这种信道模型比较复杂些, 因为由于延迟路径不同就会有不同的 τ , 从而有不同的脉冲响应。在短波无线电信道与蜂窝移动通信网等实例中, 其脉冲响应可表示为

$$c(\tau, t) = \sum_{k=1}^L \alpha_k(t) \delta(t - \tau_k) \quad (1.15)$$

其中 $\{\alpha_k(t)\}$ 表示对 L 条多径信号可能的 L 种时变的衰减因子集合,而 $\{\tau_k\}$ 便是其相应的延迟。于是式(1.14),又可表示为

$$r(t) = \sum_{k=1}^L \alpha_k(t) \delta(t - \tau_k) + n(t) \quad (1.16)$$

即接收信号由 L 个不同时延与不同衰减的多径分量所组成,有时候,会使信号变得很坏,从而需采取多种技术措施,以保证准确通信。

1.4.1.2 编码信道模型

另外一种称为编码信道的模型,它包括调制信道与调制解调器,如图1.5所示。它的输入输出都是数字信号。由于编码信道包含了调制信道,因此也受信道的两种影响。由于对固有的信道特性的影响,一般由调制解调器,包括均衡器等的设计而基本消除。对于编码信道而言,其输入输出的差错(数字的)主要由随机噪声的影响而产生。而纠正随机性差错的任务将由信道编解码器来承担,如图1.5所示。为此而建立的信道模型都是数字的或离散的。

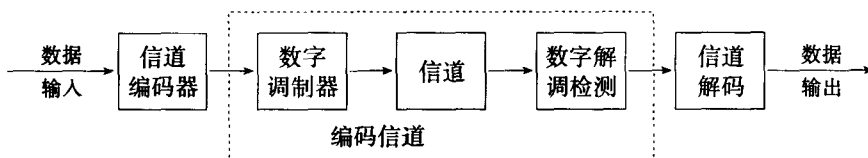


图 1.5 编码信道模型

1. 二进制对称信道(BSC)

最简单的编码信道模型是输入与输出都是离散二进制数据,即 $X = \{0,1\}, Y = \{0,1\}$ 。而可能的输入输出对应关系则由如下的一组条件概率表示。该组条件概率表明:发生错误的概率为 p (1错成0与0错成1都一样),正确概率为 $1-p$ 即:

$$\begin{aligned} P(Y = 0/X = 1) &= P(Y = 1/X = 0) = p \\ P(Y = 1/X = 1) &= P(Y = 0/X = 0) = 1 - p \end{aligned} \quad (1.17)$$

于是图1.5可简化为图1.6的模型

由于该模型的每一输出比特只由当时的输入比特所决定,而与前面的输入符号无关,故又称此信道是无记忆的。

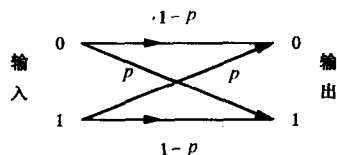


图 1.6 二进制对称信道模型

2. 离散无记忆信道(DMC)

如果一个编码信道输入(即信道编码器的输出)为 M 进制符号,即 $X = \{x_0, x_1, \dots, x_{M-1}\}$,输出为 N 进制符号即 $Y = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1}\}$,在无记忆条件下,其可能的输入输出关系如图1.7所示,其信道特性完全由 $M \times N$ 个条件概率

$$P(Y = y_i/X = x_j) = P(y_i/x_j), i = 0, 1, 2, \dots, N-1, j = 0, 1, 2, \dots, M-1$$

来表述。称之为离散无记忆信道,简称DMC。

对于从集合 $\{X\}$ 中选出的数据符号序列 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 经过信道后,接收到 n 个从符号集 $\{Y\}$ 中产生的符号 $v_1, v_2, \dots, v_n$,它们的联合条件概率可简化为单个条件概率的乘积,即

$$P(v_1, v_2, \dots, v_n / u_1, u_2, \dots, u_n) = \prod_{k=1}^n P(v_k / u_k) \quad (1.18)$$

因此,式(1.18)也就是无记忆条件的一种数学描述。

3. 离散输入连续输出信道

如果调制器的输入仍为选自集合 $\{X\}$ 的符号,但是解调器的输出却是未经量化处理的连续信号,相当于 $N \rightarrow \infty$ 情况,即输出样值取自 $Y = \{-\infty, \infty\}$,这就定义了一个时间离散的无记忆信道,也即离散输入连续输出信道。此时输出要用条件概率密度函数 $p(y/X = x_k), k = 0, 1, \dots, M-1$ 来描述了。这种信道模型来自加性高斯白噪声(AWGN)信道。此时

$$Y = X + G \quad (1.19)$$

其中 G 为零均值,方差为 σ^2 的高斯随机变量, $X = x_k, k = 0, 1, \dots, M-1$,输出 Y 便是均值为 x_k ,方差为 σ^2 的高斯随机变量,其分布为

$$p(y/X = x_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(y-x_k)^2/2\sigma^2} \quad (1.20)$$

对 n 个取自集合 $\{X\}$ 的输入符号序列 $u_1, u_2, \dots, u_n$,其输出样值为相应的 $y_1, y_2, \dots, y_n$ (不再是有确定值的 $v_1, v_2, \dots$),由于无记忆,故服从联合条件概率密度函数

$$P(y_1, y_2, \dots, y_n / u_1, u_2, \dots, u_n) = \prod_{i=1}^n p(y_i / X_i = u_i) \quad (1.21)$$

上述两种模型可由需要来选择应用。如果我们为了设计信道编解码器及性能分析,则应选用编码信道模型;如果我们需要设计数字调制解调器及其性能分析,则就应选用波形信道模型了。这两种工作在数字通信系统中都很重要,故两种模型都要熟悉。

1.4.2 信道容量

在数字通信系统中,信源离散地输出信息符号,然后经过信道的传输到达接收端。现在的问题是达到无差错接收的通信,对信源输出的符号速率有什么限制?

香农定理指出:一个给定的信道存在一个最大的信息率 C ,如果传送信息速率 R 小于 C ,则总可以找到一种编码方法,使传输差错率达到任意小。反之,若 R 大于 C ,则不论采取什么样的编码技术,差错不可避免。称 C 为给定信道的信道容量。

香农又给出了存在加性高斯白噪声的带限信道条件下的信道容量表达式:

$$C = W \log_2(1 + S/N) \quad (1.22)$$

其中 C 为信道容量,取b/s单位, W 为信道频带宽取Hz单位, S/N 为信噪比。

从式(1.22)可看出,若能提高信噪比就可以增大信道容量。当 $N = 0$ 时,即若信道中无加性噪声存在,则信道容量甚至可趋向 ∞ 。从实用意义上讲,并不需要有无穷大的传输速率。但这个结果告诉我们,若无信道噪声存在,无差错通信将很容易实现,而且信息速率可不受限制,因此,减少人为的噪声因素,确是可靠通信的一个重要措施。

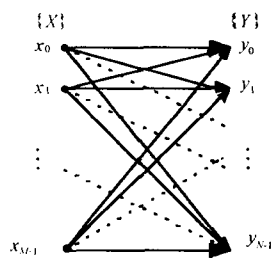


图 1.7 离散无记忆信道