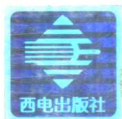


MATLAB

现代通信系统 分析与仿真

MATLAB通信工具箱

李建新 刘乃安 刘继平 编



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

现代通信系统分析与仿真

——MATLAB 通信工具箱

李建新 刘乃安 刘继平 编

西安电子科技大学出版社

2000

内 容 简 介

本书简要介绍了通信系统的基本理论,详细介绍了 MATLAB 通信工具箱的主要内容和使用方法,其中包括与通信系统有关的 MATLAB 通信工具箱库函数和 SIMULINK 模块两大部分,并以典型的应用实例说明了基于 MATLAB 进行通信系统分析与仿真的方法。

本书内容丰富,通信系统中的 MATLAB 函数和 SIMULINK 模块资料齐全,参数说明详细。

本书可作为通信工程、电子工程和通信系统仿真等课程的教学参考书,也可供通信领域的教师、研究生和科研人员参考,具有重要的实用价值和参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信系统分析与仿真:MATLAB 通信工具箱/李建新,刘乃安,刘继平编. —西安:西安电子科技大学出版社,2000.11

ISBN 7-5606-0853-1

I. 现… I. ①李… ②刘… ③刘… I. 计算机辅助计算—软件包, MATLAB
N. TP391.75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 249241 号

责任编辑 毛红兵

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)8227828

邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安兰翔印刷厂

版 次 2000年11月第1版 2000年11月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 23

字 数 549千字

印 数 1~4 000册

定 价 28.00元

ISBN 7-5606-0853-1/TP·0446

*** 如有印装问题可调换 ***

本书封面贴有西安电子科技大学出版社的激光防伪标志,无标志者不得销售。

前 言

MATLAB 是美国 Math Works 公司推出的用于数值计算和信号处理的数学计算软件包。MATLAB 与其它高级语言(如 BASIC、FORTRAN、C 等)相比,不仅语法规则更为简单,而且在解决工程数学问题和在科研教学的辅助方面更加直观、简洁和高效,因此风靡世界。

随着版本的不断升级, MATLAB 的功能越来越强大,应用范围也越来越广泛。不同应用领域的专用库函数和模块汇集起来作为工具箱添加到 MATLAB 软件包中。借助这些工具箱,各个领域和各个层次的科研人员可直观、方便地进行分析、计算和设计仿真,大大地提高了工作效率。目前, MATLAB 推出的工具箱主要有信号处理(signal processing)、控制系统(control system)、神经网络(neural network)、图像处理(image processing)、小波分析(wavelet analysis)、通信系统(communication system)等,而且还在不断增加。

通信系统工具箱中包括了对通信系统进行分析 and 仿真所需的信源编码、纠错编码、信道、调制解调以及其它所用的全部库函数和模块。通信工具箱大大减轻了工程技术人员和科研人员的编程负担,也为初学者快速、全面地了解和掌握通信系统的概念提供了一个便捷的工具。

全书共分 5 章,主要围绕 MATLAB 在通信系统中的应用展开,力图全面、实用。第 1 章对通信系统的基本组成和基本理论作了简单介绍,是通信系统库函数和 SIMULINK 模块的理论基础。第 2 章介绍了 MATLAB 通信工具箱的内容、安装、技术实现和基本使用方法。第 3 章详细介绍了 MATLAB 通信库函数的内容,对每个函数的参数和使用都作了详细的说明。第 4 章详细介绍了通信系统中 SIMULINK 仿真模块的使用。第 5 章给出了几个典型应用实例,说明了如何利用通信工具箱对通信系统进行仿真和分析。结合实例,可以使读者迅速地掌握 MATLAB 通信工具箱提供的强大功能。

考虑到读者的各种层次,本书各章自成系统,不同层次的读者可根据需要选择阅读。

本书由刘乃安编写第 1 章,李建新编写第 3 章,刘继平编写第 2、5 章,熊静、王蔚和滨海参加了第 4 章的编写工作,李建新统校全稿。在编写过程中得到了西安电子科技大学出版社的大力支持,特别是毛红兵和柴永艳同志对本书进行了细致的编辑,在此表示衷心的感谢。

鉴于作者水平,再加时间仓促,书中难免有错误之处,恳请读者指正。

编 者

2000 年 7 月

书中符号使用说明

由于本书中涉及到计算机程序，而程序中无法输入斜体和希文字母，因此为统一起见，本书中使用的公式和符号均为正体；程序中采用国际上惯用的像形符号，例如，在叙述中使用的符号 ω ，在程序中用 w (或 W) 代替；叙述中使用的带上下标符号如 f_s , f_c , ω_c , t_s 等，在程序中用 F_s , F_c , W_c , T_s 等代替。

目 录

第 1 章 通信系统基本理论	1
1.1 通信系统概述	1
1.2 信源及其编/译码	9
1.3 调制与解调	16
1.4 信道及其编/译码	32
1.5 同步	42
第 2 章 通信系统工具箱	49
2.1 通信系统工具箱	49
2.2 通信工具箱的安装	51
2.3 通信工具箱技术实现	51
2.4 通信工具箱教程	59
第 3 章 MATLAB 库函数	134
3.1 信源、信宿及误差分析	137
3.2 信源编/译码	138
3.3 差错控制编码(纠错码)	140
3.4 调制与解调	154
3.5 滤波器设计	163
3.6 有限域计算	168
第 4 章 通信工具箱仿真模块	174
4.1 信号产生与观测设备	174
4.2 信源编/译码	188
4.3 差错控制编/译码	196
4.4 调制与解调	223
4.5 信号多址接入	276
4.6 发送/接收滤波器	282
4.7 信道	288
4.8 同步与其它	295
第 5 章 通信系统分析与设计实例	315
5.1 概述	315
5.2 SIMULINK 动态仿真集成环境	316
5.3 通信工具箱分析与设计实例	327
参考文献	360

第1章

通信系统基本理论

本章主要介绍有关通信系统的基本理论,包括通信与通信系统、通信系统的基本组成与分类、通信系统的性能量度以及通信系统的几个主要组成部分。

1.1 通信系统概述

21 世纪将是一个信息社会,信息交流将成为人们生活的基本需要。现代通信系统是信息时代的生命线,通信是推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。

1.1.1 通信与通信系统

1. 通信

人类社会是建立在信息交流基础上的。在人类社会,人们总是离不开消息的传递。从古代的人力、马力以及烽火台,到现代社会的文字、书信、电报、电话和传真以及电视等,这些都是消息传递的方式或信息交流的手段。因此,通信的任务就是克服距离上的障碍,迅速而准确地传递消息。或者说,通信就是从一地向另一地传递消息。

但是,随着社会的发展和技术的进步,人们对传递消息的要求越来越高,人类通信交流的方式也越来越复杂。由于电通信方式能使消息几乎在任意距离上实现迅速、有效、准确、可靠的传递,因此,目前的通信越来越依赖于利用“电”来传递消息的这种“电通信”方式,以致于“通信”一词几乎变成了电通信的代名词。从这个意义上讲,电通信是通信的狭义而又普遍的理解。

电通信简称电信,它所传递的消息各种各样,如语言、文字、符号、图像、数据等。换句话说,电信的业务类型有语音、文字、图像以及数据等。但从广义的角度讲,广播、电视、雷达、导航以及遥控遥测等也应纳入通信的范畴。

2. 通信系统

完成信息传递所需的所有设备的总和称为通信系统。点与点通信系统的一般模型如图 1-1 所示,它概括反映了通信系统的共性。当然,根据研究对象和所关心的问题不同,具体的通信系统模型会有不同的形式。

通信系统由以下几部分组成:

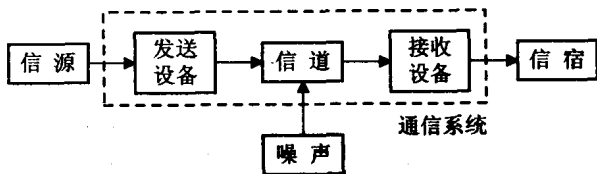


图 1-1 通信系统的组成

(1) 信源与信宿

信源就是信息源，它是信息的发生地，其作用是把各种可能的消息转换成原始电信号。

根据信源输出信号的性质不同可分为模拟信源与离散信源。模拟信源(例如电话机)输出连续变化的信号，又称连续信源；离散信源(如计算机)输出离散的信号，如文字、符号和数据，也称数字信源。模拟信源可通过抽样和量化变换成离散信源；离散信源还可以进行诸如压缩、加密等方式的信源编码处理。随着技术的发展，离散信源的种类和数量越来越多。

信宿就是信息的接收者，它是信息到达的目的地，其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

根据信源和信宿的不同，对应的信息速率在很大的范围内变化，因此，对通信系统的要求也不同。人类作为一种复杂的信源和信宿，不同器官发送和接收信息的能力是不同的。

应当指出，信宿与信源是通信系统模型的不可缺少的组成部分，但通常意义上的通信系统指除信源与信宿之外的部分，如图 1-1 中的虚框所示。

(2) 发送设备

发送设备的基本功能是将信源与信道匹配起来，也就是说，将信源输出的信号变换成适合信道传输的信号形式，然后送往信道。完成这种信号变换的方式多种多样，其中，信道调制(如调幅、调频与调相)是最常见的变换方式。

另外，发送设备还包括为达到某些特殊要求所进行的各种处理，如多路复用、保密与纠错编码处理等。

(3) 信道

信道，或者说信号传输的通道，它是发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介。它可以是有线的(如双绞线、同轴电缆、光缆等)，也可以是无线的(如无线电、红外线等)。不同的信道有不同的特性。

传输过程中必然会引入干扰与噪声，如热噪声、脉冲干扰与衰落等。信道的固有特性与引入的干扰特性直接关系到发送设备中变换方式的选取。

(4) 接收设备

接收设备的功能与发送设备相反，它是从接收信号中恢复出相应的原始信号，即进行解调、译码、解密等。对于多路复用信号，还应包括解多路复用，实现正确分路。

应当指出,通信系统除了完成信息传递之外,还必须进行信息的交换。也就是说,一个完整的通信系统可能由传输系统和交换系统共同组成,但实际使用的通信系统并不一定要求必须有交换系统。本书讨论的通信系统只局限于传输系统。

3. 通信方式

上述通信系统是单向通信系统,但在大多数场合,信源兼为信宿,需要双向通信。双向通信时,通信双方都要有发送和接收设备,并需要各自的传输媒介。这就涉及到通信方式与信道共享问题。如果通信双方共用一个信道,就必须用频率或时间分割的办法来共享信道。下面只对通信方式作一简单介绍。

常见的通信方式分为单工通信、半双工通信和双工通信三种。

(1) 单工通信

单工通信指消息只能单方向传输的工作方式,因此只占用一个信道,如图 1-2(a)所示,最简单的例子就是无线电广播。

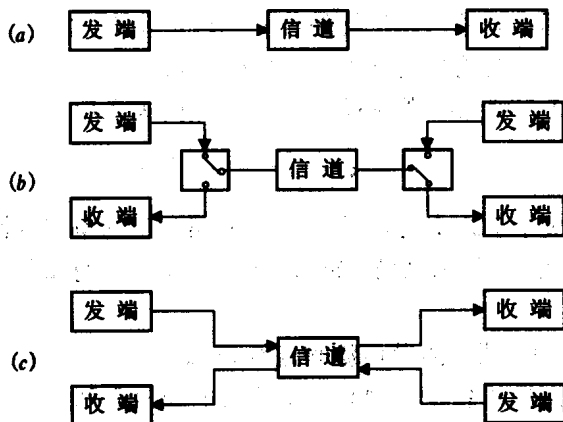


图 1-2 通信方式示意图

(a) 单工通信; (b) 半双工通信; (c) 双工通信

(2) 半双工通信

半双工通信指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收和发的工作方式,如图 1-2(b)所示。这种方式可以占用一个信道,也可以占用两个信道。典型例子是使用同一载频的无线电收发报机。

半双工通信的本质是单工通信。

(3) 双工通信

双工通信又称全双工通信,是指通信双方可以同时进行双向传输消息的工作方式,如图 1-2(c)所示。普通电话就是最简单的例子。

此外,在数字通信中,按照数字信号排列的顺序,可分为串序传输与并序传输两种。

所谓串序传输,就是将代表消息的数字信号序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输;所谓并序传输,就是将代表消息的数字信号序列分割成两路或两路以上的数字信号序列在信道中传输。通常的数字通信大都采用串序传输方式。

上述通信方式是按消息传送的方向进行划分的,此外还可以按通信的网络形式进行划分。由于本书不涉及,因此,这里不予讨论。

4. 信息及其量度

通信的目的在于传递信息,每一消息信号中必定包含接收者所需要知道的信息。“信息”在概念上与消息的意义相似,但其含义更普遍、更抽象。消息以具体信号形式表现出来,而信息是消息中包含的有意义的、本质的内容。消息的出现是随机的、无法预知的(一个预先确知的消息不会给接收者带来任何信息,因而就失去了传递的必要)。消息可以是各种各样的,但其内容可统一用信息去表述。传输信息的多少可直观地用“信息量”来衡量。

在有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对接收者来讲,被传递的消息中所含的信息量是不同的。事件的可能性越小,越使人感到惊奇与意外,信息量就越大。因此,消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关,消息出现的概率愈小,则消息中包含的信息量就愈大。如果事件是必然的(概率为 1),则其信息量为零;如果事件是不可能的(概率为 0),则其信息量为无穷大。此外,如果一个消息不是由一个事件构成而是由若干个独立事件构成,那么其总信息量就是若干个独立事件的信息量之和。

需要指出的是,信息量与消息的种类和重要程度无关。

综上所述,信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 之间的关系应为

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

信息量 I 的单位取决于上式中的 a 。若 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit),这是常用的单位;若 $a=e$,则信息量的单位为奈特(nat);若 $a=10$,则信息量的单位为哈特莱。不同的单位之间可以进行转换。

产生消息的信源有两大类:离散信源和连续信源。因此,产生的消息也有两大类,即离散消息和连续消息。离散消息是一种有限个状态的随机序列,可用离散型随机过程的统计特性来描述;连续信源可能产生的消息数目是无限的,其消息的取值也是无限的,必须用概率密度函数来描述。

对于离散信源, M 个消息等概率出现(出现的概率相等),传送 M 个消息或传送 M 进制波形(这两者完全等价)之一,其信息量为

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

或

$$I = \log_2 M \quad (\text{bit}) \quad (1-3)$$

式中, M 为传送的波形数; P 为每一波形出现的概率。

如果是非等概情况,设离散信源是一个由 n 个符号组成的符号集,其中每个符号 $x_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 出现的概率为 $P(x_i)$,且有 $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$,则每个符号的平均信息量 H 或信息熵为

$$H = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \quad (1-4)$$

如果传送的消息中符号总数为 m ,则该消息所含的信息量为

$$I = mH \quad (\text{bit}) \quad (1-5)$$

对于连续消息,其平均信息量为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx \quad (1-6)$$

式中, $p(x)$ 为概率密度函数(一元)。

信息的传输必须经过信道。信道传输信息时有一定的容量,称为信道容量 C ,它是单位时间内信道上所能传输的最大信息量。对于信道容量,可用一个著名的香农信道容量公式来概括,即

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (\text{bit/s}) \quad (1-7)$$

式中, W 为信道带宽; S/N 为信噪比。

由信道容量公式可知:

- ① 提高信噪比可以增加信道容量。
- ② 噪声功率 $N \rightarrow 0$ 时,信道容量 $C \rightarrow \infty$ 。
- ③ 增加信道带宽 W ,可以提高信道容量,但并不能无限制地增加,在极限情况下为

$$\lim_{W \rightarrow \infty} C = \lim_{W \rightarrow \infty} W \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 W} \right) = 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1-8)$$

式中, n_0 为噪声的单边功率谱密度。

- ④ 信道容量一定时,带宽 W 与信噪比 S/N 之间可以彼此转换。

有关信息、信息量等内容的进一步讨论,可参考信息论方面的有关专著。

1.1.2 通信系统的分类

通信系统的分类方法较多,这里只讨论由通信系统模型所引出的分类。

1. 按信源产生的消息的物理特征分类

根据信源产生的消息的物理特征的不同,或者说按信源提供的业务种类的不同,通信系统可分为电话通信系统、电报通信系统、数据通信系统、图像通信系统和多媒体通信系统。这些系统可以是专用的或单一的,但通常是几种并存的或兼容的。

2. 按发送设备中调制方式分类

如果按照发送设备中是否采用调制来分,通信系统又有基带传输和调制传输两种。所谓基带传输,就是将未经调制的信号直接传输,如音频市话、数字基带传输等。调制传输是对各种信号变换方式后进行传输的总称,又称载波传输。这里所说的调制,主要指信道调制,属于信道编码的范畴,它指的是用原始信号(又称调制信号或基带信号)改变或控制载波信号的一个或几个参数(如频率、幅度或相位等),使这些参数按原始信号的规律变化。常用的调制方式如表 1-1 所示,表中还给出了各种调制方式的主要用途。

发送设备中采用各种调制的目的,从根本上讲是为了使信号与信道相匹配,以便最佳传输。具体来讲,表现在以下三个方面:

- ① 将消息变换成便于传输的信号。如无线传输时必须将原始信号加载于高频载波上才能有效辐射。
- ② 提高性能,特别是抗干扰能力。

③ 有效地利用频带。

实际上,在具体应用时,不同的调制方式可进行多级级联,实现复合调制。

表 1-1 常用调制方式及用途

调制方式			主要用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	振幅键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK, DPSK, QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其它高效数字调制 QAM, MSK 等	(提高频带利用率)数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM, CVSD, DVSD 等	军用、民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其它语音编码方式 ADPCM, APC, LPC 等	中、低速数字电话

3. 按信道的种类分类

按照信道的种类划分,通信系统有有线通信系统和无线通信系统两大类。

对于有线通信系统,根据有线媒介的不同,又可细分为架空明线通信系统、双绞线通信系统、同轴电缆通信系统、光纤通信系统和混合通信系统。不同的传输媒介,其带宽、损耗等信道特性是不同的,因而在其上传输的业务类型及业务质量也是不同的。

对于无线通信系统,主要有无线电通信系统和光通信系统(红外线通信系统较多)之分。随着技术的发展和社会的进步,人们对无线通信系统的要求越来越多。但是,无线通信系统相对于有线通信系统来讲,其带宽有限。因此,一个完整的通信系统或通信网,通常都是有线和无线通信系统的结合。此外,在无线通信系统中,以无线电波作为传输媒介的无线电通信系统最为普遍,因此,习惯地把无线电通信系统直接称为无线通信系统。就是对无线电通信系统而言,还可以根据无线电波频率的高低或波长的长短,把它更为详细地划分为短波通信系统、微波通信系统等。表 1-2 列出了常用信道的频率范围或带宽、对应的波长以及其用途。

表 1-2 常用信道特性及其用途

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3 Hz~30 kHz	$10^8 \sim 10^4$ m	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30~300 kHz	$10^4 \sim 10^3$ m	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300 kHz~3 MHz	$10^3 \sim 10^2$ m	中频 MF	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3~30 MHz	$10^2 \sim 10$ m	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
30~300 MHz	10~1 m	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航
300 MHz~3 GHz	100~10 cm	特高频 UHF	波导 分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3~30 GHz	10~1 cm	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30~300 GHz	10~1 mm	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \sim 10^7$ GHz	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6}$ cm	紫外、可见光、红外	光纤 激光空间传播	光通信

4. 按信道中传输的信号的特征分类

根据信道中所传输的信号的特征, 可把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统两大类。模拟通信系统应用比较早, 也比较广泛, 但数字通信系统以其显著的优越性得到了迅速的发展, 而且日益兴旺, 甚至有替代模拟通信系统的趋势。数字通信系统之所以如此, 是有原因的。作为内因, 主要是数字通信具有以下优越性:

- ① 抗干扰(或噪声)能力强, 可以通过再生来消除噪声积累。
- ② 传输中的差错易于控制, 从而改善传输质量。
- ③ 便于进行各种数字信号处理。
- ④ 易于加密且保密性强。
- ⑤ 易于集成化。
- ⑥ 可以传递各种消息, 具有灵活性和通用性。
- ⑦ 易于交换结合。
- ⑧ 易于多路复用。

在外因方面,主要有两个:第一,社会对通信技术的要求越来越高;第二,数字元部件及计算机技术的迅速发展,为数字通信的高速发展创造了重要条件。

但是,数字通信系统也有其突出问题,一个是同步问题,另一个是带宽问题。关于这些问题,限于篇幅,这里就不展开讨论了。

5. 按传送信号的复用方式分类

按照传送信号的复用方式来分,通信系统有三种复用方式,即**频分复用**、**时分复用**和**码分复用**。频分复用是用频谱搬移的方法使不同的信号占据不同的频率范围;时分复用是用脉冲调制的方法使不同的信号占据不同的时间区间;码分复用则是用一组正交的码序列携带不同的信号。

频分复用应用最早,时分复用技术比较成熟,码分复用主要用于扩频通信或码分多址系统中。

应当指出,实际的通信系统,并不局限于使用某一种复用方式。事实上,很多系统都是同时采用了几种复用方式的。或者说,信号的复用方式还有一种混合复用方式。

1.1.3 通信系统的性能量度

在评价通信系统的质量时,往往要涉及通信系统的性能指标或质量指标。通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题,涉及到通信系统的许多方面。但从通信的目的和任务来看,其主要质量指标应是传输的有效性和可靠性。有效性是在给定信道内能传输信息内容的多少,或者说是传输“速度”问题;而可靠性是指接收信息的准确程度,也就是传输的“质量”问题。这两个问题相互矛盾而又相对统一,通常还可以进行互换。

模拟通信系统的有效性可用有效传输频带来衡量,同样的消息用不同的调制方式,需要的频带宽度不同。如果从传输速率方面来考虑,可用单位时间内传送的信息量来衡量。收发信号之间的误差程度反映了通信系统的可靠性。而产生这个误差的原因有两方面:第一,由于信号在传输时叠加上的噪声(称为加性干扰)所引起;第二,由于与信号同生同灭、始终相随的乘性干扰所产生。因为乘性干扰所引起的误差可用具体指标(如清晰度、可懂度、保真度等)来表述,因此,模拟通信系统的可靠性指标衡量的只是由加性干扰引起的误差,通常用信噪比(信号与噪声的功率之比)来度量。信噪比的大小,反映了该通信系统通信质量的好坏和该系统抗噪声能力的强弱。

对于数字通信系统,有效性和可靠性实际上就是传输速率和差错率。传输速率有不同的表示方法。一种表示方法是码元传输速率,又称码元速率或传码率,它被定义为每秒钟传送码元的数目,单位为波特或 B。在数字通信中,用具有相同的时间间隔来表示一些信号,这个间隔就是码元或码元宽度,它有二进制和多进制之分。在给出码元速率时,一定要注明码元的进制和该速率在系统中的位置。另一种表示方法是信息的传输速率,又称信息速率或传信率。它被定义为每秒钟传送的信息量,单位是比特/秒或记作 bit/s(或写成 b/s)。因此,这个速率也可称为比特(速)率。由于用二进制数字 0 和 1 取值时,传送一个二进制数字的信息量就是 1 bit,因此, N 进制数字的码元速率 R_b 与二进制数字的信息速率 R_b 之间有如下关系:

$$R_b = R_s \log_2 N \quad (\text{b/s}) \quad (1-9)$$

或

$$R_s = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad (\text{B}) \quad (1-10)$$

根据传输速率的不同, 差错率也有两种表述方法, 即误码率和误信率。

误码率是码元在传输系统中被传错的概率, 即

$$P_s = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-11)$$

误信率又称误比特率, 它是错误接收的信息量在传送的信息总量中所占的比例, 即

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-12)$$

1.2 信源及其编/译码

本节主要讨论信源及信源的编/译码。

1.2.1 信源

信源又称信息源, 它是产生消息的部分。其实, 人类本身就是最典型和最原始的信源。信源产生的消息各种各样, 如语言、文字和图像等, 因此, 信源也可按此分为几类, 如普通电话机即是语音信源, 电传打字机即为文字信源, 电视摄像机就是图像信源。

从另一角度来讲, 信源又分为连续信源和离散信源、模拟信源和数字信源。需要说明的是, 连续与离散、模拟与数字区分的标准是不同的。连续与离散是从时间域(轴)上来考虑的, 而模拟与数字则是从幅度方面来区分的。

有的信源产生的信号可以在某些通信系统中直接传送, 例如, 在人类语言交流这个通信系统中, 任何人说的话都不需进行任何变换或转换即可进行传送; 而在电信系统中, 信源输出的信号必须是电信号, 因此, 这里的信源实际上是一个信号源(实际上是电信号源)或者其中必定有将原始消息转换成电信号的转换部件(如话筒就是把语言信号转换成电信号的设备)。从这个意义上讲, 信号源又分为确知信号源和随机信号源。确知信号源产生确定的信号, 通常不一定含有信息, 但可能非常有用; 而随机信号源输出不确定信号, 而且信道中的干扰和噪声大多为随机信号源, 如高斯噪声、瑞利干扰等。

不同的信源有不同的特性, 如统计特性、频谱特性及功率特性等, 这就要求不同的传输系统和信道来适应它。因此, 设计传输系统时, 一定要对信源的特征有所了解。

随着技术的发展, 数字通信的优越性越来越明显, 这就需要越来越多的数字信源。如何把模拟信源转换成数字信源, 这就要靠信源编码器来完成。

1.2.2 信源编码

信源编码器就是把信源发出的信息转换成数字形式的信息序列, 主要包括模/数变换(A/D变换)和压缩处理, 然后再进行一定形式的编码处理。有时为了保密, 还可以包括保密处理。

1. 模/数变换

模/数变换就是把模拟量变换成数字量的过程, 主要包括抽样、量化与编码三个过程,

其中把后两个过程合称为模/数(A/D)变换器。

(1) 抽样

抽样, 又称采样, 是把连续时间模拟信号转换成离散时间连续幅度的抽样信号, 其实质就是用一固定频率的抽样信号周期性地读出或测量该连续时间模拟信号。设抽样信号的频率(称为抽样频率)为 f_s , 则其抽样周期为 T_s 。抽样以后的信号仍为模拟量, 只不过是时间上离散的脉冲调制信号。如图 1-3 所示, $f(t)$ 为输入的被抽样信号, $p(t)$ 为抽样信号, 而 $f_0(t)$ 为抽样后的输出信号。理想的抽样应是冲激序列, 但实际抽样通常是平顶抽样或自然抽样。

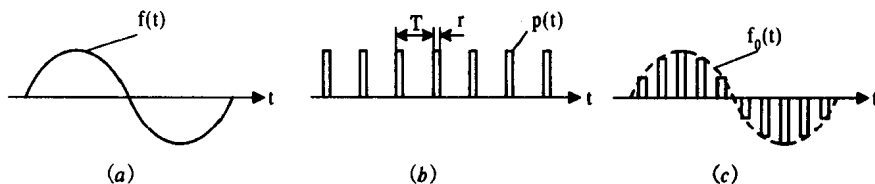


图 1-3 抽样过程波形图

(a) 输入信号 $f(t)$; (b) 抽样波形 $p(t)$; (c) 抽样输出信号 $f_0(t)$

抽样的理论基础是抽样定理, 它说明在什么条件下能从抽样输出信号 $f_0(t)$ 中恢复输入信号 $f(t)$ 。根据频谱分析理论, 只有抽样信号的频谱不发生重叠现象时, 抽样的基频谱才能与信号频谱相一致。因此, 抽样定理可表述为: 为了使抽样信号 $f_0(t)$ 能完全恢复连续信号 $f(t)$, 抽样信号重复频率 f_s 必须大于等于 2 倍的 f_H , f_H 为包含任何干扰在内的信号 $f(t)$ 的最高有效频率, 即

$$f_s \geq 2f_H \quad (1-13)$$

其中, $f_s = 2f_H$ 为奈奎斯特频率。

值得注意的是, 这里的 f_H , 应理解为包括噪声和干扰在内的信号的最高频率。此外, 抽样定理本身也说明了其应用条件是带限(频带受限)信号, 否则就会产生误差, 或者不能完全恢复原信号。庆幸的是, 绝大多数实际信号都是带限信号, 主要有低通型和带通型两类。对于这两类信号, 抽样定理可以有具体表述, 这里就不再赘述。实际上, 在对信号进行抽样之前, 经常都有一个预滤波过程, 其主要目的是保证满足带限条件。

由于实际滤波器特性的不理想, 抽样频率 f_s 通常都要高于 $2f_H$, 一般取 $f_s = (3 \sim 5)f_H$, 过高的 f_s 将要付出很大的代价。

最后解释一个名词——**混叠频率** f_a 。所谓混叠频率, 就是当利用一个抽样频率为 f_s 的离散时间系统进行信号处理时信号所允许的最高频率。任何大于 f_a 的分量都将重叠起来而不能恢复, 并使正规频带内的信号也变得模糊起来。根据抽样定理可知:

$$f_a = \frac{1}{2}f_s。$$

(2) 量化

量化是把离散时间连续幅度的抽样信号转换成离散时间离散幅度的数字信号, 其实质就是一种用数字量逼近模拟量的过程, 或者说是一种舍入过程, 因而必然存在量化误差。

量化的基本问题是计算量化误差与设计最佳量化器。

从输入不同的量化器信号来看,有标量量化和矢量量化之分。如果输入量化器 Q 的信号为一模拟信号 x , 输出为 L 个量化值 $y_k, k=1, 2, \dots, L$, 则这种量化器为标量量化器。其中, y_k 为重建电平或量化电平。标量量化器的量化过程可表示为

$$y = Q(x) = Q\{x_k < x < x_{k+1}\} = y_k \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (1-14)$$

式中, x_k 称为分层电平或判决阈值。令 $\Delta_k = x_{k+1} - x_k$, 称为量化间隔。此外,

$$q = x - y = x - Q(x) \quad (1-15)$$

定义为量化误差或量化噪声。对于 q 的大小, 通常用均方误差来度量, 即

$$\sigma_q^2 = E[x - Q(x)]^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [x - Q(x)]^2 p_x(x) dx \quad (1-16)$$

$$\text{或} \quad \sigma_q^2 = \sum_{k=1}^L \int_{x_k}^{x_{k+1}} (x - y_k)^2 p_x(x) dx \quad (1-17)$$

式中, $p_x(x)$ 为输入信号 x 的概率分布密度。

设计最佳量化器就是在 $p_x(x)$ 和 L 确定的条件下, 求出使 σ_q^2 最小的一组分层电平值 $\{x_k\}$ 和量化电平值 $\{y_k\}, k=1, 2, \dots, L$ 。

量化器的量化特性还常用量化特性曲线来描述, 如图 1-4 所示为一均匀量化的量化特性。

所谓均匀量化, 是指在整个量化范围内的量化间隔都相等, 否则称为非均匀量化。实现非均匀量化的方案有两种: 一种是先把输入信号 x 进行一次非线性变换, 然后再进行均匀量化(当然, 在接收端要进行一次逆变换才能恢复原始信号); 另一种是直接实现非线性编码。

在数字通信系统中, 衡量量化器性能的主要指标是信噪比 SNR, 通常用 S/σ_q^2 来考核。对于均匀量化, 若输入信号为正弦信号, 则

$$[S/\sigma_q^2]_{dB} \approx 4.77 + 20 \lg D + 6.02n \quad (\text{dB}) \quad (1-18)$$

式中, D 为信号有效值与最大量化电平之比; $n = \log_2 L$, L 为量化间隔数。

对于有过载情况的量化器, 量化噪声还要考虑过载噪声。但不论如何, 均匀量化器只有在输入信号为均匀分布时才是最佳量化器。

对于非均匀量化, 通常用输入信号 x 的非线性变换(压缩)来改善量化信噪比, 并通过接收端的逆变换(扩张)来恢复信号 x 。不同的压缩规律有不同的压缩特性和信噪比特性。常用的压缩器多用对数压缩, 又分为 μ 律压缩和 A 律压缩, 如图 1-5 所示。

所谓 μ 律压缩, 就是压缩特性具有如下关系:

$$y = \frac{V \ln(1 + \mu|x|/V)}{\ln(1 + \mu)} \text{sgn}(x) \quad (1-19)$$

式中, V 为信号 x 的峰值, 因此也是 y 的峰值; μ 为压缩系数; $\ln$ 为自然对数; $\text{sgn}(x)$ 为符号函数。

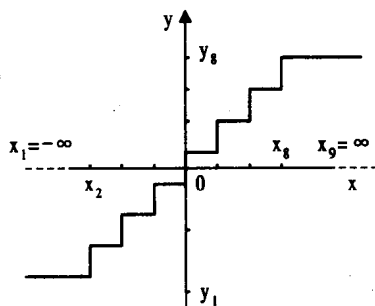


图 1-4 均匀量化特性曲线