

Signals and Communication Systems

信号和通信系统

包闻亮 鲍 风 编著



复旦大学出版社

信号与通信系统

包闻亮 鲍 风 编著

复旦大学出版社

(沪)新登字 202 号

信号与通信系统

包闻亮 鲍 风 编著

复旦大学出版社出版

(上海国权路 579 号)

新华书店上海发行所发行 复旦大学印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17.5 字数 432,000

1992 年 9 月第 1 版 1993 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—3000

ISBN 7-309-00854-5/O·108

定价: 6.75 元

内 容 提 要

本书详细地论述了信息传输系统,介绍信号、系统与噪声的基本理论和各种通信系统的基本原理。

全书共分五章,第一章为确定信号分析,第二章是随机信号分析,第三章论述数字通信系统,第四章介绍信号的调制传输,第五章阐述噪声对通信系统的影响。

本书可作为理工院校电子学与信息系统、无线电电子学、通信、生物医学电子学等专业的教材和教学参考书。也可作为广大科技工作者学习信号与系统、信息传输系统的参考读物。

责任编辑 林溪波
责任校对 马金宝

前 言

“信号与通信系统”是复旦大学电子学与信息系统专业的专业课程。本书在使用多年的“信号与通信系统”讲义的基础上补充改写而成。

对于电子学与信息系统专业的学生来说，“信号与系统”是一门重要的课程。但在这门课程中，要用较少的学时全面论述信号与系统是很困难的。多年来，我们将“信号与系统”分别在三门课程中进行讨论：第一门课程为“信号与通信系统”，主要论述连续信号和系统的频域分析，并且讲述信息传输系统。第二门课程为“自控原理”，介绍连续信号和系统的时域分析、复频域分析以及系统的状态变量分析等，并且论述自动控制系统。第三门课程为“数字信号处理”，主要讲述离散时间信号和系统分析以及数字信号处理系统。后两门课程是在前一门课程学完之后同时进行的，全部内容在两学期内讲完。这样做的好处是三门课程的内容均衔接而不重复，每门课程都能在60—70学时完成，学生对信号与系统的各个方面能全面了解。

本书以信息传输系统为主线，讲述信号、系统与噪声等基本理论。内容编排上先讨论信号与系统频域分析的各个重要课题。在频域分析中引入广义函数的概念，这样，对一类能量无限信号(如单位冲激函数、阶跃函数等)的傅里叶分析就有了更好的数学工具。然后介绍各种信息传输系统的基本原理。在学习基本原理的同时，加强了与实际通信系统的联系，特别对近年来迅速发展且应用广泛的数字通信系统进行了充分的讨论。这对于缺乏实际系统认识的理科学生来说是很有必要的。

本书的绪论讲述信息、信号与系统之间的关系。第一章讲述连续信号和系统的频域分析理论，包括频谱分析、相关分析、信号通过线性系统等内容。第二章阐述随机信号的统计特性、典型噪声信号分析及随机信号通过线性系统等内容。第三章介绍数字通信系统的基本原理以及一些具体的数字传输系统。第四章论述模拟通信系统原理。第五章阐述噪声对各种通信系统的影响，并比较各种通信系统的性能。各章后面均附有习题，有一些习题的内容涉及到具体实用系统。

本书有四个附录，介绍书中涉及到的数学公式和特殊函数，供学生参考。

本书可作为理工科院校的电子学与信息系统、无线电电子学、无线电物理、通信、生物医学电子学和计算机科学等专业的教材和参考书。也可以作为广大科技工作者学习信号与系统、信息传输系统的参考书。

本书在编写过程中，得到了邵祥义副教授的热情帮助，责任编辑林溪波同志对本书的出版作了许多工作，在此表示衷心感谢。

限于编者水平，书中难免有错误与不足之处，恳请批评指正。

编 者

1991. 12

目 录

前 言

绪 论	1
§ 0.1 信息、信号与系统	1
§ 0.2 信息与信息量	1
§ 0.3 信号的描述及其分类	3
§ 0.4 系统的分类及其分析方法	4
§ 0.5 信息传输系统概述	5
§ 0.5.1 信息传输系统模型	6
§ 0.5.2 数字通信系统模型	7
第一章 确定信号分析	9
§ 1.1 周期信号的傅里叶级数表示	9
§ 1.1.1 周期信号的简谐波展开	9
§ 1.1.2 离散频谱	11
§ 1.1.3 离散频谱的性质	13
§ 1.2 连续频谱——能量型信号的频谱分析	15
§ 1.2.1 傅里叶变换	15
§ 1.2.2 连续频谱	19
§ 1.3 广义函数	23
§ 1.3.1 广义函数的基本概念	23
§ 1.3.2 广义函数的性质	24
§ 1.3.3 几个特定的广义函数	27
§ 1.4 包含冲激函数的傅里叶变换	30
§ 1.5 频谱密度的性质	41
§ 1.6 能量谱与功率谱	47
§ 1.6.1 能量信号与能量密度谱	47
§ 1.6.2 功率信号与功率密度谱	47
§ 1.6.3 周期信号的功率谱	48
§ 1.7 确定信号通过线性系统	49
§ 1.7.1 系统的时间-频率表示法	49
§ 1.7.2 卷积	51
§ 1.7.3 频率域内线性系统的理论	53
§ 1.7.4 无失真传输与理想滤波器	56
§ 1.8 确定信号的相关	59
§ 1.8.1 相关系数	60
§ 1.8.2 相关函数	61

§ 1.8.3	相关函数的性质	62
§ 1.8.4	线性系统与相关函数的关系	64
§ 1.9	H 变换	65
§ 1.9.1	H 变换的基本概念	65
§ 1.9.2	H 变换的性质	66
§ 1.9.3	H 变换的应用	67
	习 题	71
第二章	随机信号分析	80
§ 2.1	随机信号的统计分布描述	80
§ 2.1.1	随机信号的一维和二维分布	81
§ 2.1.2	随机信号的 n 维分布	81
§ 2.1.3	平稳随机信号	82
§ 2.2	随机信号的平均表征	82
§ 2.2.1	随机信号的集平均表征量	82
§ 2.2.2	随机信号的时间平均表征量	87
§ 2.2.3	各态历经性	87
§ 2.2.4	随机信号的功率谱	89
§ 2.2.5	随机信号的功率谱与自相关函数的关系	90
§ 2.3	典型随机信号	91
§ 2.3.1	起伏噪声	91
§ 2.3.2	白噪声	92
§ 2.3.3	窄带高斯噪声	94
§ 2.3.4	正弦波加窄带高斯噪声	98
§ 2.4	随机信号通过线性系统	102
§ 2.4.1	输出信号的数字特征	102
§ 2.4.2	输出与输入随机信号间的互相关	103
	习 题	105
第三章	数字通信系统	109
§ 3.1	模拟信号的数字化原理	109
§ 3.1.1	抽样定理	109
§ 3.1.2	幅度量化	115
§ 3.1.3	量化噪声	116
§ 3.1.4	非均匀量化	118
§ 3.2	脉冲幅度调制(PAM)和时分多路复用(TDM)	123
§ 3.2.1	曲顶 PAM	123
§ 3.2.2	平顶 PAM	124
§ 3.2.3	PAM 系统的带宽与传输	126
§ 3.2.4	时分多路复用	127
§ 3.3	脉冲编码调制(PCM)	130
§ 3.3.1	线性 PCM 编码	130
§ 3.3.2	非线性 PCM 编码	132
§ 3.3.3	贝尔 T1 PCM 电话通信系统简介	134

§ 3.4	增量调制 (ΔM)	135
§ 3.4.1	简单增量调制的工作原理	136
§ 3.4.2	量化噪声和过载特性	137
§ 3.4.3	改进型增量调制	138
§ 3.5	基带传输原理	141
§ 3.5.1	基带信号的基本码型	142
§ 3.5.2	基带信号的频谱特性	143
§ 3.5.3	无码间串扰的基带信号传输	148
§ 3.5.4	部分响应系统	155
§ 3.5.5	信道噪声对基带信号传输的影响	159
§ 3.6	匹配滤波器	162
§ 3.7	纠错编码	167
§ 3.7.1	常用的差错控制方法	167
§ 3.7.2	纠错编码的基本原理	168
§ 3.7.3	常用的简单编码	171
§ 3.7.4	汉明码	172
习 题		177
第四章	信号的调制传输	185
§ 4.1	数字信号的调制	185
§ 4.1.1	振幅键控 (ASK)	186
§ 4.1.2	移频键控 (FSK)	188
§ 4.1.3	移相键控 (PSK)	191
§ 4.1.4	多进制数字信号的调制	195
§ 4.2	振幅调制	196
§ 4.2.1	双边带 (DSB) 调制	196
§ 4.2.2	一般的振幅调制 (AM)	200
§ 4.2.3	单边带 (SSB) 调制	203
§ 4.2.4	残留边带 (VSB) 调制	206
§ 4.3	角调制	209
§ 4.3.1	调频波与调相波	210
§ 4.3.2	调频信号的频谱与带宽	211
§ 4.3.3	FM 信号的产生	217
§ 4.3.4	FM 信号的解调	219
§ 4.4	频分多路复用 (FDM)	222
习 题		224
第五章	噪声对通信系统的影响	232
§ 5.1	二进制调制的误码率	232
§ 5.1.1	噪声对相干检测二进制传输系统的影响	233
§ 5.1.2	噪声对非相干检测二进制传输系统的影响	237
§ 5.1.3	二进制数字调制系统的性能比较	243
§ 5.2	调幅系统的抗噪声性能	244

§ 5.2.1	DSB 系统的抗噪声性能	244
§ 5.2.2	SSB 系统的抗噪声性能	245
§ 5.2.3	AM 系统的抗噪声性能	246
§ 5.3	FM 系统的抗噪声性能	247
§ 5.3.1	FM 系统的解调增益	247
§ 5.3.2	FM 系统与 AM 系统的输出信噪比比较	249
§ 5.3.3	FM 解调中的门限效应	250
§ 5.3.4	用去加重来改进 FM 系统的输出信噪比	252
§ 5.4	PCM 系统的抗噪声性能	253
§ 5.5	信息传输引论	256
§ 5.5.1	信道与信道容量	256
§ 5.5.2	带宽和信噪比互换	257
§ 5.5.3	实际系统的潜力	258
习 题	260
附 录	264
A	常用数学公式	264
B	施瓦茨不等式	265
C	误差函数	266
D	贝塞尔函数	268
参考文献	270

绪 论

§ 0.1 信息、信号与系统

信息是人类社会和自然界中需要传送、交换、存贮和提取的抽象内容。例如打一次电话、甲告诉乙所不知道的消息,就说甲发出了信息。而乙在电话中得知了原先不知道的消息,就说乙得到了信息。

信息存在于一切事物之中,事物的一切变化和运动都伴随着信息的交换和传送。各种各样的社会活动、无线电波的传播、计算机的运算等等都是信息交换和传输的过程。信息是人类认识世界和改造世界的知识源泉。

由于信息是抽象的内容,为了传送和交换信息,必须通过语言、文字、图像和数据等将它表示出来。人们称表示信息的语言、文字、图像和数据等为消息。消息在许多情况下是不便于传送和交换的。例如语言就不宜远距离直接传送。为此需要用光、声、电等物理量来运载消息。人们称运载消息的光、声、电等物理量为信号。当我们用数学式子表示时,它们就是时间或空间的函数。所以信号是包含(或表示)信息的时间或空间函数,记为 $S(t)$ 或 $S(x)$ 。我们就称 $S(t)$ 、 $S(x)$ 的图形为信号波形。

信息的交换、传送、存贮和提取是借助于信号的传输、存贮和处理来完成的。信号是物理量,因而信号的传输、存贮和处理必须借助于物理设备才能实现。这些传输、存贮和处理信号的设备总称为系统。具体地说,系统是由各个不同的单元按照一定的方式组成并能完成某种任务的整体的总称。系统所完成的任务从抽象的观点看就是传输、存贮和处理信号,以达到自然界、人类社会、生产设备按照对人类有利的规律运动的目的。所以系统的组成、特性应该由信息和信号决定。

从上述可知,信息、信号与系统是不可分割的整体。本课程以信号与系统为主线,对连续时间信号与系统的时域、频域进行分析,对信息传输系统作详细的论述。之所以要讨论信息传输系统,是因为它广泛存在于各个领域,不仅在通信的各个业务领域:电报、电话、传真、数据传输及可视电话等,而且存在于广播、电视、雷达、控制、遥测及计算机科学的领域中。

§ 0.2 信息与信息量

信息是一个社会概念。它是人类社会共享的一切知识、学问以及从客观现象中提取出来的各种消息的总和。对信息目前已有几十种定义。这里例举两个:维纳(N. Wiener)把信息定义为“信息是我们在适应外部世界并使这种适应为外部世界所感知的过程中,同外部世界交换内容的总和。”而哈脱莱(R. Hartley)指出:“信息是消息中不确定性的消除”。

上面的信息是广义的概念。而我们常说的信息论则是从狭义的角度来研究信息,即主要研究与通信系统有关的信源的信息量、信道容量、噪声及编码问题。它的理论基础是从山

尔(C. Shannon)研究通信系统时建立并由他与惠佛(W. Weaver)于1949年发表的“通信的数学理论”中对信息引入定量的规定,从而人们开始对信息有了初步的了解。目前信息的含意已进一步发展,这一定量规定也逐渐暴露出它的局限性。不过对于无线电、电子学等技术领域来讲,由农理论仍不失为信息论的基础。

世界上任何事件的发生都是不确定的。任何信源产生的包含一定信息的符号都是随机的。若符号的出现是确定的,或者预先知道的,就无信息可言。信息的传输也就失去了意义。例如一个朋友告诉你一件事,如果你对这件事早已知道,你就对他讲的不感兴趣。如果你对这件事一无所知,而且认为这件事发生的可能性很小,那么你听到后就会感到吃惊、感觉得到了不少信息。因此从直观的观点看,某一事件发生的信息收到的信息越大,就是信息量大。信息量和该事件发生的概率有相反的关系。如果事件是确定的(概率为1),那么它传送的信息量为零。反之,如果事件是不可能的(概率为0),那么它的发生有无穷的信息量。这就提示我们信息量应该是事件概率的倒数的对数函数,即信息量 I 为

$$I \sim \log \frac{1}{P}$$

另外,人们希望有效地传输信息。从工程的观点看,一则消息中的信息量和传输此消息所需要的时间成正比。这表明传输确定性比较大(出现概率大)的消息所用的时间比传输较小概率的消息所需时间短。早在信息论研究之前,人们为了有效地传输报文,对莫尔斯电码传送英文字母符号时就有此考虑。把字母出现的概率较大的用较短的码来传送,如字母 e 出现的概率是 $P = 0.105$, 用一个小点“.”来表示,字母 t ($P = 0.072$) 用“—”短划来表示。而概率出现较小的字母如 Q ($P = 0.0001$) 用“——.—”来表示。字母 J ($P = 0.0001$) 用“·———”来表示。当然早期的莫尔斯电码由于没有信息论的理论指导,有的字母的电码并不一定是恰当的。

下面来说明传送概率为 P 的一个符号(或消息)所需最短时间确实和 $\log \frac{1}{P}$ 成正比。

首先,假设 a 和 b 是等概率的消息,目前需要传送其中的一个,它可以是“晴”和“雨”这类气象消息。可采用二进制脉冲来传送这两个消息,用无脉冲代表消息 a (晴),有脉冲代表消息 b (雨)。显然至少需要用一个二进制脉冲来传送两个等概率消息中的任何一个,信息的单位为 bit。显然,一个二进制脉冲能够传送 1 bit 信息。

考虑有 4 个等概率消息的情况。如果这些消息由二进制脉冲传送,则每个消息需要两个二进制脉冲组成一个码组。每个二进制脉冲能取两种状态,因此两个脉冲的组合构成四种不同的码组分别表示四个消息。于是需要两个二进制脉冲来传送四个等概率消息中的任何一个,每个这样的消息占据的时间为传送两条等概率消息之一所需时间的两倍。因此它包含两倍的信息,即 2 bit。通常, n 个等概率消息之一包含 $\log_2 n$ bit 信息。至少需要 $\log_2 n$ 个二进制脉冲来传送这样一个消息。这些事件中任一个发生的概率 $P = \frac{1}{n}$ 。因此

$$I = \log_2 n = \log_2 \frac{1}{P} \quad (0.2.1)$$

由此讨论看出,一个信息的信息量度(以 bit 为单位)等于信息编码所需的最小二进制脉冲数目。

信息量公式中对数的底数常取为 2, 单位是 bit。也有以 e 或 10 为底数的, 信息量单位名称也不同, 但它们之间可以转换。

表面上看, 上面的定义似乎很有局限性, 它仅适合于离散性质的消息。但是信息论有一个重要的结论: 就是任何形式的待传输的消息, 总可以用二进制形式来表示而不失其主要内容。下面将会讨论到: 对于频带有限的连续信号, 可以用每秒若干个离散的抽样值来表示。而这些抽样值又可以用二进制码组来表示。由于噪声或者接收者能力有限, 即抽样值的精度是有限的, 所以用二进制码组表示的码组长度也是有限的。

§ 0.3 信号的描述及其分类

本书研究的信号主要是电信号, 简称信号。信息借助于信号才能传送、交换、存贮和提取。所以在信息系统中信号是一个重要的客体。一方面信号包含着信息; 另一方面由于系统是传输、变换和处理信号, 其特性应与信号有关。因此必须透彻地了解和研究信号的各种属性。

研究信号的信号理论涉及面很广, 内容十分丰富。从大的方面来说, 可以分为两部分: 一是信号分析, 研究信号的解析表示、信号有用性能的数值特征、信号的变换和处理等。二是信号的综合, 讨论满足系统给定的要求来设计或选择信号的最佳形式。信号分析与信号综合两个方面有区别, 但又是互相联系的。信号分析是综合的基础, 本书重点讨论信号的分析。

电信号一般是指随时间变化的电压或电流。描述信号的基本方法是写出它的时域解析表示式或绘出信号波形。除了表示式与波形两种直观的描述方法之外, 还用频谱分析或其他正交变换的方式来描述信号。

信号的形式是多种多样的。对于各种信号可以从不同的角度进行分类, 且常与系统有关。

1. 按照信号自变量 t 的取值特点, 将信号分成连续时间信号与离散时间信号两种。对于任意时间值(除若干不连续点之外)都可给出确定的函数值, 这样的信号称为连续时间信号, 如正弦波或矩形脉冲等。在时间上离散的信号, 即只在某些不连续的瞬时给出函数值, 这样的信号称为离散时间信号。以后将会看到, 在某种条件下, 连续时间信号与离散时间信号之间可以转换。

2. 按照信号是否存在随机性的特点, 将信号分成确定信号与随机信号。如果信号仅为时间函数, 且它的所有参量都确知, 即对于给定的某一时刻可确定相应的函数值, 这样的信号称为确定信号。而随机信号则是给定的某个时刻, 信号的值具有不可预知的不确定性。

3. 按照信号幅度取值的特点, 将信号分成模拟信号与数字信号。信号的幅度是连续取值的称为模拟信号。而信号的幅度只能取某个量值的整数倍的信号称为数字信号。

此外根据信号能量的特点, 可将信号分成能量型信号和功率型信号。能量型信号的持续时间不管有限还是无限, 信号的能量是有限的。功率型信号是持续时间无限, 能量也无限, 但其时间平均值是有限的信号。根据信号的重复性特点, 可将信号分成周期信号与非周期信号。这些类型的信号将在以后各章中分析它们的特点。

我们研究信号四个方面的特性: (1) 频谱特性, 它表明信号占有的频带。(2) 时间特

性。(3) 信息特性, 它表示信号的信息含量。(4) 能量特性, 它表明信号的能量或功率。它们分别从频域、时域、信息和能量四个不同的角度对信号进行描述。而且它们各有意义, 同时又存在密切的联系。

§ 0.4 系统的分类及其分析方法

信息的交换、传送、存贮和提取是借助于信号通过各种各样的系统(物理设备)进行的。系统完成对信号的传输、存贮和处理。信号对系统的输入称为激励、信号从系统中输出称为响应。系统的输入、输出之间的关系可由系统的数学模型来给定。可以用不同的数学模型把系统划分为不同的类型。

一、连续时间系统和离散时间系统

如果系统的输入、输出都定义在所有时间上, 称这样的系统为连续时间系统。例如由 R 、 L 、 C 组成的系统就是连续时间系统。还有另外一种系统, 与它有关的信号只在离散的瞬间变化, 这种系统称为离散时间系统。

二、线性系统和非线性系统

线性系统是输入、输出关系满足线性条件的系统。即若系统的输入为 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 其相应的输出为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$, 如果满足

$$\alpha x_1(t) + \beta x_2(t) \rightarrow \alpha y_1(t) + \beta y_2(t) \quad (0.4.1)$$

的线性性质(叠加性及均匀性), 则称为线性系统。它可以是连续时间系统, 也可以是离散时间系统。不具备上述性质的系统称为非线性系统。

三、时不变系统和时变系统

如果系统的参量不随时间而变化, 则称为时不变系统。如果参量随时间而改变, 则称为时变系统(变参系统)。对于时不变系统, 若输入为 $x(t)$, 输出为 $y(t)$, 那么当输入延迟为 $x(t-T)$ 时, 输出是 $y(t-T)$, 而 T 是某一延迟时间。

系统是否线性和是否时不变是两个独立的概念。线性系统可以是时不变的或者是时变的。

四、因果系统和非因果系统

凡是系统的响应出现在激励时刻之后的系统称为因果系统或物理可实现系统。如果系统对冲激信号 $\delta(t)$ 的响应是 $h(t)$, 那么系统为因果的充要条件对于连续时间系统是

$$h(t) = 0 \quad t < 0 \quad (0.4.2)$$

此外, 系统尚可分成集总参数系统和分布参数系统、即时系统和动态系统、多输入多输出系统等等。

不同的系统以不同的数学模型来描述, 连续时间系统用微分方程来描述, 离散时间系统用差分方程来描述, 线性系统用线性方程(组)来描述, 非线性系统则用非线性方程(组)来描述, 时不变系统用常系数方程(微分方程和差分方程)来描述, 时变系统用变系数方程来

描述。

系统分析就是通过系统方程确定在激励后的输出响应。

在近代信号和系统理论中系统分析包含两个方面的内容：一方面是研究确定信号(包括连续时间信号和离散时间信号)通过系统(包括线性系统 and 非线性系统)的分析方法。另一方面是研究随机信号通过系统的分析方法。

在建立系统模型方面，信号通过线性系统的分析方法又可分为两大类：一是输入-输出分析法，二是状态变量分析法。

输入-输出分析法着眼于系统的响应与激励的关系。并不关心系统内部变量的情况。对于实际工程中大量遇到的单输入、单输出系统应用这种方法较为方便。一般来说，描述线性时不变系统输入-输出关系是常系数线性微分方程或差分方程。

状态变量分析法除了要考虑输入和输出变量之外，还要考虑系统内部变量。所以这种方法不仅揭示了激励和响应的关系，而且揭示了系统的内部情况。这种方法对于研究多输入、多输出系统，特别是现代控制系统很方便。

需要指出的是输入-输出法和状态变量法对系统的分析没有本质的区别，只是状态变量法把系统内部变量与激励和响应的关系鲜明地揭示出来，而在输入-输出法中这些关系是隐含在分析过程之中。这两种方法各有其特点和适用范围。

从系统的求解方法讲，信号通过线性系统的分析方法又可分为时域分析法和变换域法两大类。

时域分析法以时间变量 t 或离散时间变量 n 作为自变量研究系统的时间响应特性，在线性系统时域分析中，卷积方法非常重要。它为分析线性系统提供了简单而有效的方法。

变换域分析法是将信号与系统模型的时间变量函数变换成相应的变换域的某种变量函数。例如傅里叶变换以频率为独立变量，以频域特性为主要研究对象。而拉氏变换和 Z 变换注意研究系统的极点和零点分布。利用 S 域和 Z 域的特性解释系统的现象和说明系统的特点(如系统的稳定性等)。变换域法可以将时域分析法中的微分、积分与卷积运算转化为代数运算。用这种方法解决实际问题有许多方便之处。

上面简述了线性系统的几种方法。不同类型的系统用不同的分析方法往往更为方便，但值得注意的是各类分析方法之间存在着内在的相互联系。例如，输入-输出法和状态变量法之间，傅里叶变换和拉氏变换之间，拉氏变换和 Z 变换之间， Z 变换与离散傅里叶变换之间以及时域方法与它们的变换域方法之间并没有本质的区别。它们之间的关系有的是属于同一问题的两个方面，有的是属于在一定条件下可以统一起来的同一个问题。

在信号与系统分析中，线性时不变系统分析的理论是极为重要的。因为许多实际系统常常可以近似为线性系统来分析，并且线性系统的分析已形成完整而严密的理论。本书着重讨论确定信号与随机信号通过线性时不变系统的时域与频域分析。

§ 0.5 信息传输系统概述

通信，一般地说乃是由一个地方向另一个地方传送消息，或者说由一个地方向另一个地方传输信息。通信的方式多种多样，其中利用电信号来运载信息的方式称为电信。它是传输信息的最有效的方式。这是由于利用电信号几乎能够在任意的距离上实现迅速有效

而准确可靠的信息传输。

通信中所传送的消息有各种不同的形式。例如为了传送未来天气情况的信息，可以通过广播、电视、电话和传真。总之消息可以用声音、图像、数据及图形等形式来表示。因而根据所传送消息的不同，在目前通信业务可分为电报、电话、传真及数据传输等等。但从广义的通信角度来看，广播、电视、雷达、导航、遥控遥测等也属于通信的范畴。这些系统统称为信息传输系统。

§ 0.5.1 信息传输系统模型

各种通信系统(包括广义的通信系统)，它们的具体设备、构造和业务功能会有所不同。然而经过抽象的概括，都可以用图 0.5.1 所示的模型来表示。它们的基本组成包括信源、信源变换器、发信变换器、信道、受信变换器、信宿变换器和信宿等。

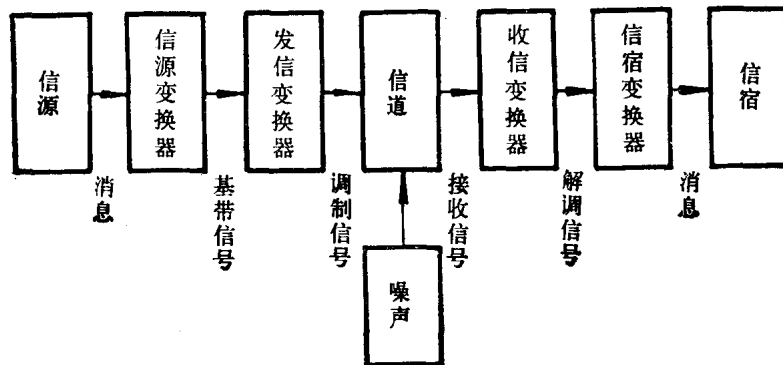


图 0.5.1 信息传输系统模型

信息源简称信源，是信息传输系统的起点。广播员讲话的声音是信源。雷达系统中目标反射电磁波，目标是信源。信源输出的是消息。消息是包含信息的语言、文字、符号数据等等，它一般不适宜于传输，需要经过变换才能传输。

信源变换器：要将消息变换成为适合信道传输的物理量后才能传输。这个变换过程一般又分为两种。第一种是信源变换，它将消息变成电信号。这一变换主要考虑信源的特性。利用声-电、光-电等变换器来实现消息到电信号的变换，即要与消息相匹配。但这样的信号还不完全适合于传输。例如话筒的输出为低频电流，而低频电流不能有效地辐射到空间去传输。这个信号也称基带信号。

信道变换器：为了使基带信号能有效地在相应的传输媒质(信道)中传输，需要通过信道变换器。如在无线电话通信中，把低频电流经过调制变换成高频电流，才能有效地通过空间传输。这个信号也称调制信号。这个变换主要是与信道的特性相匹配。

信道：信道是指发信端到受信端之间的传输媒质。它可以是一对导线、一条同轴电缆或光纤，也可以是辐射空间的一个频带。

受信变换器：信号经过信道，由发信端传输到受信端。为了得到它所携带的信息，受信端必须将信号恢复成消息，然后从消息中获知信息。这个变换是发信端变换的逆过程，受信变换器将调制信号变换成基带信号。这个过程通常称为解调。

信宿变换器：它是收信端的第二个变换过程，将基带信号变换成消息。对不同的消息相应采用不同的变换器如电-声、电-光变换器。

收信者又称信宿。它是信息传输系统的终端。

此外还要考虑通信系统内外各种噪声干扰的影响。这些噪声来自发信设备、信道与收信设备三个方面。图 0.5.1 中将其集中在一起并归结为由信道引入。之所以这样做是为了分析问题的方便。

必须指出，从消息的发送到消息的恢复，事实上并非只有以上的变换，系统里可能还有滤波器、放大器、天线等设备。但在研究信息传输系统时，以上这些设备的作用都认为是理想的，它们对信息信号的频谱不作改变，不影响对信息传输系统特点的讨论。

图 0.5.1 的模型不只是代表电信号的传输、任何其他信号形式的信息传输系统也可利用这个模型来表示。只不过其中信息信号不是电信号，而是其他形式的信号。如声音信号，光信号甚至机械位移等等。也就是说这个模型概括地反映各种不同信号形式的信息传输系统的共性。

§ 0.5.2 数字通信系统模型

现代通信中，数字通信所占的比重与适用范围越来越多，并构成通信网。但是点对点的通信是组成任何形式数字通信系统的基础。这里介绍点对点单向数字通信系统的结构。这是一般信息传输系统的一个具体系统的例子。其模型如图 0.5.2 所示。

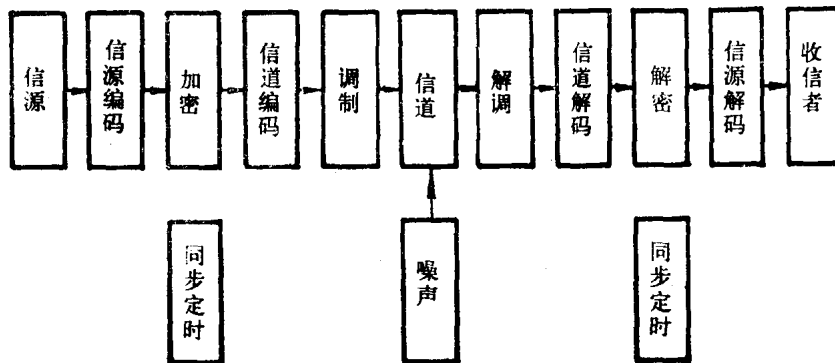


图 0.5.2 点对点单向数字通信系统模型

点对点单向数字通信系统中，发信端起点是信息源。信息源除了离散的数字信源，也可以是连续模拟信源。对后者必须将其数字化后才能采用数字通信的手段。即使已经是数字化的信源，为了适合传输的某些要求，如为了提高数字信号传输的有效性也要求变换为恰当的数字信号。因此，信源发生的信号要经过编码。此外为了达到保密的目的，可以对信源编码器的输出进行人为“置乱”，这一过程称为加密。这些都由信源编码器来完成。它相当于一般信息传输系统中的信源变换器。

在信源编码器输出的数字信号进入信道前，须经过信道编码器。除了与信道特性配合的需要必须变换频带、进行调制外，信道编码器还要有纠错编码的功能。这是由于信号在传输过程中，必定会受到噪声干扰，而使收信端的信号畸变而出现差错。为了减少传输中引起

的差错,提高传输的可靠性,必须采取抗干扰措施,即所谓纠错编码。这一部分相当于一般信息传输系统中的信道变换器。

调制信号进入信道,在信道中会叠加上噪声干扰,所以接收到的是信号与噪声的混合。因此在收信端与发信端相对应,设有信道解码器(解调与纠错解码)和信源解码器(解密和码的变换等)。

同步定时:发信端发出的数字信号是按一定的时间间隔逐个传输,并且在传输中会产生波形失真和受到噪声的影响。到达收信端时的波形总是变了样。因此对接收到的信号进行适当的处理后,必须按与发信端相同的时间间隔选择最佳时刻来逐个判定收到的一个个信号。这一判定时间的选择称为“比特同步”或“码元同步”。在数字多路通信中,常要把多路信号合并后传输,只有正确区分各个码组的起始时刻才能恢复各路原始信号,这一分组时刻的确定称为“帧同步”、“群同步”或“码组同步”。此外在数字通信网中,必须保持通信网内各地时钟一致,才能实现信息的正确传输,这称为“网同步”。以上三者统称为“同步定时”。

习 题

0.1 设英文字母 E 的出现概率为 $P = 0.105$, X 出现的概率为 $P = 0.002$ 。试求出现字母 E 与 X 的信息量。

0.2 在 M 个符号等概率时,发送每个符号的信息量为 $I = \log_2 M$ (bit)。当 M 个符号的出现为非等概率时,设相应的出现概率为 P_1, P_2, \dots, P_M , 且各个符号出现前后独立。求证此时每个符号所含信息量的统计平均值 H 为

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

0.3 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 代表 A , 01 代表 B , 10 代表 C , 11 代表 D 。每个脉冲宽度 $\tau = 5 \text{ ms}$ 。

(1) 不同字母等概率出现,试计算传输平均信息速率。

(2) 若每个字母出现的可能性分别为 $P_A = \frac{1}{5}$, $P_B = \frac{1}{4}$, $P_C = \frac{1}{4}$, $P_D = \frac{3}{10}$ 。试计算传输平均信息量。

0.4 设一信息源的输出由 128 个不同的符号组成。其中 16 个符号出现的概率为 $P = \frac{1}{32}$ 。其余 112 个符号出现的概率为 $P = \frac{1}{224}$ 。信息源每秒发出 1000 个符号,且每个符号独立出现,试计算该信息源的平均信息速率。

0.5 已知家用电表由 4 位十进制数字表示,试计算电表读数所需信息量。