



高等学校 规划教材
工科电子类

通信原理

(第4版)

樊昌信 詹道庸 徐炳祥 吴成柯



国防工业出版社

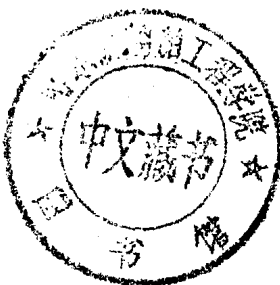
TN91
F07
(4)

435508

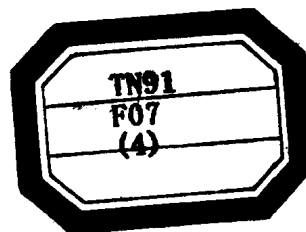
通信原理

(第4版)

樊昌信 詹道庸 徐炳祥 吴成柯



00436508



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/樊昌信等编. - 4 版. - 北京:国防工业出版社, 1995(1999.7 重印)

ISBN 7-118-01429-X

I. 通… II. 樊… III. 通信-基础理论 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01860 号

DR 96/20

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 27 625 千字

1995 年 10 月第 4 版 1999 年 7 月北京第 15 次印刷

印数:103001—113000 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

目 录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 通信系统的组成	1
1.3 通信系统的分类及通信方式	4
1.4 信息及其度量	6
1.5 主要性能指标	9
思考题	11
习题	11
第二章 随机信号分析	13
2.1 引言	13
2.2 随机过程的一般表述	13
2.3 平稳随机过程	15
2.4 平稳随机过程的相关函数与功率谱密度	16
2.5 高斯过程	19
2.6 窄带随机过程	22
2.7 正弦波加窄带高斯过程	26
2.8 随机过程通过线性系统	28
思考题	31
习题	31
第三章 信道	34
3.1 引言	34
3.2 信道定义	34
3.3 信道数学模型	35
3.4 恒参信道举例	37
3.5 恒参信道特性及其对信号传输的影响	42
3.6 随参信道举例	44
3.7 随参信道特性及其对信号传输的影响	48
3.8 随参信道特性的改善——分集接收	51
3.9 信道的加性噪声	53
3.10 信道容量的概念	56
思考题	60
习题	60
第四章 模拟调制系统	63
4.1 引言	63

4.2	幅度调制的原理及抗噪声性能	63
4.3	非线性调制(角度调制)的原理及抗噪声性能	75
4.4	各种模拟调制系统的比较	81
4.5	频分复用(FDM)	83
4.6	复合调制及多级调制的概念	85
	思考题	85
	习题	86
第五章	数字基带传输系统	90
5.1	引言	90
5.2	数字基带信号及其频谱特性	91
5.3	基带传输的常用码型	97
5.4	基带脉冲传输与码间干扰	100
5.5	无码间干扰的基带传输特性	102
5.6	部分响应系统	107
5.7	无码间干扰基带系统的抗噪声性能	112
5.8	眼图	114
5.9	时域均衡	116
	思考题	123
	习题	123
第六章	数字调制系统	129
6.1	引言	129
6.2	二进制数字调制原理	130
6.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能	141
6.4	二进制数字调制系统的性能比较	155
6.5	多进制数字调制系统	156
6.6	改进的数字调制方式	175
	思考题	183
	习题	184
第七章	模拟信号的数字传输	187
7.1	引言	187
7.2	抽样定理	187
7.3	脉冲振幅调制(PAM)	193
7.4	模拟信号的量化	196
7.5	脉冲编码调制(PCM)	207
7.6	增量调制(ΔM 或 DM)	217
7.7	PCM 和 ΔM 的性能比较	222
7.8	增量(差分)脉冲编码调制(DPCM)系统	223
7.9	时分复用和多路数字电话系统	225
7.10	语音和图象的压缩编码	230

思考题	234
习题	234
第八章 数字信号的最佳接收	237
8.1 引言	237
8.2 数字信号接收的统计表述	237
8.3 关于最佳接收的准则	239
8.4 确知信号的最佳接收	241
8.5 随相信号的最佳接收	250
8.6 起伏信号的最佳接收	256
8.7 实际接收机与最佳接收机的性能比较	258
8.8 匹配滤波器	259
8.9 基带系统的最佳化	271
思考题	275
习题	276
第九章 差错控制编码	279
9.1 引言	279
9.2 纠错编码的基本原理	281
9.3 常用的简单编码	284
9.4 线性分组码	286
9.5 循环码	291
9.6 卷积码	301
9.7 编码调制	311
思考题	315
习题	316
第十章 正交编码与伪随机序列	319
10.1 引言	319
10.2 正交编码	319
10.3 伪随机序列	323
10.4 伪随机序列的应用	335
思考题	344
习题	345
第十一章 同步原理	346
11.1 引言	346
11.2 载波同步的方法	346
11.3 载波同步系统的性能	352
11.4 载波相位误差对解调性能的影响	354
11.5 位同步的方法	355
11.6 位同步系统的性能及其相位误差对性能的影响	363
11.7 群同步	366

11.8 扩展频谱系统同步.....	374
11.9 网同步的基本概念.....	378
思考题	382
习题	382
第十二章 通信网	385
12.1 引言.....	385
12.2 通信网的基本原理.....	385
12.3 数据通信网.....	396
12.4 综合业务数字网(ISDN)	402
思考题	406
附录 A PCM 量化误差功率谱公式的证明	407
附录 B Q 函数和误差函数	411
附录 C 英文缩写名词对照表	413
附录 D 部分习题答案	415
参考资料.....	421

第一章 绪 论

1.1 引 言

通信按照传统的理解就是信息的传输与交换。在当今信息社会,通信则与传感、计算技术紧密结合,成为整个社会的高级“神经中枢”。没有通信,人类社会是不可想象的。一般来说,社会生产力水平要求社会通信水平与之相适应。若通信的水平跟不上,社会成员之间的合作程度就受到限制,社会生产力的发展也必然最终地受到限制。可见,通信是十分重要的。

本教材讨论信息的传输、交换及通信网的基本原理,但侧重信息传输原理。为了方便起见,在深入讨论上述内容之前,先简要讨论通信系统的有关基础知识。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统模型

通信的目的是传递消息。消息具有不同的形式,例如:符号、文字、语声、音乐、数据、图片、活动图象等等。因而,根据所传递消息的不同,目前通信业务可分为电报、电话、传真、数据传输及可视电话等。如果从广义的角度看,则广播、电视、雷达、导航、遥测遥控等也可列入通信的范畴。

实际上,基本的点对点通信,均是把发送端的消息传递到接收端。因而,这种通信系统可由图 1-1 中模型加以概括。图中,信息源(也称发终端)的作用是把各种可能消息转换成

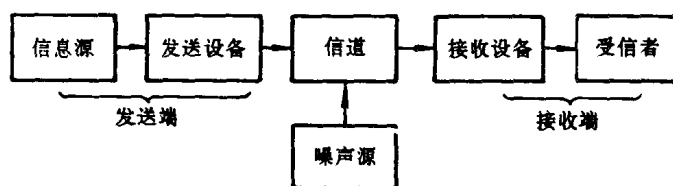


图 1-1 通信系统的模型

原始电信号。为了使这个原始信号适合在信道中传输,由发送设备对原始信号完成某种变换,然后再送入信道。信道是指信号传输的通道。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号,而受信者(也称信息宿或收终端)是将复原的原始信号转换成相应的消息。图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示。

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及所关心的问题不同,将会使用不同形式的较具体的通信系统模型。通信原理的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

1.2.2 模拟通信与数字通信系统模型

如上所述,通信传输的消息是多种多样的,可以是符号、文字、语声、图象等等。各种不同的消息可以分成两类:一类称作离散消息;另一类称作连续消息。离散消息是指消息的状态是可数的或离散型的,比如符号、文字或数据等。离散消息也称为数字消息。而连续消息则是其状态连续变化的消息,例如,连续变化的语声、图象等。连续消息也称为模拟消息。

为了传递消息,各种消息需要转换成电信号。由图 1-1 的通信过程可知,消息与电信号之间必须建立单一的对应关系,否则在接收端就无法复制出原来的消息。通常,消息被载荷在电信号的某一参量上,如果电信号的该参量携带着离散消息,则该参量必将是离散取值的。这样的信号就称为数字信号。例如,电传机输出的信号就是数字信号。如果电信号的该参量连续取值,则称这样的信号为模拟信号。例如,普通电话机输出的信号就是模拟信号。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把通信系统分成两类:模拟通信系统和数字通信系统。

应当指出,我们也可以先把模拟信号变换成数字信号(这种变换称作模拟—数字变换),经数字通信方式传输后,在接收端再进行相反的变换(即数字—模拟变换),以还原出模拟信号。

自 1844 年 5 月 24 日莫尔斯(Morse)在华盛顿和巴尔的摩之间发送世界上第一份电报以来,电报通信已经经历了大约 150 年。但是长期以来,由于电报通信不如电话通信方便,作为数字通信主要形式的电报却比 1876 年贝尔(Behr)发明的电话发展缓慢。直到 20 世纪 60 年代以后,数字通信才日益兴旺起来,甚至目前出现了数字通信替代模拟通信的某种趋势。除了计算机的广泛应用需要传输大量数字信息的客观要求外,数字通信迅速发展基本原因是它与模拟通信相比,更能适应对通信技术越来越高的要求。第一,数字传输的抗干扰能力强,尤其在中继时,数字信号可以再生而消除噪声的积累;第二,传输差错可以控制,从而改善了传输质量;第三,便于使用现代数字信号处理技术来对数字信息进行处理;第四,数字信息易于作高保密性的加密处理;第五,数字通信可以综合传递各种消息,使通信系统功能增强。

模拟通信系统正如图 1-1 表明的那样,需要两种变换。首先,发送端的连续消息要变换成原始电信号,接收端收到的信号要反变换成原连续消息。这里所说的原始电信号,由于它通常具有频率很低的频谱分量,一般不宜直接传输。因此,模拟通信系统里常需要有第二种变换:将原始电信号变换成其频带适合信道传输的信号,并在接收端进行反变换。这种变换和反变换通常称为调制或解调。经过调制后的信号称为已调信号,它应有两个基本特性:一是携带有消息,二是适应在信道中传输。通常,我们将发送端调制前和接收端解调后的信号称为基带信号。因此,原始电信号又称基带信号,而已调信号则称为频带信号。

有必要指出,消息从发送端传递到接收端并非仅经过以上两种变换,系统里可能还有滤波、放大、变频、辐射等等过程。但本书只着重研究上述两种变换和反变换。其余过程被认为都是足够理想的,而不予讨论。

于是,一般的模拟通信系统模型可由图 1-1 略加改变而成,如图 1-2 所示。这里的调制器与解调器就代表图 1-1 中的发送设备与接收设备。

那么,数字通信系统的模型是怎样的呢?正如前面指出的,数字通信的基本特征是,它

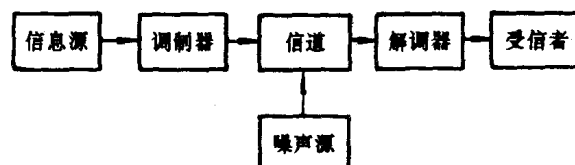


图 1-2 模拟通信系统模型

传输的信号是“离散”或“数字”的,从而使数字通信有许多特点。譬如,对于上面提到的第二个变换来说,在模拟通信中强调变换的线性特性,即强调已调参量与基带信号成比例;而在数字通信中,则强调已调参量与基带信号之间的一一对应性。

此外,数字通信还有以下突出的问题。第一,数字信号传输时,信道噪声或干扰所造成的差错,原则上都是可以控制的。这是通过差错控制编码等手段来实现的。为此,在发送端需要增加一个编码器,而在接收端相应地需要一个解码器。第二,当需要保密时,可以有效地对基带信号进行人为“搅乱”,即加上密码,这叫加密。此时,在接收端就需要进行解密。第三,由于数字通信传输的是一个接一个按节拍传送的数字信号单元,即码元,因而接收端必须按与发送端相同的节拍接收。不然,会因收发节拍不一致而造成混乱,使接收性能变坏。另外,为了表述消息内容,基带信号都是按消息内容进行编组的(相当于写文章要有标点符号那样)。因此,编组的规律在收发之间也必须一致,否则接收时消息的正确内容就无法恢复。在数字通信中,通常,称节拍一致为“位同步”或“码元同步”,而称编组一致为“群同步”、“帧同步”、“句同步”或“码组同步”。可见,数字通信还必须有一个同步问题。

综上所述,点对点的数字通信系统模型一般地可用图 1-3(a)表示。图中,同步环节没有示出,因它的位置往往不是固定的。当然,实际上的数字通信系统并非一定要如图 1-3(a)所示的那样包括所有的环节。比如,调制与解调、加密与解密、编码与解码等环节究竟采用与否,还取决于具体设计方法及要求。例如,在本书中将要详细讨论的数字基带传输系统,它的模型就不包括调制与解调环节,如图 1-3(b)所示。另外,数字通信系统传送的消息一般都是离散型的,但也可以是连续型的。倘若需要在数字通信系统中传送模拟消息,

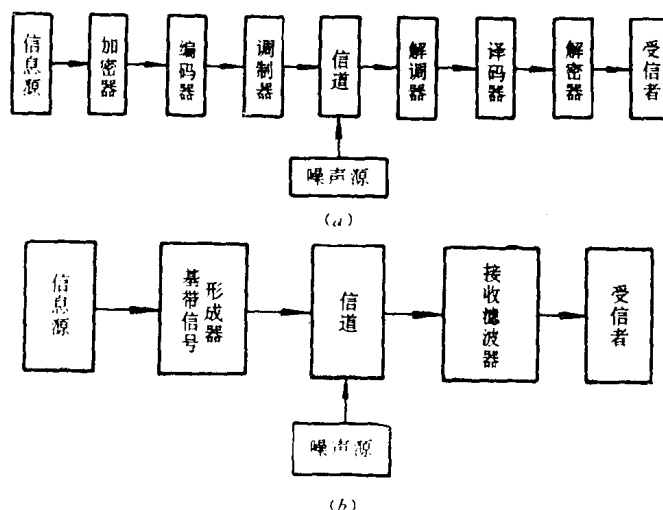


图 1-3 数字通信系统模型

则在发送端的信息源中应包括一个模—数转换装置,而在接收端的受信者中应包括一个数—模转换装置。

一般来说,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带而换得的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽,而一路传输质量相同的数字电话则可能要占用数十千赫的带宽。在系统频带紧张场合,数字通信的这一缺点显得很突出。但是在系统频带富裕的场合,比如毫米波通信、光通信等场合,数字通信几乎成了唯一的选择。考虑到现有大量模拟通信系统这一事实,目前还常常需要利用它来传输数字信号。这就需要对其作些改造,或者加装数字终端设备。

1.3 通信系统的分类及通信方式

为了便于今后的讲述,本节把常见的通信系统和通信方式作一综合介绍。

1.3.1 通信系统分类

通信系统有不同分类方法。这里从通信系统模型的角度讨论其分类。

1. 按消息的物理特征分类

根据消息的物理特征的不同,通信系统可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图象通信系统等。由于电话通信网最为发达普及,因而其他消息常常通过公共的电话通信网传送。例如,电报常通过电话信道传送。又如,随着电子计算机发展而迅速增长起来的数据通信,在远距离传输数据时也常常利用电话信道传送。在综合业务通信网中,各种类型的消息都在统一的通信网中传送。

2. 按调制方式分类

前面已经指出,根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话;频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多,常见的一些如表 1-1 所列。

表 1-1 常用调制方式及用途

调制方式			用途举例
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		单边带调制 SSB	载波通信、短波无线电通信
		双边带调制 DSB	立体声广播
		残留边带调制 VSB	电视广播、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
		频移键控 FSK	数据传输
		相移键控 PSK、DPSK	数据传输
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信

(续)

调制方式			用途举例
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	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	市话中继线、卫星、空间通信
		增量调制 DM(ΔM)	军用、民用数字电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图象编码
		其他编码方式 ADPCM 等	中速数字电话

3. 按信号特征分类

前面已经指出,按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把通信系统分成模拟通信系统与数字通信系统两类。

4. 按传输媒介分类

按传输媒介,通信系统可分为有线(包括光纤)和无线两类。

5. 按信号复用方式分类

传送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。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围;时分复用是用抽样或脉冲调制方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用则是用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号。

传统的模拟通信中大都采用频分复用。随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用愈来愈广泛。码分复用多用于空间扩频通信系统中;目前又开始用于移动通信系统中。

1.3.2 通信方式

对于点与点之间的通信,按消息传送的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种。

所谓单工通信,是指消息只能单方向传输的工作方式,如图 1-4(a)所示。例如遥测、遥控,就是单工通信方式。

所谓半双工通信,是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收发的工作方式,如图 1-4(b)所示。例如,使用同一载频工作的无线电对讲机,就是按这种通信方式工作的。

所谓全双工通信,是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式,如图 1-4(c)所示。例如,普通电话就是一种最常见的全双工通信方式。

在数字通信中,按照数字信号码元排列方法不同,有串序传输与并序传输之分。

所谓串序传输,是将数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输,如图 1-5(a)所示。如果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,则称为并序传输,如图 1-5(b)所示。

一般的远距离数字通信大都采用串序传输方式,因为这种方式只需占用一条通路。并序传输在近距离数字通信中有时也会遇到,它需要占用两条或两条以上的通路,比如,使用多条导线传输。

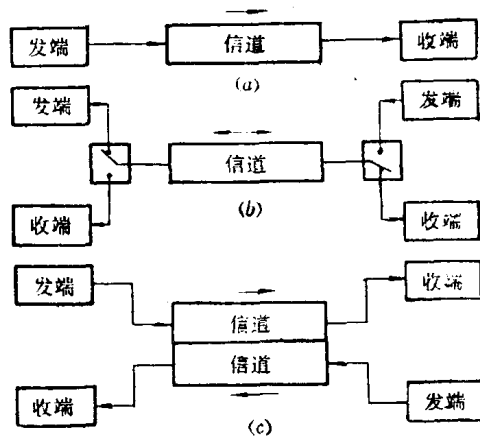


图 1-4 通信方式示意图

(a) 单工通信方式; (b) 半双工通信方式; (c) 全双工通信方式。

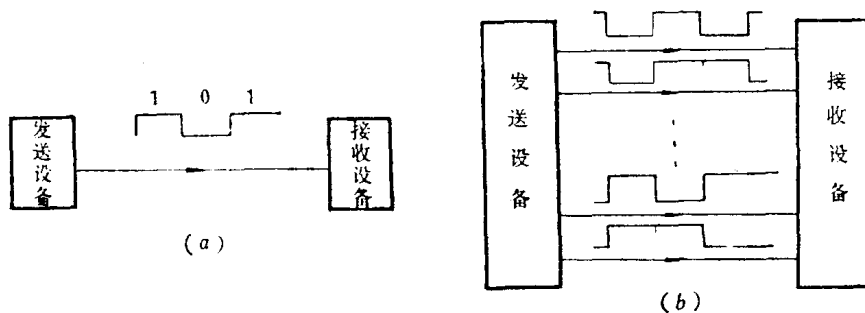


图 1-5 串序和并序传输方式

(a) 串序传输; (b) 并序传输。

实际的通信系统分为专线和通信网两类。点与点的通信是专线通信, 多点间的通信属网通信。网通信的基础仍是点与点的通信。因此, 本书重点讨论点与点通信的原理。

1.4 信息及其度量

通信的目的在于传递信息。为了便于今后对通信系统的主要性能作定量的分析, 对信息这个术语的含义以及它的定量描述作扼要的讨论是十分必要的。

信息一词在概念上与消息的意义相似, 但它的含义却更普遍化、抽象化。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容。这就是说, 不同形式的消息, 可以包含相同的信息。例如, 分别用语音和文字发送的天气预报, 所含信息内容相同。如同运输货物多少采用“货运量”来衡量一样, 传输信息的多少使用“信息量”去衡量。现在的问题是信息如何度量。

已经指出, 消息是多种多样的。因此度量消息中所含的信息量的方法, 必须能够用来度量任何消息的信息量, 而和消息种类无关。另外, 消息中所含信息量的多少也应和消息

的重要程度无关。

在一切有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对于接收者而言,某些消息比另外一些消息却含有更多的信息。例如,若一方告诉另一方一件非常可能发生的事件:“今年冬天的气候要比去年冬天的更冷些”,比起告诉另一方一件很不可能发生的事件:“今年冬天的气候将与去年夏天的一样热”来说,前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为在接收者看来,前一事件很可能发生,不足为奇,但后一事件却极难发生,听后使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义。而且,我们可以看出,对接收者来说,事件愈不可能,愈是使人感到意外和惊奇,信息量就愈大。

概率论告诉我们,事件的不确定程度,可以用其出现的概率来描述。亦即事件出现的可能性愈小,则概率就愈小;反之,则概率就愈大。据于这种认识,我们得到: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),则它传递的信息量应为零;如果事件是不可能的(概率为0),则它将有无穷的信息量。如果我们得到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的信息量,就是若干个独立事件的信息量的总和。

综上所述可以看出,为了计算信息量,消息中所含的信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 间的关系式应当反映如下规律:

(1)消息中所含的信息量 I 是出现该消息的概率 $P(x)$ 的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1.4-1)$$

(2)消息的出现概率愈小,它所含的信息量愈大;反之信息量愈小,且当 $P(x)=1$ 时, $I=0$ 。

(3)若干个互相独立事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[p(x_1)p(x_2)\cdots] = I[p(x_1)] + I[p(x_2)] + \cdots \quad (1.4-2)$$

不难看出,若 I 与 $p(x)$ 间的关系式为

$$I = \log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x) \quad (1.4-3)$$

就可满足上述要求。

信息量的单位的确定取决于上式中对数底 a 的确定。如果取对数的底 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit);如果取 e 为对数的底,则信息量的单位为奈特(nit);若取 10 为底,则信息量的单位称为十进制单位,或叫哈特莱。上述三种单位的使用场合,应根据计算及使用的方便来决定。通常广泛使用的单位为比特。

下面我们先来讨论等概率出现的离散消息的度量。若需要传递的离散消息是在 M 个消息之中独立地选择其一,且认为每一消息的出现概率是相同的。显然,为了传递一个消息,只需采用一个 M 进制的波形来传送。也就是说,传送 M 个消息之一这样一件事与传送 M 进制波形之一是完全等价的。 M 进制中最简单的情况是 $M=2$,即二进制,而且,任意一个 M 进制波形总可用若干个二进制波形来表示。因此,用“ $M=2$ ”时的波形定义信息量是恰当的。我们定义传送两个等概的二进制波形之一的信息量为 1,单位为“比特”。该定义就意味着式(1.4-3)变为

$$I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{2}} = \log_2 2 = 1(\text{bit}) \quad (1.4-4)$$

这里选择的对数是以 2 为底,在数学运算上这也是方便的。同时,在数字通信中,由于常以二进制传输方式为主,因而这也是恰当的。按式(1.4-4)的定义,对于 $M > 2$,则传送每一波形的信息量应为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M (\text{bit}) \quad (1.4-5)$$

若 M 是 2 的整幂次,比如 $M = 2^K (K=1, 2, 3, \dots)$,则式(1.4-5)可改写成

$$I = \log_2 2^K = K (\text{bit}) \quad (1.4-6)$$

式(1.4-6)表明, $M (M = 2^K)$ 进制的每一波形包含的信息量,恰好是二进制每一波形包含信息量的 K 倍。由于 K 就是每一个 M 进制波形用二进制波形表示时所需的波形数目,故传送每一个 $M (M = 2^K)$ 进制波形的信息量就等于用二进制波形表示该波形所需的波形数目 K 。

综上所述,只要在接收者看来每一传送波形是独立等概出现的,则一个波形所能传递的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} \quad (\text{bit}) \quad (1.4-7)$$

或

$$I = \log_2 M \quad (\text{bit}) \quad (1.4-8)$$

式中 M ——传送的波形数;

P ——每一波形出现的概率。

但应强调指出,上述结论仅在每一波形独立等概传送的条件下才是成立的。

现在我们来考察非等概的情况。设离散信息源是一个由 n 个符号组成的集合,称符号集。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

$$\left\{ \begin{array}{cccc} x_1, & x_2, & \dots, & x_n \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_n) \end{array} \right\}, \text{且有 } \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$ 。于是,每个符号所含信息量的统计平均值,即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[-\log_2 P(x_1)] + P(x_2)[-\log_2 P(x_2)] + \dots + P(x_n)[-\log_2 P(x_n)] \\ &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned} \quad (1.4-9)$$

由于 H 同热力学中的熵形式相似,故通常又称它为信息源的熵,其单位为 bit/符号。显然,当 $P(x_i) = 1/n$ (等概条件时的概率值)时,式(1.4-9)即成为式(1.4-8)。用平均信息量来计算消息的信息量是很有用的。

[例 1.4.1] 一信息源由 4 个符号 0、1、2、3 组成,它们出现的概率分别为 $3/8$ 、 $1/4$ 、 $1/4$ 、 $1/8$,且每个符号的出现都是独立的。试求某个消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

在此消息中,0 出现 23 次,1 出现 14 次,2 出现 13 次,3 出现 7 次,消息共有 57 个符号。其中出现 0 的信息量为 $23 \log_2 8/3 = 33 \text{bit}$,出现 1 的信息量为 $14 \log_2 4 = 28 \text{bit}$,出现 2 的信息量为 $13 \log_2 4 = 26 \text{bit}$,出现 3 的信息量为 $7 \log_2 8 = 21 \text{bit}$,故该消息的信息量为

$$I = 33 + 28 + 26 + 21 = 108 \text{ bit}$$

平均(算术平均)一个符号的信息量应为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{108}{57} = 1.89 \text{ bit/符号}$$

若用熵的概念计算,根据式(1.4-9)有

$$\begin{aligned} H &= -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\ &= 1.906 \text{ bit/符号} \end{aligned}$$

则该消息所含信息量为

$$I = 57 \times 1.906 \approx 108.64 \text{ bit}$$

以上两个结果略有差别的原因在于,它们平均处理方法不同。前一种按算术平均的方法,结果可能存在误差。这种误差将随消息中符号数的增加而减小。

顺便指出,根据式(1.4-9)可知,不同的离散信息源可能有不同的熵值。无疑,我们期望熵值愈大愈好。可以证明^[2],在式(1.4-9)成立的条件下,信息源的最大熵,发生在每一符号等概率出现时,即 $P(x_i) = 1/n, i = 1, 2, \dots, n$, 而最大熵值等于 $\log_2 n$ (bit/符号)。

以上我们讨论了离散消息的度量。同样,关于连续消息的信息量可用概率密度来描述。可以证明,连续消息的平均信息量(相对熵)为

$$H_1(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_e f(x) dx \quad (1.4-10)$$

式中 $f(x)$ ——连续消息出现的概率密度。

关于信息量的进一步讨论,限于篇幅这里就不再进行了。有兴趣的读者,可参考信息论有关专著^{[2],[3]}。

1.5 主要性能指标

在设计或评述通信系统时,往往要涉及通信系统的主要性能指标,否则就无法衡量其质量的优劣。性能指标也称质量指标,它们是对整个系统综合提出或规定的。

通信系统的性能指标涉及其有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等等。如果考虑所有这些因素,那么通信系统的设计就要包括很多项目,系统性能的评述工作也就很难进行。不过,从辩证观点看,任何过程如果有多数矛盾的话,其中必定有一种是主要的,起着主导的、决定的作用,其他则处于次要和服从的地位。尽管对通信系统可有名目繁多的实际要求,但是,从研究消息的传输来说,通信的有效性与可靠性将是主要的矛盾所在。这里所说的有效性主要是指消息传输的“速度”问题,而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。显然,这是两个相互矛盾的问题,这对矛盾通常只能依据实际要求取得相对的统一。例如,在满足一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速度;或者,在维持一定有效性下,使消息传输质量尽可能地提高。

对于模拟通信系统来说,消息传输速度主要决定于消息所含的信息量和对连续消息(即信息源)的处理。处理的目的在于使单位时间内传输更多的消息。从信息论观点来说,消息传输速度可用单位时间内传送的信息量来衡量。模拟通信中还有一个重要性能指标,即均方误差。它是衡量发送的模拟信号与接收端复制的模拟信号之间误差程度的质量指