

通信原理

樊昌信 徐炳祥 詹道庸 吴成柯

国防工业出版社

内 容 简 介

本书是在1980、1984年出版的《通信原理》教材的基础上,根据教学改革实践的需要,本着“精选内容、逐步更新”的原则再次修订而成的。

本书讲述现代通信的基本原理,主要包括模拟通信和数字通信,而侧重于数字通信。全书共九章,可分为三个部分:第一部分(第1~4章)阐述通信基础知识及模拟通信原理;第二部分(第5~8章)主要论述数字通信及模拟信号数字化的基本原理;第三部分(第9章)讨论数字通信中的同步原理。各章均设有习题,书后并附有部分习题答案。书中讲述由浅入深,简明透彻,概念清楚,重点较为突出,更便于教学。

本书是全国高等院校工科电子类通信专业的统编教材,又可作为通信工程等广大科技人员的重要参考书。

通 信 原 理

樊昌信 徐炳祥 詹道庸 吴成柯

责任编辑 林秀权

*

国防工业出版社 出版、发行

(北京市车公庄西路老虎庙七号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张19¹/₄ 445千字

1988年12月第一版 1988年12月第一次印刷 印数: 00,001—10,080册

ISBN 7-118-00348-4/TN·66 定价: 3.85元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、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年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续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“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映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。广大编审者、各编审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、出版工作还会有缺点和不足之处，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

前 言

本教材系按电子工业部制定的工科电子类专业教材 1986~1990 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会通信编审小组征稿、推荐出版,责任编辑乐光新。

本教材由西安电子科技大学(原西北电讯工程学院)担任主编,北京邮电学院倪维桢担任主审。它是在国防工业出版社先后两次出版的《通信原理》基础上,根据编审小组新制订的编写大纲重新编写的。

本课程的参考学时数为 90 学时,其主要内容包括模拟通信和数字通信,但侧重数字通信。全书共九章,可分为三个部分。第一部分(第一至四章)阐述通信基础知识及模拟通信原理,其中第二章扼要介绍本书所需的随机信号与噪声分析的数学知识;第二部分(第五至八章)主要论述数字通信及模拟信号数字化的基本原理;第三部分(第九章)讨论数字通信中的同步原理。各章均设有习题,书后并附有部分习题答案。使用本教材时,可根据不同的教学要求灵活讲授。例如,只讲授模拟通信(第一部分)时,约需 30 学时;只讲授数字通信(第四章不讲)时,需要 80 学时左右。在实施过程中,尚需配合一定数量的示教和实验。

本教材由徐炳祥编写第一章至第六章及第八章,詹道庸编写第七章,吴成柯编写第九章,樊昌信统编全稿。参加审阅工作的还有蹇锡钧,曹志刚等同志,他们都为本书提出许多宝贵意见,这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
1.1 通信系统模型	1
1.2 通信的发展简史	2
1.3 模拟通信与数字通信	2
1.4 通信方式	5
1.5 信息及其量度	6
1.6 主要性能指标	9
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	29
2.9 输出信噪比最大的最佳线性滤波器 (匹配滤波器)	31
2.10 均方误差最小的最佳线性滤波器	36
习题	39
第三章 信道	42
3.1 引言	42
3.2 信道的定义	42
3.3 信道模型	43
3.4 恒参信道及其对信号传输的影响	45
3.5 随参信道及其对信号传输的影响	48
3.6 随参信道特性的改善 (分集接收)	51
3.7 加性噪声	52
3.8 信道容量的概念	56
习题	57
第四章 模拟调制系统	58
4.1 引言	58
4.2 幅度调制 (线性调制) 的概念	58
4.3 几种线性调制信号的产生与解调	59
4.4 频分复用 (FDM)	66
4.5 非线性调制 (角度调制) 的概念	67

4.6 宽带调频与窄带调频	68
4.7 调频信号的产生与解调	72
4.8 线性调制系统的抗噪声性能	74
4.9 调频系统的抗噪声性能	80
4.10 各种模拟调制系统的比较	86
4.11 复合调制及多级调制的概念	87
习题	88
第五章 数字基带传输系统	92
5.1 引言	92
5.2 数字基带信号	93
5.3 基带信号的频谱特性	94
5.4 基带传输的常用码型	99
5.5 基带脉冲传输与码间干扰	101
5.6 无码间干扰的基带传输特性	103
5.7 无码间干扰基带系统的抗噪声性能	108
5.8 眼图	110
5.9 时域均衡	112
5.10 部分响应系统	119
习题	124
第六章 数字调制系统	127
6.1 引言	127
6.2 二进制数字调制原理	127
6.3 二进制数字调制信号的频谱特性	135
6.4 二进制振幅键控 (2ASK) 系统的抗噪声性能	138
6.5 二进制移频键控 (2FSK) 系统的抗噪声性能	142
6.6 二进制移相键控及差分相位键控 (2PSK 及 2DPSK) 系统的抗噪声性能	145
6.7 二进制数字调制系统的性能比较	149
6.8 M 进制数字调制	150
6.9 多进制数字调制系统的性能	158
6.10 改进的数字调制方式	162
习题	169
第七章 模拟信号的数字传输	171
7.1 引言	171
7.2 抽样定理	171
7.3 脉冲振幅调制 (PAM)	177
7.4 模拟信号的量化	180
7.5 脉冲编码调制 (PCM)	191
7.6 增量调制 (ΔM)	201
7.7 PCM 和 ΔM 系统的性能比较	208
7.8 改进型增量调制	210
7.9 增量 (差分) 脉冲编码调制 (DPCM) 系统	213
7.10 时分复用和多路数字电话系统	215

习题	221
附录	222
第八章 数字信号的最佳接收	227
8.1 引言	227
8.2 数字信号接收的统计表述	227
8.3 关于最佳接收的准则	229
8.4 确知信号的最佳接收	231
8.5 随相信号的最佳接收	241
8.6 起伏信号的最佳接收	248
8.7 基带系统的最佳化	250
8.8 实际接收机与最佳接收机的性能比较	255
8.9 匹配滤波器的实现	256
习题	260
第九章 同步原理	262
9.1 引言	262
9.2 载波同步的方法	262
9.3 载波同步系统的性能	268
9.4 载波相位误差对解调性能的影响	270
9.5 位同步的方法	271
9.6 位同步系统的性能及其相位误差对性能的影响	280
9.7 群同步	282
习题	292
英文缩写名词对照表	294
部分习题答案	295
参考资料	300

第一章 绪 论

1.1 通信系统模型

在人类社会里，人们总是离不开消息的传递。古代的烽火台、金鼓、旌旗；当今的书信、电话、电报、传真、电视……等都是传递消息的方式。一般地说，通信乃是由一地向另一地传递消息。人类社会发展到今天，通信的方式是举不胜举的。

然而，随着社会生产力的发展，人们对传递消息的要求也越来越高。在各种各样的通信方式中，利用“电”来传递消息的通信方式（简称电通信）获得了非常广泛的发展。这是由于电通信方式能使消息几乎在任意的通信距离上实现既迅速、有效，而又准确、可靠传递的缘故。如今，在自然科学中，以致“通信”一词几乎变成了电通信的同义词。

电通信（以下简称通信）中所传递的消息，有各种不同的形式，例如：符号、文字、语声、音乐、数据、图片、活动画面等等。因而，根据所传递消息的不同，在目前通信业务上可分为电报、电话、传真、数据传输、可视电话等。如果从广义的角度来看，则广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也可列入通信的范畴。

按消息由一地向另一地传递媒质的不同，通信可分为两大类：一类称为有线通信，另一类称为无线通信。所谓有线通信，即消息传递是用导线作为传输媒质来完成的通信方式。这里的导线可以是架空明线、电缆、光缆及波导等。例如普通的有线长途电话系统可由图 1.1 来示意。图中，电话机完成语声与电的话音信号之间的变换，而载波机则完成话音信号与传输信号之间的变换。所谓无线通信，它不需架设线路而用无线电波在空间传播来传递消息。用于通话的无线通信系统示于图 1.2。图中，语声通过话筒变成电的话音信号，发射机及天线将话音信号转换成相应的高频辐射波，并发往另一地。另一地（称为接收端）通过接收机及扬声器完成与发送端相反的变换。

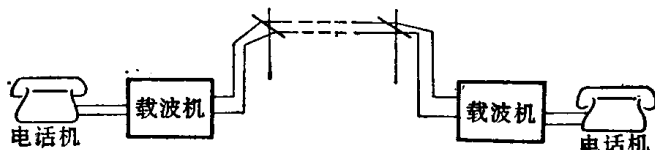


图1.1 有线长途电话系统示意图

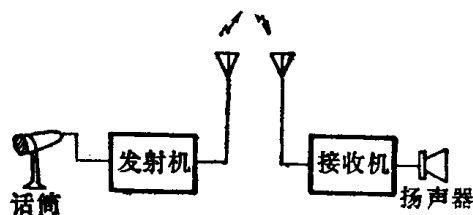


图1.2 无线电话系统示意图

实际上，无论何种点与点通信，均是把一地（发送端）的消息传递到另一地（接收端），因而，点与点通信系统可由图 1.3 加以概括。这里，信息源（也称发终端）的作用是把各种可能消息转换成原始电信号，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，它是指信号传输的通道（信道的概念以后还要专门讨论）。在接收端，接收设备的功能与发送设备的相反，它将从接收信号中恢复出相应的原始信号；而受信者（也称收终端）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它各处的噪声的集

中表示,这种表示并不影响通信中主要问题的讨论,反而对分析问题带来方便。

图 1.3 是通信系统的模型,它概括地反映了通信系统的共性。通常,根据我们的研究对象及所关心的问题不同,将会出现不同形式的较具体的通信系统模型。通信的原理或基本理论的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

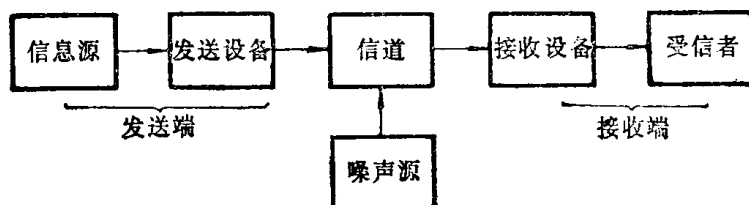


图1.3 通信系统的模型

1.2 通信的发展简史

从真正作为一种有实用意义的通信手段说来,电通信起源于十九世纪三十年代,以出现低级的有线电报通信方式作为标志。当然,电报通信方式的问世是完全建立在以往人们长期实践基础上的,当时已经积累了有关电学和磁学的丰富知识。十九世纪七十年代,又由于电磁感应理论的形成和发展,开始有了电话机,并开始形成了以金属导线作为传输媒质的简单的有线电话通信方式。不久,人们又发现了电磁波现象,于十九世纪末期人们发明了简单的无线电发送和接收装置,从而开辟了无线电通信发展的道路。二十世纪初,电子管等器件开始出现,从而使电报和电话通信获得了迅速的发展,相继有了较高水平的有线通信及长波、中波和短波一类的无线电通信。

由于社会对通信技术的需要越来越迫切,从而又大大推动了通信科学的发展。从二十世纪三十年代开始,尤其是五十年代之后,人们逐步地对通信实践中遇到的问题展开了深入的理论研究,并获得了可喜的进展。在通信理论上,先后形成了“过滤和预测理论”、“香农信息论”、“纠错编码理论”、“信源统计特性理论”、“信号与噪声理论”、“调制理论”、“信号检测理论”等等;在通信体制上,由于电子管的更加完善、晶体管的出现以及集成电路的问世,不仅更加促进像电话通信那样的模拟通信的高速发展,而且(于二十世纪中叶)对电报通信方式有了重大突破,出现了具有广阔发展前景的数字通信方式;在通信的种类上,相继出现了脉码通信、微波通信、卫星通信、激光通信和计算机通信等等;在通信的对象上,突破了人与人之间进行通信的范畴,实现了人与机器或机器与机器之间的通信。现代的通信,正朝着更高的水平发展。

1.3 模拟通信与数字通信

如上所述,通信时有待传输的消息是多种多样的,它可以是符号、文字、语声、图像等等。然而,所有不同的消息,都可以把它们归结成两类:一类称作离散消息,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。而连续消息则是非离散型的,也即消息状态是连续变化的,例如,强弱连续变化的语声、亮度连续变化的图像等。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 1.3 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原来的消息。通常，消息被寄托在电信号的某一参量上。如果电信号的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。如果电信号的参量对应于模拟消息而连续取值，则称这样的信号为模拟信号或连续信号，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——数字-模拟变换，以还原出模拟信号。

目前，无论是模拟通信，还是数字通信，都是已经获得广泛应用的通信方式。尽管低级的电报通信（它可视为数字通信的一种方式）在 150 多年前就出现了，但它却比模拟通信的发展缓慢得多，实际使用的通信设备也远比模拟通信的少。但是，在二十世纪中叶以后，数字通信日益兴旺起来，甚至目前出现了数字通信替代模拟通信的某种趋势。这是什么缘故呢？如同其他任何事物发展的根本原因一样，这是由其内部的矛盾性——内因所决定的。当然外部原因也是重要的，但外因是变化的条件，而内因才是变化的根据。与模拟通信相比，数字通信更能适应对通信技术越来越高的要求：第一，数字传输的抗噪声（或干扰）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，传输中的差错可以设法控制，这就改善了传输质量；第三，便于使用现代计算技术来对数字信息进行处理；第四，数字信息易于加密且保密性强；第五，数字通信可以传递各种消息，使通信系统变得通用、灵活等。以上是对数字通信获得迅速发展的“内因”的概括。在外因方面，第一是社会对通信技术的需要越来越迫切且要求也越来越高；第二是数字元部件及计算技术的迅速发展，为数字通信的高速度发展创造了重要条件。

模拟通信系统，正如图 1.3 表明的那样，需要包含两种重要变换。首先，发送端的连续消息要变换成原始电信号，接收端恢复的原始电信号要变换成连续消息。这里所说的原始电信号，由于它具有频率较低的频谱分量，一般不能直接作为传输信号。因此，模拟通信系统里常有第二种重要变换：将原始电信号转换成其频带适合信道传输的信号，并在接收端进行相反变换。这个变换在通信术语中称为调制或解调。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。所以，原始电信号就是一种基带信号，而已调信号就不算基带信号了。

有必要指出，从消息的发送到消息的恢复，事实上并非仅有以上两个变换，系统里可能还有滤波、放大、天线辐射与接收等

等过程。但本书只着重研究上述的两个变换，而其余过程被认为都是足够理想的。

于是，一般的模拟通信系统模型可由图 1.3 略加改变而成，如图 1.4 所示。

那么，数字通信系统的模型是怎样的呢？正如上面说到的，数字通信的基本特征

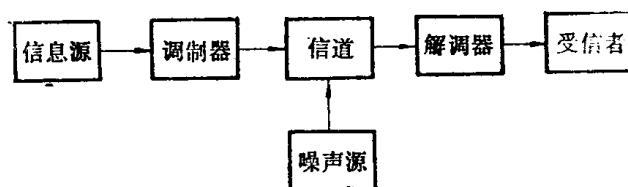


图1.4 模拟通信系统模型

是，它的消息或信号具有“离散”或“数字”的特性，从而使数字通信带有许多特殊的问题。就以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，即强调已调参量与消息之间的成比例性；而在数字通信中，则强调已调参量与消息之间的一一对应性。

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数字信号差错，原则上都是可以控制的。这是通过所谓的差错控制编码来实现的。于是，就需要在发送端增加一个编码器，而在接收端相应需要一个解码器；第二，当需要保密通信时，可有效地对基带信号进行人为“搅乱”（即加上密码信号），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，因而接收端必须有一个与发送端相同的节拍，不然，会因收发步调不一致而造成混乱，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特征进行编组的（相当于写文章要有标点符号那样），于是，在收发之间一组组的编码的规律也必须相一致，否则接收时消息的真正内容就无法恢复。在数字通信中，称节拍一致为“位同步”或“码元同步”，而称编组一致为“群同步”、“句同步”或“码组同步”。故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 1.5(a) 表示。图中，同步环节没有示意出，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 1.5(a) 所示的那样同时包括所有的环节。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，还取决于具体设计条件与要求。例如，在本书中将要详细讨论的数字基带传输系统，它的系统模型将不包括调制与解调环节，如图 1.5(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，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。

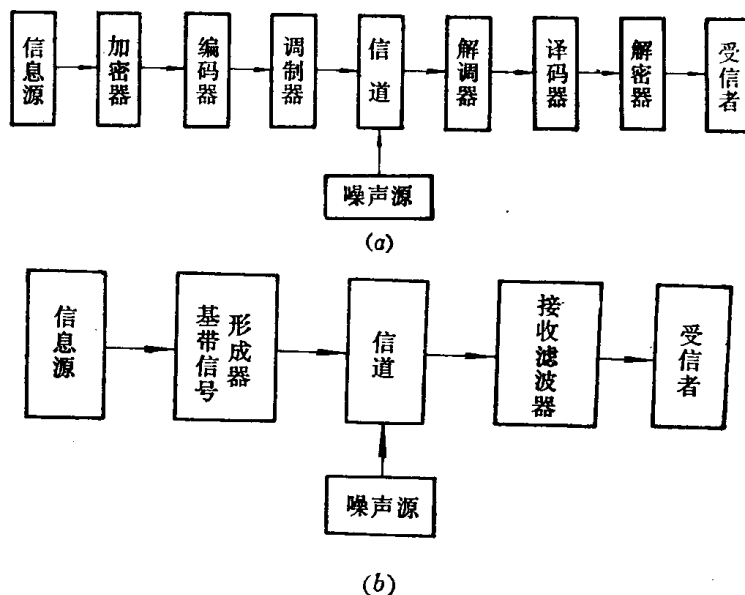


图1.5 数字通信系统模型

顺便指出，上面提到的差错控制编码，它在数字通信中是十分重要和应用较广的一

种技术措施。差错控制编码的基本思想是,为了改善系统的误码性能,在发送端,在信息码流中人为地加进一些“多余”的码(称监督码),并使这些监督码与信息码发生某种确定关系。接收端,则利用这种“确定关系”,去校验所接收的码是否发生了错码以及错码的可能位置,从而达到发现错码或纠正错码的目的。显然,利用差错控制编码技术提高系统的可靠性是以牺牲部分有效性为代价的。目前,差错控制编码已发展成为一门独立的学科,本书不作专门介绍,有兴趣者可参阅有关资料^{〔1〕、〔2〕、〔3〕}。

一般说来,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,但一路数字电话可能要占据约 20~60kHz 的带宽。因此,数字通信的频带利用率不高。在系统频带紧张的情况下,数字通信的这一缺点就显得更为突出。然而,随着社会生产力的发展,有待传输的数据量急剧增加,传输可靠性要求越来越严,保密要求也越来越高。因而,实际中往往宁可牺牲系统频带而采用数字通信。至于在系统频带富裕的情况下,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。

毫无疑问,模拟通信系统将按照模拟信号传输的特点来设计,而数字通信系统将按照数字信号传输的特点来设计。然而,考虑到现有系统多数是模拟通信系统这一事实,目前还有一个尽可能利用现有模拟通信系统来传输数字信号的任务。这就需对该系统作些改造,或者加装数字终端设备。

1.4 通信方式

为了便于下面的讲述,本节把通信中常见的通信方式方面的知识作一综合介绍。

通常,如果通信仅在点与点之间进行,那么,按消息传送的方向与时间,通信的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,即是指消息只能单方向进行传输的工作方式,如图 1.6(a)所示,例如广播、遥控,就是一种单工通信方式。

所谓半双工通信方式,即是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 1.6(b)所示,例如,使用同一载频工作的普通无线电收发报话机,就是按这种通信方式工作的。

所谓全双工通信,即是指通信双方可同时进行双向传输消息的工作方式,如图 1.6(c)所示,例如,普通电话就是最简单的一种全双工通信方式。

在数字通信中,按照数字信号排列的顺序,有串序传输与并序传输之分。

所谓串序传输,即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的方式,如图 1.7(a)所示;如果将代表信息的数字信号序列分割成两路或两路

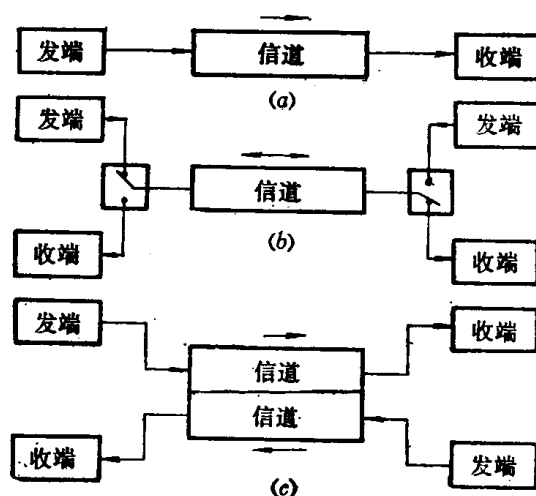


图1.6 通信方式示意图

以上的数字信号序列同时在信道中传输, 则称为并序传输方式, 如图 1.7(b) 所示。

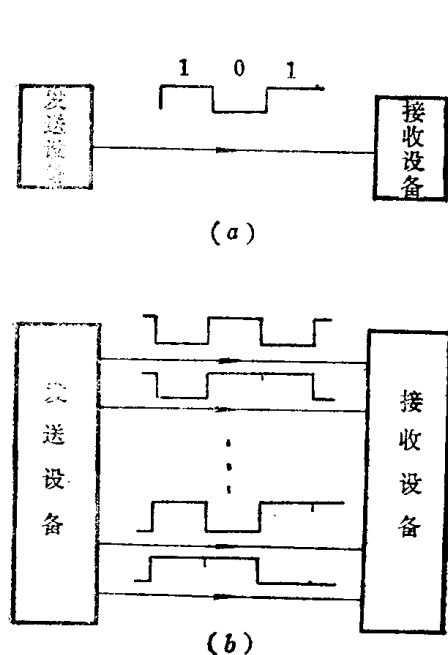


图1.7 串序和并序传输方式

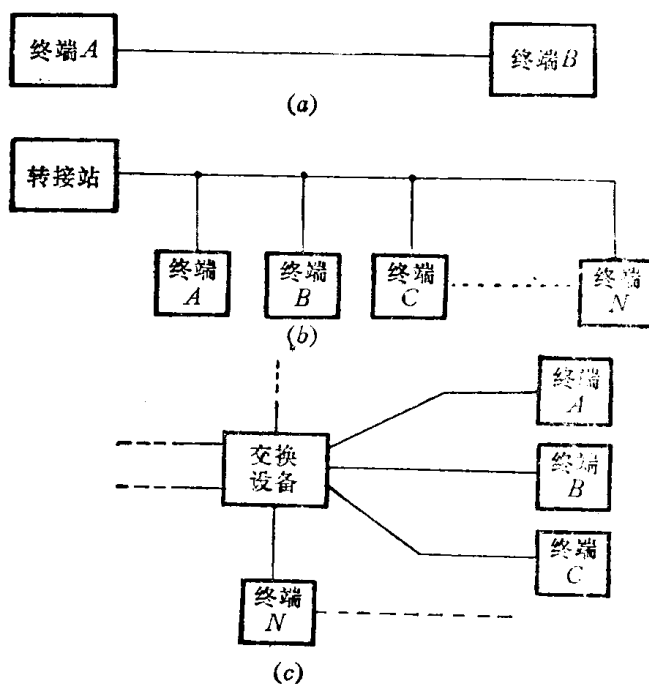


图1.8 通信的网络形式

(a) 直通方式; (b) 分支方式; (c) 交换方式。

一般的数字通信方式大都采用串序传输方式, 这种方式只需占用一条通路; 并序传输方式在数字通信中有时也遇到, 它需要占用两条或两条以上的通路, 比如, 占用多条传输导线或多条频率分割的通路。

最后, 我们介绍按网络形式划分的通信方式。

通信的网络形式可分为三种: 两点间直通方式、分支方式及交换方式, 它们的示意图如图 1.8 所示。直通方式是通信网络中最为简单的一种形式, 终端 A 与终端 B 之间的线路是专用的; 在分支方式中, 它的每一终端 (A, B, C, ..., N) 经过同一信道与转接站相互连接, 此时, 终端之间不能直通消息, 而必须经过转接站转接, 这种方式只在数字通信中出现; 交换方式是终端之间通过交换设备灵活地进行线路交换的一种方式, 即把要求通信的两终端之间的线路接通 (自动接通), 或者可以实现消息交换, 即通过交换设备把发方来的消息先收下 (叫做消息贮存), 然后再转发至收方。这种消息转发可以是实时的, 也可以是延时的 (线路无空闲时)。

分支方式及交换方式均属网通信的范畴。无疑, 它和点与点直通方式相比, 还有其特殊的一面, 例如, 通信网有一整套的线路交换与消息交换的具体规定, 有通信的自动控制问题, 对数字通信网还有严格的网同步问题等等。可是, 尽管如此, 网通信的基础还是点与点通信, 因此, 本书把注意力放在这个“基础”上, 而不准备讨论网通信问题。

1.5 信息及其量度

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出定量的分析和

研究, 先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; 消息可以是各种各样的, 但其内容可统一用信息去表述。如同运输货物多少采用“货运量”来衡量一样, 传输信息的多少就直观地使用“信息量”去衡量。现在的问题是信息如何量度。

传递的消息都有其量值的概念。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的传递却具有更多的信息。例如, 若一方告诉另一方一件非常可能发生的事件: “今年冬天的气温要比去年冬天的更冷些”, 那么比起告诉另一方一件很不可能发生的事件: “今年冬天的气温将与去年的夏天一样热”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。

正如已经指出的, 消息是多种多样的, 因此我们量度消息中所含的信息量时, 必须能够用来估计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。

由概率论告诉我们, 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。又考虑到如果事件是必然的 (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, 为了定量地计算信息的数量, 则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

$$I = I[P(x)] \quad (1.5-1)$$

(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

$$I[p(x_1)p(x_2)\cdots] = I[p(x_1)] + I[p(x_2)] + \cdots \quad (1.5-2)$$

不难看出, 若 I 与 $p(x)$ 间的关系式为

$$I = \log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x) \quad (1.5-3)$$

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出现的离散消息的量度。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，定义“ $M=2$ ”时的信息量度是恰当的。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(1.5-3)变为

$$I = \log_2 \frac{1}{\frac{1}{2}} = \log_2 2 = 1 \text{ (bit)} \quad (1.5-4)$$

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(1.5-4)的定义，对于 $M>2$ ，则传送每一波形的信息量应为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \text{ (bit)} \quad (1.5-5)$$

若 M 是2的幂次，比如 $M=2^K$ ($K=1, 2, 3, \dots$)，则式(1.5-5)可改写成

$$I = \log_2 2^K = K \text{ (bit)} \quad (1.5-6)$$

式(1.5-6)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的所需的波形数目，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，则传送一个波形所能传递的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} \text{ (bit)} \quad (1.5-7)$$

或

$$I = \log_2 M \text{ (bit)} \quad (1.5-8)$$

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。如果该条件不满足，则每一波形所含的信息量将要改变。

现在我们再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（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为

$$\begin{aligned}
 H(x) &= P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2) + \cdots + P(x_n)[- \log_2 P(x_n)] \\
 &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \quad (1.5-9)
 \end{aligned}$$

H 称为符号集中每个符号的平均信息量, 由于它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, 则式 (1.5-9) 即成为式 (1.5-8)。用平均信息量来计算消息的信息量是很有用的。若传送一个消息的符号总数为 m , 则该消息所含的信息量为

$$I = mH \quad (\text{bit}) \quad (1.5-10)$$

〔例1.3.1〕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。其中因为出现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 $7 \log_2 8 = 21\text{bit}$, 所以该消息的信息量为

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

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, 则据式 (1.5-9) 有

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

故该消息所含信息量为

$$I = 57 \times 1.906 \approx 111\text{bit}$$

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, 在工程计算时常被采用, 但它的结论可能存在误差, 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 (1.5-9) 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 (1.5-9) 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)。

关于信息量的进一步讨论, 限于篇幅而不再进行下去。有兴趣者, 可参考信息论有关专著^{〔2〕、〔8〕}。

1.6 主要性能指标

在设计或评述一个通信系统时, 往往要涉及通信系统的主要性能指标问题, 否则就无法衡量通信系统的质量优劣。主要性能指标也称主要质量指标, 它们是从整个系统上综合提出或规定的。

然而，通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题，例如要涉及到通信的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等等。如果把所有因素都考虑进去，那么通信系统的设计项目就要包括很多项，系统性能的评述工作也就很难进行。不过，用辩证观点来说，任何过程如果有多数矛盾存在的话，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。用信息传输的观点（即所谓的信息论观点）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是均方误差，它是衡量发送的连续信号与接收端复制的连续信号之间误差程度的质量指标。均方误差越小，说明复制的信号越逼真。

顺便指出，在实际的模拟通信中，上述误差是由两方面原因造成的。第一，是由于信号在传输时叠加上噪声产生的，我们称之为由加性干扰产生的误差；第二，是由于信道传输特性不理想产生的误差，一般称为乘性干扰产生的误差。第一种干扰是始终存在的（不管信号有无），而第二种干扰（乘性的）则随信号的消失而消失。对于由乘性干扰产生的误差，常常还用更具体的性能指标来表述，例如，用于通话的通信系统还有保真度、可懂度、清晰度等质量指标，这些就不作说明了。由加性干扰产生的误差，通常用信号噪声比这一指标衡量。在后面的讨论中，我们主要研究加性干扰的影响，故认为在模拟通信中均方误差的大小最终将完全取决于接收机输出的信号平均功率与噪声平均功率之比（简称输出信噪比）。因此，我们今后在估计模拟通信系统的质量指标时，往往采用输出信噪比来衡量。如果在相同的比较条件下，某一个系统的输出信噪比最高，则称该系统通信质量最好，或称该系统抗信道噪声（或干扰）的能力最强。

在数字通信系统里，主要的性能指标有两个，即传输速率和差错率。它们在数字通信中有着直观的物理解释。为了说清楚这两个指标的确切概念，有必要先说明数字通信中信号是怎样被表示的。

如前所述，由于数字通信是传输离散信号的，因此，这些离散值就可以一一加以表示。按人们的习惯，自然就想到用十进制数字（0，1，2，…，9）去表示。比如，某一离散值用一位十进制数字去表示，或者为了准确些，用几位十进制数字去表示。然而，十进制数字在人们日常生活中虽然比较习惯和熟悉，但对于机器来讲，根据数字电路的特点，却是不方便的。在计算机和数字通信中最适宜采用的是二进制，即只有两种不同状态（只有两个电压值或只有两个电流值）的“0”或“1”。二进制数的各种运算规则与十进制数的完全相同，区别仅在于前者“逢二进一”，而后者是“逢十进一”。二进制与十进制之间有一一对应的表述关系。因此，用二进制数可以表示任意一个离散值。在数字通信中，若离散信号的状态只有两种，则可用一位二进制符号去表示；若离散信号的状态多于两种，则可用若干位二进制符号去表示。当然，除了采用二进制外，还可