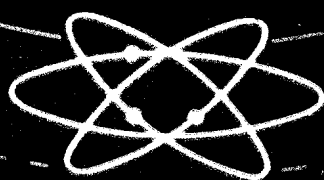


高等学校教材



内 容 简 介

本书是在第一轮教材实践的基础上,根据电子工业部无线电技术与信息系统委员无线电通信编审小组主持召开的《通信原理》教材修编意见征询会通过的修编大纲进行修编的。

本书讲述现代通信的基本原理。全书共有十三章,内容包括模拟通信和数字通信,但侧重数字通信。本书讲法由浅入深,叙述简明,概念清楚,取材比较新颖,结构自成系统,既可作为高等学校工科电子类通信专业的教材,又可作为通信工程技术人员参考书。

通 信 原 理

西北电讯工程学院

樊昌信 徐炳祥 詹道庸 吴成柯 编

责任编辑:王细李

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张24 556千字

1984年6月第二版 1984年6月第三次印刷 印数:13,001—25,000册

统一书号:15034·~~2000~~274 定价:3.20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工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初，由于各有关院校，特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合，共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要，反映国内外电子科学技术水平，达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求，在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上，电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》，中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会，作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构，并制定了一九八二~一九八五年教材编审出版规划，列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量，适当增加教材品种的思想指导下，这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿，主要是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材，分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验，这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处，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

本教材系由无线电技术与信息系统教材编审委员会无线电通信编审小组评选审定,并推荐出版。

本教材由西北电讯工程学院樊昌信、徐炳祥主编,清华大学冯重熙、曹志刚主审。编审者依据无线电通信编审小组主持召开的《通信原理》教材修编意见征询会通过的修编大纲进行编写和审阅的。

本课程的参考教学时数为100~130学时,其主要内容为模拟通信和数字通信,但侧重数字通信。全书共十三章,可分为四部分。第一部分(一~五章)阐述通信基础知识及模拟通信原理,其中第二、三章扼要介绍本书其余各章所必需的数学知识。第二部分(六~九章)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(十~十二章)讨论保证或提高数字通信系统性能的基本技术措施。第四部分(十三章)简要介绍信息论的基本观点。各章设有习题,书后附有部分答案。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,需要30~40学时;只讲授数字通信(第二、五和十三章不讲)时,需要80~90学时。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至七章及第九章,詹道庸编写第八章和第十三章,樊昌信编写第十一章和第十二章,吴成柯编写第十章。樊昌信、徐炳祥统编全稿。

派代表参加本书修编意见征询会的兄弟院校有(按笔划顺序):山东工学院、上海交通大学、上海科技大学、华中工学院、西安交通大学、成都气象学院、成都电讯工程学院、河北大学、郑州工程技术学院、国防科技大学、重庆大学、南京通信工程学院、浙江大学、清华大学。他们对本书修编提出许多宝贵意见,这里谨表示诚挚的感谢。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	4.5 随参信道及其对信号传输的影响	71
1.1 通信的概念	1	4.6 随参信道特性的改善(分集接收)	76
1.2 通信的发展简史	2	4.7 加性噪声的类型	77
1.3 模拟通信与数字通信	2	4.8 起伏噪声	78
1.4 通信系统中的基本问题	3	4.9 限带白噪声的模拟与测量	81
1.5 通信方式	5	习题	83
1.6 主要性能指标	7	第五章 模拟调制系统	85
1.7 本书的范围与结构	9	5.1 引言	85
第二章 确定信号分析	10	5.2 幅度调制(线性调制)	85
2.1 引言	10	5.3 各种线性调制信号的产生与解调	86
2.2 信号与系统分析的基本方法	10	5.4 频分复用(FDM)	93
2.3 卷积定理	14	5.5 非线性调制(角度调制)	94
2.4 能量谱密度与功率谱密度	18	5.6 宽带调频与窄带调频	96
2.5 波形的互相关与自相关	23	5.7 调频信号的产生与解调	99
2.6 相关函数与谱密度	27	5.8 线性调制系统的抗噪声性能	101
2.7 复信号与希尔伯特(Hilbert)变换	28	5.9 调频系统的抗噪声性能	108
习题	30	5.10 复合调制及多级调制的概念	113
第三章 随机信号分析	35	习题	114
3.1 引言	35	第六章 数字基带传输系统	118
3.2 随机过程的概念	35	6.1 引言	118
3.3 平稳随机过程	37	6.2 数字基带信号	119
3.4 平稳随机过程的相关函数与 功率谱密度	38	6.3 基带信号的频谱特性	120
3.5 高斯过程	41	6.4 基带传输的常用码型	125
3.6 窄带随机过程	44	6.5 基带脉冲传输与码间串扰	126
3.7 正弦波加窄带高斯过程	48	6.6 无码间串扰的基带传输特性	128
3.8 随机过程通过线性系统	51	6.7 无串扰基带系统的抗噪声性能	134
3.9 输出信噪比最大的最佳线性 滤波器(匹配滤波器)	55	6.8 眼图	136
3.10 均方误差最小的最佳线性 滤波器	60	6.9 部分响应系统	137
习题	62	6.10 时域均衡	142
第四章 信道与噪声	65	习题	149
4.1 引言	65	第七章 数字调制系统	152
4.2 信道的定义	65	7.1 引言	152
4.3 信道模型	66	7.2 二进制数字调制原理	152
4.4 恒参信道及其对信号传输的影响	69	7.3 二进制数字调制信号的频谱特性	160
		7.4 二进制振幅键控(2ASK)系统的抗 噪声性能	162
		7.5 二进制移频键控(2FSK)系统的抗	

噪声性能	167	10.5 位同步的方法	273
7.6 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	170	10.6 位同步系统的性能及其相位误差 对性能的影响	282
7.7 二进制数字调制系统的性能比较	174	10.7 群同步	285
7.8 改进的数字调制方式	174	习题	294
习题	184	第十一章 差错控制编码	296
第八章 模拟信号的数字传输	186	11.1 引言	296
8.1 引言	186	11.2 纠错编码的基本原理	297
8.2 抽样定理	186	11.3 常用的简单编码	301
8.3 脉冲振幅调制(PAM)	192	11.4 线性码	303
8.4 模拟信号的量化	194	11.5 循环码原理	308
8.5 脉冲编码调制(PCM)	200	11.6 循环码的编、解码方法	312
8.6 增量调制(ΔM)	211	11.7 实际的循环码	315
8.7 PCM和 ΔM 系统的性能比较	217	习题	317
8.8 改进型增量调制	219	第十二章 伪随机序列	319
8.9 增量(差分)脉冲编码 (DPCM)系统	222	12.1 引言	319
8.10 时分复用(TDM)	223	12.2 m序列的产生	319
习题	225	12.3 m序列的性质	325
第九章 数字信号的最佳接收	227	12.4 其他伪随机序列简介	330
9.1 引言	227	12.5 伪随机序列的应用	332
9.2 数字信号接收的统计表述	227	习题	341
9.3 关于最佳接收的准则	230	第十三章 信息传输引论	342
9.4 确知信号的最佳接收	231	13.1 引言	342
9.5 随相信号的最佳接收—— 非相干接收	241	13.2 消息的量度	342
9.6 基带系统的最佳化	248	13.3 信道容量	348
9.7 匹配滤波器的实现	253	13.4 带宽与信噪比的互换	355
习题	258	13.5 实际系统的潜力	356
第十章 同步原理	260	习题	359
10.1 引言	260	附录A PCM量化误差功率谱公式的 证明	360
10.2 载波同步的方法	260	附录B 循环码的性质	365
10.3 载波同步系统的性能	266	英文缩写名词对照表	368
10.4 载波相位误差对解调性能的 影响	272	部分习题答案	368
		参考资料	375

第一章 绪 论

1.1 通信的概念

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。

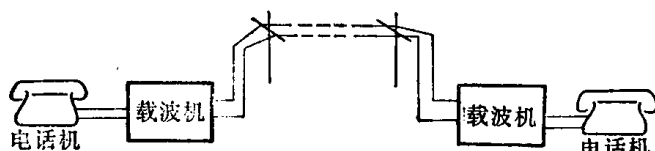


图1.1 有线长途电话系统示意图

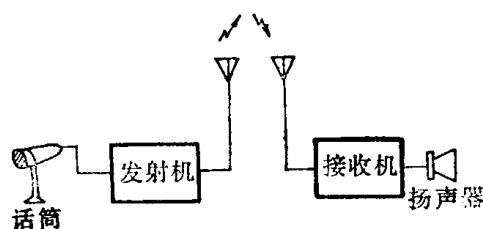


图1.2 无线电话系统示意图

通常，有线通信按传输线路的种类可分为明线通信、电缆通信、波导通信等。无线通信常见的有短波通信、散射通信（电离层散射或对流层散射等）、微波中继通信、流星余迹通信、人造卫星中继通信等。

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，它是指信号的传输媒质（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

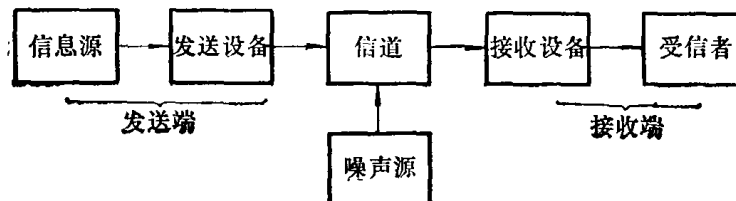


图1.3 通信系统的模型

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。

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^[1]；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、图象等等。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 1.3 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。从前面介绍的通信简史看出, 尽管低级的电报通信(它可视为数字通信的一种方式)出现最早, 但在一个很长的时期中, 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, 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; 二是数字元部件及计算技术的发展, 为数字通信的高速度发展创造了重要条件。

但是, 事物总是一分为二的, 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 4 千赫带宽, 但一路数字电话可能要占据约 20~60 千赫的带宽。因此, 数字通信的频带利用率不高。在系统频带紧张的场合, 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。

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 通信系统中的基本问题

为了说明通信的概念与过程, 我们曾介绍过简单的通信系统模型, 如图 1.3 所示。本

节将从消息传输的观点出发, 来说明通信系统应该包括哪些基本问题。

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。

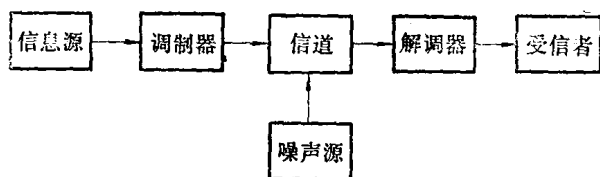


图1.4 模拟通信系统模型

这样看来, 模拟通信系统的模型可由图 1.3 略加改变即成, 如图 1.4 所示。由图 1.4 看出, 模拟通信研究的基本问题应该包括: (1) 收发两端的换能过程及基带信号的特性; (2) 调制与解调原理; (3) 信道与噪声的特性及其对信号传输的影响; (4) 研究存在噪声条件下的系统性能等。

那么, 数字通信系统应该有些什么基本问题呢?

由上节讨论不难确信, 模拟通信中的基本问题在数字通信中同样存在。所不同的是数字通信中的消息或信号具有“离散”或“数字”的特性, 从而使数字通信带有许多特殊的问题。就拿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(见第十一章)。这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, 数字通信系统的模型如图 1.5 所示。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 所示的那样

同时包括所有的环节。比如，加密与解密、编码与解码这两个环节究竟采用与否，还取决于具体的设计条件与要求。另外，这里传送的消息可以是离散型的，也可以是连续型的。不过，正如前面已经说过的，倘若需要传递连续消息，则在发送端信息源中应包括有模-数转换装置，而在接收端受信者处应包括有数-模转换装置。顺便指出，通常把这两个变换列入

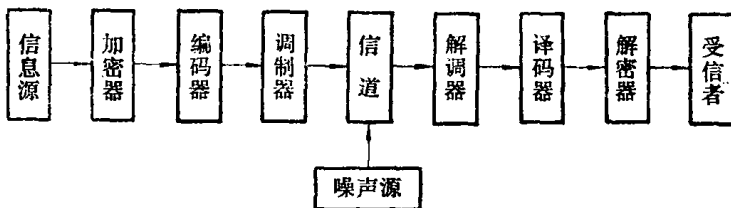


图1.5 数字通信系统模型

所谓的“信源编码”范畴。信源编码的任务完全不同于抗信道干扰编码（有时简称纠错编码），它除解决模拟信号数字化外，主要任务是提高数字信号传输的有效性。

在数字通信系统中，基带信号仍是指调制前和解调后的信号。例如，经过加密器或编码器变换后的信号，仍属于基带信号。

归结起来，在图 1.5 所示的点对点数字通信系统模型中，要研究的基本问题有：（1）发收两端的换能过程、模拟信号数字化及数字式基带信号的特性；（2）数字调制与解调原理；（3）信道与噪声的特性及其对信号传输的影响；（4）抗干扰编码与解码，即差错控制编码问题；（5）保密通信问题；（6）同步问题等。

值得强调指出，以上所说的基本问题，在研究和解决中始终与采用什么样的数学分析方法紧密地联系在一起。因而，可以认为，掌握基本的数学分析方法（比如，对信号与系统的非统计的或统计的分析方法）也是一个十分重要的基本问题。

本书将围绕上面提出的基本问题进行讨论。我们已经把它们有机地安排在各章之中。

1.5 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，见图 1.7 (a)。如果将代表信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同时在信道中传输，则称为并序传输方式，见图 1.7 (b)。

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。

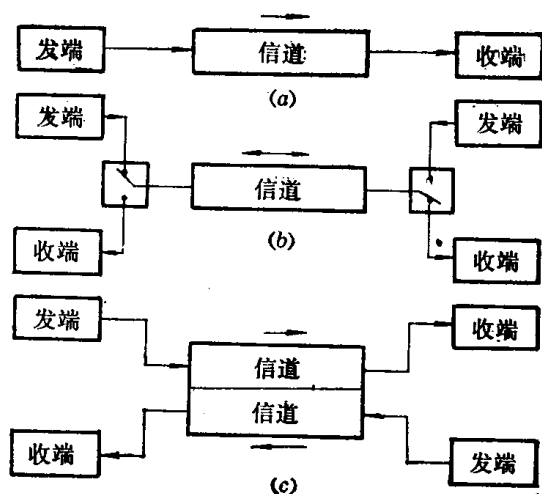


图1.6 通信方式示意图

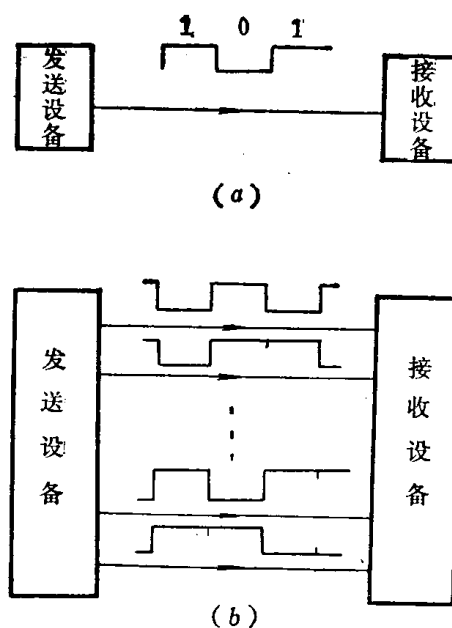


图1.7 串序和并序传输方式

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 ($A, B, C, \dots, N$) 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）。

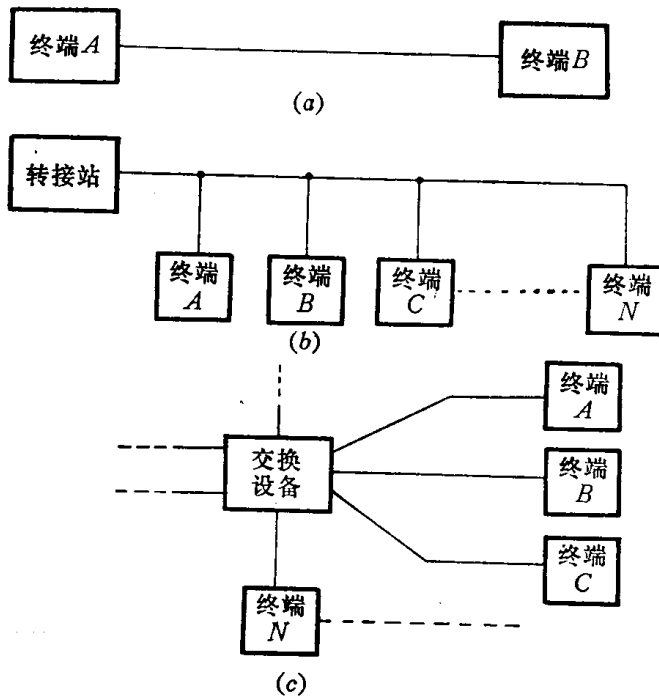


图1.8 通信的网络形式

(a) 直通方式；(b) 分支方式；(c) 交换方式。

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，还有其特殊性的一面，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。

1.6 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

● 关于信息量的概念，在信息论中有详细讨论。本书第十三章也将作些介绍。

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，还可采用多进制（大于2的进制），比如选用N进制，这里的N是大于2的一个正整数。自然，N进制与二进制仍然是可以相互表示的。比如，当 $N=4$ ，则N进制的每一个符号可以用两位二进制符号去表示，反之亦然。原则上，N进制的一个符号可用 $\log_2 N$ 个二进制符号去表示。但要注意，当 $\log_2 N$ 不为整数时，则应取大于此值的第一个整数。

在数字通信中常常用相同的时间间隔来表示一个二进制信号，这个间隔被叫做码元长度，这样的信号简称为二进制码元。同样，所有N进制的信号也是等长的，这个码元被叫做N进制码元。

有了上述知识，我们就可方便地介绍关于传输速率及差错率的概念。

传输速率，它通常以码元传输速率来衡量。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”，常用符号“B”表示。例如，若某系统每秒钟传送4800个码元，则该系统的传码率为4800波特或4800 B。但要注意，码元速率仅仅表征单位时间内传送码元的数目，而没有限定这时的码元是何种进制码元。考虑到同一系统的各点上可能采用不同的进制，故给出码元速率时必须说明码元的进制和该速率在系统中的位置。设二进制码元速率为 R_{B_2} ，N进制码元速率为 R_{B_N} ，且有 $2^k = N$ ，（ $k=1、2、3、\dots$ ），则二进制与N进制的码元速率有如下转换关系式：

$$R_{B_2} = R_{B_N} \log_2 N \quad \text{波特}$$

按照信息论的观点，在进行有意义的通信时，传递消息就意味着传递了信息（信息可理解为消息中所包含的对受信者有意义的内容）。而传递消息的多少，就以传递信息的多少来说明。在信息论中采用“信息量”去衡量信息的多少，单位为“比特”，或用符号“b”表示。鉴于这种认识，系统的传输速率还可用信息传输速率来表征。信息传输速率，又称信息速率或传信率，它被定义为每秒钟传递的信息量，单位是比特/秒，或记为b/s。

这里有必要指出，虽然码元速率及信息速率均是传输速率的指标，但它们有着不同的概念，故在使用中不能相互混淆。不过，码元速率与信息速率在数值上有一定的联系。以后（第十三章）将会说明，每个二进制码元规定含有1比特信息量，故在二进制下的码元速率与信息速率在数值上相等，只是单位不同。设信息速率为 R_b ，则N进制的码元速率 R_{B_N} 与 R_b 的数值关系为

$$R_b = R_{B_N} \log_2 N \quad \text{比特/秒}$$

或

$$R_{B_N} = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad \text{波特}$$

现在我们来讨论数字通信的另一个性能指标——差错率。它是衡量系统正常工作时，传输消息可靠程度的重要性能指标。差错率有两种表述方法：误码率及误信率。

所谓误码率，它是指错误接收的码元数在传送总码元数中所占的比例，或者更确切

地说，误码率即是码元在传输系统中被传错的概率。

所谓误信率，又称误比特率，它是指错误接收的信息量在传送信息总量中所占的比例，或者说，它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。

1.7 本书的范围与结构

现代通信的理论是非常广泛的，全面介绍这方面的内容，不是本书的宗旨。但应该说，本书的内容可以看作是现代通信理论的基础。

概括地说，本书的范围主要是论述模拟和数字通信系统的信息传输的基本原理与分析方法，并把讨论的重点放在数字通信原理上。具体一点说，本书首先在第二、三章概述了分析一个通信系统所必需的有关信号与系统的数学知识。在第四章，介绍了各种通信系统必不可少的组成部分——信道的特性，以及信道中可能存在的各种噪声，并指出信道与噪声给通信带来的影响。第五章扼要地论述了模拟通信系统的一般理论，并估计噪声对系统带来的影响。这一章之所以是“扼要”的，这是因为模拟通信的一般知识在前续课程已经讲到。然后，本书转入重点内容的讨论：第六、七、八章论述数字通信的基本原理；第九章则把数字传输原理在理论高度上提高一步，即建立最佳数字传输系统的基本原理。第十、十一、十二章分别讨论数字通信中若干重要的技术原理，以便建立数字通信系统的更为完整的概念。最后第十三章，用信息论的基本观点，简要地总结通信系统的潜力与发展方向。

第二章 确定信号分析

2.1 引言

从本章开始, 将要通信中的基本问题逐步进行研究, 以求全面了解通信系统设计的基本原理。然而, 通信系统的设计始终依赖于对信号特性和系统●特性的了解, 因此, 探索并揭示信号和系统特性以及它们之间的关系, 将是十分必要的。

本书不准备把信号与系统的分析内容详加叙述, 而认为这些内容读者已经熟悉。本章及下一章, 只是为使全书有统一表述的基础和建立一些十分必需的概念及关系而设置的。本章将有选择地介绍确定信号与系统的分析, 而随机信号的分析将在下一章进行。

2.2 信号与系统分析的基本方法

由上一章的通信系统模型看出, 它一般由许多相互联结和相互依赖的功能方框组成。它们把包含信息的一系列信号进行各种加工和处理, 以达到从一点向另一点传输信息的目的。显而易见, 分析一个通信系统, 本质上是建立在对每一功能方框(或系统)进行分析的基础之上的。于是, 这里就可归纳为分析讨论如图 2.1 所示的所谓“信号通过系统”的问题。

尽管通信系统中可能遇到各种各样的信号与系统, 例如, 信号有确定信号与随机信号、周期信号与非周期信号、模拟信号与数字信号、能量信号与功率信号之分, 系统有线性系统与非线性系统、时不变系统与时变系统、模拟系统与离散系统、即时系统(无记忆系统)

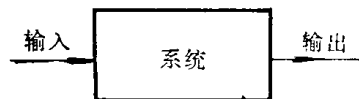


图2.1 信号通过系统的功能方框图

与动态系统(有记忆系统)之分。但是, 在信号与系统中, 确定信号通过线性时不变系统的问题是最基本和最重要的。这不仅是因为在实际通信系统中经常遇到, 而且还有一些非线性系统或时变系统在限定范围或指定条件下, 也遵从或接近于线性时不变特性的规律; 另一方面, 线性时不变系统的分析方法已经形成完整的、严格的体系, 而且行之有效和日趋完善。而非线性系统与时变系统的研究, 虽有一定进展, 但目前还不能令人满意。在实际中, 常采用近似法或图解法。

下面我们就信号通过线性时不变系统的分析方法作扼要的回顾。

在通信系统原理的研究中, 实用意义最大的分析方法是时域分析法和频域分析法(傅里叶分析法)。当然, 其他分析法(拉普拉斯变换法、Z变换法等)也是十分有用的, 只是这些分析方法在相对独立的学科中(电路理论、数字信号处理等)应用更广泛些。

正如大家已经知道的, 时域分析法是直接分析时间变量的函数●的方法, 研究的是

● 系统这一术语, 通常既可指简单的网络, 又可指复杂的线路或各种功能方框图。

● 在本书中, 经常把信号与函数两名词通用。一般地说, 函数可以是多值的, 但信号却是单值的, 故这里的函数也是单值的。

时域特性；而频域分析法是分析频率变量函数的方法。这两种方法之间有确定的变换关系。

确定信号通过线性时不变系统的分析，无非是要对图 2.1 建立数学模型，即提供数学表述的方法。信号与系统的分析理论指出^[2,3]，若设输入和输出信号分别为时间函数 $f_i(t)$ 及 $f_o(t)$ ，线性时不变系统的单位冲激响应为时间函数 $h(t)$ ，那么，这三者的关系可用卷积积分来表述，即有

$$f_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (2.2-1)$$

或

$$f_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) f_i(t - \tau) d\tau \quad (2.2-2)$$

如果此时的系统是物理可实现的，则由于在 $t < 0$ 时有 $h(t) = 0$ ，故上式变成

$$f_o(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) f_i(t - \tau) d\tau \quad (2.2-3)$$

或

$$f_o(t) = \int_{-\infty}^t f_i(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (2.2-4)$$

以上四个公式就是信号与系统分析中最基本的时域分析表示式。由于式 (2.2-1) 与 (2.2-2)、(2.2-3) 与 (2.2-4) 分别是等效的，因而我们只需熟悉其中之二即可。

根据傅里叶变换理论，上述时域分析可以变换到频域分析。任一时间函数 $f(t)$ ，只要满足一定的条件[●]，就可用下式表示：

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.2-5)$$

其中，

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.2-6)$$

式 (2.2-5) 及式 (2.2-6) 就是傅里叶变换关系式，通常称式 (2.2-6) 为傅里叶正变换，另一式称为反变换。把这些变换组成一对，又称傅里叶变换对或变换偶，记作

$$f(t) \longleftrightarrow F(\omega)$$

且把正变换记为

$$\mathcal{F}[f(t)] = F(\omega)$$

反变换记为

$$\mathcal{F}^{-1}[F(\omega)] = f(t)$$

我们将常见的各种时间函数及其傅里叶变换列成了一个表，如表 2.1 所示。表中， $\delta(t)$ 为单位冲激时间函数， $u(t)$ 为单位阶跃函数， $S_a(t)$ 为 sint/t 函数， $D_\tau(t)$ 为门函数（在时间 $-\tau/2 < t < \tau/2$ 内取值为 1，其余时间内取值为零）， $\delta_{T_0}(t)$ 是以 T_0 为周期的单位冲激函数。

显然，如果系统输入 $f_i(t)$ 、输出 $f_o(t)$ 及系统冲激响应 $h(t)$ 的傅里叶变换存

● 傅里叶变换存在的充分条件是满足绝对可积条件。但这条件并不是必要的，因为在数学上允许奇异函数存在，故变换存在条件被放宽了。