

通 信 原 理

西北电讯工程学院

樊昌信 徐炳祥 吴成柯 詹道庸 编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书讲述通信的基本原理。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，取材较新颖，结构自成系统，可作为高等学校工科电子类通信专业的试用教材，也可供通信工程技术人员参考。

通 信 原 理

西北电讯工程学院

樊昌信 徐炳祥 吴成柯 詹道庸 编

*

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30¹/₈ 702千字

1980年7月第一版 1982年1月第二次印刷 印数：7,001—13,000册

统一书号：15034·2000 定价：3.10元

前 言

本书系高等学校工科电子类通信专业统编教材。

本书内容包括模拟通信和数字通信,但侧重数字通信。全书共十八章,由四部分组成。第一部分(第一至七章)概述通信基本原理,阐明模拟通信及模拟信号数字化原理。其中,第二和第五章提供本书其余各章所必需的数学知识。第二部分(第八至十章)主要论述数字通信的基本原理。第三部分(第十一至十三章)主要讨论理想通信系统的基本概念和数字通信系统的最佳化问题。第四部分(第十四至十八章)介绍通信中,特别是数字通信中的一些重要技术原理。

本书约需讲授 150 学时。另外,尚需配合一定数量的示教和实验。在本书目录中打“*”号的章节,可以不作为基本的教学内容,当时间不够时,其中的部分内容可以不讲。第二和第五章的数学内容,按照先修课程的情况,可以灵活实施。

本书由西北电讯工程学院主编。第一至十三章由徐炳祥执笔,第十四章由吴成柯执笔,第十五至十八章由樊昌信执笔。全书各章习题由吴成柯、詹道庸编写。樊昌信审阅了全部初稿。

本书由清华大学主审。主审人为朱雪龙、曹志刚。参加审稿的单位还有:成都电讯工程学院、华中工学院、华南工学院、上海交通大学、上海科学技术大学、南京航空学院、南京通信工程学院。

在这里谨向以上参加编审活动的各院校以及给予热情支持和帮助的其他同志表示衷心的感谢!

编 者

目 录

第一章 绪 论

1.1 通信的概念	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 通信系统中的基本问题	4
1.5 通信方式	5
1.6 主要性能指标	7

第二章 数学基础 I：频谱分析

2.1 引言	10
2.2 傅里叶级数和傅里叶积分	10
2.2.1 傅里叶级数	10
2.2.2 傅里叶积分	12
2.3 典型信号波形的傅里叶分析	13
2.4 卷积定理	19
2.5 帕塞瓦尔(Parseval) 定理	23
2.6 能量谱密度与功率谱密度	25
2.7 信号通过线性网络	27
2.8 无失真传输	30
2.9 波形的互相关与自相关	32
2.10 相关函数与谱密度	35
习题	37

第三章 连续调制

3.1 线性调制	42
3.2 各种线性调制信号的产生与解调	43
3.2.1 双边带(DSB)信号的产生与解调	43
3.2.2 调幅(AM)信号的产生与解调	45
3.2.3 单边带(SSB)信号的产生与解调	46
3.2.4 残留边带(VSB)信号的产生与解调	49
3.3 频分复用(FDM)	51
3.4 非线性调制(角调制)	52
3.5 宽带调频与窄带调频	53
3.5.1 宽带调频	54

3.5.2 窄带调频	56
3.6 调频信号的产生与解调	57
3.6.1 调频信号的产生	57
3.6.2 调频信号的解调	59
3.7 抽样定理	59
3.8 脉冲振幅调制(PAM)	64
3.9 脉宽调制(PDM)与 脉位调制(PPM)	67
3.10 时分复用(TDM)	67
*3.11 TDM-PAM 信号的信道带宽	68
习题	69

第四章 脉冲编码调制(PCM)原理

4.1 引言	73
4.2 PCM 通信的概念	73
4.3 压缩与扩张	74
4.4 编码与译码	78
4.5 PCM 通信系统的组成	81
4.6 增量调制(ΔM)原理	83
4.7 增量总和($\Delta-\Sigma$)调制原理	85
4.8 压扩式自适应 ΔM 原理	86
习题	88

第五章 数学基础 I：概率论与随机过程

5.1 引言	91
5.2 概率	91
5.3 复杂事件及其概率	93
5.4 随机变量与概率分布	97
5.4.1 随机变量	97
5.4.2 概率分布	98
5.4.3 概率密度	99
5.4.4 几种典型的概率分布	100
5.5 多维随机变量	104
5.6 随机变量的函数	107

5.7 随机变量的数字特征	111	7.2 线性调制系统的抗噪声性能	171
5.7.1 数学期望	111	7.2.1 DSB 调制系统的性能	171
5.7.2 方差	113	7.2.2 SSB 调制系统的性能	172
5.7.3 相关系数	114	7.2.3 AM 系统的性能	173
5.8 大数定理和中心极限定理	116	7.3 调频系统的抗噪声性能	176
5.8.1 大数定理	117	*7.4 PAM 系统的抗噪声性能	182
5.8.2 中心极限定理	119	7.5 PPM 系统的抗噪声性能	184
5.9 随机过程的基本概念	121	7.6 PCM 系统的抗噪声性能	186
5.10 平稳随机过程	123	7.7 ΔM 系统的抗噪声性能	189
5.11 平稳随机过程的相关函数与 功率谱密度	124	7.8 PCM 和 ΔM 系统的性能比较	193
5.12 高斯过程	127	7.9 DPCM 系统	195
5.13 窄带随机过程	128	7.10 非编码调制与编码调制的 性能比较	196
5.14 正弦波加窄带高斯过程	132	习题	197
5.15 随机过程通过线性网络	135		
5.16 输出信噪比最大的最佳线性 滤波器(匹配滤波器)	139		
*5.17 均方误差最小的最佳线性 滤波器	143		
习题	146		

第六章 信道与噪声

6.1 引言	152
6.2 信道的定义	152
6.3 信道模型	153
6.4 恒参信道及其对信号传输的影响	155
6.4.1 幅度-频率畸变	155
6.4.2 相位-频率畸变——群延迟畸变	156
6.5 随参信道及其对信号传输的影响	157
6.6 加性噪声的类型	161
6.7 起伏噪声	162
6.7.1 散弹噪声	163
6.7.2 热噪声	163
6.7.3 宇宙噪声	164
*6.8 限带白噪声的模拟与测量	165
习题	167

第七章 连续调制系统与脉冲调制系统的性能

7.1 引言	170
--------------	-----

7.2 线性调制系统的抗噪声性能	171
7.2.1 DSB 调制系统的性能	171
7.2.2 SSB 调制系统的性能	172
7.2.3 AM 系统的性能	173
7.3 调频系统的抗噪声性能	176
*7.4 PAM 系统的抗噪声性能	182
7.5 PPM 系统的抗噪声性能	184
7.6 PCM 系统的抗噪声性能	186
7.7 ΔM 系统的抗噪声性能	189
7.8 PCM 和 ΔM 系统的性能比较	193
7.9 DPCM 系统	195
7.10 非编码调制与编码调制的 性能比较	196
习题	197

第八章 数字基带信号及其传输

8.1 数字基带传输系统的基本结构	200
8.2 信息的数字表示法	201
8.3 基带信号	203
8.4 基带波形的形成	211
8.5 基带脉冲传输与码间串扰	213
8.6 理想的基带传输特性	215
8.7 理想基带系统的性能	219
8.8 眼图	221
习题	223

第九章 数字调制

9.1 引言	226
9.2 数字振幅调制	227
9.3 数字频率调制	229
9.4 数字相位调制	233
9.5 多进制数字调制	236
9.5.1 多进制数字振幅调制	236
9.5.2 多进制数字频率调制	239
9.5.3 多进制数字相位调制	240
习题	244

第十章 数字调制系统的性能

10.1 二进制振幅键控系统的性能	247
10.2 二进制移频键控系统的性能	252

10.3 二进制移相键控系统的性能	257	13.2 理想信道下的最佳基带系统	311
10.4 二进制数字调制系统的性能比较	261	13.3 非理想信道下的最佳基带系统	314
10.5 多电平振幅调制系统的性能	262	13.4 部分响应系统	317
10.6 多频数字调制系统的性能	264	13.5 均衡原理	321
10.7 多相数字调制系统的性能	265	13.5.1 频域均衡	321
习题	267	13.5.2 时域均衡	323
		习题	330

第十一章 信息传输引论

11.1 引言	268
11.2 信息的量度	268
11.3 信息速率与信道容量	270
11.4 带宽与信噪比的互换	273
11.5 实际系统的潜力	275
习题	277

第十二章 数字信号的最佳接收

12.1 引言	280
12.2 数字信号接收的统计表述	280
12.3 关于最佳接收的准则	283
12.4 确知信号的最佳接收	284
12.4.1 二进制确知信号的最佳接收机	285
12.4.2 二进制确知信号最佳接收机的性能	287
12.4.3 二进制确知信号的最佳形式	290
12.4.4 多进制确知信号的最佳接收机及其性能	292
12.5 随相信号的最佳接收——非相干接收	294
12.5.1 二进制随相信号的最佳接收机	294
12.5.2 二进制随相信号最佳接收机的性能	298
*12.5.3 多进制随相信号的最佳接收	300
*12.6 起伏信号的最佳接收	302
12.7 匹配滤波器的实现	305
习题	310

第十三章 基带系统的最佳化

13.1 引言	311
---------------	-----

第十四章 同步原理

14.1 引言	333
14.2 锁相环的基本概念	333
14.2.1 基本锁相环的组成	334
14.2.2 锁相环路的传输函数	335
14.2.3 锁相环的跟踪性能	336
14.2.4 锁相环路的噪声性能	337
14.2.5 锁相环的同步带宽	338
14.2.6 锁相环的捕捉带宽和捕捉时间	338
14.2.7 锁相环的同步保持时间	338
14.3 载波同步的方法	339
14.3.1 插入导频法	339
14.3.2 直接法	342
14.4 载波同步系统的性能	344
14.4.1 稳态相差 $\Delta\varphi$	344
14.4.2 随机相差	345
14.4.3 建立时间和保持时间	348
14.5 载波相位误差对解调性能的影响	350
14.6 位同步的方法	351
14.6.1 插入导频法	351
14.6.2 直接法	352
14.7 位同步系统的性能及相位误差对性能的影响	359
14.7.1 数字锁相相位同步系统的性能	359
14.7.2 位同步相位误差对性能的影响	361
14.8 群同步	361
14.8.1 起止式同步法	362
14.8.2 连贯式插入法	362
14.8.3 间隔式插入法	363
14.8.4 群同步系统的性能	365
14.8.5 群同步的保护	367
*14.9 网同步的基本概念	368

14.9.1 主从同步法	370	16.6.5 数据加乱器	425
14.9.2 相互同步法	370	16.6.6 噪声产生器	426
14.9.3 码速调整法	370	习题	427
14.9.4 水库法	371		
习题	372		
第十五章 差错控制编码		*第十七章 扩展频谱通信	
15.1 引言	375	17.1 引言	428
15.2 纠错编码基本原理	376	17.2 直接序列调制系统	430
15.3 常用的简单编码	379	17.3 频率跳变系统	436
15.4 线性码	383	17.4 时间跳变系统	441
15.5 循环码原理	387	17.5 线性调频系统	442
15.6 循环码的编解码方法	391	17.6 混合系统	447
15.7 循环码的性质	394	17.6.1 跳频/直扩系统	447
15.8 实际的循环码	396	17.6.2 跳时/跳频系统	448
15.9 卷积码	398	17.6.3 跳时/直扩系统	448
习题	404	17.7 系统的同步	449
		17.7.1 初始同步	450
第十六章 正交编码及其应用		17.7.2 同步识别	451
16.1 引言	406	17.7.3 跟踪	452
16.2 哈达马矩阵	408	习题	455
16.3 M序列的产生	410		
16.4 M序列的性质	415	*第十八章 分集接收	
16.4.1 均衡性	415	18.1 引言	458
16.4.2 游程分布	416	18.2 信号的分散	459
16.4.3 移位相加特性	417	18.3 信号的合并	463
16.4.4 自相关函数	418	18.4 最佳选择式合并	464
16.4.5 伪噪声特性	419	18.5 等增益合并	465
16.5 其他PN序列简介	419	18.6 最大比值合并	467
16.6 PN序列的应用	421	18.7 三种合并方式的性能比较	468
16.6.1 误码率测量	421	18.8 数字信号的分集接收	470
16.6.2 时延测量	422	习题	472
16.6.3 分离多径	423	参考资料	473
16.6.4 通信加密	425	英文缩写名词对照表	474

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、语音、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来完成的通信方式。这里的导线可以是架空明线、电缆及波导等。例如普通的有线长途电话系统可由图 1.1 来示意。图中，电话机完成语音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，语音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。

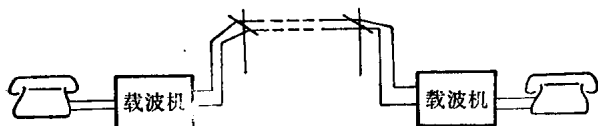


图1.1 有线长途电话系统示意图

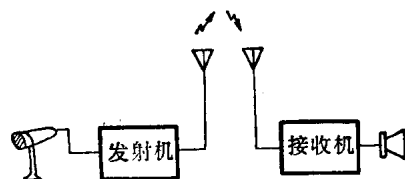


图1.2 无线电话系统示意图

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，无论何种通信，均是把一地（发送端）的消息传递到另一地（接收端），因而，通信系统可由图 1.3 加以概括。这里，信息源（也称发终端），它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),它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。

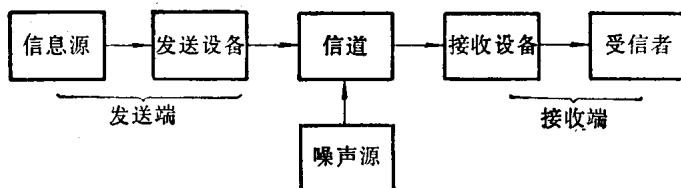


图 1.3 通信系统的模型

图 1.3 便是对各种通信系统的一个抽象,它概括地反映了通信系统的共性,人们常称其为通信系统的模型。通常,根据我们的研究对象及关心的问题不同,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,不仅更加促进电话通信的高速发展,而且于二十世纪中叶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;在通信的传输方式上,早已打破人与人之间进行通信的旧框框,已经实现人与机器或机器与机器之间的通信。

展望未来,尽管通信技术已经发展到了一定的高度,但是,通信的发展仍然不能满足社会的需要。因此,通信科学必将朝着更高的水平不断发展。

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,一类称作模拟消息。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。而模拟消息则是非离散型的，也即消息状态是连续变化的，例如，强弱连续变化的语音、亮度连续变化的图象等。模拟消息也称为连续消息。

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，但在一个很长的历史时期中，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）的能力强，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，改善传输质量；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”概括。在外因方面，一是社会对通信技术的需要越来越迫切，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，考虑到现有设备多数是模拟通信设备这一事实，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。这就需要对该系统作些改造，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。

对于模拟通信系统, 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信号, 接收端的原始信号要变换成连续消息。这种变换设备是一种换能器, 它将声能或光能转换成电能, 或者进行相反转换。这里所说的原始信号, 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。如果这样做, 将使发送效率很低(传输损耗太大), 因此, 模拟通信系统里就有第二种重要变换: 将原始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。

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。

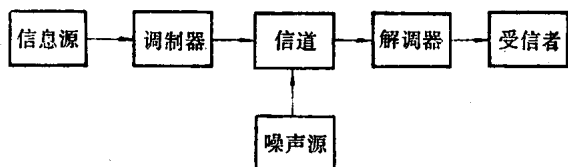


图 1.4 模拟通信系统模型

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, 强调其开关特性, 即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(见第十五章)。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码的(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”，而称编码一致为“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（见第十四章）。

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

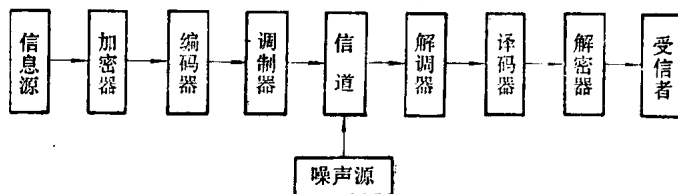


图 1.5 数字通信系统模型

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。本书的第四、七、十一章将要涉及到。

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）收发两端的换能过程、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字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

为了便于今后的讲述，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，那末，按消息传送的方向与时间，通信的方式可分为单向通信、半双工通信及全双工通信三种。

所谓单向通信，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，就是一种单向通信方式。

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。

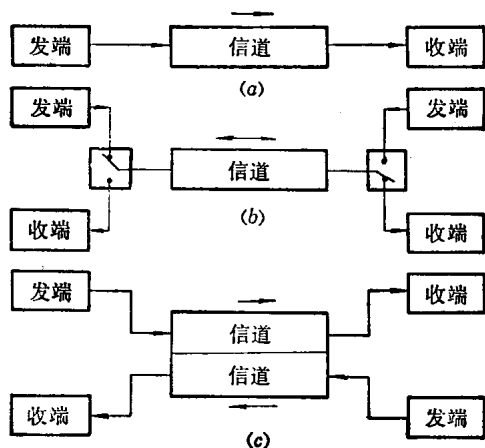


图1.6 通信方式示意图

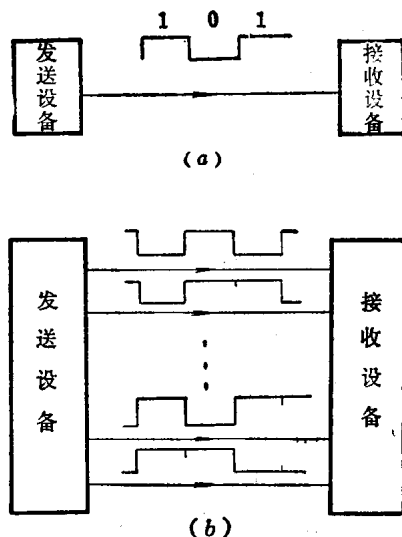


图1.7 串序和并序传输方式

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，即是按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。

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），

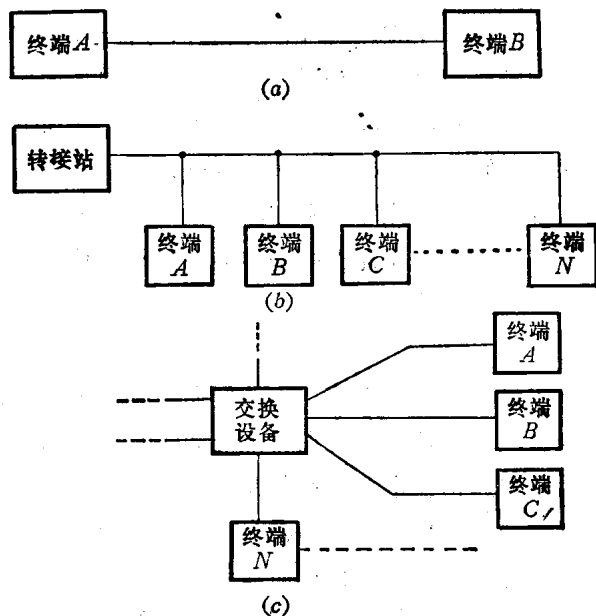


图1.8 通信的网络形式

(a)直通方式；(b)分支形式；(c)交换方式。

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,本书把重点放在这个“基础”上,而较少地讨论网通信问题(仅将讨论网同步问题)。

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。

● 关于信息量的概念,在信息论中有详细讨论。本书第十一章也将作些介绍。

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4800B。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_{B2} , N进制码元速率为 R_{BN} ,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:

$$R_{B2} = R_{BN} \log_2 N \quad \text{波特}$$

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(第十一章)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_i ,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。