

数字通信原理

《数字通信原理》编写组

海军司令部通信兵部
西北电讯工程学院

一九七四年一月

7N919/11

毛主席语录

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

前 言

十多年来，数字通信理论和技术有着迅速的发展。在无产阶级文化大革命的推动下，数字通信在我国的研究和应用也日益广泛。为了适应社会主义建设和教育革命的需要，我们编写了这本讲义。它主要是为从事数字通信设备研制工作的工人、工程技术人员以及有关教学工作人员编写的；本讲义也可以作为工农兵学员的参考书。我们期望它能起到为无产阶级政治服务、为社会主义经济基础服务、为培养无产阶级革命事业接班人服务的作用。

在准备编写这本讲义的阶段，遵照毛主席关于“教材要彻底改革”和“洋为中用”等的指示，我们曾到有关工厂、部队、研究单位和院校学习，也曾参阅了国外有关数字通信方面的科学技术资料，力图使这本讲义能将一般理论同我国工农兵在三大革命中的丰富实践经验和发明创造结合起来，使之适应社会主义革命和社会主义建设发展的需要。在讲义的编写方法上，我们根据党的群众路线，组织了较多人员参加讨论和编写。讲义的初稿曾于一九七二年三月至九月在内部举办的“数字通信学习班”上使用过，这次，根据实施中的问题和同志们的意见进行了较全面的讨论和修改。但是，我们攻读马、列和毛主席著作很不够，业务水平不高，实践经验缺乏，编写时间也仓促，因此，我们实际做到的与上述目的要求相差尚远。为了当前的工作需要，也只好先行付印使用，有待以后在实践中逐步改进。书中缺点错误肯定不少，热切希望广大读者提出宝贵意见。

这本讲义在内容上侧重于无线电数字通信，兼顾有线电数字通信。另外，限于篇幅，对于“信源编码”和“数字通信网”问题也未予纳入。因此严格地讲，这本讲义主要讨论的是两点之间的“无线电数字传输”问题。

许多兄弟单位的同志，对本讲义的编写提出了宝贵意见，对此我们表示衷心的感谢。

《数字通信原理》编写组

1974.1

目 录

第一章 概 论	1
1-1 什么是数字通信	1
1-2 数字通信系统举例	2
1-3 数字通信系统模型	4
1-4 数字通信系统的主要指标	6
第二章 概率论及随机过程的基本知识	9
引 言	9
2-1 概率的基本概念	9
2-1-1 事件与概率	9
2-1-2 概率的几何解释	12
2-1-3 条件概率与统计独立	13
2-1-4 全概率定理与贝叶斯定理	15
2-1-5 贝努利定理	17
2-2 随机变量的概率分布	18
2-2-1 分布函数与概率密度	18
2-2-2 多元随机变量	23
2-2-3 随机变量的函数	27
2-2-4 数字特征	34
2-2-5 特征函数	40
2-2-6 正态分布	42
2-3 随机过程的理论基础	48
2-3-1 随机过程的基本概念	48
2-3-2 平稳随机过程及各态历经性	51
2-3-3 随机过程的功率谱密度	53
2-3-4 周期性随机过程的功率谱密度	58
2-3-5 相关函数和功率谱密度的性质	60
2-3-6 两个随机过程之间的统计联系	63
2-3-7 正态随机过程	65
第三章 随机信号通过线性系统	67
引 言	67
3-1 线性系统分析原理	67
3-1-1 系统函数	68
3-1-2 冲激响应函数	70
3-2 随机信号通过线性系统	73

3-2-1	输出随机过程的数字特征	73
3-2-2	线性系统的噪声等效带宽	75
3-2-3	输出随机过程的概率分布	77
3-3	随机过程通过窄带线性系统	77
3-3-1	窄带随机过程	77
3-3-2	正态窄带随机过程的包络和相位的分布	78
3-3-3	正弦信号加正态窄带随机过程的包络和相位的分布	82
3-4	匹配滤波器	87
3-4-1	问题的提出: 错误概率与信噪比	87
3-4-2	匹配滤波器的传输特性	88
3-4-3	匹配滤波器的输出信号与噪声	92
3-4-4	匹配滤波器举例	94
3-4-5	输入噪声为非白噪声时最佳滤波器的传输特性	103
第四章	信道表述	105
4-1	引言	105
4-2	信道的一般模型	105
4-3	随机多径传输及对流层散射信道	109
4-3-1	随机多径信道的传输函数	110
4-3-2	包络和相位的分布	111
4-3-3	时间自相关函数	113
4-3-4	频率自相关函数	114
4-3-5	频率选择性衰落	115
4-3-6	多普勒效应, 衰落功率谱, 衰落速率	118
4-3-7	差分迟延, 多径的可分辨度	120
4-3-8	包络时间导数 $r'(t)$ 的分布	120
4-3-9	包络频率导数 $i(u)$ 的分布	121
4-3-10	瞬时频率 $\varphi'(t)$ 的分布	122
4-3-11	包络迟延 $\dot{\varphi}(u)$ 的分布	122
4-3-12	时间导数 $\varphi''(t)$ 的分布	123
4-3-13	频率导数 $\dot{\varphi}(u)$ 的分布	124
4-3-14	实验观察到的传输损耗变化	124
4-3-15	对流层散射信道模型	125
4-3-16	实验观察到的快速起伏的时间自相关函数	125
4-3-17	对流层散射信道的差分迟延	126
4-3-18	实验观察到的频率自相关函数	126
	附 录	128
第五章	数字信号最佳接收原理	130
	引 言	130
5-1	最佳接收基础	131

5-1-1	消息、信号及干扰的统计描述	131
5-1-2	频域与时域的正交展开式	133
5-1-3	关于最佳接收的准则	136
5-2	恒参信道下数字信号的最佳接收——相干接收	138
5-2-1	二元制时的最佳接收机结构	139
5-2-2	二元制时的最佳接收机性能	143
5-2-3	二元制时的最佳信号形式	146
5-2-4	多元制时最佳接收机的结构及其性能	147
5-2-5	多元制时的最佳信号形式	151
5-3	随相数字信号的最佳接收——非相干接收	153
5-3-1	二元随相信号的最佳接收	153
5-3-2	二元制非相干接收时的最佳信号形式	159
5-3-3	多元随相信号的最佳接收	161
第六章	基带传输系统	165
6-1	基带信号	165
6-1-1	基带信号的表示	165
6-1-2	基带信号的波形和频谱	167
6-1-3	奈奎斯特准则	170
6-1-4	实用基带信号	173
6-2	基带传输系统的设计	176
6-2-1	基带传输系统模型	176
6-2-2	理想信道的最佳传输系统	177
6-2-3	非理想信道的最佳传输系统	179
6-3	基带传输系统的均衡	182
6-3-1	眼图	182
6-3-2	横向滤波器均衡	184
6-3-3	自动均衡系统	186
6-4	基带传输系统的典型电路	189
6-4-1	基带脉冲变换与发送滤波器	190
6-4-2	接收积分电路	193
6-4-3	取样判决电路	195
第七章	线性调制系统	197
7-1	线性调制信号	198
7-1-1	线性调制信号的一般分析	199
7-1-2	振幅键控信号	200
7-1-3	单边带调制信号	201
7-1-4	残留边带调制信号	204
7-2	线性调制信号的产生	206
7-2-1	振幅键控信号的产生	207

7-2-2	单边带信号产生器	208
7-2-3	残留边带信号产生器	211
7-3	线性调制信号的解调	212
7-3-1	振幅键控信号的解调	212
7-3-2	单边带信号与残留边带信号的解调	216
7-3-3	等效基带传输系统	218
7-4	采用相关电平编码的线性调制系统	220
7-4-1	相关电平编码的基本原理	221
7-4-2	相位变化的调幅系统	225
7-4-3	采用相关电平编码的单边带系统	226
第八章	数字频率调制系统	228
8-1	数字频率调制信号	228
8-1-1	相位离散的数字调频信号	228
8-1-2	相位连续的数字调频信号	230
8-2	数字调频信号的产生	232
8-2-1	频率转换法	232
8-2-2	直接调频法	234
8-3	数字调频信号的解调	236
8-3-1	最佳非相干解调器	236
8-3-2	匹配滤波器的实现方法	237
8-3-3	限幅鉴频解调法	243
8-3-4	零交点计数检波法	244
8-4	数字调频系统抗干扰性能分析	245
8-5	多元数字频率调制系统	247
8-5-1	多元数字调频信号的产生	248
8-5-2	多元数字调频信号的解调	250
8-5-3	起伏噪声下多元数字频率调制系统的抗干扰性能	252
第九章	数字相位调制系统	255
9-1	数字相位调制的一般原理	255
9-1-1	移相信号的表示与分析	255
9-1-2	绝对移相与相对移相	257
9-2	二相差分移相系统	259
9-2-1	二相差分移相原理	259
9-2-2	二相差分移相信号的产生	260
9-2-3	二相差分移相信号的解调	265
9-2-4	鉴相器电路及其工作原理	268
9-2-5	二相移相系统的抗干扰性能	273
9-3	多相数字调制系统	277
9-3-1	相干四相调制	278

9-3-2	差分四相调制	280
9-3-3	多相数字调制系统的抗干扰性能	300
第十章	衰落信道下数字信号的传输	304
引言		304
10-1	衰落的本质及其分类	304
10-2	衰落情况下数字通信系统的性能	307
10-3	瑞利衰落下数字信号的最佳接收	309
10-4	分集接收	314
10-4-1	分集方式与接收信号的相关性	314
10-4-2	最佳非相干分集接收	317
10-4-3	关于分集信号的合并方法	322
10-5	衰落下调制及检测技术的选择	328
10-5-1	多元制及多路并行传送制	328
10-5-2	时频调制	330
10-5-3	时频相调制	337
10-5-4	自适应接收技术简介	340
第十一章	同步原理	343
11-1	位同步	343
11-1-1	滤波法提取位同步信号	343
11-1-2	锁相原理	346
11-1-3	模拟锁相法提取位同步信号	352
11-1-4	数字式锁相	353
11-1-5	几种同步方案介绍	361
11-2	载波同步	364
11-2-1	直接法	365
11-2-2	插入导频法	368
11-2-3	相干载波相位误差的影响	373
11-3	群同步	376
11-3-1	引言	376
11-3-2	利用特殊码组作同步码组时的概率计算	377
11-3-3	巴克码	379
11-3-4	群同步保护	381
第十二章	正交编码及其应用	385
12-1	正交编码及正交性	385
12-1-1	正交和相关函数的定义	385
12-1-2	超正交性和单纯码	387
12-1-3	正交码和双正交码	391
12-1-4	哈达马矩阵	391
12-2	最长线性移位寄存器序列(M序列)	393

12-2-1	双值自相关序列和伪随机序列	393
12-2-2	M序列的产生	395
12-2-3	特征多项式和母函数的关系	397
12-2-4	SR序列的周期与产生M序列的充要条件	398
12-2-5	M序列诸性质的证明	402
12-2-6	M序列的采样	404
12-3	其它PN序列	407
12-3-1	二次剩余序列(L序列)	407
12-3-2	双素数序列(TP序列)	409
12-3-3	非周期自相关函数和巴克(Barker)序列	410
12-4	PN序列的实现	412
12-4-1	直接产生法	412
12-4-2	间接产生法(一)	416
12-4-3	间接产生法(二)	418
12-5	正交编码应用举例	420
12-5-1	迪其洛克(Digilock)正交编码通信系统	420
12-5-2	采用M序列的瑞克(Rake)系统	426
12-5-3	利用M序列进行多地址通信	430
12-5-4	PN序列的其它用途	434
第十三章	误差控制与纠错编码	437
	引 言	437
13-1	误差控制的基本思想和方法	439
13-1-1	误差控制的基本形式	439
13-1-2	检测(发现)错误的常用方法	443
13-2	线性分组码	446
13-2-1	基本概念	446
13-2-2	汉明距离与重量	448
13-2-3	线性码	449
13-2-4	汉明码	457
13-2-5	循环码	458
13-2-6	大数逻辑可译码	480
13-2-7	捕错译码	488
13-2-8	纠正突发错误码	492
13-2-9	纠正突发错误和随机错误的码	499
13-3	卷积码	503
13-3-1	卷积码的一般概念	504
13-3-2	纠正随机错误的卷积码	510
13-3-3	纠正突发错误的卷积码	521
13-3-4	纠正随机与突发错误的卷积码	530

13-3-5	卷积码的概率译码	535
13-3-6	分组码与卷积码的比较	546
13-4	设计误差控制系统中的几个问题	547
13-4-1	用户的要求	547
13-4-2	信道的错误统计特性	548
13-4-3	各种误差控制方式的性能估计与比较	552
13-4-4	设计误差控制系统的一般步骤	556

第一章 概 论

1-1 什么是数字通信

毛主席教导我们说：“在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。”数字通信就是近十多年来在电报通信基础上迅速发展起来的一种通信方式。

大家知道，通信系统是用来传送消息的。为了传送消息，通常必须通过末端设备将消息变为电信号。这样的信号通常可按其代表消息的参量的取值方式分为两类：一类是模拟信号，又称连续信号，如电话机送话器输出的语言信号、摄影管产生的图象信号，它们的电压（电流）取值为连续的时间函数；另一类是数字信号，又称离散信号，如电报数字和文字、雷达数据、遥控指令等，它们仅可能有有限个离散的取值。通常我们把传输模拟信号的系统称为模拟通信系统，把传送数字信号的系统称为数字通信系统。如普通的印字电报通信就是数字通信的一种形式。打电报时，首先把每个汉字用4位阿拉伯数字表示，然后把每位阿拉伯数字又用五个二进制的电流脉冲序列表示，所以在信道中真正传送的是一系列电流脉冲，而且每个电流脉冲只可能有两种不同的取值。

现在，我们来简要地分析一下，数字通信系统和模拟通信系统相比，除了具有一般通信系统普遍具有的共性之外，还有哪些本质上的区别？

在模拟通信系统中，传输的是一个连续的模拟波形，即传输的是取值连续变化的某个参量。这时，要求接收机能以高保真度来复现原发送的消息波形。对于系统传输质量的衡量准则主要是输出信噪比，它代表输出波形与输入波形之间的均方误差。因此，模拟系统中的基本问题就是一个连续波形的参量估值问题。模拟信号传输的理论基础主要是参量估值理论。

在数字通信系统中，传输的是有限个离散取值的信号之一。因此，要求接收机能在存在各种干扰的条件下，正确判决（或检测）出当时发送的是哪一个离散值。至于接收波形的失真，只要它还不足以影响接收机的正确判决，就没有什么关系。这时，系统传输质量的衡量准则主要是错误判决的概率。研究数字信号传输的基本理论主要是统计判决理论。

由于我们对于上述两种系统传输质量的衡量准则不同，因此我们关心的系统性能参数也不同。在数字通信系统中，我们关心的是：错误概率、输入信噪比、传输速率和传输带宽等。而在模拟系统中，我们考虑的是：输出信噪比、输入信噪比和频带展宽因数（调制前后信号的带宽比）等等。

此外，在数字通信中，由于在接收端要进行对每个发送消息的判决，故在发送端和接收端之间一般需要建立时间轴的“同步”。所以，同步问题也是数字通信中的一个很重要的问题。同步不良会使错误判决概率增加，或使全部接收消息无法识别。

但是，在许多模拟通信系统中，常常不存在同步问题。仅在电视图象传输及时分制多路脉冲调制通信等模拟系统中存在同步问题。

数字通信由于传送的是一系列数字信号，因而具有很多优点：

(1) 信号形式简单, 而且不管是指令(呼叫)信号还是逻辑信息, 在传输中均同样处理。因而其产生、编码、存贮、转接都很方便, 且便于与其他数字式设备(如电子计算机)联用;

(2) 数字信号由于其取值仅有有限个, 故在有干扰的条件下容易检测(判决), 并且在中继传输中每个中继站都可对其加工整形, 消除波形误差的积累;

(3) 数字信号便于采用抗干扰编码, 因而通信系统的抗干扰性比较高;

(4) 在数字通信中便于实现保密性强的数字式加密, 因而可增加通信的保密性;

(5) 数字信号的多余度较小, 因而信道利用率较高;

(6) 在模拟调制中, 例如调频, 输出信噪比仅和带宽成正比地增加, 而在数字调制中, 例如脉冲编码调制, 信噪比随带宽增加按指数规律上升。

由于数字通信具有上述优点, 所以现在有一些模拟信号, 例如语言、遥测信号等, 也有时希望将其数字化, 然后以数字信号形式传输。

数字通信除了用以传输电报报文、数字电话等信号外, 更为重要的用途是和电子计算机、数据处理设备等结合起来, 构成自动化集中数据处理系统, 这种系统能够广泛应用于国民经济和国防建设的各个领域。从另一方面讲, 由于雷达、遥测和遥控技术的发展, 特别是数字电子计算机的广泛使用, 需要传输的数据量大为增加, 对传输速率和可靠性要求也更高, 这样就促使数字通信技术近十多年来有着飞速的发展。

此外, 还应该指出, 数字通信技术迅速发展的一个重要条件是半导体技术(特别是集成电路)使设备能够小型化并且具有高可靠性。否则, 需要应用成千上万个有源器件的数字通信设备是不可能实际应用的。

目前, 数字通信技术的发展使数字传输的速率和可靠性不断提高。在当前的实际应用中, 系统的传输速率已达每秒 1 兆比特左右; 而在实验室中, 试验速率高达百兆比特/秒的数量级。为了在很高传输速率下, 实现可靠通信, 不断降低错误传输概率, 误差控制技术有了迅速发展。特别是纠错编码的数学理论研究日趋深入, 多种纠错编码技术已付诸实用。卷积编码和概率译码(序列译码和维特比译码等)技术在卫星通信系统中也已得到实用。为了适应在衰落扩散信道中传输高速数据, 除了纠正突发错误(及兼有突发和随机错误)的编码理论和技术目前研究很多以外, 新的调制解调技术和自适应均衡系统近来也在不断发展。正交编码(包括伪随机码)在数字通信中应用日益广泛, 特别是用于卫星通信中进行码分多址通信, 是很引人注意的。

总之, 数字通信的理论和技術目前仍处在迅速发展之中。数字通信方式是很有前途的一种通信方式。

1-2 数字通信系统举例

数字通信由于具有上述优点, 因而在国防通信、自动化防空体系、生产运输、经济管理、科学实验等领域内得到了广泛应用。现举例说明几种数字通信系统的组成:

1. 快速电报:

由于现代武器的速度迅速提高, 原来的人工电报远远满足不了军事需要。此外, 在利用流星余迹通信时, 信道每次能利用的时间很短, 一般只有几毫秒到几秒, 而且是随机的, 所以只能用自动快速电报通信。又如, 潜艇对岸站的通信, 为了避免敌人的定位及侦听, 就必须在极短时间内发完报文。在上述一些情况下, 需要采用自动快速电报的方式。这种快速电

报系统的原理方框图示于图 1-1。

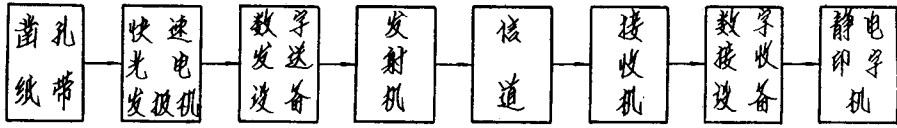


图 1-1 快速电报通信原理图

凿孔纸带是事先由凿孔机凿好的，凿孔纸带上的穿孔及不穿孔表示所要发送的信息。凿孔纸带通过光电发报机产生所需的数字电信号。而后将此信号送至数字发送设备，其中可能有编码器，也可能仅有调制器。信号经发送设备的(编码)调制送入发射机发射出去。接收机收到信号后经放大送至数字接收设备，经解调(译码)后通过静电印字机在特制的纸带(页)上印出报文。

快速电报的另一种形式是多个用户共用一个数字传输系统，这种情况也称为多路复用。其原理方框图示于图 1-2。

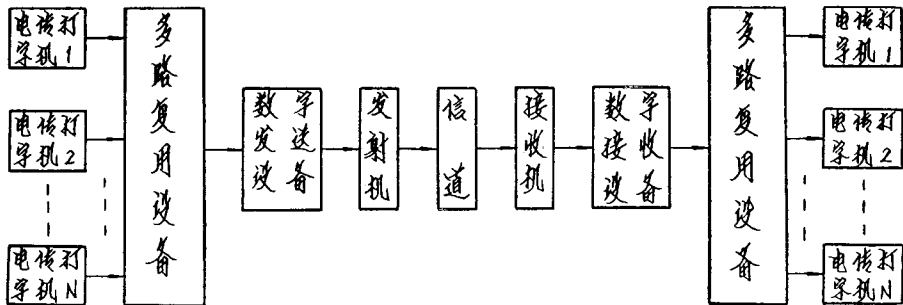


图 1-2 多路复用数字传输系统

这种传输方式对每个用户而言速率很低，便于直接接受，但总的传输速率却可做得很高。它的优点是多个用户可以同时通报，容量大。但复用设备比较复杂。

2. 数字电话:

数字电话通信系统可用图 1-3 中方框图表示。送话器送出的信号为连续信号，它经过模拟-数字转换设备变换为数字信号，而后送入保密机进行加密，再经数字发送设备和发射机变为信道信号。接收端把收到的信道信号首先解调为数字信号，并进行解密，然后送到数字-模拟转换装置，还原成原始的连续信号送到受话器输出。

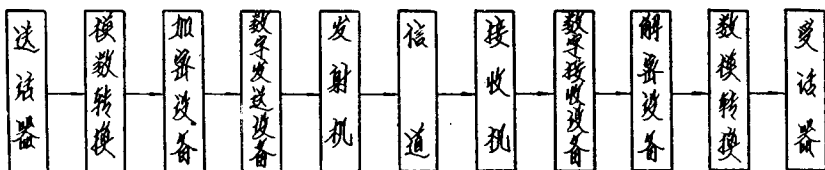


图 1-3 数字电话系统方框图

数字电话保密性好，且抗干扰性能高。但设备比较复杂。图 1-3 中的加密设备和解密设备合称保密机。

3. 数据、指令的传输：

在自动化防空体系中及导弹控制系统中，雷达数据与遥控指令的传输是十分重要的。这种系统的原理方框图示于图 1-4。

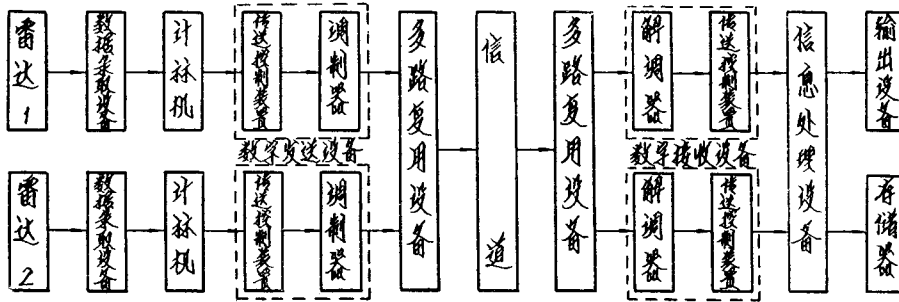


图 1-4 雷达数据传输系统方框图

雷达测量到的数据经录取设备变成一组数字信号送入计算机。计算机计算所得到的结果由传送控制装置在所要求的时间内送入数字发送设备，经调制后送入载波机或其他多路复用设备。复用设备将多路数字信号送入信道。在接收端信号经过相反的变换后送入信息处理设备，在这里把各个雷达送来的数据进行处理，一部分送到存贮器，另一部分送到输出设备，或者再经过数据传输设备送往其他地方进行控制或交换。

传送控制设备除了对数据的输入输出进行控制外，还可能加抗干扰编(译)码。

通常把传送控制装置及调制、解调器结合在一起称为数据传输设备，简称为数传机。

象这样的系统又可简化为如下的方框图

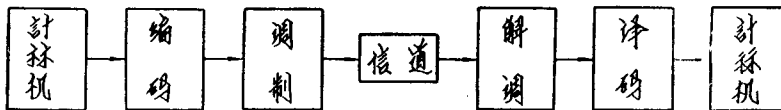


图 1-5 数据传输系统方框图

由此可见，这个数字通信系统是为计算机与计算机之间的通信用的，在这里信道的概念更广泛了，它除了包括真正的传输媒质外，连发射机、接收机的高频部分也包括进去了。

1-3 数字通信系统模型

上节已指出，数字通信系统种类繁多，用途不一。然而我们却可用图 1-6 模型加以概括。

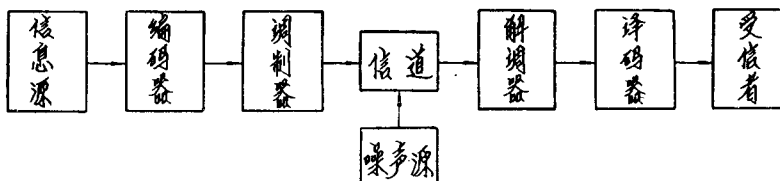


图 1-6 数字通信系统模型

1. 信息源和受信者：信息源是产生数据信息的人或物体。受信者则是用来接受数据信息的人或物。

信息源(数据源)和受信者(数据收集器)有时也称末端设备，它是一种能量转换装置。在低速传输系统中可直接采用电传打字机作为末端设备，但在高速数据传输系统中必须有存贮与变换装置。它们可以是纸带、磁带、卡片或磁芯存贮器。数据收集器与数据源必须相适应，以便能记录下所传送的消息。表 1-1 分类示出各种常见的末端设备。

表 1-1 末端设备分类

	数 据 源	收 集 器
记忆装置	纸带读出器 卡片读出器 磁带读出器 磁芯存贮器	纸带穿孔器 卡片穿孔器 磁带记录器 磁芯存贮器
直接输入-输出装置	键 盘 开 / 关 转 向 器 继 电 器 触 点	印 字 器 二 进 制 指 示 器 屏 幕 显 示 或 控 制 器
数字电话	数 字 电 话 编 码 器 (模/数转换器)	数 字 电 话 译 码 器 (数/模转换器)

2. 编码器与译码器：

编码器把原始信号进行适当的编码。译码器则进行编码的反演。

编码器主要包含两个部分：信源编码器和信道编码器。

信源编码器的主要任务是解决模拟信号数字化和提高数字信号的有效性。例如，将模拟信号变换为数字信号的脉冲编码调制、图样识别、数据压缩措施等即属于信源编码。这就是说，信源编码的目的是在一定保真度的条件下将模拟信号数字化，并且解除信号之间的内在统计关联，以压缩传输原始消息所需的数据速率。信源编码已形成通信理论的一个重要分支，本书不讨论这部分内容。

信道编码器则主要解决可靠性问题。它将信源编码器输出人为地按一定规则增加一些多余的数字以达到能自动发现或纠正传输中发生的错误的目的，从而提高通信的可靠性。山农基本定理指出，在给定的信道条件下，信道有一个最高传输信息的能力，称为信道容量；如果以小于信道容量的速率传输信息，则可通过编码的方法实现错误概率任意小的通信。信源和信道编码则是实现这种有效而可靠的通信的手段。当然，目前的水平还远未达到信息论基本定理指出的理论极限，但十几年来已朝这一方向大大前进了。

此外，为了实现保密通信，可在信道编码器前(或后)对信号加上密码，而在接收端相应位置解密。密码的研究也属于编码的范畴。

3. 调制器与解调器：

原始的数字信号一般是不适合于在信道中直接传送的，必须对一载波振荡进行调制，利用载波振荡的某个参量的变化来传送信息。所以说调制器的功用是把原始信号变为适合于信道传送的信号。解调器则进行反变换，把接收到的信道信号变为原始的数字信号。在多路传

输时，通过调制还可划分信号，解决多路复用的问题。

调制所用的载波通常使用正弦振荡。正弦波有三个参量可以进行调制，因此可构成调幅、调频、调相三种基本调制方式。

如果按选择参量的参考标准不同，则又可分为绝对调制和相对调制。绝对调制是利用载波某个参量的取值本身传送信息的；相对调制则是利用载波参量取值的相对变化来传送信息的。比如在差分移相中就是利用前后码元信号的相位相对变化来传送信息的。

调制与解调方式对通信系统的质量有很大影响。为了提高系统的性能，就存在调制方式和解调方式的选择问题。从另一方面讲，调制方式选择是信号形式选择的重要内容。

4. 信道与干扰：

信道是用来传送电信号的媒质。能用来进行数字通信的信道很多，主要的有：1. 架空明线；2. 地下及水底电缆；3. 表面波(地波)传播；4. 短波电离层反射传播；5. 微波视距传播；6. 对流层散射；7. 超视距绕射；8. 人造卫星中继；9. 流星余迹散射等等。

在传输过程中信道对数字通信有两方面的影响，即信道本身传输特性的影响与外界加性干扰的影响。信道特性包含振幅-频率特性、相位-频率特性、频率漂移、多径失真等。外界加性干扰则包括起伏噪声、脉冲干扰、电台干扰等。

在设计通信系统时，必须首先掌握信道特性，然后才能正确的选择调制制度与编码方式。

5. 同步：在上面的数字通信系统模型中，虽然未显示出同步系统，但是它在数字通信中一般是不可缺少的重要组成部分。为了使接收端和发送端之间有严格的共同“时间”标准，以便接收端对每个码元进行同步接收和在每个码元终了时刻对其进行取样判决，必须将“位同步”信息传送到接收端。同理，为了对若干码元组成的“字”或对信道编码器编成的“分组码”的每个码组进行正确识别或译码，还需要将“字同步”信息传送到接收端。“位同步”和“字同步”信息可能在代表原始消息的信道信号中原已包含，也可能需要在原信道信号中另外加入“位同步”和“字同步”信号。同步失效，就会使错误判决概率增大，或使全部接收消息无法辨认。

在数字通信网中，为了建立全网的共同“时间”标准，尚存在网同步问题。但是，限于篇幅，我们没有把它列入本书范围。

1-4 数字通信系统的主要指标

在我们考虑数字通信系统的性能要求时，最首要的因素是有效性和可靠性。

伟大领袖毛主席教导我们说：“一切事物中包含的矛盾方面的相互依赖和相互斗争，决定一切事物的生命，推动一切事物的发展”。数字通信系统中的有效性与可靠性也是矛盾的对立统一。所谓有效性就是在给定容量的信道中传送信息的速率高低。所谓可靠性就是信息传输的准确程度。为了提高有效性可缩短码元的长度，但随之可靠性就要降低。为了提高可靠性可采用抗干扰编码增加信号的多余度，但有效性随着就要降低。这就是矛盾的对立统一。

数字通信有效性与可靠性通常可分别用下面的指标来衡量：

1. 传输速率：它用来衡量数字通信系统的有效程度。常用的有以下三种不同的定义：

(1) 码元速率 R_B ：指单位时间(每秒)内所传送的码元数目，单位为“波特”(B)。

(2) 信息速率 R_b ：指单位时间内所传送的信息量，单位为“比特/秒”(b/s)。

在信息论中指出, 当消息源总共可能产生 N 个不同的离散消息, 且第 i 个可能消息出现的概率为 p_i 时, 则每个消息所含的平均信息量为

$$I = \sum_{i=1}^N p_i \log_2(1/p_i) \quad \text{比特} \quad (1-4-1)$$

在实际应用中, 通常认为各个可能消息的出现概率相等, 即 $p_i = 1/N$, 这时上式变成

$$I = \log_2 N \quad \text{比特} \quad (1-4-2)$$

对于二进制信号, $N=2$, 每个码元所含信息量为

$$I_2 = 1 \quad \text{比特} \quad (1-4-3)$$

这时, 码元速率和信息速率在数值上相等。例如, 当每秒传输 50 个二进制码元时, 我们说码元速率为 50 波特, 信息速率为 50 比特/秒。

对于多进制 (M 进制) 信号, 每个码元所含的信息量为

$$I_M = \log_2 M \quad \text{比特} \quad (1-4-4)$$

这时, 信息速率 R_b 和码元速率 R_B 的关系为

$$R_b = R_B \log_2 M \quad \text{比特/秒} \quad (1-4-5)$$

(3) 消息速率 R_M : 即单位时间内所传送的消息数目。例如, 传送文字时单位是“字/秒”。在构成消息时可采用不同的码元基数及不同的长度, 因此消息速率与码元速率的关系对于不同的系统是不相同的。另外在传送信息时还要传送一些同步码元, 也要影响两者之间的关系。

2. 信道频带利用率: 是指单位频带内所能实现的码元速率。它是衡量数字通信系统有效性的重要标志。通常取决于采用的调制方式。

3. 错误率: 这是用来衡量可靠性的主要指标。可以有三种不同定义:

(1) 误码率 P_e : 指错误接收码元数在传输码元总数中所占比例。

$$P_e = \text{错误接收码元数目} / \text{传输码元总数目} \quad (1-4-6)$$

(2) 误比特率 P_b : 指错误接收的比特数在传输总比特数中所占的比例。

$$P_b = \text{错误接收比特数} / \text{传输总比特数} \quad (1-4-7)$$

现在我们讨论误比特率和误码率之间的关系。对于二进制信号, 显然误码率和误比特率相等。对于 M 进制信号, 每个码元含有 $n = \log_2 M$ 比特。而每个特定的错误码元可以有 $(M-1)$ 种不同的错误样式。其中恰好错 i 比特的错误样式有 $\binom{n}{i}$ 个。假定这些错误样式以等概率出现, 则当一个码元发生错误时, 在 n 比特中错误比特所占比例的期望值等于

$$\begin{aligned} \eta_b &= E(\text{错误比特数} / \text{一个码元中的比特数}) \\ &= \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^n \frac{i}{n} \binom{n}{i} = \frac{2^{n-1}}{M-1} = \frac{M}{2(M-1)}. \end{aligned} \quad (1-4-8)$$

所以, 比特错误率为

$$P_b = \eta_b P_e = \frac{M}{2(M-1)} P_e \approx \frac{1}{2} P_e \quad (1-4-9)$$

在某些系统中, 例如采用格雷 (Gray) 码的多相制系统中, 错误码元中仅发生一个比特错误的概率最大。这时, 下式近似关系成立:

$$P_b \approx P_e / \log_2 M \quad (1-4-10)$$

(3) 误字率 P_w : 指错字数在总传输字数中所占的比例。若一个字中有 k 比特, 每比特用一码元传输, 则误字率等于