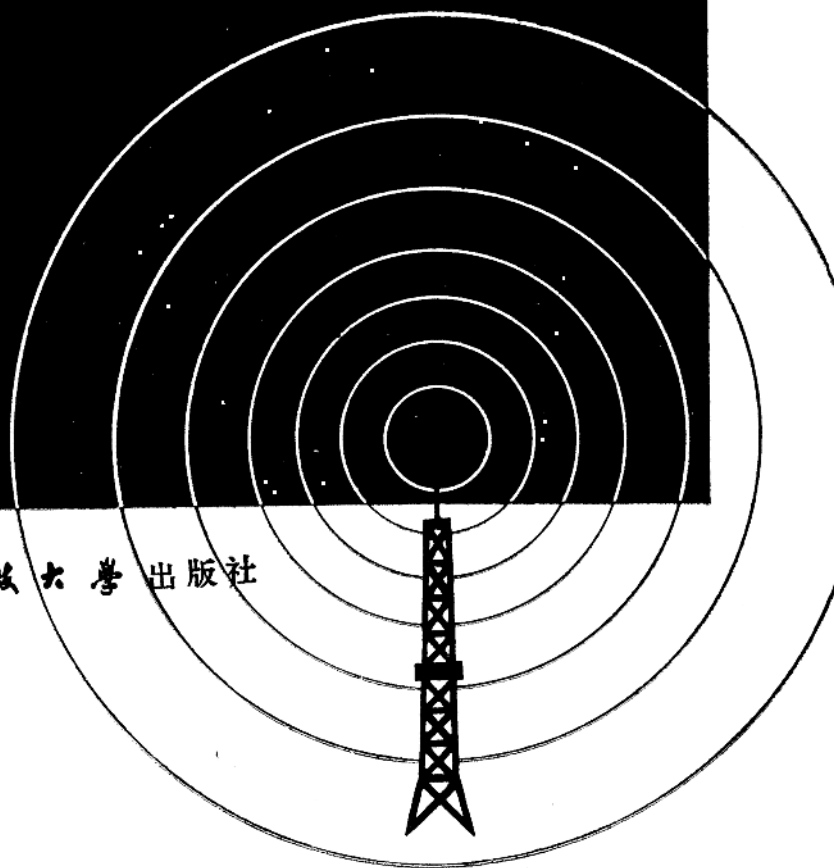


数字通信原理

国防科技大学出版社



前 言

在当今和未来的信息社会中,通信都是人们获取、传递、交换信息的重要手段。随着大规模集成电路技术、激光技术、空间技术等不断发展以及计算机的广泛应用,现代通信技术日新月异。近二三十年来出现的数字通信、卫星通信、光纤通信、程控交换等是现代通信中具有代表性的新领域。应当指出,在这些新领域中,数字通信尤为重要,它是现代通信的基础。特别是数字通信与计算机的紧密结合可以说是通信发展史上的一次飞跃。数字通信与模拟通信相比,具有抗干扰能力强、可以再生中继、便于加密、易于集成化等一系列优点。另外,各种通信业务,不论是语音、电文,还是数据、图象等信号,经过数字化后都可以在数字网中传输、交换、处理,这就更显示了数字通信的优越性。

数字通信涉及的理论和技术是很广的,它包括终端、传输、交换及通信网等方面的内容。数字终端和数字传输是数字通信的基础部分。从学科上讲,数字通信的基础部分又可分为信源编码、信道编码(纠错编码)、数字调制及同步技术等内容。本书就是按照这四个方面来阐述数字通信的原理与技术的。全书分为四篇共22章。第1章:绪论。简要概括地介绍了数字通信的基本概念、特点、主要性能指标和主要技术问题以及应用和发展。第一篇:信源编码。着重阐述分析脉码调制、增量调制、差分脉码调制和压缩编码的原理与技术。第二篇:数字调制。首先介绍了信道特性,接着分析讨论基带传输、线性调制、数字频率调制、数字相位调制的原理与技术以及数字调制技术的发展及其性能。第三篇:同步原理。在介绍了模拟锁相环和数字锁相环原理的基础上,着重阐述分析载波同步、位同步、群同步和网同步的原理与实现方法。第四篇:纠错编码。着重分析讨论线性分组码、循环码和卷积码的编译码原理及电路。

本书是在数字通信专业历届所用《数字信息传输原理》讲义的基础上,经修改、充实,编写而成。根据过去的教学、科研实践经验,综合多种数字通信原理教材和参考书的特点,既着重分析数字通信的基本原理,又注意介绍数字通信的一些新技术。文字叙述上,力求由浅入深,概念清楚;数学分析上,尽量作到步骤清晰,结论明确。本书可以作为大学本科数字通信课程的教材或参考书,也可供从事数字通信技术的科技人员阅读参考。

本书的原讲义稿曾经周祖同教授审阅过,新编全书由汪漱玉副教授审阅,他们都对该书提出了许多宝贵的意见。另外,在编写中,第一篇参考了许织新编的《数据压缩》;第三篇参考了汪嘉颐编的《网同步技术》;第四篇参考了饶世麟编的《编码原理》和王新梅编的《纠错码》。编者在此对他们表示衷心的感谢。

本书的第一篇由杨述明编写;第二篇由董兆鑫编写;第一章和第三篇由李情与编写;第四篇由易波编写。由于编者水平有限,改编时间也较仓促,书中难免有不妥和错误之处,欢迎读者批评指正。

编 者

一九八九年十月

目 录

第一章 绪论

1.1 消息、信息、信号	1
1.1.1 消息	1
1.1.2 信息	1
1.1.3 信号	2
1.2 模拟通信与数字通信	3
1.2.1 模拟通信	3
1.2.2 数字通信	4
1.3 数字通信的主要特点	5
1.3.1 主要优点	6
1.3.2 主要缺点	7
1.4 数字通信系统的主要性能指标	7
1.4.1 传输速率	7
1.4.2 差错率	8
1.4.3 功率利用率和频带利用率	9
1.4.4 系统的可靠性	9
1.4.5 经济性	10
1.5 数字通信的主要技术问题	10
1.5.1 信道与噪声	10
1.5.2 信源编码与译码	11
1.5.3 保密编码与解码	12
1.5.4 信道编码与译码	13
1.5.5 调制与解调	14
1.5.6 同步	15
1.5.7 数字复接与数字交换	16
1.6 数字通信的应用	17
1.6.1 计算机通信	17
1.6.2 遥测、遥控系统	18
1.6.3 军事自动化指挥控制系统	18
1.6.4 航天测控网	18
1.7 数字通信的发展方向	19

第一篇 信源编码

第二章 采样、保持与量化

2.1 模拟信号的采样过程	21
2.2 采样定理	22
2.3 采样信号的频谱	23
2.3.1 采样信号的频谱	23
2.3.2 理想采样器的特性	24
2.4 采样信号的保持	25
2.5 采样信号的均匀量化	27
2.5.1 采样信号的均匀量化	27
2.5.2 均匀量化的量化误差	28
2.5.3 均匀量化信噪比(信号-量化失真功率比)	29
2.5.4 动态范围	31
2.6 采样信号的非线性量化	31

2.6.1 非线性量化	31
2.6.2 十三折线A律压扩非线性量化	32
2.6.3 十五折线 μ 律压扩特性	33
2.6.4 非线性量化时信噪比的改善量	33
第三章 脉码调制	35
3.1 逐次比较型PCM编码器	36
3.1.1 局部译码电路	37
3.1.2 求和比较电路	38
3.2 实际的逐次比较型PCM编码电路	39
3.2.1 全波整流电路	40
3.2.2 极性判决电路	40
3.3 译码方法	43
3.4 非线性编码方法	46
3.5 级联型编码方法介绍	47
3.6 单片PCM编译码器	49
3.7 时分多路复用介绍	52
3.8 PCM高次群介绍	52
第四章 增量调制与差分脉码调制	54
4.1 简单增量调制	56
4.2 DM编码的量化误差	57
4.3 改进型DM编码	57
4.3.1 双积分DM编码	58
4.3.2 连续音声压扩DM编码	59
4.3.3 数字音声压扩DM编码	61
4.3.4 $\Delta\Sigma$ 编码	62
4.4 集成化数字压扩DM	63
4.5 差分脉码调制	63
4.5.1 DPCM编码器的结构	64
4.5.2 H-DPCM编码器电路介绍	64
第五章 压缩编码	68
5.1 预测编码	70
5.2 变换编码	71
5.2.1 变换编码的数学模型	72
5.2.2 离散付氏变换(DFT)	73
5.2.3 Walsh-Hadamard变换(WHT)	74
5.2.4 Haar变换(HrT)	74
5.2.5 斜变换(Slant Transform, ST)	75
5.2.6 离散余弦变换(DCT)	77
5.3 统计编码	78
5.3.1 Huffman编码	79
5.3.2 Shannon-Fano(SF)码	79
第二篇 数字调制	
第六章 信道	81
6.1 信道的影响	82
6.2 频分信道和时分信道	82
6.2.1 频分信道	83
6.2.2 时分信道	84
6.3 有线信道	84
6.3.1 明线	85
6.3.2 对称电缆	86
6.3.3 同轴电缆	86
6.3.4 公共交换网	90
6.3.5 载波信道	95
6.4 无线信道	95

6.4.1 短波信道	95
6.4.2 无线电接力信道	99
6.4.3 卫星中继信道	100
6.5 光纤信道	102
6.5.1 光纤信道的一般组成	102
6.5.2 光纤的传输特性	103
6.6 数字信道	104
6.6.1 时分信道上消息流的组织	104
6.6.2 数字信道的组成方式	106
6.7 信道容量	106
第七章 基带传输系统	109
7.1 基带信号	109
7.1.1 基带信号的类型	109
7.1.2 基带信号的波形和频谱	112
7.1.3 奈奎斯特准则	114
7.1.4 实用基带信号	115
7.2 最佳基带传输系统的设计	120
7.2.1 基带传输系统的模型	120
7.2.2 理想信道的最佳基带传输系统	121
7.2.3 非理想信道的最佳基带传输系统	124
7.3 基带传输系统的均衡	125
7.3.1 眼图	125
7.3.2 均衡原理	126
7.3.3 横向均衡滤波器	128
7.3.4 自动均衡系统	130
第八章 线性调制系统	134
8.1 线性调制信号	134
8.1.1 双边带调制信号	137
8.1.2 单边带调制信号	140
8.1.3 残余边带调制信号	142
8.2 线性调制信号的产生	146
8.2.1 振幅键控信号的产生	146
8.2.2 单边带信号的产生	148
8.2.3 残余边带信号的产生	149
8.3 线性调制信号的解调	150
8.3.1 振幅键控信号的解调	150
8.3.2 单边带与残余边带信号的解调	152
8.4 采用相关电平编码的线性调制系统	153
8.4.1 相关编码的一般工作原理	155
8.4.2 数码变换器的频率特性	156
8.4.3 相关电平编码的线性调制系统举例	157
第九章 数字频率调制系统	161
9.1 数字频率调制信号	161
9.1.1 相位离散的数字调频信号	161
9.1.2 相位连续的数字调频信号	164
9.2 数字调频信号的产生	165
9.2.1 频率转换法	165
9.2.2 直接调频法	166
9.3 数字调频信号的解调	166
9.3.1 最佳非相干解调器	167
9.3.2 匹配滤波器的实现方法	168
9.4 多元数字调频原理	173
第十章 数字相位调制系统	176
10.1 数字相位调制的一般原理	176
10.1.1 移相信号的表示和分析	176
10.1.2 二相绝对移相	178

10.2 二相相对移相	181
10.2.1 二相相对移相信号的产生	182
10.2.2 二相相对移相信号的解调	184
10.3 四相制调相	188
10.3.1 四相制调相信号的产生	188
10.3.2 四相制调相信号的接收	196
10.4 八相制调相	203
10.4.1 八相制调相信号的产生	203
10.4.2 八相制调相信号的接收	206
第十一章 数字调制技术的发展及其性能	
11.1 数字调制的分类	212
11.1.1 振幅调制	212
11.1.2 频率调制	213
11.1.3 相位调制	214
11.1.4 振幅-相位联合调制	215
11.2 几种新的调制技术	215
11.2.1 最小频移键控	215
11.2.2 连续相位频移键控	217
11.2.3 偏置键控-四相相移键控	218
11.2.4 相关相移键控	220
11.2.5 振幅相位混合调制	222
11.3 二元制数字调制系统的误码率	223
11.3.1 二元制振幅键控系统的误码率	223
11.3.2 二元制频移键控系统的性能	228
11.3.3 二元制相移键控系统的性能	231
11.3.4 二元制数字调制系统性能比较	234
11.4 调制性能的比较	235
11.4.1 理想性能	235
11.4.2 谱特性	236
11.4.3 干扰的影响	237
11.4.4 衰落的影响	238
11.4.5 迟延畸变的影响	239
11.4.6 成本和复杂性	240

第三篇 同步原理

第十二章 模拟锁相环的基础知识

12.1 锁相环的组成与工作原理	241
12.1.1 鉴相器	241
12.1.2 环路滤波器	243
12.1.3 压控振荡器	245
12.1.4 环路的相位模型和动态方程	246
12.2 环路的跟踪能力	249
12.2.1 环路的线性相位模型与传递函数	249
12.2.2 三种典型输入信号与求环路跟踪相位误差的方法和步骤	252
12.2.3 二阶环路对典型输入暂态信号的响应	253
12.2.4 稳态相位误差	256
12.3 环路的噪声性能	257
12.3.1 有输入噪声时环路的相位模型	258
12.3.2 环路对输入噪声的滤波性能	259
12.4 环路的捕获与失锁	264
12.4.1 捕获的基本概念	264
12.4.2 捕获过程	265
12.4.3 捕获性能参数	268
12.4.4 同步带与同步保持时间	269
12.4.5 环路的失锁	270

12.5 模拟锁相环的设计	271
12.5.1 模拟锁相环参数	271
12.5.2 模拟锁相环的一般设计方法和步骤	273
第十三章 数字锁相环	
13.1 数字锁相环的组成和特点	276
13.2 数字锁相环的环路部件	277
13.2.1 数字式鉴相器	277
13.2.2 数字式滤波器	281
13.2.3 数控振荡器	284
13.3 常用的一些数字锁相环	286
13.3.1 触发鉴相型数字锁相环	286
13.3.2 采用集成器件构成的数字锁相环	287
13.3.3 软件数字锁相环	288
13.3.4 微分鉴相型数字锁相环	288
13.3.5 积分鉴相型数字锁相环	291
13.3.6 快捕数字锁相环	294
13.4 数字锁相环的性能分析	295
13.4.1 环路的基本方程	295
13.4.2 相位阶跃响应	296
13.4.3 频率阶跃响应	298
13.4.4 数字锁相环的性能指标估算	301
第十四章 载波同步	
14.1 双边带调制系统的相干载波提取	303
14.1.1 非线性变换-滤波法	303
14.1.2 平方环	305
14.1.3 同相-正交环	305
14.1.4 逆调制环	306
14.1.5 判决反馈环	308
14.1.6 抑制载波双边带信号跟踪环的鉴相特性与相位含糊问题	308
14.2 四相调制(QPSK)系统的相干载波提取	309
14.2.1 四次方环	309
14.2.2 科斯塔斯环	309
14.2.3 逆调制环	310
14.2.4 判决反馈环	312
14.2.5 四相PSK载波跟踪环的鉴相特性与相位含糊问题	313
14.3 基带数字处理载波跟踪环	314
14.3.1 四相PSK的基带数字处理载波跟踪环	314
14.3.2 八相PSK的基带数字处理载波跟踪环	315
14.4 残余边带调制系统的相干载波提取	316
14.5 插入导频法	317
14.5.1 在频域插入导频的方法	317
14.5.2 在时域插入导频的方法	318
14.6 相干载波相位误差的影响	319
第十五章 位同步	
15.1 从数字信号中提取位同步的原理	321
15.1.1 随机的单极性二进制基带脉冲序列的功率密度谱	322
15.1.2 非归零的二进制随机脉冲序列的功率密度谱	322
15.1.3 归零的二进制随机脉冲序列的功率密度谱	322
15.1.4 自同步法位同步提取电路的基本组成	323
15.2 常用的一些自同步法	323
15.2.1 从基带数字信号中提取位同步	323
15.2.2 从中频已调信号中提取位同步	326
15.3 特殊的位同步锁相环	329
15.3.1 同相-中相积分位同步环	329
15.3.2 早-迟积分位同步环	333
15.4 外同步法	336

15.4.1	在频域插入位同步导频法	336
15.4.2	包络调制法	337
15.4.3	独立通道键控法	338
15.4.4	在时域插入位同步的方法	339
15.5	位同步性能指标	341
15.5.1	静态相差(固定同步误差)	341
15.5.2	抖动	343
15.5.3	错位率	343
15.5.4	建立时间与保持时间	344
15.5.5	位同步门限噪声比	344
第十六章 群同步		
16.1	概述	345
16.2	起止同步法	346
16.3	插入帧同步码法	347
16.3.1	帧同步码插入方式	347
16.3.2	帧同步的识别方式	348
16.3.3	帧同步引入方式	348
16.3.4	帧同步保护方式	348
16.3.5	帧同步的建立与控制过程	349
16.4	帧同步码的选择	350
16.4.1	帧同步码型的选择	351
16.4.2	帧同步码码长的选择	356
16.5	帧同步校验和帧同步保护	359
16.5.1	帧同步为什么要校验和保护	359
16.5.2	简单的分析	359
16.5.3	参数的选择	360
16.6	帧同步系统	361
16.6.1	一种帧同步系统方案	361
16.6.2	PCM30/32 路基群设备的帧同步系统	362
16.7	帧同步系统性能的计算	368
16.7.1	假同步概率和漏同步概率的计算	368
16.7.2	平均失步(失帧)间隔时间的计算	369
16.7.3	同步引入时间的计算	369
第十七章 网同步		
17.1	网同步的基本概念	371
17.2	滑动及其影响	372
17.3	准同步方式和正码速调整法	374
17.3.1	准同步方式	374
17.3.2	正码速调整法	375
17.4	主从同步方式	376
17.5	相互同步方式	378
17.6	外时间基准同步方式	379
17.7	非同步接入	380
17.7.1	取样法	380
17.7.2	双模法	381
17.8	网同步的主要技术指标	382
17.8.1	数字网的滑动速率	382
17.8.2	数字网的时钟性能	383
17.9	网同步方式的选择原则	384
17.9.1	国内网网同步方式的选择	384
17.9.2	国际网网同步方式的选择	385
17.9.3	按网的规模选择网同步方式	385
17.9.4	按网的布局结构选择网同步方式	385

第四篇 纠错编码

第十八章 纠错编码的基本概念

18.1 码字的重叠、距离和码字的纠、检错能力	388
18.2 信道、错误的种类和码字的分类	391
18.3 差错控制的基本工作方式	393
18.3.1 前向纠错方式	393
18.3.2 自动请求重传方式	393
18.3.3 混合纠错方式	393
18.4 简单的纠错码	394
18.4.1 奇偶监督码	394
18.4.2 水平一致监督码	394
18.4.3 行列监督码	395
18.4.4 群计数码	395
18.4.5 恒比码	396

第十九章 编码代数知识补充

19.1 群、环、域的概念	397
19.2 整数按模运算	399
19.3 多项式按模运算	399
19.4 有限域多项式	400

第二十章 线性分组码

20.1 线性分组码的构造	405
20.2 线性分组码的译码	409
20.2.1 标准阵列译码法	409
20.2.2 伴随式译码法	411
20.3 线性分组码的纠错能力	412
20.4 汉明码(非循环)	413

第二十一章 循环码

21.1 循环码的结构与编码电路	415
21.1.1 循环码的结构	415
21.1.2 循环码的编码与解码电路	419
21.2 循环码的译码与译码电路	423
21.2.1 循环码的一般译码方法	423
21.2.2 循环码的大数逻辑译码	425
21.2.3 循环码的捕错译码	431
21.3 缩短循环码	434
21.4 BCH 码	436
21.5 纠突发错误码	443
21.5.1 基本定理	443
21.5.2 法尔(Fire)码	444
21.5.3 交错码	445
21.5.4 乘积码	446

第二十二章 卷积码

22.1 卷积码的结构	447
22.2 卷积码的码树、状态图和篱笆图	452
22.2.1 $m(n_0, 1)$ 卷积码的码树结构	452
22.2.2 $m(n_0, 1)$ 卷积码的状态图结构	454
22.2.3 $m(n_0, 1)$ 卷积码的篱笆图	454
22.3 卷积码的距离意义	456
22.4 卷积码的概率译码	457
22.4.1 最大似然译码	457
22.4.2 维特比译码算法	458
22.4.3 序列译码算法	460

参考文献

参考文献	463
------	-----

第一章 绪 论

人们的社会活动和通信有着密切的关系，通信已深入到社会的各个领域。政府部门为行使政府职能；军事部门为了指挥千军万马作战；经济部门为了组织现代化的大规模生产等等，都要藉助可靠而有效的通信手段来传递信息。有人把通信比作顺风耳、千里眼、神经系统，可见通信之重要了。当前，世界已进入信息时代，通信对人类的生活和社会的发展更加具有特殊的重要意义。通信是一门传统的、古老的学科，现代通信技术的发展，使这个古老的学科焕发了青春，特别是现代数字通信的发展对其它通信产生了广泛而深刻的影响。

1.1 消息、信息、信号

所谓通信是指传输含有信息的消息，而消息通常是转变成电信号进行传输的。因此，在研究通信之前，必须首先搞清楚消息、信息和信号的概念。

1.1.1 消息

在人类的各种活动中经常需要了解事物的各种运动状态。人们是通过消息的形式来了解和认识事物的运动状态的。人们对事物运动状态了解了也就得到了消息，或者说获得了信息。什么是消息？概括地说，以具有某种物理特征（这种物理特征能够为人们的感觉器官所感知）的文字、语音、图象等形式，把客观物质运动和主观思维活动的状态表达出来就成为消息。所以消息是以某种形式对主、客观事物运动状态的具体描述。例如，在日常生活里，我们收到一封电报，接到一个电话或听到气象广播后，我们便得到了某些消息，这些消息是对某一事物运动状态的描述。电报上的报文：“母病愈”，这是对母亲身体健康状态的描述。电话中说：“他想去上海”，这是对他头脑里的思维活动状态的描述。气象预报说：“晴天间多云”，这是对气象运动状态的描述。从通信的观点出发，所有的文字、语音、图象等各种形式的消息要具有两个条件：一是能为通信对方（发信者与收信者）所理解；二是可以传递。消息在传递过程中有一个最基本、最普通却又不十分引人注意的特点，这个特点是：收信者在收到消息以前是不知道消息的具体内容的。消息的传递过程，对收信者来说，是一个由不知到知的过程，或者说是一个由不确定到确定的过程。如果不是这样，收信者事先已经知道了消息的具体内容，那么消息也就没有传递的必要了。

1.1.2 信息

上边谈到，消息的传递过程，对收信者来说，是一个由不确定到确定的过程。收信者在收到消息之前对消息存在着不确定性，不知道发信者可能发来什么样的消息，当接

收到消息之后,不确定性消除了,收信者就获得了信息。由此看来,信息是对事物运动状态的不确定性的描述。信息寓于事物运动状态的不确定性之中。例如,报文“母病愈”是对母亲身体健康状态的一种描述,实际上,母亲的身体健康情况也可能会表现出其它不同的状态。收信者在看到报文以前存在着不确定性,他不能确定母亲的身体健康状态如何。一旦他看到正确的报文以后,原来的不确定性就消除了,他就从接收到的报文中获得了信息。可见信息是寓于不确定性之中。某种消息所含的信息量与它的不确定性程度有关。信息量的大小通常以“比特”来度量。

1.1.3 信号

由于消息不便于直接向远方传输,通常是把它转变成电信号通过信道来传输,信号与消息是相对应的,因而在信号中也就包含了所要传递的信息。信号按其时间上是否连续,可分为连续信号与离散信号。信号按其随消息而变化的参数的取值是否连续,又可分为模拟信号与数字信号。

一、连续信号与离散信号

连续信号是指随连续时间变化的信号,通常表示为 $f(t)$ 。信号的自变量时间一定是连续的,而从变量的取值可以是连续的,也可以是不连续的。连续信号的示意图如图1-1(a)所示。

在实际应用中,我们往往不必要了解 $f(t)$ 变化的全部过程,只要知道特定时间的 $f(t)$ 样值就可以恢复出 $f(t)$ 来。这样就引出了离散信号。离散信号是指时间变量是离散的、从变量是连续的信号,通常表示为 $f(nT)$ 。离散信号仅在时间变量的离散值上才有定义,离散信号的示意图如图1-1(b)所示。

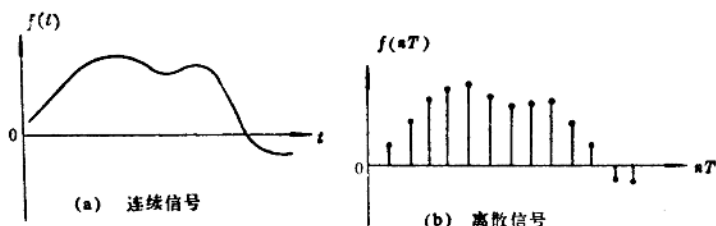


图 1-1 连续信号与离散信号示意图

二、模拟信号与数字信号

模拟信号是指其代表消息的参数(幅度、频率或相位)完全随消息的变化而变化,好像是模拟消息变化,所以称这种信号为模拟信号。(如果以幅度作为代表消息的信号,则这种信号在幅度上是连续的,在时间上可以是连续的也可以是不连续的)。例如连续变化的语音信号,电视图象信号及许多物理的遥测遥控信号都是模拟信号;又如脉冲幅度调制(PAM)、脉冲相位调制(PPM)、脉冲宽度调(PWM)这些时间上不连续的信号也都是模拟信号,因为它们代表消息的参数完全随消息的变化而变化。模拟信号的示意图如图1-2(a), (b)所示。

数字信号是指不仅在时间上是离散的,而且在幅度上也是离散的(即幅度只取有限个离散值)信号,通常表示为 $x(nT)$ 。例如电传电报机信号、计算机输入输出信号、

数字电话信号、数字电视信号、数字遥测遥控信号等都是数字信号。一般所说的数字信号都是指用0, 1数字表示的二进制信号。数字信号示意图如图1-2(c)所示。

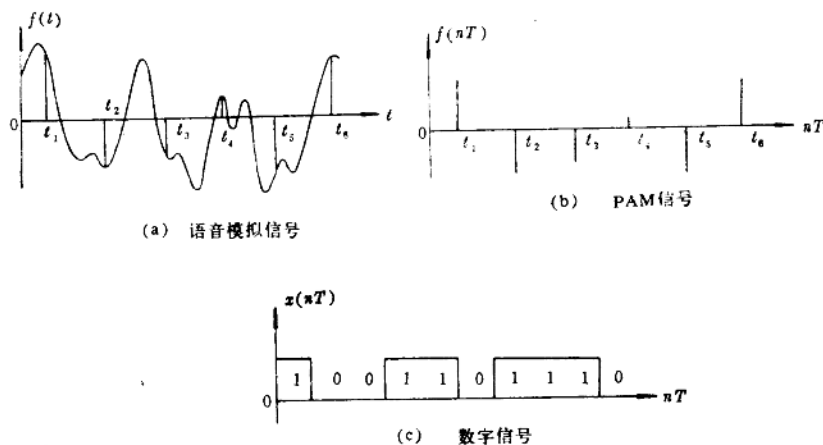


图 1-2 模拟信号和数字信号示意图

1.2 模拟通信与数字通信

上节已经谈到信号有模拟信号与数字信号之分, 与此相对应, 通信也分为模拟通信和数字通信。模拟通信是利用模拟信号来传递消息; 而数字通信则是利用数字信号来传递消息。按传送模拟信号而设计的通信系统称为模拟通信系统; 按传送数字信号而设计的通信系统称为数字通信系统。

1.2.1 模拟通信

利用模拟信号来传递消息称为模拟通信。普通的电话、广播、传真、电视都属于模拟通信。原始的模拟信号一般都要经过调制 (一些近距离的有线通信也可不经调制, 如市内电话。) 再通过信道传输。模拟通信系统的模型如图1-3所示。



图 1-3 模拟通信系统模型

模拟通信系统按其调制方式的不同又可分为连续调制系统和脉冲调制系统。连续调制系统包括 振幅调制(AM)系统、单边带(SSB)调制系统、频率调制(FM)系统、相位调制(PM)系统等; 脉冲调制系统包括脉冲幅度调制(PAM)系统、脉冲相位调制(PPM)系统、脉冲宽度调制(PWM)系统等。这些模拟通信系统得到了比较广泛的采用。

为了扩大通信容量使得在一个信道中可以同时传输多路信号, 目前广泛采用了多路复用的方法。最常用的复用方式是频分复用(FDM)和时分复用(TDM)。有线长途载波电话和模拟微波通信的多路复用设备采用的都是频分复用方式。

1.2.2 数字通信

利用数字信号来传递消息称为数字通信。电传电报、数据通信、数字电话通信都属于数字通信。单向点对点数字通信系统模型如图 1-4 所示。下面阐述这个模型的各部分的作用。

信源与信宿——信源是发出信息的。信源有各种各样，但就其性质来讲，可以分为两类：一类是离散的数字信源；另一类是连续的（或离散的）模拟信源。信宿是信息的归宿点，可以是受信者或机器。

信源编码与信源译码——如果信源发出的是连续的或离散的模拟信号，就要经过信源编码对它采样、量化及编码，使之变为数字信号。例如脉码调制和增量调制编码器都起着信源编码器的作用。有时为了某种目的（如节省频带，增强抗干扰性等）也需要对信源发出的信号进行处理。例如声码器和电视信号的数码率压缩也都属于信源编码。综合来看，信源编码有两个主要作用：一个是实现模/数转换；另一个是降低信号的数码率。信源译码是信源编码的逆处理。

加密与解密——有时为了对通信保密，采用一复杂的密码序列对信源编码器输出的数码序列进行人为的“搅乱”，这一过程称为加密。解密是加密的逆处理。

信道编码与信道译码——信道通常会遭受到各种噪声干扰（自然的和人为的），终端设备本身也存在噪声，通信系统的各个环节还会引起信号失真，这些噪声对信号的干扰与信号的失真，均可能导致接收数字信号的错误，即发生误码。为了能够自动检出错误或纠正错误，可采用检错编码或纠错编码，统称之为纠错编码，又叫信道编码。信道译码与信道编码是相对应的。

调制与解调——从信道编码器输出的数码序列还是属于基带信号。除某些近距离的数字通信可以采用基带传输外，通常为了与采用的信道相适应（匹配），都要把基带信号经过调制变换成频带信号传输。解调是调制的逆变换。

定时与同步——定时与同步也是数字通信系统的一个重要的不可缺少的部分。由于数字通信系统传递的是数字信号，所以发送端和接收端都必须有各自的定时系统。为了能正确地接收信号，收端定时与发端定时应实现同步。最主要的同步是位同步和群同步，如果收端采用相干解调还有载波同步问题。

信道与噪声——信道是信号由发送端传输到接收端的中间媒介，它可以是双绞线、同轴线、光纤、波导、无线电波、光波等等。有时候把线路两端的某些设备也包括到信道中去。信道噪声和设备各部件的内部噪声都归并到噪声源之中。

点对点的数字通信系统模型是构成任何数字通信系统和通信网的基础。当然这并不是说模型的各个部分对任何特定的数字通信系统都是必须具有的，在不同的运用场合，根据具体情况和具体要求，往往可以省去某些部分。

最基本的数字通信系统可以分为两大类：一类是数字电话通信系统；另一类是数据

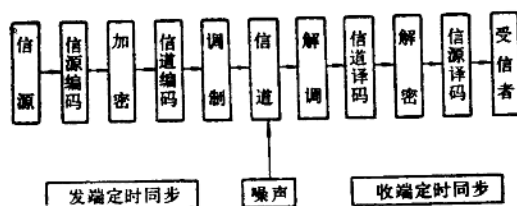


图 1-4 点对点单向数字通信系统模型

通信系统。第一类数字通信系统中最常用的是脉码调制(PCM)电话通信系统和增量调制(ΔM)电话通信系统。PCM电话通信系统的示意图如图1-5所示。其中再生中继器是对受了干扰并失真的信号波形进行整形、再生,以便去掉干扰和失真的影响,提高系统的抗干扰性。码型变换通常是从编码器输出的单极性脉冲转变为适合线路传输的双极性脉冲。在接收端又通过码型反变换将双极性脉冲变换成单极性脉冲。

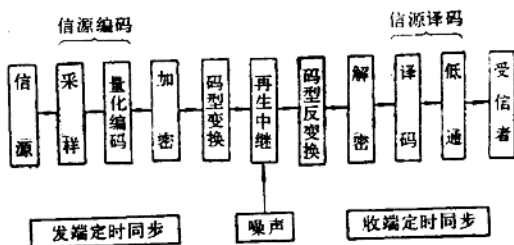


图 1-5 PCM数字电话通信系统

数据通信系统的基本构成如图1-6所示。它包括处理信息的计算机中心、发送接收信息的数据终端以及传输信息的通信线路三大部分。计算机中心由通信控制器、中央处理机、内存贮器和外围设备(包括外存贮器及输入输出设备)等四部分组成。终端部分设有数据终端,它向计算机中心发送需要处理的数据并接收计算机的处理结果数据。终端直接由人操作,它的速率一般都比较低。通信线路将数据终端和计算机中心的通信控制器连接起来。数据通信线路通常有专用线路和交换网线路两种。一般通信线路还应包括线路两端的调制解调器(数传机)。根据对数据的处理形式不同可以把数据通信系统分为四类:(1)联机实时系统(2)分时处理系统(3)远程批量系统(4)批量传输系统。

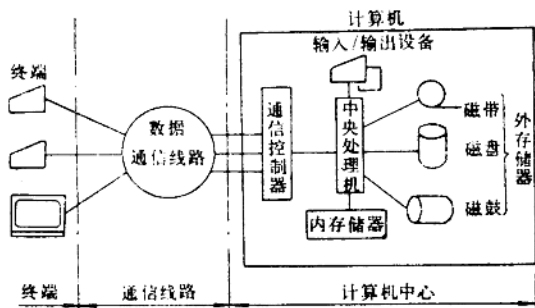


图 1-6 数据通信系统的基本构成

为了实现任意两点或多点之间的通信,必须建立通信网。近代数字通信网系统的原理结构模型可用图1-7来说明。图中用户数字终端的作用是对信号进行处理和变换。各数字终端之间的信息交换是由数字交换设备来完成的。为了充分利用信道容量,提高传输效率,常常把若干个低次群信号合并成高次群信号,把若干个低速数字信号合并成高速数字信号,使其在高速信道中传输。数字复接的作用就是完成这一功能;数字分接是数字复接的逆过程。将数字处理、数字交换、数字传输、存储程序控制和公共信道处理机间的联络等部分融为一体的数字网,就是所谓的综合数字网(1DN)。



图 1-7 数字通信网系统原理结构模型

1.3 数字通信的主要特点

近年来,数字通信无论在理论上和技术上都有了突飞猛进的发展。数字通信发展如

此之快是和它具有的特点分不开的。

1.3.1 主要优点

数字通信较之模拟通信有如下优点：

一、抗干扰能力强

模拟通信系统传输的是模拟信号，在传输过程中噪声干扰是叠加在模拟信号上，接收端难于把信号和噪声分开，所以模拟通信的抗干扰的能力比较差。而数字通信系统通常传输的是二元数字信号，信息是寓于数字脉冲波形的两种状态之中。在接收端对每一信号码元进行采样判决时，只要采样时刻的噪声绝对值与判决电平相比不超过某个门限值，就不会形成错判。因此，数字通信比模拟通信的抗干扰能力强。此外，数字通信还可以采用具有检错或纠错功能的信道编码，从而进一步提高了系统的抗干扰性。

二、可采用再生中继实现高质量的远距离通信

对于模拟通信，噪声是叠加在模拟信号上的，模拟通信系统中的增音机无法把信号和噪声分开，只有将信号和噪声进行同等放大，因此，随着传输距离的增加，增音机的增多，信噪比越来越低。也就是说，长途模拟通信系统中的噪声是积累的，随着通信距离的增加，传输质量也随之下降。对于数字通信来说，由于它传送的是二元数字信号，因此可以采用再生中继的方法将在传输过程中信号所受到的噪声干扰加以消除，再生出纯净的原始信号波形。远距离的数字通信，可以经过多次再生中继。由于再生中继消除了噪声的积累，所以可以实现高质量传输。

三、能适应各种通信业务

在数字通信中，各种消息（电报、电话、图象和数据等）都可以变换为统一的二元数字信号进行传输，所以数字通信能灵活地适应各种通信业务。把数字信号传输技术与数字程控交换技术结合起来还可以组成统一的综合业务数字通信网（ISDN）。综合业务数字通信网对来自各种不同消息源的信号自动地进行变换、综合、传输、处理、贮存和分离，实现各种综合的业务入网。这就给实际应用带来很大的便利，另外这种单一的综合性的传输和交换在性能上也是优越的。

四、便于现代数字计算机连接

由于数字通信所传输的信号与数字电子计算机所采用的数字信号是完全一致的，所以数字通信线路可以很方便地与电子计算机进行接口连接。数字通信与计算机的紧密结合，就可以构成复杂的、远距离的、大规模的、灵活多样的数字通信系统和自动控制系统以及强有力的数据处理系统。这对现代科学、人类文明都起着重大作用，对社会的发展将产生极其深刻的影响。

五、便于实现高强度加密

在数字通信中易于采用复杂的、非线性的、长周期的密码序列对信码进行序列加密，从而使通信具有高强度的保密性。模拟通信要实现高强度加密就比较困难。

六、设备可以集成化、微型化

数字通信设备的电路大都由数字电路构成。数字电路比模拟电路容易集成化。信号处理技术和大规模集成电路的发展为数字通信设备的集成化和微型化提供了良好的条件。特别是当前最引人注目的专用集成电路的迅速发展，必将对数字通信系统和设备产

生极大的影响。

1.3.2 主要缺点

一、占用的频带宽

数字通信有优点也有缺点,它的最大缺点是占用的信道频带宽。可以说数字通信的许多优点是用比模拟通信所占信道带宽要宽得多这一代价换得来的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据4KHz带宽,而一路数字电话所占据的频带宽度却远大于4kHz。例如PCM-30/32路数字电话系统,根据采样定理,其子帧频率为8000帧/秒,即子帧周期为125μs,若每路采用8bit编码,则该系统的总数码率为 $f_B = 8000 \times 32 \times 8 = 2.048 \text{ Mb/s}$ 。按照所需带宽与脉码宽度成反比计算,则PCM-30/32路系统需要占据的总带宽为2.048 MHz (某PCM-30/32路微波接力机的中频带宽为3MHz),平均每路数字电话所占带宽为64kHz,它是一路模拟电话所占带宽的16倍。可见数字通信对信道频带的利用率是不高的。在某些信道频带受限的场合,数字通信的这一最大缺点往往限制了它的使用。

二、系统和设备比较复杂

数字通信系统和设备一般说来都比较复杂,只有在数字集成技术发展的基础上,才有可能采用中、大规模集成元件制造出体积小、功耗低、可靠性高、经济性好的数字通信设备来。如果没有相应的集成技术基础,数字通信的迅速发展将受到影响。

从上面所介绍的优缺点,总的看来数字通信的优点是主要的,特别是随着微波、卫星、光缆等宽频带信道的采用和数据压缩技术的提高以及集成技术的迅速发展,数字通信的两个缺点也越来越显得不重要了。所以数字通信是现代通信的一个发展方向。

1.4 数字通信系统的主要性能指标

在阐述数字通信的主要技术问题之前,有必要先介绍一下数字通信系统的主要性能指标,以便用这些指标来衡量系统的性能。通信的有效性和可靠性是评价任何通信系统都要考虑的两个最重要的方面。对数字通信系统来说,通信的有效性主要是指传输速率;通信的可靠性主要是指传输的差错概率,所以传输速率和差错率是数字通信系统的两项重要指标。此外还有功率利用率和频带利用率、系统的可靠性、经济性等项指标。下面来分别说明各项性能指标的确切含义。

1.4.1 传输速率

传输速率是衡量系统传输有效性的重要指标。它有以下几种不同的定义:

一、码元传输速率

携带数字信息的信号单元叫做码元。每秒钟通过系统传输的信号码元数称为码元传输速率,码元速率又称信号速率,记作 R_B ,其单位是波特(Bd)。

二、比特传输速率

每秒钟通过系统传输的信息量称为比特速率,又称信息速率(或数码率),记作 R_b ,其单位是比特/秒(b/s)。

三、消息传输速率

每秒钟系统所传送的消息数称为消息速率,记作 R_m ,其单位随消息单位的不同而

不同,例如传送文字时,其单位是字/秒。

码元速率、信息速率和消息速率三者有着不同的定义,但信号是携带信息的,信息寓于消息之中,所以它们之间肯定有着一定的关系,我们不要因为它们之间有关系,就把它们混淆起来。通常最容易搞混的是码元速率和比特速率。比特速率和码元速率之间的关系主要决定于携带信息的数字信号是几元制(几进制)。如果是二元制信号且两个信号出现的概率是相等的,则每个二元制信号码元所含的信息量为 $\log_2 2 = 1$ bit, 所以对于二元制信号的数字通信系统,其比特速率和码元速率之间的关系是

$$R_b = R_B \quad \text{b/s} \quad (1-1)$$

即二元制系统的信息速率和码元速率在数值上是相等。如果采用的是 M 元制信号,而 M 元制信号又可以用 $\log_2 M$ 个二元制信号来表示(例如四元制信号可以用两位二元制信号表示), 所以一个 M 元制信号码元所含的信息量为 $\log_2 M$ 比特, 所以对于 M 元制信号的数字通信系统,其比特速率和码元速率之间的关系是:

$$R_b = R_B \log_2 M \quad \text{b/s} \quad (1-2)$$

提高传输速率受信道特性和设备复杂性的限制。对于数据通信系统, CCITT(国际电报与电话咨询委员会)建议:通过模拟电话信道(通带为 300~3400Hz)传输的比特速率为 $N \times 600$ b/s, 其中 N 为 1~18 的整数。在所建议的速率中,通常选用的速率为 600, 1200, 2400, 3600, 4800, 7200 和 9600 b/s。如果利用数字电话信道(PCM)传输数据,则每路传输的比特速率可达 56 kb/s 或 64 kb/s。对于脉码调制数字电话通信系统, CCITT 所建议的 30 路系列标准:由 32 路(实际提供 30 个话路,另两个话路作为其它用途)组合成为一个基群,基群的比特速率(又称数码率)为 2.048 Mb/s;四个基群构成一个二次群,二次群的比特速率为 8.448 Mb/s;四个二次群构成一个三次群,三次群的比特速率为 34.368 Mb/s;四个三次群构成一四次群,四次群的比特速率为 139.264 Mb/s。注意,不同群次的比特速率不正好成 4 的整数倍关系,这是因为合群时需要加入一些额外的码元。

1.4.2 差错率

差错率是衡量传输质量的重要指标,它的大小反映了信道噪声对通信可靠性的影响。

一、码元差错率

码元差错率(简称误码率)是指在传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例。这是一个统计平均数,当统计的码元数很大时,它与理论上计算得到码元差错概率很接近,故用同一符号 P_e 表示。

二、比特差错率

比特差错率是指在传输的比特总数中发生差错的比特数所占的比例(平均值)。当统计的比特数很大时,它与理论上计算得到的比特差错概率很接近,故用同一符号 P_{eb} 表示。譬如说, $P_{eb} = 10^{-3}$, 这意味着,每传送 1000 个比特,要发生一个比特的差错。很显然,在二元制系统中,码元差错率也就是比特差错率,而在多元制系统中,通过一定的较复杂的运算,可以由码元差错率求得比特差错率。