

数字通信

申普兵 主编 何集体 李荣 何渊 编著

国防科技大学出版社

数 字 通 信

主编：申普兵

编著：何集体 李 荣 何 渊

国防科技大学出版社

·湖南长沙·

图书在版编目(CIP)数据

数字通信/申普兵,何集体,李荣,何渊编著. —长沙:国防科技大学出版社,2000.7
ISBN 7-81024-673-9

I. 数… II. ①申…②李… III. 数字通信-教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 36399 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn
责任编辑:何 晋 责任校对:卢天贶
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:18.25 字数:422 千
2001 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数:1—5000 册

*

定价:24.00 元

内 容 简 介

本书是在西安通信学院 1996 年编写的《数字通信》教材基础上,经过四年本科和专科的教学实践进一步修改而成的。书中介绍了 PCM 数字通信的基本原理,主要包括数字通信的概念和特点,模拟信号的数字化原理,数字基带传输系统,数字频带传输系统,数字复接原理和 PCM 基群设备常见指标的测试等内容。全书内容新颖,自成体系,各章后附有小结和习题。

作者根据多年的教学经验,在编写该书时注意深入浅出,对各章节内容作了周密安排。本书概念清楚,有众多概念摘录自 ITU-T 系列建议,每章之后均有小结和习题,便于教学和学生自习。

本书可作为大专院校通信专业培训的教材,也可作为通信工程技术人员的参考书或供自学使用。

前 言

随着通信理论的不断完善和通信技术的不断发展,实用通信系统已逐步数字化。作为光纤通信系统和数字微波通信系统的终端设备,PCM 数字复接设备在整个数字通信系统中占有十分重要的地位。

本书共分七章。第一章介绍数字通信的基本概念,第二章介绍脉冲编码调制的基本原理,第三章介绍 PCM 基群系统中的定时与同步,第四章介绍数字信号基带传输系统以及数字信号的再生中继传输,第五章介绍数字频带传输系统,第六章介绍数字复接原理,模数接续及综合业务数字网,第七章介绍语音信号的压缩编码技术,包括波形编码和参数编码两大类,第八章介绍 PCM 基群设备主要指标的测试与设备的维护。

本书可作为本科教材使用。作为大专教材使用时,带“*”的章节可不作要求。

本书第一章由何集体编写,第二、三、四、六章由申普兵编写,第五、七章由李荣编写,第八章由何渊编写,全书由申普兵统稿。本书在编写过程中得到了许多同志的帮助,他们对本书的编写提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。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

2000 年 10 月于西安通信学院

目 录

第一章 数字通信概述

1.1 模拟通信与数字通信	1
1.1.1 模拟通信与数字通信	1
1.1.2 模拟信号与数字信号	2
1.1.3 数字通信系统模型	3
1.2 数字通信系统质量指标	5
1.2.1 有效性质量指标	5
1.2.2 可靠性质量指标	6
1.3 数字通信的特点及其发展	7
1.3.1 数字通信的特点	7
1.3.2 数字通信的发展概况	9
1.3.3 数字通信的发展方向	10
1.4 数字信号的多路复用	11
1.4.1 多路复用的概念	11
1.4.2 TDM 的构成	12
1.4.3 PCM 通信的构成	13
小 结	21
复习题	22

第二章 模拟信号的数字化

2.1 模拟信号的抽样	23
2.1.1 抽样原理	23
2.1.2 抽样定理	24
2.1.3 抽样保持	29
2.1.4 抽样电路	30
2.1.5 抽样噪声	31
2.2 量化理论	33
2.2.1 量化及其特性表示	33
2.2.2 量化噪声功率	35
2.2.3 均匀量化及其量化信噪比	36
2.2.4 非均匀量化及压缩律	38
2.2.5 压扩特性的折线近似	44
2.3 编码与译码	47

2.3.1 编码码字与码型	47
2.3.2 编码原理	49
2.3.3 译码原理	59
2.4 分路与恢复	62
2.4.1 PAM 信号的分路	62
2.4.2 模拟信号的恢复	66
* 2.5 单片 PCM 编译码器	66
2.5.1 PCM 编译码器——MK5156	66
2.5.2 PCM 编译码与滤波器——I2914/I29C14	69
小 结	73
复习题	73

第三章 定时与同步

3.1 定时系统	76
3.1.1 PCM30/32 路系统定时脉冲的种类及参数	76
3.1.2 发定时系统	78
3.1.3 收定时系统	86
3.2 同步系统	86
3.2.1 比特同步	87
3.2.2 字同步	87
3.2.3 帧同步	87
3.2.4 复帧同步	100
小结	102
复习题	103

第四章 数字基带传输系统

4.1 数字信号传输的基本理论	104
4.1.1 数字信号的波形及频谱	104
4.1.2 带限传输对数字信号的影响	106
4.1.3 数字信号传输的基本准则	107
4.1.4 数字基带传输系统模型	108
4.2 传输码型	109
4.2.1 选择传输码型的条件	109
4.2.2 常见的电缆传输码型	110
4.2.3 常见的光纤传输码型	115
4.3 数字信号的再生中继传输	118
4.3.1 信道及其主要特性	118
4.3.2 再生中继系统及再生中继器	120

4.3.3 单片 PCM 再生中继集成电路——SC22301	130
4.4 再生中继传输性能分析	133
4.4.1 信道噪声及干扰	133
4.4.2 误码率及误码率的积累	134
* 4.4.3 相位抖动	138
* 4.4.4 中继长度的确定	141
附录 A 数字基带信号功率谱的推导	145
附录 B PCM 误码噪声均方值的计算	149
小 结	151
复习题	152

第五章 数字频带传输系统

5.1 频带传输系统的组成	154
5.2 幅度键控	155
5.2.1 ASK 信号和功率谱密度	155
5.2.2 单边带和残余边带调制	157
5.2.3 正交调幅	157
5.3 频率键控	160
5.3.1 数字调频信号和功率谱密度	161
5.3.2 数字调频信号的产生和解调	162
5.3.3 最小频移键控	165
5.4 相位键控	170
5.4.1 PSK 信号和功率谱密度	170
5.4.2 二相调相信号的产生与解调	173
5.4.3 多相调相信号的功率谱密度和频带利用率	174
5.4.4 多相调相信号的产生和解调	175
5.5 频带传输中的误码性能	177
5.5.1 数字信号的最佳接收	177
5.5.2 最佳接收时的误码率	179
5.5.3 数字调制的误码率	181
小 结	182
复习题	182

第六章 数字复接与数字通信网

6.1 数字复接	184
6.1.1 数字复接的基本概念	184
6.1.2 同步复接原理	187
6.1.3 异源(准同步)复接原理	190

* 6.1.4 跳群复接原理	203
* 6.1.5 零次群数字流的复用	205
* 6.1.6 同步数字序列 SDH 简介	210
6.2 模数接续	217
6.2.1 PCM/TDM—SSB/FDM 相互转接方式	218
* 6.2.2 TDM $\longleftrightarrow$ FDM 转换的基本原理	219
6.3 综合业务数字网(ISDN)简介	221
6.3.1 通信网的概念和发展	221
* 6.3.2 综合业务数字网(ISDN)	224
小 结	232
复习题	232

第七章 语音信号的压缩编码

7.1 语音信号的模型及其特征参数	234
7.1.1 语音信号的模型	234
7.1.2 语音信号的特征参数	235
7.2 波形编码	236
7.2.1 差值脉码调制(DPCM)	236
7.2.2 自适应 DPCM(ADPCM)	241
7.2.3 增量调制(DM)	245
* 7.2.4 自适应增量调制(ADM)	250
* 7.2.5 子带编码(SBC)	256
* 7.3 参数编码	259
7.3.1 通道声码器	259
7.3.2 线性预测声码器(LPC)	260
* 7.4 语音插空技术	262
7.4.1 语音插空概述	262
7.4.2 DSI 的工作原理	263
7.4.3 数字电路倍增设备 DCME 的应用	264
小 结	266
复习题	266

第八章 PCM 基群设备主要指标的测试与维护

8.1 主要话路特性指标的测试	268
8.1.1 电平测试	268
8.1.2 净衰耗测试	269
8.1.3 净衰耗频率特性测试	269
8.1.4 振幅特性测试	269

8.1.5 空闲信道噪声测试	271
8.1.6 总失真测试	271
8.1.7 串音测试	272
8.2 2048kb/s 接口主要指标测试	275
8.2.1 数字比特率测试	275
8.2.2 2M 接口输出脉冲波形测试	275
* 8.3 告警性能测试	275
8.4 设备的维护	277
8.4.1 基群设备的日常维护	277
8.4.2 故障检修	278
8.4.3 设备开通的一般步骤	279
参考文献	280

第一章 数字通信概述

通信是一门传统而古老的学科,其历史可以追溯到古代的烽火台和狼烟。但是直到1937年莫尔斯(Morse)发明有线电报通信为止,才拉开了近代通信(指电通信)的序幕。在近代通信一百多年的历史中,模拟通信一直占据统治地位,数字通信直到几十年前才发展起来。因此从通信的历史来讲,数字通信是一种古老而又新型的通信方式。说其古老,是由于它可以追溯到古代的烽火狼烟和旗语。说其新型,是由于它是继近代通信在模拟通信方式几乎统治了整个通信系统后提出来的一种全新概念。本书所介绍的就是近几十年内发展起来的一种新型的通信方式——数字通信。

1.1 模拟通信与数字通信

1.1.1 模拟通信与数字通信

一般地说,通信就是把一地(发送端)的消息传递到另一地(接收端)。因此,通信系统可由图 1-1 加以概括。这里信息源和输入转换器的作用是把各种可能的消息转换成电信号。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。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。而输出转换器和受信者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噪声的集中表示。

由图 1-1 的通信过程可知,为了传递消息,首先需要将各种消息转换成电信号。电信号可以分成两大类:一类是模拟信号。例如,普通电话机输出的信号就是模拟信号。另一类是数字信号。例如,电传机输出的信号就是数字信号。我们按照在信道中传输的是模拟信号还是数字信号,把通信相应地分成模拟通信和数字通信两类。

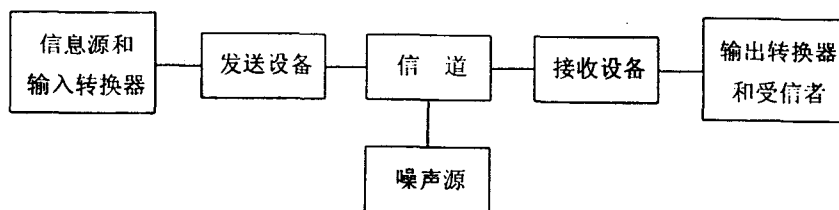


图 1-1 通信系统模型

定义:以模拟信号携带并传输信息的通信方式叫模拟通信。

在模拟通信中,通常采用频分复用技术进行多路通信。例如,9600 路模拟微波通信,3600 路模拟载波通信等等。然而由于噪声和串音的限制,使模拟通信在保持传输质量,进一步提高多路化程度方面都遇到较多的困难。随着通信技术的发展,人们开始探索把模拟信号变成数字信号来传输,也就是采用数字通信的方式来传输信息。

定义:以数字信号携带并传输信息的通信方式叫数字通信。

在数字通信中,通常采用时分复用技术进行多路通信。1937 年,英国人里费(A.H.Reeves)首先提出了用脉冲的有无组合(即脉冲的编码)来传递话音的通信方式,这就是脉冲编码调制通信,即 PCM(Pulse Code Modulation)通信。这种数字通信的设想是:首先,每隔适当的时间间隔对话音信号抽样,抽取其瞬时幅度;然后,将各抽样点的幅度以适当的精度划分成为若干区间,并量出其区间数;最后,把此区间数变换为相应的脉冲的有无组合。上述三个过程可分别称为抽样、量化和编码。统称为模/数变换(A/D 变换)。实际上,数字通信不仅指 PCM 通信,它还包括增量调制(DM)、自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)等数字通信方式。它所传送的信号也不仅是话音信号,可视电话、电视、高清晰度图像等信号都可以采用数字通信方式传输,只是其编/解码设备与传话音信号的编/解码设备不同。本书主要介绍传送话音信号的数字通信。

1.1.2 模拟信号与数字信号

我们知道,在通信中信息是通过信号进行传递的,而电信号可以分成模拟信号和数字信号两大类。

定义:一种信号,它的特征量(如幅度、频率或相位等)连续地跟随代表信息的另一物理量的变化而变化,这种信号称为模拟信号。

例如,语音信号的特征量——幅度连续地跟随代表信息的另一物理量——声压的变化而变化。因此语音信号属于模拟信号。判断一个信号是否为模拟信号,可以根据该信号的特征量取值来判断。而与该信号是时间连续信号还是时间离散信号无关。如果信号的特征量取值是连续的,则该信号属于模拟信号。图 1-2 中信号的特征量——幅度取值是连续的,因此属于模拟信号。图(a)是时间连续的模拟信号;图(b)是时间离散的模拟信号,该信号也叫脉冲幅度调制(PAM)信号。

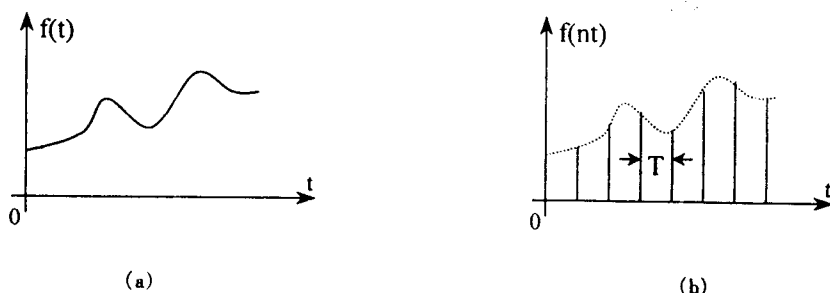


图 1-2 模拟信号示意图

数字信号是指时间离散,而且特征量取值也离散的信号。如果一个信号在时间上是离散的,并且特征量的取值也是离散的,则该信号属于数字信号。

定义:一种时间离散信号,在这种信号内,信息是由许多明确定义的离散值来代表的,它的某一特征量可以在某一时间取这些离散值。这种信号称为数字信号。

例如:电报信号、计算机信号及数字电话信号等都是数字信号。图 1-3 中的信号是时间离散信号,且特征量——幅度的取值也是离散的。因此属于数字信号。图(a)是二进制数字信号。图(b)是四进制数字信号。

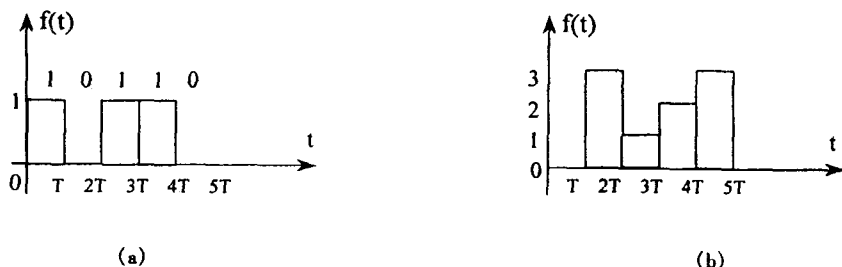


图 1-3 数字信号示意图

1.1.3 数字通信系统的模型

数字通信系统的形式有各种各样,但从系统的主要功能和部件来看,所有的数字通信系统都可以概括为如图 1-4 所示的模型。

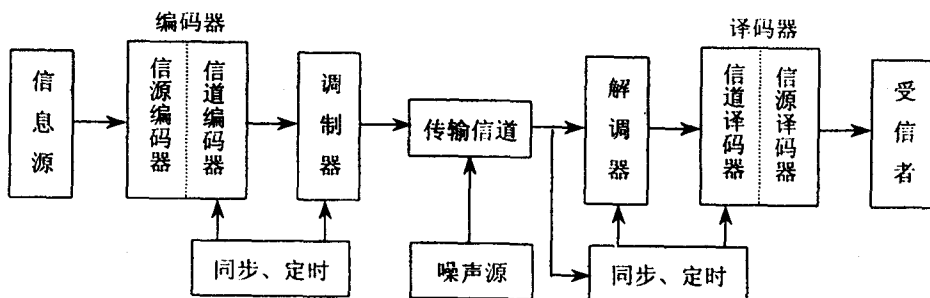


图 1-4 数字通信系统模型

由图可见,一个数字通信系统包括八个主要组成部分:信息源、编码器、调制器,信道,解调器,译码器,受信者和定时与同步系统。下面对各部分的组成和功能作一简要介绍。

1. 信息源和受信者

信息源和受信者这两部分有时统称为终端设备。信息源是产生和发出消息的人或机器。发出的消息可以是模拟的,也可以是数字的。而受信者是接受这些消息的人或机器。接受的消息可以是模拟的,也可以是数字的。

2. 编码器和译码器

编码器的主要功能是将原始信息转换成适当的数字序列。这种序列一般为二进制的脉冲序列。而译码器的功能与编码器的相反。

编码器一般包括信源编码器和信道编码器两个部分。信源编码器的主要任务是将信息源送出的模拟信号数字化或将信息源送出的数字信号进行变换以提高传送的有效性,减少原始消息的冗余度。若信息源送出的信号是模拟信号,则信源编码首先应对信号进行 A/D 转换编码,如 PCM 编码或 DM 编码等;若信息源送出的信号是数字信号,应根据实际信息源的统计特性进行数据压缩编码。信源问题的研究请参阅有关信息论的书籍。本书关于信源编码主要介绍对语音信号的 PCM 编码。

信道编码主要解决数字通信的可靠性问题,故又称为抗干扰编码。数字信号在信道中传输,与模拟信号一样会受到噪声污染,导致在接收端可能产生误码。信道编码就是为了减少这种误码产生的概率。它将信源编码后的数字信号,人为地按一定规律加入多余的数字码,以达到接收端可以发现和纠正误码的目的。信道编码技术主要应用于移动通信、卫星通信等无线通信系统中。

信源译码器和信道译码器是编码器的逆变换,是为恢复原始消息而设置的。

在数字通信中,为了保密,通常在信道编码器的前面或后面加一个加密器,而在接收端相应的位置加一个解密器。这种加密和解密仍属于编码的范畴。

由编码器输出的信号为数字基带信号。将这种信号直接送入信道传输叫数字信号的基带传输。本书第四章将主要讨论数字信号的基带传输系统。

3. 调制器和解调器

由编码器输出的基带数字信号一般不适于在无线信道中直接传送。为了使基带数字信号能在无线信道中传送,要把基带数字信号经过调制后再送往信道。所谓调制就是把信号频谱经过变换搬移到较高频段上的过程。调制的主要功能是提高信号在信道上的传输效率,或是达到信号复用的目的,或是为了提高抗干扰的性能。

解调是调制的逆过程。

4. 信道和噪声

信道是用来传送信号的媒质。由于构成信道的物理媒介不同,信道可以是有线信道(如电缆、光缆等)、无线信道(如短波、微波等),卫星信道等。

有时为了研究编码和译码问题,常把调制器和解调器也包括在信道中,称这种信道为广义信道(又称为编码信道)。

信号在信道中传输,不可避免地要受到噪声和干扰的影响。噪声和干扰信号有多种多样,它们主要分为起伏噪声、脉冲噪声和电台干扰等等。不同的噪声对通信系统的影响是不同的。在通信系统的设计中,首先应了解信道和噪声的特性,才能合理地选择编码方法和调制方式。

5. 定时、同步系统

任何一个实际的数字通信系统要正常工作,都必须有一稳定的定时同步系统。定时系统产生一系列定时信号,使系统有序地工作;同步系统确保收发端机之间具有一定的(相对不变)时间关系。定时系统应产生一高稳定的主时钟及其相应的时序信号。同步系统包括载波同步、位同步、群(帧)同步和网同步。如果同步有误差或失去同步,则数字通信中就会出现大量误码,甚至使整个通信中断。

1.2 数字通信系统的质量指标

在研究设计或者评价一个数字通信系统的时候,必然涉及系统的质量指标问题。数字通信系统的质量指标是很多的,涉及电气性能、工艺结构、使用维修、经济效益等等。归纳起来主要有以下几个方面。

有效性:指消息的传输速度;

可靠性:指消息的传输质量;

适应性:指环境使用条件;

标准性:指元件的标准性互换性;

经济性:指成本的高低;

保密性:指是否便于加密;

使用维修:是否方便。

但其中最主要的是有效性和可靠性,因为这两个指标基本上体现了对数字通信准确、迅速和不间断的要求。

1.2.1 有效性质量指标

数字通信系统的有效性主要从传输速率、功率利用率和频带利用率三个方面来考虑。

一、传输速率

传输速率是衡量数字通信系统有效性的重要指标,通常用码元速率 R_b 和信息速率 R_b 来表示。

1. 码元速率(或称传码率)

定义:每秒钟传输码元的数目称为数字信号的码元速率。

单位:波特(B)。

符号: R_b 。

虽然数字信号有多进制与二进制之分,但码元速率与信号的进制数无关,它只与码元宽度 T 有关。例如,某 N 进制数字信号,其码元宽度为 T 。每秒钟码元的数目为 $1/T$,故码元速率 $R_b = 1/T$ 波特。

2. 信息速率(或称比特率)

定义:每秒钟传输的信息量称为数字信号的信息速率。

单位:比特/秒(bit/s)。

符号: R_b 。

信息量是衡量各种不同消息中包含信息多少的标准。单位为比特(bit),通常用符号 I 表示。

一个 N 进制数字信号,每个码元可能出现的状态有 N 个,设每个状态出现的概率 P 是相同的,则 $P = 1/N$,在信息理论中,定义每个码元的信息量为:

$$I = \log_2 1/P = \log_2 N \quad (\text{bit}) \quad (1.1)$$

因为信息量与数字信号的进制数有关,因此信息速率也和数字信号的进制数有关。一个 N 进制的数字信号,其信息速率为

$$R_b = R_B \cdot I = R_B \cdot \log_2 N \quad (1.2)$$

即等于 N 进制数字信号每秒钟传输的码元个数(码元速率)乘以该信号一个码元所包含的信息量。对于二进制数字信号而言,码元速率和信息速率在数值上相等,但它们的单位是不同的。

二、功率利用率

数字通信传输系统的功率利用率用系统信噪比来描述。在保证系统传输质量的条件下,系统所需要的最低归一化信噪比定义为系统的功率利用率。

归一化信噪比是指每比特信号的能量 E_b 和噪声单边功率谱密度 N_0 的比值。显然,对某特定传输系统而言,所需的归一化信噪比越低,功率利用率越高;反之则越低。

三、频带利用率

频带利用率用系统单位频带内所实现的信息传输速率来衡量。表示为

$$\eta = R_b/B \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1.3)$$

式中, B 为系统所需的传输带宽, R_b 为系统的信息传输速率。显然,在传输带宽相同时,若信息传输速率越高,则频带利用率越高,反之则越低。将式(1.2)代入式(1.3),则有

$$\eta = R_b/B = R_B(\log_2 N)/B \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1.4)$$

若系统的码元速率相同,通过加大 N 或减小 B 都可使频带利用率提高。前者可以采用多进制调制技术实现;后者可采用单边带调制、部分响应等压缩发送信号频谱的方法实现。

1.2.2 可靠性质量指标

数字通信系统的可靠性主要用差错率来表示。另外,为了说明系统正常工作的能力,可靠性指标还包括可靠度和中断率。

一、差错率

差错率是衡量数字通信系统可靠性的重要指标。通常用误码率 P_e 和 P_b 误比特率来表示。

1. 误码率(或称码元差错率)

定义:在系统传输的码元总数中发生差错的码元数所占的比例称误码率。

记为

$$P_e \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_{eB}}{n_B} \quad (1.5)$$

式中, n_B 是在一定时间内系统传输的码元总数; n_{eB} 是在相同时间内传输中产生差错的码元数。

2. 误比特率(或称比特差错率)

定义:系统在传输中发生差错的比特数占传输总比特数的比例称误比特率。

记为

$$P_b \triangleq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_{eb}}{n_b} \quad (1.6)$$

式中, n_b 是在一定时间内系统传输的比特总数; n_{eb} 是在同一时间内传输中产生差错的比特数。

对于二进制数字信号, 误码率和误比特率相等。而对于多进制数字信号, 其误码率总是大于等于误比特率。

二、可靠度

可靠度是指在全部工作时间内系统正常工作时间所占的百分数, 记为 P_r 。

三、中断率

中断率是指在全部工作时间内系统传输中断的时间所占的百分数。记为 ϵ 。

显然, 可靠度与中断率之间有: $\epsilon = 1 - P_r$ 。

在数字通信系统中, 有效性和可靠性这两个要求通常是矛盾的; 实际中应根据需要尽可能取得满意的结果。例如在一定可靠性指标下, 尽量提高消息传输的速度; 或在一定有效性条件下, 使消息的传输质量尽可能提高。

1.3 数字通信的特点及其发展

近年来, 数字通信无论是在理论上和技术上都有了突飞猛进的发展。数字通信之所以有如此快的发展, 除了计算机技术和大规模集成电路 (LSI) 高速发展的推动外, 还与其本身所具有的一系列模拟通信所无法比拟的特点是分不开的。

1.3.1 数字通信的特点

一、主要优点

1. 抗干扰能力强

电信号在传输过程中要受到各种噪声的干扰。对模拟信号来说, 噪声是迭加在信号波形上的, 噪声和信号难以分开。数字通信系统传输的是二进制数字信号, 其信息不是包含在脉冲的波形之中而是包含在脉冲的有、无之中。只有当噪声在判决时刻超过某个门限时, 才有可能改变信号的值 (即造成误判决)。因此, 数字信号比模拟信号抗干扰能力强。此外, 数字信号可以进行抗干扰编码 (纠错编码) 从而进一步提高其可靠性。

2. 可采用再生中继实现远距离传输

模拟信号在远距离传输时, 一方面要受到噪声的干扰, 另一方面又要受到信道的衰减。传输距离越长衰减越大; 噪声干扰越大, 信噪比就越低。这样, 通信距离就会受到限制。为了增加传输距离, 必须每隔一定的距离对已被衰减和附有噪声的信号进行适当处理, 即加设增音设备把从线路上收到的信号加以放大后再传往下一站。增音机除了将信