

中等专业学校教材

数字通信原理

南京铁路运输学校 冉宏伟 主编



中国铁道出版社

中等专业学校教材

数字通信原理

南京铁路运输学校 冉宏伟 主编
西安铁路运输学校 李勤法 主审

中国铁道出版社

1999年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书是根据中等专业学校综合电信专业《数字通信原理》课程教学大纲要求编写的。全书共分七章,主要包括:数字通信概述;脉冲编码调制(PCM);增量调制;定时与同步系统及 PCM 基群端机组成;传输码型、再生中继及数字复接技术;同步数字体系(SDH);数字接入网等内容,为便于学习每章附有复习与思考题。

本书可作为中等专业学校综合电信专业专业课教材,也可供从事通信专业工作的有关现场技术人员学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字通信原理/冉宏伟主编. —北京:中国铁道出版社, 1999. 8

中等专业学校教材

ISBN 7-113-03443-8

I. 数… I. 冉… III. 数字通信-专业学校-教材
IV. TN914. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 46949 号

书 名:数字通信原理

作 者:南京铁路运输学校 冉宏伟

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市宣武区右安门西街8号)

责任编辑:武亚雯

封面设计:薛小卉

印 刷:北京市燕山印刷厂

开 本:787×1092 1/32 印张:15.75 字数:392千

版 本:1999年8月第1版 1999年8月第1次印刷

印 数:1~3500册

书 号:ISBN 7-113-03443-8/TN·117

定 价:20.80元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

本书是依据铁道部教卫企函(1997)42号文公布的《数字通信原理》课程教学大纲编写的。

全书共分七章,主要内容为:第一章介绍数字通信系统的组成和特点,数字通信系统的主要性能指标;第二章介绍脉冲编码调制原理(PCM),抽样定理,量化理论,编码与解码,集成单片编解码器;第三章介绍增量调制原理,增量调制的特性,增量调制的改进;第四章介绍时分复用原理,PCM基群帧结构,定时与同步系统,PCM基群端机的组成及通路特性指标;第五章介绍数字信号的常用传输码型,再生中继器的组成,数字复接技术,PCM高次群帧结构;第六章介绍同步数字体系(SDH)的基本原理,SDH复用映射结构,SDH帧结构,SDH复用设备原理,数字传输网络管理;第七章介绍数字接入网基本原理,接入网的构成,接入网的业务接入。

本书以讲清数字通信的基本概念为主,理论上不作过多的分析。

本书由南京铁路运输学校冉宏伟担任主编,乌鲁木齐铁路运输学校刘栋担任协编,西安铁路运输学校李勤法担任主审。书中的第二章由刘栋编写,其余章节由冉宏伟编写。在整个编写过程中李勤法给予了大力帮助。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请各位读者批评指正。

编者

1999年4月

目 录

第一章 数字通信概述	1
第一节 数字通信系统的构成.....	1
第二节 数字通信系统的主要性能指标.....	3
第三节 数字通信的特点及发展概况.....	5
复习与思考题.....	7
第二章 脉冲编码调制(PCM)	9
第一节 抽 样.....	9
第二节 量 化	15
第三节 编码与解码	23
第四节 单片 PCM 编解码器	37
复习与思考题	48
第三章 增量调制	50
第一节 增量调制的概念和工作原理	50
第二节 简单增量调制的特性	52
第三节 增量调制的改进	55
复习与思考题	63
第四章 定时与同步系统及 PCM 基群端机组成	65
第一节 30/32 路 PCM 基群帧结构.....	65
第二节 30/32 路 PCM 基群端机组成及话路特性指标.....	68
第三节 定时系统	73
第四节 PCM 基群同步.....	79
复习与思考题	89
第五章 传输码型、再生中继及数字复接技术	90
第一节 PCM 基带传输码型和码型变换.....	90
第二节 PCM 信号的再生中继传输.....	99
第三节 再生中继器电路实例.....	106
第四节 再生中继传输系统的质量指标及其测试.....	111
第五节 数字复接的基本原理.....	115
第六节 二次群复接及高次群帧结构.....	118

复习与思考题.....	125
第六章 同步数字体系 SDH	126
第一节 SDH 概述	126
第二节 SDH 的复用映射结构及帧结构	130
第三节 SDH 复用方法	140
第四节 SDH 复用设备原理	172
第五节 数字传输网络管理.....	204
复习与思考题.....	219
第七章 数字接入网	220
第一节 数字接入网概述.....	220
第二节 接入网支持的接入类型.....	228
第三节 业务节点接口和业务节点要求.....	236
第四节 接入网的管理、控制和操作	238
复习与思考题.....	244
参考文献	244

第一章 数字通信概述

第一节 数字通信系统的构成

一、信息与信号

通信是指信息的传递和交换。人类社会的生存和发展离不开信息的交流,尤其是随着社会生产力的发展和科技的进步,人类社会已步入了信息时代,信息高效、快速的传递变得越来越重要。既然信息对于人类社会是如此普遍和重要,因此首先弄清楚它的含义就变得很有必要。

什么叫信息?在通信中,信息是指对受信者来说还不知道的、待传送、存储或提取的内容。

信号是信息的载体,是运载信息的工具。人们要想传递和交换信息,必须借助于信号,首先用信号来表示。例如:说出来的语言、写出来的文字、画出来的图像、编出来的电码等,都是不同形式的信号。同一信息可用不同形式的信号来表示,从这一意义上讲,可以认为通信的任务是传递和交换信号。

通信的含义很广泛,我们研究的现代通信主要是指电通信(包括光通信),即以电信号作为其传递与交换对象的信号。电通信的突出优点是:能使信号在任意距离上实现快速、有效而又准确可靠地传递,因而成为现代社会的主要通信方式。

二、数字信号与模拟信号

任何电信号的波形都可以用幅度和时间两个参量来描述。根据信号的波形,可分为数字信号和模拟信号两大类。图 1-1-1 是数字信号的波形,图(a)是二进制码,每一个码元(由一个脉冲构成)只能取二个状态(0、1)之一;图(b)是多电平码,其每个码元只能取多个状态(3、1、-1、-3)中的一个。上述两个信号的共同特征是:幅值被限定在有限个数值之内,它不是连续的,而是离散的。这种幅值为离散的信号被称为数字信号。由于通常传输码型的码元占空比只为 50%,即码元宽度为信号周期 T 的一个半,而另一半则在幅值上没有意义,所以数字信号一般在时间上、幅度上都是离散的。属于数字信号的信源有:电报信号和数据信号等。

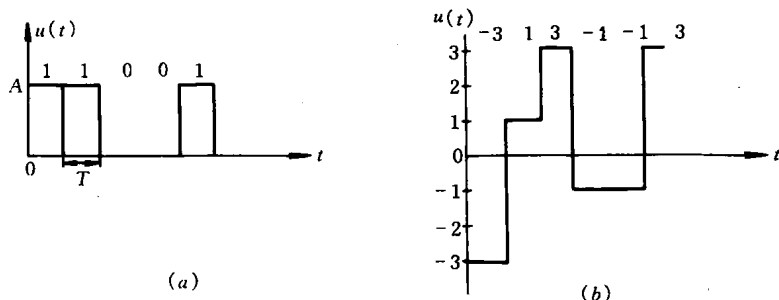


图 1-1-1 数字信号的波形
(a)二进制;(b)多进制。

与数字信号相反,如果信号的幅值是连续的而不是离散的,则称为模拟信号。例如电话的话音信号和传真、电视的图像信号都是模拟信号。图 1-1-2(a)是话音信号的电压波形,它模拟了语声声强的大小,其幅值是连续变化的,因此它是模拟信号。图 1-1-2(b)所示的是图(a)的抽样信号,即图(a)所示的模拟信号,通过一个抽样开关后的输出信号。该开关每隔 T_s 时间合上一次,合上时间为 τ 。在开关合上时原模拟信号输出,打开时无信号输出,这个过程称为抽样。经过抽样后的信号在时间上是离散的,但幅度取值仍然连续,所以图(b)所示的仍是模拟信号。抽样后的信号称样值信号,又叫脉冲幅度调制(PAM)信号。

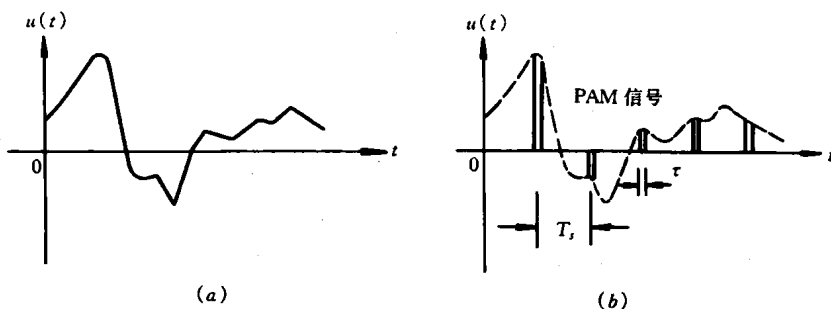


图 1-1-2 模拟信号的波形
(a)连续信号;(b)抽样信号。

由上面的介绍可知,判断数字信号与模拟信号,是根据信号幅度取值是否离散而定。一个信息,既可用模拟信号来表示,也可以用数字信号来表示,模拟信号和数字信号在一定条件下可互相转化。

三、数字通信系统的模型

电通信种类很多,根据在信道(传输信号的媒介)上传输信号的波形类型,可分为两类通信方式:模拟通信和数字通信。通信的任务是由一整套技术设备和传输媒介所构成的总体——通信系统来完成的。实际数字通信系统的构成,因用途不同而异。综合各种数字通信系统,可得图 1-1-3 所示的模型。

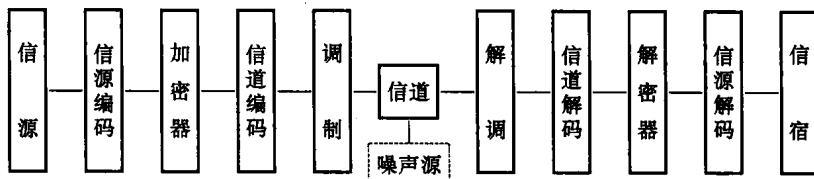


图 1-1-3 数字通信系统模型

图中,信源是把信息变换成原始电信号。常见的信源有产生模拟信号的电话机、话筒、摄像机和输出数字信号电子计算机、各种数字终端设备等。

信源编码的任务是把模拟信号变换成数字信号(一般是变为二进制数字信号),完成模拟/数字变换(简称模/数变换,或 A/D 变换)的任务。对于信源已经是数字信号的情况,如数据信号等,则可省去信源编码环节。

加密器的功能是对数字信号进行加密,对数字信号进行一些逻辑运算即可起到加密的作用。

信道编码通常由纠错编码和线路编码(又称码型变换)两部分组成。信道编码的功能有两个:一是由于信道噪声的干扰,可能会使传输的数字信号产生差错,为了使接收端能自动检出错码或纠正错码,必须进行纠错编码;二是为了信源编码后的数字信号适合于在信道上传输,必须进行码型变换。纠错编码和码型变换的具体做法是在信源编码后的信息码元中,再按一定的规律,附加一些多余的码元(称为冗余),以使码元之间形成较强的规律性。这样就使得信道上传送的码流具备有时钟分量等,接收端易于同步接收发送端送来的数字码流,并且根据信道编码形成的规律性自动进行检错甚至纠错。

有时为适应信道传输的频带要求,将编码后的数字信号频谱变换到高频范围内,这一变换称为调制。在数字通信中,未经调制的信号称为基带信号。

信道是指传输信号的媒介。根据传输媒介的不同信道可分为有线信道(电缆、光缆等)与无线信道(包括微波等)。其中除有线信道的电缆可以直接传输数字基带信号外,其它各种传输媒介都工作在较高的频段上。因此在这些信道上传输数字信号时,数字基带信号都必须经过一次调制,将数字基带信号的频带搬移到适合于信道传输的频带上。将数字基带信号直接送到信道上的传输方式称为基带传输;将数字基带信号经过调制后送到信道的传输方式称为频带传输。

信号在传输系统中传输时,不可避免地会受到系统外部干扰和系统内部的噪声(如电阻热噪声、晶体管器件的散弹噪声等)干扰。通常把所有的干扰(包括内部噪声)折合到信道上,统一用一个等效噪声源来表示。

接收端的解调、信道解码、解密器、信源解码等的功能与发送端的调制、信道编码、加密器、信源编码等的功能,是一一对应的反变换,这里不再赘述。

需要提到的是:具体的数字通信系统并非一定要包括图 1-1-3 所示的全部方框。比如,若信源是数字信息时,则信源编码和信源解码环节可去掉,这时的通信系统称为数据通信系统;对于基带传输系统,调制、解调器可去掉;当通信不需要保密时,加、解密器可去掉等等。

第二节 数字通信系统的主要性能指标

通信系统的有效性和可靠性是通信技术发展过程中的一对矛盾。数字通信系统衡量这对矛盾的主要性能指标是传输容量和传输差错率。在介绍这两个指标之前,先引入码元和比特的定义。

一、码元和比特

码元,即携带信息的数字单元称作码元。它一般是指在数字信道中传送数字信号的一个波形符号,它可能是二进制的,也可能是多进制的。

比特,即信息量的度量单位。信息量既然是指对受信者来说尚不知道的消息,那么某消息所包含的信息量同该消息的不确定性(即该消息发生的概率)是有关的。消息的不确定性越大,则其信息量越大。例如某一消息早已众所周知,则此消息已无意义,信息量应该为零;但某一消息是大家意想不到的,则该消息信息量应该很大。所以信息量实际上是同该消息所发生的概率 P 成反比的,通常以下式来度量信息量,即

$$\text{信息量 } I = \log_2 \frac{1}{P}$$

其单位为比特(bit)。那么 1bit 信息量究竟为多少呢?一位二进制数,不是 0 就是 1,如果 0 和

1 以相等概率出现的话,那么该二进制数为 0 或 1 的概率各为 $1/2$ 。在这种情况下,一位二进制数所携带的信息量即为 $\log_2 \frac{1}{P} = 1\text{bit}$ 。一位八进制数字,如果这八进制的 0、1、2、3、4、5、6、7 的八个状态是等概率出现的话,那么每个状态的概率各为 $\frac{1}{8}$,所表示的信息量为 $\log_2 \frac{1}{P} = 3\text{bit}$ 。同样的,一位十六进制数字可表示 4bit 信息量。在数字通信中,通常是以二进制数字来传递信息的,由于人们讲话语音的随机性,在语音所编成的二进制码流中,0 和 1 出现的概率是等概率出现的,所以一位二进制数字也就称 1 比特。比特的英文名称是 binary digit(bit),也是二进制数字的意思,所以 1bit 也代表一位二进制数字。例如 10010110,有八位二进制数字,就叫 8bit,当然这种提法不够严格。

二、传输容量

传输容量通常用传输速率表示。传输速率就是在单位时间内通过信道的平均信息量,一般有如下两种表示方法。

1. 比特速率

比特速率又称传信率,指系统每秒钟传送的比特数。单位是 bit/s、kbit/s、Mbit/s,用符号 f_b 表示。

2. 码元速率

码元速率又称传码率,指系统每秒钟传送的码元数。单位是波特(Baud),用符号 f_B 表示。码元速率仅仅表示每秒钟传送码元的个数,并没有限定这个码元是何种进制的码元,故给出码元速率时必须说明这个码元的进制。

对 M 进制码元,其码元速率和比特速率关系式

$$f_b = f_B \cdot \log_2 M$$

显然,对二进制码元, $f_b = f_B$ 。

电报通常用传码率,数字通信常用传信率(又称数码率)来反映信道传输效率。但是数码率(bit/s)的指标还不能完全看出信道的传输效率。因为传输速率越高,所占用的信道频带越宽,因此为了说明信道频带利用情况,真正地体现出信道的传输效率,通常又采用了单位频带的传信率这一概念,其单位为“bit/s · Hz”。例如,通过 2MHz 信道的数码率为 2Mbit/s,则其单位频带的传信率为 1bit/s · Hz。

三、传输差错率

1. 误码率

误码率又称码元差错率,指在传输的码元总数中错误接收的码元数所占的比例(平均值),用符号 P_e 表示。

2. 误比特率

误比特率又称比特差错率,指在传输的比特总数中错误接收的比特数所占的比例(平均值)。用符号 P_{eb} 表示。

由于数字通信中一般采用二进制,在这种情况下,误码率同误比特率相等,所以以后传输差错率都用误码率 P_e 来表示。

显然,从通信的有效性和可靠性出发,希望单位频带的数码率越大越好,误码率越小越好。

第三节 数字通信的特点及发展概况

一、数字通信的特点

1. 抗干扰能力强,无噪声积累

信号在传输过程中必然会受到各种噪声的干扰。在模拟通信中,为了实现远距离传输,需要及时地把已经受到衰减的信号进行放大(增音)。但在信号放大的同时,串扰进来的噪声也被放大,如图 1-3-1(a)所示。由于模拟信号是用信号幅度载荷信息的,而噪声又是直接干扰信号幅度,因此,难以把信号与干扰噪声分开。随着传输距离增加,噪声累加越来越大,信噪比越来越小。所以模拟通信的通信距离越远,通信质量越差。

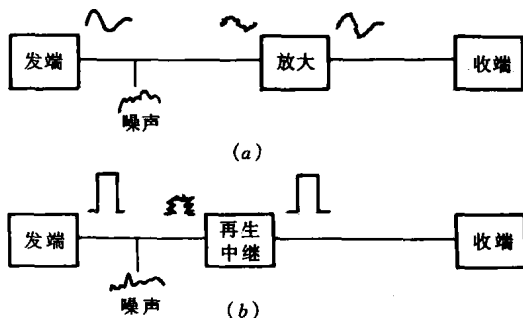


图 1-3-1 数字通信和模拟通信抗干扰性能比较
(a)模拟信号;(b)数字信号。

在数字通信中,信息不是包含在脉冲的波形上,而是包含在脉冲的有无之中。为了实现远距离传输,可以通过再生的方法对已经失真的信号波形进行判决,从而消除噪声积累,如图 1-3-1(b)所示。由于无噪声积累,所以数字通信抗干扰能力强,易于实现高质量的远距离传输。这是数字通信的重要优点之一。

2. 灵活性强,能适应各种业务要求

在数字通信中,各种消息(电报、电话、图像和数据等)都可以变换成统一的二进制数字信号进行传输。数字信号的传输可以与数字信号时分交换结合起来,组成统一的综合业务数字网(ISDN)。综合业务数字网对来自不同信源的信号自动地交换、综合、传输、处理、存储和分离,这会给实际应用带来极大的便利。

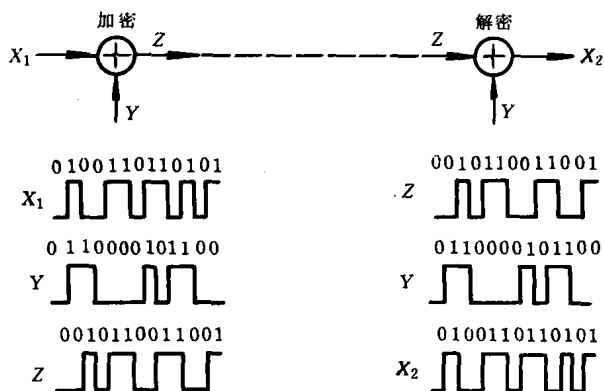


图 1-3-2 加密

信息传输的安全性和保密性都显得越来越重要,数字通信的加密处理比模拟通信容易得多。加密经过一些简单的逻辑运算即可实现,如图 1-3-2 所示。

X_1 为原数字信号,设为 0100110110101……, Y 为密码,设为 0110000101100 的周期性信号。将二者送入由模 2 加组成的加密电路,则输出的信号 $Z = X_1 \oplus Y = 0010110011001$ ……。显然, Z 和 X_1 不同。到了接收端,将 Z 和 Y 再送入由模 2 加组成的解密电路,输出的信号 $X_2 = Z \oplus Y = 0100110110101$ ……,即还原为原数字信号。只要双方约定密码,且密码周期足够长,则

3. 便于与计算机连接

由于数字通信中的二进制数字信号与数字电子计算机所采用的信号完全一致,所以数字通信线路可以很方便地与计算机接口,实现复杂的远距离大规模自动控制系统和自动数据处理系统,实现以计算机为中心的自动交换通信网,通过计算机对整个数字通信网络进行高度智能化的监测。

4. 便于加密处理

第三者就很难破译,而且密码还可以随时变换。

以上介绍的只是简单的加密原理,实际的加密方案要复杂得多,但由此可看出,数字通信容易加密。

5. 设备便于集成化、小型化

数字通信通常采用时分多路复用,不需要昂贵的、体积较大的滤波器。由于设备中大部分电路都是数字电路,可以用大规模和超大规模集成电路实现,这样设备体积小,功耗也较低。

6. 占用频带宽

这是数字通信的最大缺点。一路模拟电话约占 4kHz 带宽,而一路数字电话大约需 64kHz 带宽。随着编码技术的不断发展,虽然一路数字电话的带宽可降到 32kHz,甚至 16kHz,但仍然远大于模拟通信。当然,随着光纤等宽带传输信道的逐步采用,数字通信和光纤传媒的优点得到了最好的结合,数字通信也就得到了广泛的应用。

二、数字通信的发展趋势

数字通信终端设备、数字传输技术有以下几个发展趋势。

1. 向着小型化、智能化方向发展

随着微电子技术的发展,数字通信设备不断在更新换代。

首先在小型化方面,早期的单路编解码器由两块芯片组成,现在只要一块芯片,功耗由 200mW 降到 50mW 左右。中继器用的单片集成电路可装在电缆接头上。每个 PCM30/32 路系统只需一个 300mm×120mm×225mm 的机框,功耗仅 2.5W。一个窄条架可装 8 个系统,共 240 路。

在智能化方面,微处理器技术已应用到设备中。例如利用微处理器完成信令变换,使得设备能灵活适应各种长途、市话交换机;在再生中继故障定位中使用微处理器实现不停业务的自动监测告警。

随着小型化,低功耗和自动故障诊断技术的发展,系统可靠性大大提高,成本也大大下降。

2. 向高速、大容量方向发展

由于长途通信线路的投资远大于终端设备,因此,为了提高长距离干线传输的经济性,世界各国都很重视开发高速、大容量的数字通信系统。目前国内外的二、三、四次群数字复接设备大都经历了换代,进一步小型化的过程。例如一个二次群、三次群复接设备,只占用一块印刷电路板,功耗分别为 2.5W、4.5W。一个条架可装 20 个三次群复接设备。一个四次群设备,功耗仅 12W,一个条架可装 6 个系统。

美、日等国利用光纤传输的五次群(565Mbit/s)系统,中继距离超过 40km。英国在实验室试验 1.2Gbit/s 速率的系统,在 1.3 μ m 单模光纤上中继距离可达 30~55km,在 1.55 μ m 单模光纤上可达 114km。日本开发了 1.6Gbit/s 六次群单模光纤系统,建设了 120km 的试验电路。美国贝尔实验室,采用外差调制激光器,传输距离为 68.3km 的大容量实验系统已取得成功。

3. 向数字处理的开发应用发展

(1) 压缩频带和比特率

光纤在 1.45~1.65 μ m 波段内,具有最小损耗值,约为 0.178~0.2dB/km。若能充分利用此波段,则传输频带的理论值约为 25 000GHz。如果每个数字电话占频带 25kHz,则 10 亿人可利用同一对光纤进行通信(当然,实际传输频带还取决于光纤的色散,目前制成的光纤可达频带约 160GHz)。然而,尽管光纤传输频带的潜力如此惊人,并不能说对压缩频带,提高线路传

输效率等研究工作就没有必要了。结论恰恰相反,这是因为,一方面,在其它许多重要的通信方式中,频率资源有限,节约带宽就非常重要。例如,卫星通信、微波通信和移动通信等领域就是如此;另一方面,容量大,比特率就高,这对器件,光纤等要求很高,对设备工艺要求也越高。

数字通信,按常规编码每话路需 64kbit/s,但利用话音样值之间的相关性,可减小每一样值的编码位数,从而降低数码率。若采用自适应差分脉码调制(ADPCM)技术使每话路数码率降为 32kbit/s,则传输效率提高一倍。目前,ITU-T 还在研究更低比特率的话音编码。例如,自适应比特分配自适应预测编码(AB-APC),每路数码率可降为 16kbit/s。这个方法虽达不到长途通信质量,但节约了频带,仍有很大吸引力。

就目前情况来看,32kbit/s ADPCM 语音编码理论已经成熟,并形成国际标准投入运行。但抗噪声能力强,高质量的 9.6kbit/s、4.8kbit/s 和 2.4kbit/s 语音编码算法仍不够成熟,有待于进一步研究。

(2)数字话音插空 DSI

在双方通话过程中,一方在讲话时,另一方必然在听,也就是说总有一个方向是空闲的,况且讲话的一方还有停顿,因此电路中每一方向的平均利用率都不到 50%。可以利用已经占用的电路在通话过程中的空闲时间来传送其它话路的信号,这叫话音插空技术(DSI)。利用 DSI 技术可将 120 条电路当作 240 条电路使用。

(3)数字电路倍增(DCM)

ADPCM 技术是利用话音信号的相关性,压缩信号的冗余度,而 DSI 技术是利用通话的双向性,提高电路利用率。低比特率语音编码技术与 DSI 技术可以合并使用,这就是数字电路倍增(DCM)。它可使电路容量翻两番,即一条 2Mbit/s 电路,可传 120 路电话。最新资料表明,DSI 技术可做到 2.5 倍增益,这样一条电路可当作 5 条电路使用。如与统计复用技术相结合,DCM 增益将会更高(可大于 5)。DCM 对于卫星通信是很有用的。

4. 向着用户数字化和 ISDN 发展

数字程控交换与数字传输的结合构成综合数字网(IDN),对电话用户而言,网络的入口仍然是模拟的,这就限制了 IDN 能力的发挥,对新业务的发展尤为不利。如果把数字化从交换节点至交换节点扩展到用户/网络接口至用户/网络接口,不同业务的信号都以数字信号形式进网,同一网可承担多种业务,实现端到端的数字连接,这就成为 ISDN。这里要解决的问题之一是二线制的用户线如何实现双工数字传输问题。可采用的方法有频分法、乒乓法和回波抵消法。由于 ISDN 的优越性,世界各国都很重视对 ISDN 的开发和研究,许多国家已正式使用窄带 ISDN(N-ISDN)业务。

目前世界各国(包括我国)都在积极开展宽带 ISDN(B-ISDN)的研究。

复习与思考题

1. 模拟信号与数字信号的主要区别是什么?
2. 试画出数字通信系统组成框图,并简述各部分作用。
3. 试画出数据通信系统组成框图。
4. 试画出数字通信基带传输的组成框图。
5. 信源编码与信道编码的任务各是什么?
6. 什么叫模拟通信? 什么叫数字通信?
7. 数字通信系统的主要性能指标有哪些?

8. 数字通信有哪些优、缺点?
9. ISDN 的中文名称是什么? 它的含义是什么?
10. 时分制多路通信是否一定是数字通信? 为什么?
11. 在 $125\mu\text{s}$ 内传输 256 个二进制码元, 计算信息的传码率及比特率, 若该信息在 4 秒钟内有 5 个码元产生误码, 其误码率是多少?
12. 在八进制系统中, 码元速率为 1 600Baud, 求该系统的传信率。
13. 在 $100.38\mu\text{s}$ 内传输 848 个二进制码元, 试计算信息的数码率。

第二章 脉冲编码调制(PCM)

第一节 抽 样

模拟信号数字化的第一步是抽样。对抽样的要求是抽样后在时间上离散的样值序列能代替原来时间连续的信号,并且能完全表示原信号的信息。也就是说,使接收端能从离散的样值脉冲中不失真地恢复出原模拟信号,实现重建的任务。这一节将从理论上说明,抽样脉冲的重复频率 f_s 必须满足什么条件才能保证收信端正确地加以重建。然后简要介绍抽样和重建的电路、抽样中碰到的问题及解决办法。

一、抽样定理

1. 样值信号的频谱

抽样电路的模型可用一个乘法器表示,如图 2-1-1 所示。

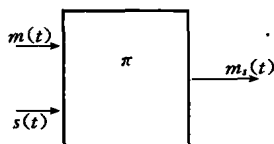


图 2-1-1 抽样电路模型

$$\text{即} \quad m_s(t) = m(t) \cdot s(t) \quad (2-1-1)$$

式中 $s(t)$ 只有 0 和 1 两个值,当抽样脉冲 $s(t) = 1$ 时,抽样门有输出, $m_s(t) = m(t)$;当抽样脉冲 $s(t) = 0$ 时,抽样门无输出, $m_s(t) = 0$ 。可见这样是能完成抽样的任务的。抽样脉冲 $s(t)$ 的波形如图 2-1-2 所示,它是重复周期为 T_s 、脉冲

幅度为 1、脉冲宽度为 τ 的周期性脉冲序列。

下面分析样值信号的频谱。 $s(t)$ 用傅里叶级数可表示为

$$s(t) = A_0 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos n\omega_s t$$

$$\text{式中} \quad \omega_s = \frac{2\pi}{T_s} = 2\pi f_s; A_0 = \frac{\tau}{T_s}; A_n = \frac{\tau}{T_s} \frac{\sin \frac{n\omega_s \tau}{2}}{\frac{n\omega_s \tau}{2}}$$

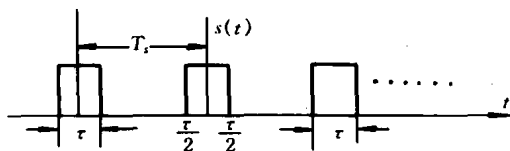


图 2-1-2 抽样脉冲序列

$$\text{则} \quad m_s(t) = m(t) \cdot s(t) = A_0 m(t) + 2A_1 m(t) \cos \omega_s t + 2A_2 m(t) \cos 2\omega_s t + \dots + 2A_n m(t) \cos n\omega_s t \quad (2-1-2)$$

若 $m(t)$ 为单一频率 Ω 的正弦波,即

$$m(t) = A_0 \cdot \sin \Omega t$$

则式(2-1-2)中的各项分别如下:

$$\text{第 1 项为:} \quad A_0 m(t) = \frac{\tau}{T_s} A_0 \cdot \sin \Omega t$$

第 2 项为:

$$\begin{aligned} 2A_1 m(t) \cdot \cos \omega_s t &= 2A_1 A_0 \cdot \sin \Omega t \cdot \cos \omega_s t \\ &= A_1 A_0 [\sin(\omega_s + \Omega)t - \sin(\omega_s - \Omega)t] \end{aligned}$$

$$= \frac{\tau}{T_s} \frac{\sin \frac{\omega_s \tau}{2}}{\frac{\omega_s \tau}{2}} A_n [\sin(\omega_s + \Omega)t - \sin(\omega_s - \Omega)t]$$

...

第 $n+1$ 项为

$$\frac{\tau}{T_s} \frac{\sin \frac{n\omega_s \tau}{2}}{\frac{n\omega_s \tau}{2}} \cdot A_n [\sin(n\omega_s + \Omega)t - \sin(n\omega_s - \Omega)t]$$

从上述情况中看出,抽样后的频率成分除原模拟信号 Ω 外,还有 $\omega_s \pm \Omega, 2\omega_s \pm \Omega \dots, n\omega_s \pm \Omega$,即除 Ω 外还有 $n\omega_s$ 的上、下边频。还可看出,第 1 项中包含有原模拟信号 $m(t) = A_n \cdot \sin \Omega t$ 的全部信息,只是幅度差 $\frac{\tau}{T_s}$ 倍。

如果原模拟信号的频带为 $f_L \sim f_H$,即为一定带宽信号,其频谱如图 2-1-3(a)所示(图中形状不表示不同频率成分能量的分布情况,仅表示该信号带宽为 $f_L \sim f_H$),则由上面简单的正弦信号样值的频谱成分分析类推可知:抽样后的 PAM 信号中的频率成分除有 $f_L \sim f_H$ 外,还有 $n\omega_s$ 的各次上、下边带,如图 2-1-3(b)、(c)、(d)所示(图中只表示频率成分的有无,不表示幅度的相对大小关系)。

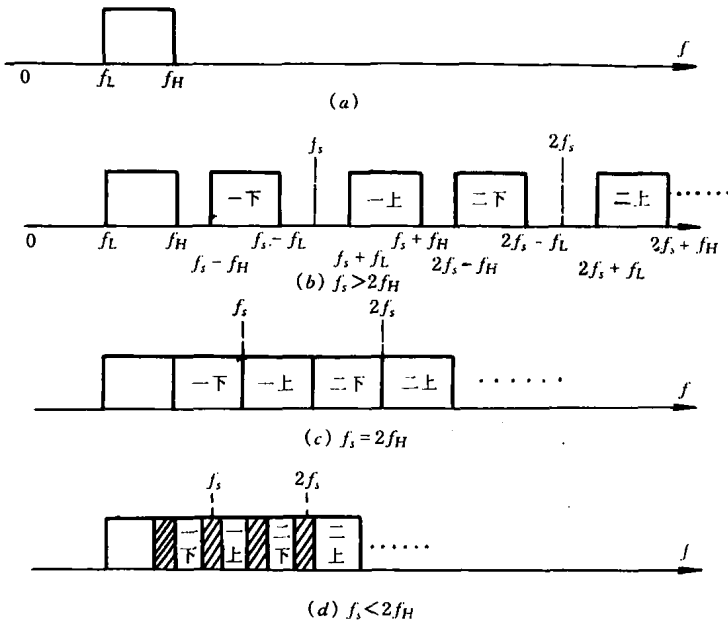


图 2-1-3 样值信号的频谱

2. 低通型抽样定理

图 2-1-3 给出了 $f_s > 2f_H, f_s = 2f_H, f_s < 2f_H$ 三种情况下样值信号的频谱图。从图可见,当 $f_s > 2f_H$ 时,原模拟信号频带和各次上、下边带有一定的频率间隔;当 $f_s = 2f_H$ 时,原模拟信号频带和各次上、下边带在频率上紧挨在一起,但不重叠;当 $f_s < 2f_H$ 时,原模拟信号频带和各次上、下边带重叠在一起。

对于 $f_s > 2f_H$ 和 $f_s = 2f_H$ 两种情况,在接收端均可通过截止频率 $f_c = f_H$ 的理想低通滤波

器从样值信号频谱中滤取出原模拟信号频带。因此对于低频频率 f_L 很低(一般指 $f_L < B = f_H - f_L$), 最高频率 f_m 为 f_H 的低通型模拟信号来说, 抽样频率 f_s 的要求是

$$f_s \geq 2f_m$$

即抽样脉冲 $s(t)$ 的重复频率 f_s 必须不小于模拟信号最高频率的两倍。这就是低通型抽样定理, 它为时分多路复用提供了理论基础。

实际的滤波器不像理想滤波器那样具有锐截止特性, 而是有一定的过渡带, 如图 2-1-4 (b) 所示。当 $f_s = 2f_m$ 时, $f_c = f_m$ 的实际低通滤波器不容易分出原模拟信号的频谱。因此通常取 $f_s > 2f_m$, 使原模拟信号和各次边带间留出空隙(又叫保护频带), 如图 2-1-3(b) 所示。如果取 $f_s \leq 2f_m$, 接收端仍然用截止频率 $f_c = f_m$ 的实际低通滤波器去还原模拟信号, 则由图 2-1-3(d) 可以看出, 这时候信号高频段处将会出现频谱的重叠, 从而产生折叠噪声。例如, 电话信号的频带为 $300 \sim 3400\text{Hz}$, $2f_m = 6800\text{Hz}$, 实际选择抽样频率 $f_s = 8000\text{Hz} > 2f_m > 6800\text{Hz}$ (此时保护频带为 1200Hz), 其重复周期 $T_s = 1/f_s = 125\mu\text{s}$, 即对电话信号每隔 $125\mu\text{s}$ 抽取一个样值。接收端用截止频率 $f_c = 3400\text{Hz}$ 的低通滤波器就可以将样值恢复成模拟信号, 从而完成通信任务。根据上述原理和 CCITT 建议, 我国规定 30/32 路 PCM 基群的抽样频率 f_s 为 8000Hz , 重复周期为 $125\mu\text{s}$ 。

需要提到的是, 在选定 $f_s = 8000\text{Hz}$ 后, 对模拟电话信号的 f_m , 必须给予限制, 以免引起折叠噪声。例如, 若 f_m 为 4100Hz , 则不再满足 $f_s \geq 2f_m$ 的要求, 从图 2-1-3(d) 可见, f_H 和 $f_s - f_H$ 就会重叠, 接收端用 $f_c = 3400\text{Hz}$ 的低通滤波器去还原就必然导致折叠噪声。所以, 需在 PCM 设备的抽样门之前加 3400Hz 的低通滤波器, 限制 f_m , 保证 $f_s > 2f_m$ 。

3. 带通型抽样定理

从图 2-1-3 看出: 只要 $f_s \geq 2f$, 收信端就能从 PAM 信号中重建出模拟信号, 对 f_L 无特殊要求。但对于 f_L 较高的模拟信号, 仍使用 $f_s \geq 2f_m$ 的条件, 确定 f_s 虽然可以, 但不必要。如图 2-1-3(b) 所示, 在 $0 \sim f_L$ 段还有很大空隙未被利用, 只要适当地选取抽样频率, 就可将样值中的一个或几个边带搬移至 $0 \sim f_L$ 段, 使 $0 \sim f_L$ 频段得到利用, 而且抽样频率可以大大地降低。带通型抽样定理就解决了这样的问题。

带通型抽样定理为: 对于频带为 $f_L \sim f_H$ 的信号, 其带宽为 $B = f_H - f_L$, 若 $f_L > B = f_H - f_L$ (该式含义为 $0 \sim f_L$ 段至少能容纳一个边带), 即 $f_L > f_H/2$, 则它的抽样频率为

$$\frac{2f_H}{(n+1)} \leq f_s \leq \frac{2f_L}{n}$$

式中 n 取 f_L/B 的整数部分。通常 f_s 取 $\frac{2(f_L + f_H)}{2n+1}$ 。

下面通过分析对载波超群 $312 \sim 552\text{kHz}$ 信号按带通型抽样定理进行抽样后样值的频谱图来说明带通型抽样定理的正确性。

对载波超群: $f_L = 312\text{kHz} > \frac{f_H}{2} = \frac{552}{2} = 276\text{kHz}$, 属于带通型信号, $\frac{f_L}{B} = \frac{312}{552-312} = \frac{312}{240} =$

1.3, 所以 n 取 1, 则:

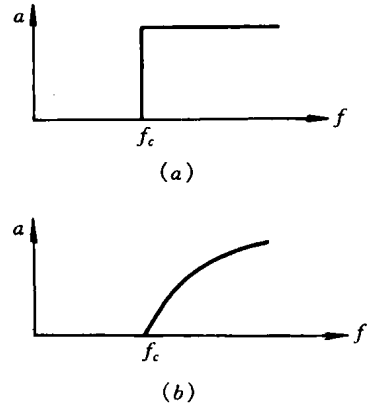


图 2-1-4 低通滤波器特性
(a)理想低通; (b)实际低通。