

数字通信原理及应用

曹庆源 编著



武汉测绘科技大学出版社

前 言

随着通信技术和计算机技术的发展,数字通信、程控交换和以此为基础的 ISDN 网的发展,使关心数字通信和程控交换技术的工程技术人员骤然增多。在新形势下,要求无线电专业的学生系统地掌握数字通信原理、通信系统、程控交换技术的基础理论、系统构成和一些关系到系统工作原理的基本电路。在通常情况下要做到这一点,将涉及到通信专业三门以上的专业课程。无线电技术专业无法安排那么多的学时来分别设课,考虑到相关课程均有部分内容互相重复,为了精选内容,侧重基础,扩宽专业,加强课程内容本身的内在联系和反映新的教学内容,在体裁和内容上进行了改革,编写了此教材。

《数字通信原理及应用》是为无线电技术专业开设的加强通信内容的专业课。要求教学学时约 60 学时左右,着重基本概念、基本分析方法和基本理论,强调理论联系实际。本教材的基本内容如下:

第一章:通信基础知识。这是专为非通信专业的读者设的一章,以便在学习该课程前能在概念上和一些基础知识方面作必要的准备。该章内容包括通信系统的基本概念、各种具体信道、传输方式、数字通信的基本问题、通信系统的主要性能指标、信号分析和概率论方面的必备知识。第二章:语声波形的量化与编码技术。内容包括时间量化与抽样定理,幅度均匀量化及线性编码和解码,幅度非均匀量化及非线性编码和解码,单片 PCM 编解码器、滤波器及其混合电路和差值编码(DPCM)。第三章:时分多路复用系统。内容包括时分多路复用原理,时分复用系统中的帧同步,PCM 30/32 路系统的帧结构以及各种定时信号:时钟、位、路、帧、复帧脉冲发生电路。第四章:数字信号的基带传输。内容包括数字信号传输的基本理论,信道噪声与再生中继,中继传输性能分析,数字基带信号的码型,线路传输码型编码电路,差错控制编码。第五章:数字信号的频带传输。内容包括振幅键控(ASK)、频率键控(FSK)、相位键控(PSK),这三种数字信号的调制解调技术、功率谱和误码率的分析,M 元数字载波调制,匹配滤波与相关接收,格状编码,扩频通信。第六章:数字多路复接与数字通信网。内容包括复接系列构成方式,复接原理、复接帧同步、复接抖动的产生和抑制,网同步,综合业务数字网(ISDN),本地网中使用的大规模集成电路和应用实例。第七章:程控交换技术,内容包括交换机在通信网中的作用,数字程控交换机主要部件的工作原理,数字程控交换机的外围设备,数字程控交换机介绍及数字程控交换机的软件类型。

本书是在近几年“数字通信原理及应用”讲义的基础上,根据教学实践、教学研究成果和参考有关资料编写而成。华中理工大学傅耀明教授仔细地审阅了全稿,并提出了宝贵的意见。在本书的编写过程中,得到了本校教务处、本系、本专业教师的支持和帮助,作者谨对以上单位和个人表示衷心的感谢。

限于本人水平,书中难免有不妥之处,敬希读者改正。

编 者

1991 年 7 月

目 录

第一章 通信基础知识	1	§ 2-3 非均匀量化	24
§ 1-1 通信系统的基本概念	1	一、实现非均匀量化的途径	24
一、模拟通信系统	1	二、对数编码律	24
二、数字通信系统	2	三、A 编码律及其 13 折线近似	25
§ 1-2 信道	3	四、 μ 编码律及其 15 折线近似	28
一、架空明线	3	§ 2-4 编码和解码	29
二、对称电缆	3	一、线性解码网络	29
三、同轴电缆	4	二、线性编码	31
四、微波信道	5	三、非线性编码和解码	34
五、卫星信道	5	§ 2-5 单片 PCM 编解码器、滤波器	
六、光缆、激光信道	5	及其组合电路	41
§ 1-3 传输方式	6	一、2911 的性能指标、内部组成和功能	41
一、基带传输	6	二、2912A PCM 发射/接收滤波器	43
二、载波传输	6	三、2913/2914 单片 PCM 编解码器和	
三、中继传输	7	滤波器	44
四、广义信道	7	四、2916/2917 单片 PCM 编解码器和	
§ 1-4 数字通信的基本问题和数字		滤波器	45
信号传输的主要指标	7	五、2910/11/12/13/14 的应用电路	45
一、数字通信的基本问题	7	§ 2-6 差值编码(DPCM)	46
二、数字通信系统的主要性能指标	8	一、线性预测	47
§ 1-5 预备基础知识	9	二、差值量化的基本原理	48
一、信号分析的基础知识	9	本章小结	52
二、概率论的基础知识	11	思考题和习题	53
三、语声的功率密度分布和听觉频率		第三章 时分多路复用系统	57
特性	13	§ 3-1 时分多路复用原理	57
本章小结	13	一、正交原理	57
思考题和习题	14	二、帧及系统同步	57
第二章 语声波形的量化与编码技术	16	§ 3-2 时分多路复用系统中的	
§ 2-1 时间量化与抽样定理	16	帧同步	58
一、信号抽样	16	一、帧同步原理	58
二、抽样定理	17	二、帧同步码的检验和同步保护电路	60
三、具有带通频谱信号的抽样频率	18	§ 3-3 PCM 30/32 路系统的帧结构	62
四、抽样保持电路	20	一、时隙分配	62
五、抽样展宽引起的信号失真	20	二、定时系统	63
§ 2-2 幅度均匀量化	21	§ 3-4 时钟、位、路、帧脉冲发生器	64
一、均匀量化含义及其特性	21	一、时钟脉冲发生器	64
二、均匀量化噪声	22	二、位脉冲发生器	64
三、均匀量化信噪比与码位的关系	23	三、路脉冲发生器	66

四、时隙脉冲发生器	68	§ 5-3 频率键控(FSK)	120
五、复帧脉冲发生器	68	一、数字频率调制与解调	121
本章小结	70	二、FSK 信号的功率谱、带宽和频带 利用率	122
思考题和习题	70	三、频率键控系统的抗噪声性能	124
第四章 数字信号的基带传输	72	§ 5-4 相位键控(PSK)	127
§ 4-1 数字信号传输的基本理论	72	一、绝对移相	127
一、数字信号波形与频谱	72	二、相对移相	129
二、带限传输对信号波形的影响	76	三、相位键控信号的功率谱密度、带宽 和频带利用率	130
三、数字信号传输的基本原则	77	四、相位键控系统的抗噪声性能	131
§ 4-2 信道噪声与再生中继	78	五、ASK、FSK、PSK 性能的比较	134
一、信道特性和噪声	78	§ 5-5 M 元数字载波调制	136
二、再生中继	78	一、多相相位键控	136
三、信号波形均衡	79	二、正交幅度键控	138
四、时钟提取及判决再生	82	三、连续相位频率键控	144
§ 4-3 中继传输性能分析	82	§ 5-6 匹配滤波与相关接收	146
一、信道误码及其对 PCM 传输质量的 影响	82	一、匹配滤波器	146
二、定时抖动及其对 PCM 信号传输的 影响	85	二、相关器	149
§ 4-4 数字基带信号的码型	86	§ 5-7 编码与调制的结合—格状 编码调制	150
一、对传输码型的要求	86	一、问题的提出	150
二、二元码	86	二、格状编码(TCM)的基本原理	150
三、三元码	88	§ 5-8 扩频通信	153
§ 4-5 线路传输码编码电路	91	一、扩频通信的基本概念	153
一、基本矩形脉冲数字基带信号之间 的转换	91	二、扩频信号的产生	154
二、单极性连码与 AMI 码之间的转换	92	本章小结	156
三、单极性不归零码与 HDB ₃ 码之间 的转换	93	思考题和习题	157
§ 4-6 差错控制编码	94	第六章 数字多路复接与数字通信网	159
一、差错控制方式和控制原理	94	§ 6-1 数字多路复接的构成方式	159
二、线性分组码	95	一、复接系列	159
三、汉明码	99	二、复接中数码的排列方式	160
四、卷积码	100	三、同步时钟复接的基本原理	161
本章小结	107	四、异步时钟复接原理	162
思考题和习题	109	§ 6-2 复接帧同步和复接抖动的产生 与抑制	165
第五章 数字信号的频带传输	112	一、复接帧同步	165
§ 5-1 概论	112	二、复接抖动的产生与抑制	166
§ 5-2 振幅键控(ASK)	113	§ 6-3 PCM 通信网中的同步 方式	168
一、数字振幅调制与解调	113	一、主从同步方式	168
二、ASK 信号的功率谱、带宽和频带 利用率	114	二、相互同步方式	168
三、振幅键控系统的抗噪声性能	115	三、独立同步方式	169

§ 6-4 综合数字网(ISDN)和综合业务 数字网(ISDN)的基本概念.....	170	二、时间(T)接线器	187
一、综合数字网(IDN)	170	三、语音存贮器和控制器的组成和工作 原理	188
二、综合业务数字网(ISDN)	171	四、PCM端机和T接线器的连接.....	191
三、我国通信网的发展	172	五、空间(S)接线器的组成和工作原理	194
§ 6-5 局域网中使用的大规模集成 电路	173	六、T-S-T数字交换网络的组成原理	195
一、82586 局域网协处理器	173	七、适用于用户交换机的交换网络芯片	197
二、82C501 以太网串联接口	176	§ 7-3 数字程控交换机的外围设备	198
三、82502 以太网收发两用机大规模 集成电路	177	一、用户电路	198
四、82586、82C501、82502 应用电路	178	二、模拟中继器	200
五、82588 高集成局域网控制器	179	三、数字中继器	200
本章小结.....	180	四、数字音频信号的产生、发送和接收	201
思考题	181	§ 7-4 数字程控交换机的类型、组成 和功能	203
第七章 程控交换技术	183	一、数字程控用户交换机的类型	203
§ 7-1 交换机在通信网中的作用	183	二、程控用户交换机的综合业务运用	204
一、通信网中交换机的作用及其分类.....	183	三、数字程控用户交换机的组成和功能	205
二、数字程控交换机的基本概念	184	四、大型数字程控交换机的组成 和功能	207
三、我国程控交换技术的发展概况	185	五、数字程控交换机的软件类型	210
§ 7-2 数字程控交换机主要部件 的工作原理	186	本章小结.....	211
一、数字交换和数字交换网络	186	思考题和习题	212
		参考文献	214

第一章 通信基础知识

§ 1-1 通信系统的基本概念

通信是指信息的传递和交换,现代通信是指“电通信”。一个通信系统通常由七部分构成,如图 1.1-1 所示。图中 a 、 b 处均为模拟电信号。所涉及的术语简介如下:

信息:反映人类活动的任何消息都是信息,在电通信中提到的信息一般指语言、文字、符号、图表、图像、数据等。

信源:发信息的部分叫信源。

输入变换器:把非电量信息转换成适于传输的电信号的装置。

发送装置:把电信号放大并变换成适于在相应媒介中传输的能量形式的一种设备。

信道:它是一种介于发送与接收之间的传输媒介,如架空双线、同轴电缆、波导、光纤或无线电信道等。

噪声:在信道中,在空间上和时间上作随机分布的所有无用信号统称为噪声,噪声分外部噪声和内部噪声。如邻近信道的干扰信号,电气设备启动过程中的高频辐射、闪电、太阳辐射等属外部噪声;电子设备内部的电子热运动,带电载流子的随机辐射、扩散和复合等属内部噪声。为了分析方便,常把发送、接收、传输信道这三方面所存在的干扰都折合到信道中,成为信道中的等效噪声源。

接收装置:从载有信息的电磁能量中取出电信号的一种设备。

输出变换器:它是把电信号变换成原来信息的形式(如声、光等)的一种装置。

信宿:信息的接受者或信息存储介质,如受话人及其听到的语音或传真所得的图片。

上述方框中的功能并不是在所有情况下都要分别由单独的装置来承担,如电视机就兼有接收机、输出变换器和信宿三个方框的功能。电信号可以是模拟的,也可以是数字的,因而由此而构成的系统有模拟通信系统和数字通信系统。

一、模拟通信系统

模拟信号是指信源发出的信息,它是时间的连续函数。例如电话的语音,其声压随时间作连续变化(如图 1.1-2),经非电/电变换后所得电流或电压仍是时间的连续函数。以电话为例,利用图 1.1-1 的通信系统模型,信源是发话人及其发出的语音,输入变换器为发话用户话筒中的送话盒,发送装置、信道、接收装置为市电信局的交换机和公用电话网,输出变换器为受话用户话筒中的受话盒,信宿为受话人。无线电对讲机也是模拟通信系统的一个例子。

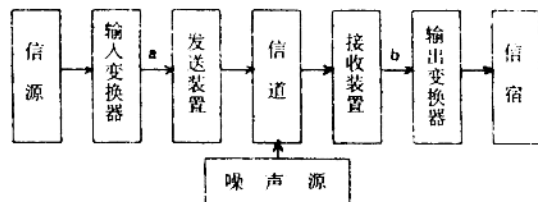


图 1.1-1 通信系统模型

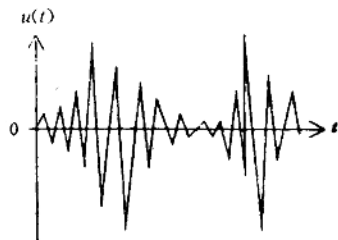


图 1.1-2 语音信号

在模拟通信中,通过信道的信号频谱通常比较窄,信道的利用率较高,设备比较简单,但模拟信号的通病是抗干扰能力差,不易保密。随着通信的迅速发展,要求电话具备智能化功能,而且现有的电话交换机正在被程控交换机取代,因而在提高抗干扰性能,发展远距离通信,使通信设备集成化、智能化,增强保密性,构成数字通信网等方面,模拟通信系统无能为力,这也是数字通信迅速发展的原因。

二、数字通信系统

1. 系统构成

数字通信系统的信源发出的信息有的是模拟的,如电话和电视图像,有的一开始就是离散的,如电报符号和计算机的数据流等。如果原始信息是模拟电信号,首先要将其离散。因此,对于数字通信系统,仍

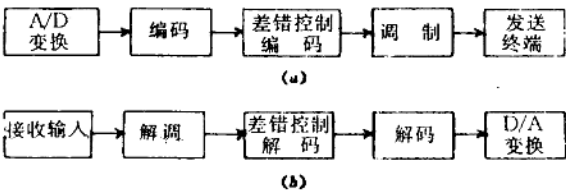


图 1.1-3 (a) 发送装置 (b) 接收装置

可用图 1.1-1,只需将其中的发送方框由图 1.1-3(a)构成,接收方框由图 1.1-3(b)构成,显然,这是对开始输入为模拟信息而言;如果传送的是数据,图中的 A/D 变换和 D/A 变换均可去掉。有时通信需要保密,则可在编码方框之后插入加密器,在解码方框之前加入解密器,已编码的码流经过加密器,插入了只有自己知道的密码,使原来的信息码变成了杂乱无章的东西,这种信号到达接收方后,经过解密器,按同一规则把加进去的保密码去掉,就可达到自己容易识别,别人难以破译的保密目的。

数字序列在传送过程中,由于噪声干扰和信道衰减,接收端解码时会出现差错,方块图中的差错控制编码和解码,就是在信息码元系列中以一定的编码规则,加入校验信息,接收时按规则进行解码,从而发现差错并予以纠正,这种编码称为差错控制编码或信道编码,纠正能力的大小则与所用差错控制码方式有关。

2. 数字信号波形

数字通信系统中所用的数字波形与脉冲数字电路课本中所用的数字波形略有些区别。如图 1.1-4

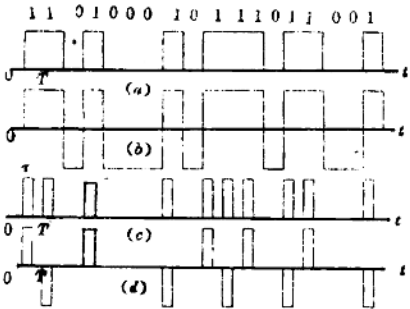


图 1.1-4 数字通信系统中所用的数字波形

所示。其中(a)为脉冲数字电路中的常用数字波形,称为不归零码 (noretun-to zero),在通信书籍中常用 NRZ 表示。因不归零信息的频谱中含有直流分量,而通信系统中的某些环节,如信道不能通过直流分量,所以不能采用 NRZ 波形。如果在数字序列中 0 和 1 出现的概率相等,用正脉冲代表 1,负脉冲代表 0,则该数字序列的直流分量为 0,其相应波形如图 1.1-4 (b)所示,称为不归零双极性脉冲。在通信中,为了不出差错,同步是一个非常重要的问题,因此需要从数字序列中提取准确的时钟信号,由图 1.1-4(a)和(b) 都无法实现此要求。为解决从数字序列波形中提取时钟信号的问题,将(a) 中脉冲的占空比改为 50%,即 $\tau/T=0.5$,得图 1.1-4(c),称为归零单极性脉冲。为了去掉直流分量,将图(c)中的脉冲依次交替用正负脉冲表示,得图 1.1-4(d),称为归零双极性脉冲。这种数字波形不含直流分量,经全波整流后

可容易且准确地提出时钟信号，因此，这种波形常用于通信系统中。由于它的电平有三种状态：+、0、-，而实际表示的仍是二进制码，所以，图 1.1-4(d)的数字序列又称伪三进制码。

§ 1-2 信道

发送端至接收端之间的传输媒介称为信道。以传输媒介为准，可分为有线信道（架空双线、对称电缆、同轴电缆、波导、光导纤维）和无线信道（长波、中波、短波，超短波，微波和卫星信道）；以信息多路复用的方式可分为频分信道和时分信道，几种常用传输信道的特征如下：

一、架空明线

架空明线是利用金属裸线，架设在电线杆上的一种通信线路。结构简单，建造比较容易，经费较少，适用于通信容量不大的地区，多建于农村（图 1.2-1）。架空明线对电磁场是“开放式”的，线路本身具有一定的辐射性，使线路衰减增大，同时又容易接收外界干扰，噪声电平高。一般用来开通 12 路载波电话，传输频率为 150kHz，不适于数字通信。

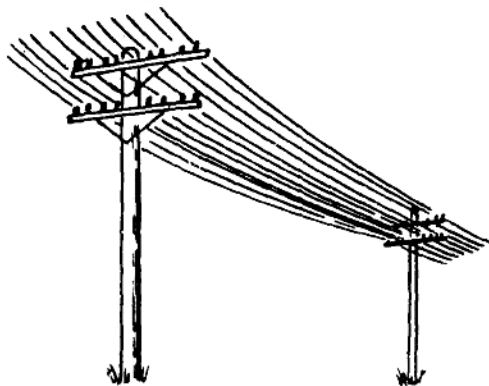


图 1.2-1 架空明线

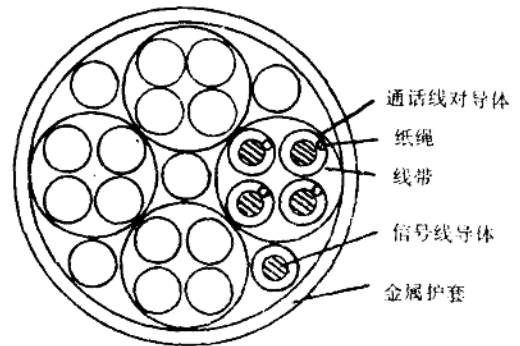


图 1.2-2 4×4×1.2 对称电缆

二、对称电缆

对称电缆回路的每两根导线的几何位置都是互相对称的，它的芯线一般做成星形四线组或对绞线的形式，对地也是对称的，所以称为对称电缆。由于长途对称电缆多数要埋在地下或在水中铺设，所以一般都用铠装电缆。

对称电缆的最高传输频率为 252kHz，可开通 60 路，为了减少传输损耗，芯线线径较粗，一般均为 1.2mm，且均为芯绞方式，以减少高频串音，对称电缆有单四芯组、四个四芯组、七个四芯组三种规格，使用较多的是四个四芯组，如图 1.2-2 所示，它有 8 对话路线，可通 480 路。对称电缆 HEQ、HEQ₂、HEQ₃ 的电气性能：

直流电阻：15.95 欧/公里（信号线 28.5 欧/公里）；

同一线对的两导线电阻差：0.17 欧（850 米）；

绝缘电阻：10000 兆欧·公里；

介质耐压：1800 伏（交流）2 分钟；

线对工作电容：26.5 毫微法/公里；

电容差: $\pm 1.0 \sim 1.1\%$;
 近端串音衰减: 6.8 奈(850 米);
 远端串音防卫度: 7.9 奈(850 米)。

三、同轴电缆

同轴电缆中含有一根或多根同轴管, 每一根同轴管相当于对称电缆的一对芯线, 其结构如图 1.2-3 所示。

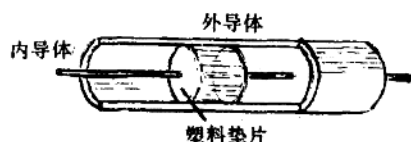


图 1.2-3 同轴管的构造

同轴管按管径大小不同, 可以分为小同轴、中同轴、大同轴三种。小同轴的内导体直径 $d=1.2\text{mm}$, 外导体内径 $D=4.4\text{mm}$; 中同轴的 $d=2.6\text{mm}$, $D=9.5\text{mm}$, 大同轴无标准尺寸, 同轴电缆按所含同轴管数不同, 分为单管、四管、八管的同轴电缆等。在同轴电缆内除同轴管外大多还有星形四线组及信号线, 所以也叫同轴综合电缆。同轴电缆对电磁场是“封闭的”, 损耗小, 抗干扰能力强, 适于高频传输。

同轴电缆载波系统采用单电缆四线单频式传输方式, 例如 1800 路载波系统, 收、发使用同一线路频谱(300kHz~9MHz)在同一电缆的两根同轴管中分开传输(空分), 即发信用一根同轴管, 收信用另一根同轴管。我国电视节目采用兼容制(即黑白、彩色电视均能接收), 频带约 6MHz, 一个单方向的电视节目将占用一个同轴管(1800 路)的大部分传输频带, 若双向传输时, 需要两个同轴管。

同轴电缆的使用频率有一个下限和上限, 这是由趋肤效应决定的。电磁波由导体表面衰减至表面值的 $1/e$ 处的深度称为趋肤深度 δ 。

$$\delta = 1 / \sqrt{\pi \mu \sigma f} \quad (1.2-1)$$

每平方米的表面电阻 R_s

$$R_s = \sqrt{\pi f \mu / \sigma} \quad (1.2-2)$$

对于紫铜 $\sigma=5.8 \times 10^7$ 西/米, $\mu=\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$ 亨/米

$$R_s = 0.261 \times 10^{-6} \sqrt{f} \text{ 欧/米}^2 \quad (1.2-3)$$

从原理上讲, 同轴线可传输各种频率的信号, 但是, 由于衰减的原故, 同轴线中传输信号的频率有上限和下限。下述例题作了定量说明。

【例 1.2-1】在紫铜材料做成的同轴线中, 传输频率 f 由 15kHz 变至 60kHz, 求表面电阻 R_s 和相对变化 $\Delta R_s/R_s$ 。

解: 对于紫铜做成的同轴线, 表面电阻 R_s 为

$$R_s = 0.261 \times 10^{-6} \sqrt{f} \text{ 欧/米}^2$$

$$f=f_1=15\text{kHz}, \quad R_{s1}=32 \text{ 微欧/米}^2$$

$$f=f_2=60\text{kHz}, \quad R_{s2}=64 \text{ 微欧/米}^2$$

$$\Delta R_s/R_s = (R_{s2} - R_{s1})/R_{s1} = (64 - 32)/32 = 100\%$$

由此可见, 衰减虽小, 但衰减变化大。

【例 1.2-2】在上例的同轴线里, 传输信号频率由 2500MHz 变至 3000MHz, 求表面电阻 R_s 和相对变化 $\Delta R_s/R_s$ 。

$$\text{解: } f=f_1=2500\text{MHz}, \quad R_{s1}=13.0 \text{ 毫欧/米}^2$$

$$f=f_2=3000\text{MHz}, \quad R_{s2}=14.3 \text{ 毫欧/米}^2$$

$$\Delta R/R = (R_2 - R_1)/R_1 = (14.3 - 13.0)/13.0 = 10\%$$

由此可见,衰减变化小,但衰减明显增大。所以,同轴电缆传输频率的下限,对小同轴电缆定为 60kHz,对中同轴电缆定为 300kHz,上限不超过 3000MHz。

四、微波信道

微波通常是指 1 千兆赫到 300 千兆赫的电磁波。微波的波长短,具有似光性,两站间作视距传播,因此,对于长途通信,均按站间距离 50 公里左右设微波中继接力站,在设备终端与天线之间采用波导传输线联接,因微波频带宽,信息容量大,是多路数字通信的主要信道。

五、卫星信道

卫星信道是一种特殊的微波中继信道,中继站就是通信卫星。它放在地球赤道上空高度为 35786 公里的轨道上,它围绕地轴旋转一周的时间为 23 小时 56 分 4 秒,正好等于地球自转一周。它与地球同步旋转,固定在地球上空的一点静止不动,所以叫做静止卫星。为什么说卫星信道是一种特殊的微波中继信道呢?因为地面与静止卫星之间隔着大气层。地球大气成分中含有各种气体分子和微粒,按不同的波长,对电磁波有不同的散射和吸收,根据对大气电磁特性的测定,臭气全部吸收波长 $\lambda < 0.3\mu\text{m}$ 的紫外光谱,水气吸收 $0.624 \sim 2.123\mu\text{m}$ 的红外光谱,二氧化碳吸收 $\lambda < 3\mu\text{m}$ 的中、远红外。而大气对微波是“透明”的,微波可以穿过云层,且不受气候条件和昼夜的影响,具有全天候能力,所以卫星信道选用微波频段,但不是所有的微波频段在大气层中都畅通无阻,大气中的水汽、氧气对某些微波频段有较强的吸收,微波通信就挑选那些吸收少的微波频段作为“窗口”。国际电信联盟对卫星广播业务使用的频率进行了分配,它将全世界分成三个区域:

第一区包括了非洲、欧洲、前苏联亚洲部分、蒙古、伊朗西部边界以西的国家;第二区包括南、北美洲;第三区包括亚洲的大部分和大洋洲。我国属第三区。各区使用的频段为:

620~790MHz	全世界使用	2.5~2.69GHz	全世界使用
11.7~12.2GHz	2、3 区使用	22.5~23.0GHz	第 3 区使用
41~43GHz	全世界使用	84~86GHz	全世界使用

后面列出的三个较高频段在技术上尚在开发。现在一般只考虑 620~790MHz, 2.5~2.69GHz, 11.7~12.5GHz 三个较低频段。卫星信道可很方便地沟通边远地区、山区、海岛的通信,受到国家的重视,正在迅速发展。

六、光缆、激光信道

光通信的原理是把声音变成强弱变化的电信号后,用它去控制光源的发光强度,产生随话音强弱变化的光信号,将其经光导纤维传输到接收端,经光电二极管转换成电信号,再还原为话音。

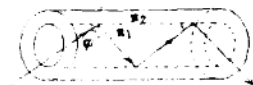


图 1.2-4 光在光导纤维中传输示意图

光在光导纤维中传输的原理是利用光导纤维芯线与包层介面之间的全反射曲折前进,适当选择芯和皮的材料,使芯的折射率大于皮的折射率(即图 1.2-4 中 $n_1 > n_2$),则临界角 $\sin\varphi_0 = n_2/n_1$ 。当入射角 $\varphi > \varphi_0$ 时,就会在芯和包层的界面上不断的产生全反射,向前传输。如果光纤是均匀园柱体,则入射光线可在光纤内不断反射,从光纤的一端传到另一端。

光缆中含有多根光导纤维,根数多少和具体结构随光缆型号不同而异,图 1.2-5 给出了一种光缆结构图。光通信的光源是激光,单色性好,方向性强,能量集中,光在光纤中的传输损耗主要有吸收损耗和散射损耗,玻璃材料中的过渡离子,如铜、铁、铬等正离子和氢氧根(OH^-)会吸收光能,经严格化学提纯(10^{-9})后,可基本消除这种原因引起的吸收损耗,但当波长 $\lambda > 1.6\mu\text{m}$ 时,因原子缺陷所引起的本征吸收明显增加。玻璃中因密度不均匀而引起的散射称瑞利散射,其散射损耗与 λ^{-4} 成正比,当 $\lambda < 0.8\mu\text{m}$,这种瑞利散射已严重影响光的正常传输,所以目前石英光纤的工作波长在 $0.8\sim 1.7\mu\text{m}$ 波段,工作频段在 $(1.8\sim 3.8)\times 10^{14}\text{Hz}$,是所有信道中信息容量最大的一种信道。

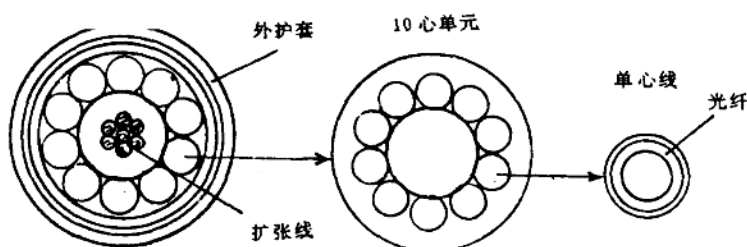


图 1.2-5 光缆结构示意图

以上所述各种信道仅涉及传输媒介本身,称为狭义信道。

§ 1-3 传输方式

通信涉及收、发两端,将含有信息的电信号能量从发端保质(尽量少失真)、保量(信号能量尽量少衰减)地送往收端的过程称为传输。本节所讨论的传输方式就是指满足这一要求的几种信号能量的输送方式。

一、基带传输

模拟信号 $f(t)$ 经抽样、量化后所得的数字序列称为数字基带信号。在电话中,基带是 $0\sim 3.5\text{kHz}$ 的音频频带。在电视中,基带是 $0\sim 4.3\text{MHz}$ 的视频频带。可见基带信号是含有直流和低频频谱分量的信号,将这种信号直接在线对或同轴电缆中传输,称为基带传输。因为低频分量无法利用无线电辐射,所以基带信号不能直接在无线信道中传输,且基带传输方案也无法利用现有信道宽阔的频谱,所以,基带通信只用于市内电话通信和两个交换局之间的短距离通信。

二、载波传输

利用调制技术搬移信号频谱的通信叫载波通信。把多路基带信号的频谱搬移到互不重叠的频带上,可以实现频分多路。由于已将信号频谱搬移到较高的频率,可使用相应的天线有效地把功率辐射出去,此外,可用频率搬移的办法使传输带宽大于基带频谱宽度,加强通信的保密性和提高信噪比(SNR)。

在数字通信系统中,先对模拟信号作 A/D 变换使其数字化,然后利用脉冲编码来传输数

字信号的方案称为脉冲编码调制(PCM)。这里虽用了调制一词,但脉冲编码方案仍是基带方案,仅产生数字基带信号,没有发生频带搬移。

以搬移频带为目的的调制有调角(即调频和调相的总称)和调幅,具体的调制及解调在高频电子线路课中已讲述。

三、中继传输

信号在信道中传输将产生衰减,其衰减特性与频率有关,因此传输后的信号不仅产生幅度衰减,还要产生波形失真,传输距离越长,波形失真越严重,以致收信端无法识别。为了延长通信距离,在传输通路的每隔一定距离(如 50 公里)上设置数字信号的整形再生装置。其特点不是对畸变后的波形修修补补,而是按初始波形的的基本参量重建(图 1.3-1)。因此波形畸变不会积累,有较好的抗干扰性,电缆中继、微波中继、激光中继,它们的具体设备有很大不同,但中继的原理和所要达到的目的是共同的。

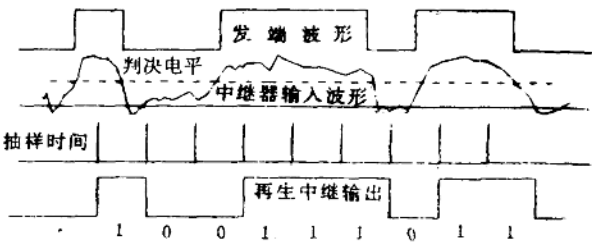


图 1.3-1 再生过程中的波形

四、广义信道

为了简化系统的模型和突出重点,常按所研究的问题,把信道的范围适当扩大,除传输媒介外,还可包括天线、馈线、功率放大器、混频器、调制器和解调器等,因此广义信道有不同的定义法。如果仅着眼于已调信号的传输,从调制器的输出端起至解调器的输入端止看成一个整体,称为调制信道。如果仅着眼于编码和解码问题,从编码器的输出端起至解码器的输入端止看成一个整体称为编码信道,如图 1.3-2 所示。

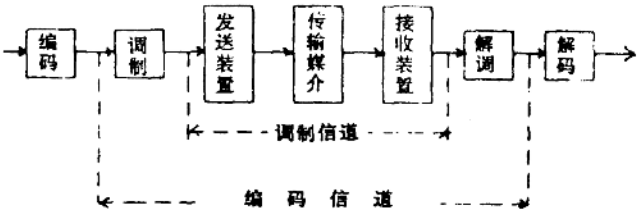


图 1.3-2 从不同角度定义的广义信道

引入广义信道概念后,可用不同的信道参数表示不同信道的特征,把通信中共同的基本问题放在基带信号传输中讨论,所以,基带传输系统虽然应用不广仍然要作详细讨论。

§ 1-4 数字通信的基本问题和数字信号传输的主要指标

一、数字通信的基本问题

信源发出的常常是模拟信号,需要用 A/D 变换将其变成离散的数字信号。用数字序列表示模拟量的精度与量化分级数 N 有关,分级越细, N 越大,误差越小,但码位越多,信道的利用率越低,为了既减少编码位又不降低量化的信噪比,需要研究非线性编码。为了提高抗

干扰性能或加强保密性,要作差错控制编码或加密编码。为了提高信道的利用率;在数字通信中常采用时分多路,这就要研究同步问题,发出规定的同步码,插在码流中。这种携带各种信息的码流除基带传输外,往往要作频率搬迁,以便适应具体信道,因此,要用编码信号对载波进行数字调制,要掌握已调信号的特性,信号在传输过程中要发生衰减和失真,因此,要了解信道的传输特性,噪声的性质及对信号传输的影响,为中继再生的波形均衡方案提供依据,此外,在邮电通信业务中,还涉及通信网和交换技术。因此数字通信要研究的基本问题有:

1. A/D 和 D/A 变换,线性编码和解码;
2. 非线性编码和解码;
3. 数字调制与解调;
4. 数字基带信号和已调信号的特性;
5. 信道传输特性和噪声对传输信号的影响;
6. 差错控制编码;
7. 时分多路的系统结构及同步问题;
8. 通信网和交换机。

二、数字通信系统的主要性能指标

数字通信系统的主要性能指标是传输的有效性和可靠性。传输的有效性可用传输速率和频带利用率来衡量,可靠性用误码率来衡量。所以主要性能指标有三个:

1. 传输速率

它用于衡量数字通信系统传送消息速度的快慢,常用的定义有两种:

(1) 传码率 R_b 。设码元间隔为 T_b , 则

$$R_b = 1/T_b (\text{波特}) \quad (1.4-1)$$

例如,若某系统每秒传送 4800 个码元,则该系统的传码率就是 4800 波特。

(2) 传信率 R 。传码率 R_b 仅指出了每秒传送的码元数,没涉及所传送的码元是何种进制。一个码元有几个可能的取值。取值个数不同,码元数所代表的信息量也不一样。

传信率 R 定义为每秒传送的信息量。理论分析指出一个 M 进制码元所含的信息量为:

$$I = \log_2 M \quad (1.4-2)$$

所以,每秒中传送的信息量,即传信率 R 为

$$R = R_b \log_2 M (\text{比特/秒}) \quad (1.4-3)$$

在二进制情况下,由于 $M=2$, 此时

$$R = R_b \quad (1.4-4)$$

传信率和传码率在数值上是相等的。

由式(1.4-1)可知,码元宽度 T_b 越窄,传码率 R_b 越高,传信率 R 也高,但这是以牺牲系统的传输带宽为代价的。为了正确体现信息的传输效率,还要引入频带利用率的概念。

2. 频带利用率 η_B

设 B 为系统的传输带宽, 则

$$\eta_B = R/B (\text{比特/秒/赫}) \quad (1.4-5)$$

它表示单位传输带宽所能实现的传信率。

3. 误码率 P_e

反映传输可靠性的指标为误码率 P_e 。

$$P_e = \text{错误接收的码元数} / \text{传输的总码元数} \quad (1.4-6)$$

误码率与信噪比的关系非常密切。提高信噪比可迅速降低误码率。对数字通信而言,要求误码率 P_e 小于 10^{-6}

§ 1-5 预备基础知识

一、信号分析的基础知识

一个信号既可在时域里用时间函数 $f(t)$ 描述,也可在频域里用频谱函数 $F(\omega)$ 描述。在通信系统中,经常遇到时域和频域的转换,如提高传信率会引起信号频带的展宽,这个问题用傅里叶变换容易理解,所以在学习本课程之前复习一下基础理论可收到事半功倍的效果。

1. 傅里叶级数

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t) \quad (1.5-1)$$

其中
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n\Omega t dt, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1.5-2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n\Omega t dt, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1.5-3)$$

$\Omega = 2\pi/T$, T 为 $f(t)$ 的周期

或写成:
$$f(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t + \varphi_n) \quad (1.5-4)$$

$$A_0 = a_0 \quad (1.5-5)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (1.5-6)$$

$$\Phi_n = -\arctg(b_n/a_n) \quad (1.5-7)$$

或写成:
$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\Omega t} \quad (1.5-8)$$

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\Omega t} dt \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (1.5-9)$$

2. 信号的频谱

(1) 周期矩形脉冲的频谱

设有一幅度为 1, 脉宽为 τ , 周期为 T 的矩形脉冲 (图 1.5-1), 由于 $\Omega = 2\pi/T$, 则其频谱分量 (傅里叶系数) 为

$$\begin{aligned} F_n &= \frac{1}{T} \int_{-\tau/2}^{\tau/2} e^{-jn\Omega t} dt = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{\sin(n\Omega\tau/2)}{(n\Omega\tau/2)} \\ &= \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau/T)}{n\pi\tau/T}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \end{aligned} \quad (1.5-10)$$

当 $\tau/T = 0.5$ 时,

$$F_n = \frac{1}{2} \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi/2} = \frac{1}{2} Sa(n\pi/2) \quad (1.5-11)$$

$$F_0 = 1/2 \quad (1.5-12)$$

$$F_n = \begin{cases} 1/\pi, -1/3\pi, 1/5\pi, -1/7\pi, \dots & n \text{ 为奇数} \\ 0, & n \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (1.5-13)$$

在图 1.5-2 中出现了负频率, 在工程中没有负频率概念, 可按(1.5-8)关系, 利用

$$\cos n\Omega t = (e^{jn\Omega t} + e^{-jn\Omega t})/2 \quad (1.5-14)$$

将对应的两个正负频率的指数形式组合起来消去负频率, 因此当 $\tau/T=1/2$ 时, $f(t)$ 可写为

$$f(t) = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4}{\pi} (\cos \Omega t - \frac{1}{3} \cos 3\Omega t + \frac{1}{5} \cos 5\Omega t - \frac{1}{7} \cos 7\Omega t + \dots) \right] \quad (1.5-15)$$

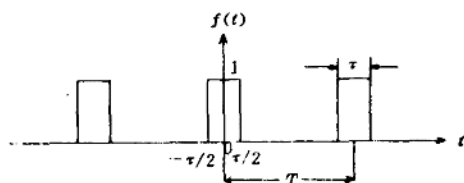


图 1.5-1 周期矩形脉冲

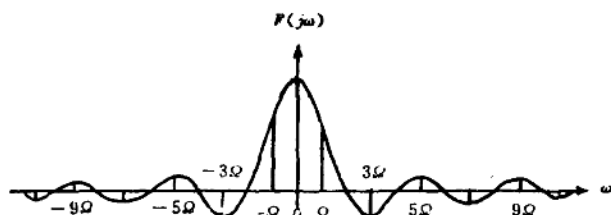


图 1.5-2 $\tau/T=0.5$ 的周期矩形脉冲的频谱

如果 $\tau/T=1/5$, 则所得频谱如图 1.5-3 所示。由图可见, 时域的压缩对应着频域的展宽, 它从理论上指明了提高传信率是以牺牲频带宽度为代价的。

(2) 门函数的频谱

脉宽为 τ , 幅度为 1 的单个矩形脉冲称为门函数, 用 $g_\tau(t)$ 表示。它是一种非周期函数频谱。

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g_\tau(t) e^{-j\omega t} dt = \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \exp(-j\omega t) dt = \tau \text{Sa}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \quad (1.5-16)$$

常取从零频率到第一个零值频率 $(1/\tau)$ 之间的频段为信号的频带宽度。所以脉冲宽度越窄, 信号的频带宽度越宽。

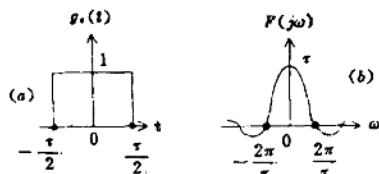


图 1.5-4 (a) 门函数 (b) 门函数的频谱

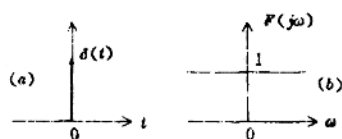


图 1.5-5 (a) $\delta(t)$ 函数 (b) $\delta(t)$ 的频谱

(3) 单位冲激函数的频谱

按 $\delta(t)$ 定义:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$$

且

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.5-17)$$

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-j\omega t} dt = 1 \quad (1.5-18)$$

它从理论上说明了冲击噪声的能量均匀分布在整個频带。这一事实可从实际生活中观察到。当一台收音机正开着时,这时你若为其他电器(如电视机)插电源,这一动作相当加入 $\delta(t)$,收音机中会发出“喳…”的干扰声,而与你原来将收音机调在那个波段无关。

二、概率论的基础知识

1. 概率的某些基本定理

乘法定理

$$P(AB) = P(B/A)P(A) \quad (1.5-19)$$

全概率

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(A/B_i)P(B_i) \quad (1.5-20)$$

相互独立事件

$$P(ABC) = P(A)P(B)P(C) \quad (1.5-21)$$

2. 随机变量及其分布

(1) 高斯分布

设连续随机变量 x 的概率密度为

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp[-(x - \mu)^2 / (2\sigma^2)] \quad (1.5-22)$$

其中 μ 为均值, σ 为均方差, 称随机变量 x 服从参数为 μ, σ 的正态分布或高斯分布。

$\mu = 0, \sigma = 1$ 时的高斯分布称为标准正态分布, 记为

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2) \quad (1.5-23)$$

相应的分布函数为

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-z^2/2) dz \quad (1.5-24)$$

其几何图象为概率密度函数曲线所围的阴影部分的面积。如图 1.5-7 所示, 该面积的最大值为 1。

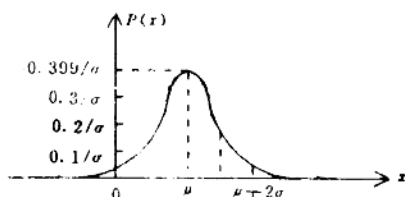


图 1.5-6 高斯概率密度函数

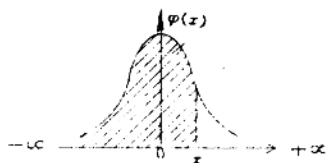


图 1.5-7 标准正态分布函数

在图 1.5-7 中, 如果对非阴影部分进行积分

$$\text{Erfc}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-z^2/2) dz \quad (1.5-25)$$

式(1.5-24)+(1.5-25), 则

$$\Phi(x) + \text{Erfc}(x) = 1$$

$$\therefore \text{Erfc}(x) = 1 - \Phi(x) \quad (1.5-26)$$

因此, $\text{Erfc}(x)$ 称为互补误差函数。而且, 不论 x 为何值, 均有

$$\text{Erfc}(x) + \text{Erfc}(-x) = 1 \quad (1.5-27)$$

此一结论可由互补误差函数 $\text{Erfc}(x)$ 的定义及标准正态分布函数图象的对称性得到证明。

在图 1.5-8 中,

$$\text{Erfc}(-x) = s_0 + s_1, \quad \text{Erfc}(x) = s_1$$

$$\text{Erfc}(x) + \text{Erfc}(-x) = s_1 + (s_0 + s_1) = s_2 + s_0 + s_1 = 1 \quad (\text{得证})$$

统计学中使用的误差函数通常定义为:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt \quad (1.5-28)$$

其相应的互补误差函数为:

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) \quad (1.5-29)$$

对式(1.5-24)作 $t = z / \sqrt{2}$ 的变量代换:

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-z^2/2) dz \\ &= \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{0.707x} \exp(-t^2) dt \\ &= [1 + \text{erf}(x / \sqrt{2})] / 2 \end{aligned} \quad (1.5-30)$$

将式(1.5-30)代入(1.5-26)有

$$\text{Erfc}(x) = 1 - \Phi(x) = [1 - \text{erf}(x / \sqrt{2})] / 2 \quad (1.5-31)$$

再将式(1.5-29)代入(1.5-31)有

$$\text{Erfc}(x) = 0.5 \text{erfc}(x / \sqrt{2}) \quad (1.5-32)$$

当 x 较大时,

$$\text{Erfc}(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2) (1 - \frac{1}{x^2} + \frac{1 \cdot 3}{x^4} - \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{x^6} + \dots) \quad (1.5-33)$$

(2) 伽玛分布

$$P(x) = [3^{1/4} / \sqrt{8\pi\sigma|x|}] \exp(-\sqrt{3}|x|/2\sigma) \quad (1.5-34)$$

令

$$\gamma = \sqrt{3}/2\sigma = 0.866/\sigma \quad (1.5-35)$$

取标准方差 $\sigma=1$, 则

$$P(x) = [\sqrt{\gamma}/(2\sqrt{\pi|x|})] \exp(-\gamma|x|) \quad (1.5-36)$$

实验表明, 对话音信号的长时间统计(几十秒以上), 其幅度概率分布较好地符合伽玛分布。

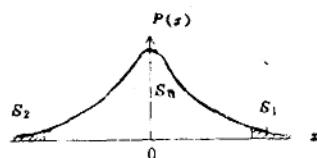


图 1.5-8 互补误差函数的性质