

邮电高等函授试用教材

数字通信原理

徐靖忠 王钦笙 编 倪维桢 审

YOU DIAN GAO DENG

YOU DIAN GAO DENG

HAN SHOU

YOU DIAN GAO DENG HAN SHOU

JIAO CAI

HAN SHOU SHI YONG

GAO HAN

邮电高等函授试用教材

数 字 通 信 原 理

徐靖忠 王钦笙 编
倪维桢 审

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书是有关数字通信技术方面的教科书,着重论述了语音编码和数字传输方面的一些主要问题。具体内容有:数模变换的理论与方法;数字传输与同步;数字复用及其转换技术;在数字网中的有关接续;语音信号的压缩编码—波形编码与参数编码。

本书自成系统,重视理论联系实际,力求通顺易懂,适于自学。可作为高函电信工程专业本科的教材,也可供从事数字通信技术方面的工程技术人员参考。

邮电高等函授试用教材

数字通信原理

徐靖忠 王钦笙 编

倪维桢 审

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街 27 号

中国铁道出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

开本: 850×1168 1/32 1990 年 6 月 第 一 版

印张: 13 8/32 页数: 212 1990 年 6 月 北京第 1 次印刷

字数: 348 千字 印数: 1—8 000 册

ISBN7-115-04202-0/G · 019

定价: 3.20 元

编 者 的 话

本书是根据邮电高等函授电信工程专业教学计划的要求进行编写的。本书系邮电函授本科教科书，可供全国邮电高等函授电信工程专业选用，也可供从事数字通信方面的科技人员和有关院校通信专业的师生参考。

本书是在邮电高函《数字通信原理》讲义的基础上改写的。全书共有八章。第一章数字通信概述，介绍数字通信系统的原理、模型、复用及其性能。第二章讨论语音信号抽样的理论与语音的重建。第三章是模数变换的特有问题，着重讨论量化特性、量化失真功率和量化信噪比。第四章介绍模数变换（编码）与数模变换（解码）的理论、方法与其电路结构。第五章介绍数字通信系统的同步问题，主要讨论定时系统、时钟提取、定时抖动以及同步系统的构成与其性能。第六章阐述传输码型、信道误码、基带传输特性以及再生中继过程。第七章论述数字复用技术以及在数字网中的接续问题。第八章介绍有关语音压缩编码的理论与方法。

本书的第一～四、六、八章由徐靖忠编写；第五、七两章由王钦笙编写。全书由倪维桢审阅，经徐靖忠整理定稿。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，希读者批评指正。

编者

1988年12月

目 录

第一章 概 述

第一节 数字通信系统	1
一、数字信号与模拟信号	1
二、数字通信系统模型	3
第二节 话音信号的数字化方式	5
一、PCM通信系统	6
二、DPCM与DM通信系统	14
第三节 时分多路复用及其构成	17
一、多路复用的概念	17
二、PCM时分复用及其构成	19
第四节 数字信道的主要性能要求	24
一、数字信道	24
二、数字信道的主要性能要求	24
第五节 数字通信的特点及其发展	27
一、数字通信的特点与优、缺点	27
二、数字通信的发展概况	29

第二章 抽样与保持

第一节 话音信号的抽样	33
一、理想抽样的频谱	33
二、抽样定理	37
三、样值序列的复原	40
四、带通型信号的抽样速率	41
第二节 抽样保持与其特性	47
一、抽样保持系统	47
二、收端的话路分离与脉冲展宽	54

三、有关抽样的各种噪声	58
-------------------	----

第三章 量化理论

第一节 均匀量化	61
一、均匀量化特性	61
二、量化失真平均功率的一般计算公式	63
三、均匀量化失真平均功率与 S/D	68
第二节 非均匀量化	74
一、非均匀量化特性与实现方法	74
二、非均匀量化的量化失真平均功率与 (S/D)	78
三、对数压缩律	81
四、A律的 (S/D) 与其界限	86
五、A律13折线压缩特性与其 (S/D)	92

第四章 编码与解码

第一节 码字安排与其变换	106
一、码字码型	106
二、A律13折线的码字安排	109
三、线性码与非线性码之间的变换	112
第二节 数模变换(D/A)	118
一、数—模转换器系统的构成	118
二、线性解码网络	119
三、非线性码的解码	126
第三节 模数变换(A/D)	131
一、A/D变换有关电路单元	132
二、码字判决与判定值的提供	138
三、逐次渐近型编码器	150
四、单片PCM编解码器	155

第五章 定时与帧同步

第一节 定时系统	164
一、发端定时系统的组成	165

二、收端定时提取	169
三、相位抖动	174
第二节 帧同步系统	181
一、帧同步的实现方法	181
二、对帧同步系统的主要要求	182
三、帧同步系统的工作原理	185
四、帧同步系统性能的近似分析	193
第六章 数字传输与再生中继	
第一节 基带传输的线路码型	212
一、基带传输与频带传输	212
二、线路传输码型的选择	214
三、常用的传输码型	216
四、传输码型变换的误码增殖	229
第二节 数字信号的基带传输	232
一、基带传输模型	232
二、理想基带传输系统	234
三、PCM的常用均衡波形	242
四、码间干扰的衡量—眼图	254
第三节 再生中继	258
一、再生中继系统	258
二、均衡放大	260
三、抽样判决与码形成	265
第四节 中继传输性能的分析	268
一、误码率及其累积	269
二、相位抖动的传输特性	277
第五节 中继段长度的确定	287
一、数字传输链路总误码率的分配	287
二、传输等效频率与串音等效频率	287
三、电缆最大中继间距的确定	293

四、光纤传输距离的估算	295
-------------------	-----

第七章 数字复接与数字通信网

第一节 数字复接	309
一、数字信号的复接	309
二、数字复接中的码速变换	314
三、同步复接	314
四、异步复接	317
五、数字复接系列	329
第二节 数模接续与话音插空	331
一、对PCM/TDM $\leftrightarrow$ SSB/FDM相互转接方式的考虑	331
二、TDM $\leftrightarrow$ FDM复用变换的基本概念	333
三、时分话音插空技术简介	339
第三节 数字网与信令接口	342
一、网同步	342
二、综合数字网 (IDN) 与综合业务数字网 (ISDN) 的 基本概念	347
三、信令接口	351

第八章 语音信号的压缩编码

第一节 语音的生成机构与其特征参数	360
一、语音信号的生成机构	360
二、语音的特征参数	363
第二节 波形编码	364
一、差值脉码调制 (DPCM) 的原理	365
二、最佳预测	370
三、增量调制 (DM)	374
四、自适应增量调制 (ADM)	382
五、自适应DPCM (ADPCM)	393
六、子带编码 (SBC)	399
第三节 参数编码	402

一、声码器	402
二、线性预测声码器 (LPC)	403
复习题部分答案	407
参考文献	412

第一章 概 述

本章从数字通信系统模型的构成、话音数字化方式、数字传输方式的时分复用、数字信道的性能要求、数字通信的特点、优缺点以及发展概况等方面,对数字通信的整体作一比较全面的概括介绍,并提出了一些最基本的概念。

学习要点是:

- (1)数字通信系统模型的构成条件与两种传输方式;
- (2)话音信号的数字化的方式,PCM、DPCM、DM的编码对象以及编码过程;
- (3)量化间隔、量化级数、量化误差、编码位数之间的关系;
- (4)时分复用时的各路信号的合路与分路方法;
- (5)数字信道的主要性能要求、数字通信的特点与优缺点。

第一节 数字通信系统

一、数字信号与模拟信号

人们在生产和社会活动中,总是离不开信息的传递。信息的传递是通过信息的物质载体——信号来实现的。根据信号的波形,可分为数字信号和模拟信号两类。

信号波形的特征可用二个物理量(时间、幅度)来表示。图1-1-1是数字信号的波形,图(a)是二进码,每一个码元(由一个脉冲构成)只能取两个(0、A)状态中之一;图(b)是多电平码,其每个码元

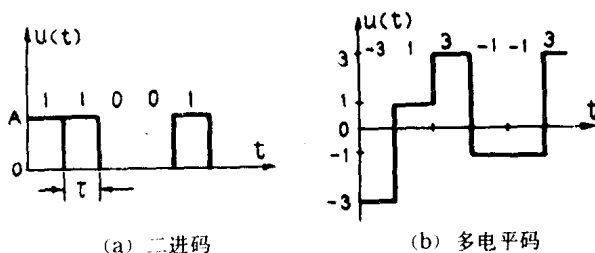


图 1-1-1 数字信号的波形

只能取四个 (3、1、-1、-3) 状态中之一。上述两种信号的共同特征是：幅值被限制在有限个数值之内，它不是连续的，而是离散的。例如图 (b) 的多电平码，它只能从 3、1、-1、-3 四个值中取一个值，而不取其他数值，例如 2、1.5 等值就取不了。这种幅值为离散的信号称为数字信号。通常码元宽度为图 1-1-1 (a) 码元宽度 τ 的一半，所以数字信号一般在时间上、幅值上均是离散的。属于数字信号的信源有：电报符号和数字数据（简称数据）等。

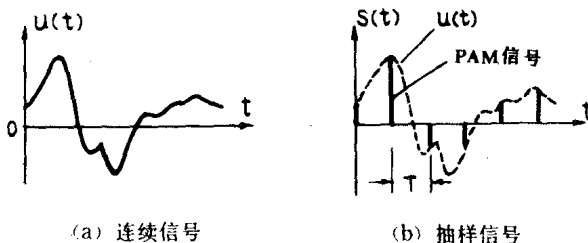


图 1-1-2 模拟信号的波形

与上述情况相反，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、电视的图象信号都是模拟信号。图 1-1-2 (a) 是语音信号的电压波形，其幅值是连续变化的，因此它是模拟信号。图 (b) 是图 (a) 的抽样信号，即对图 (a) 的模拟信号，每隔 T 时间进行抽样一次，因此其波形在时间

上是离散的，但幅度取值不是离散的，而是连续的，所以图 (b) 仍是模拟信号。对模拟信号的抽样信号又称脉幅调制 (PAM) 信号。

由上述的分析可知：数字信号与模拟信号的区分是根据幅度取值上是否离散而定的。模拟信号与数字信号有明显区别，但两者之间、在一定的条件下是可以互相转换的。

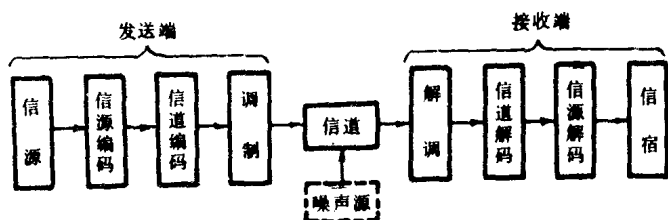


图 1-1-3 数字通信系统模型

二、数字通信系统模型

传递信息的过程称为通信。根据在信道（传输信号的通道）上传输信号的波形，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质所构成的总体——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。

图中，信源是把原始消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的电子计算机、各种数字终端设备等。

信源编码的功能是把模拟信号变换成数字信号，完成模/数变换（A/D变换）的任务。因此，如果信源已经是数字信号，如数据信号等，则可省去信源编码环节。

由于信道噪声干扰，可能使传输的数字信号产生差错——误码。有时为了在接收端能自动进行检出错码或纠正错码，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（这多余的

码元称为**监督码元**)，形成新的数字信号。这样，虽然信号码元个数增多了，但其信号码元间的关系形成较强的规律性，因此在接收端就可按此规律性来检查接收信号是否有差错或纠正错码。这种自动检错码或纠错码的功能是由信道编码来完成的。

有时为了适应信道传输的要求，需要将编码后的数字信号频谱变换到高频范围后，才能在信道中传输。这一变换称为**调制**。在数字通信系统中，未经调制的数字信号称为**基带信号**。

如前所述，信道是指传输信号的通道。根据传输媒介可分为有线信道（明线、电缆、光纤信道等）与无线信道（短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继信道等）。其中除有线信道的明线和电缆可以直接传输数字基带信号外，其他各种信道媒介都工作在较高的频段上。因此数字基带信号必须经过一次调制，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**。

接收端的解调、信道解码、信源解码等几个方框的功能与发送端的几个方框的功能，是一一对应的反变换，这里不再赘述。信源解码后的电信号，由受信者接收，通常称之为**信宿**。信宿可以是人，也可以是各种终端设备。

信号在通信系统中传输时，不可避免地会受到系统外部干扰和系统内部的噪声（电阻热噪声、晶体管器件的散弹噪声等）干扰。为了便于研究，通常把所有的干扰（包括内部噪声）折合到信道中，成为一个总的等效噪声源。

应当指出：对具体的数字通信系统来讲，其方框图并非一定要与图 1-1-3 方框图完全一样。对此举例如下：

(a) 若信源是数字信息时，则信源编码和信源解码环节可去掉。这样就构成了数据通信系统。

(b) 若通信距离不太远，且通信容量不太大时，信道一般采用电缆信道，即采用基带传输方式，而不需要进行调制与解调。

(c) 由于在话音信号中, 含有多余的信息, 这种多余信息的丢失, 不会影响通话。所以在这种情况下, 就不需要信道编码与信道解码。

(d) 对保密要求比较高的通信系统中, 可在信源编码与信道编码之间加入加密器; 同时在接收端的信道解码与信源解码之间加入一个解密器。

本书只讲授信源编码通信系统, 重点放在数字基带传输方面。

小 结

(1) 数字信号与模拟信号的主要区别, 在于幅度取值是否离散。幅度取值为离散者称为数字信号; 幅度取值为连续者称为模拟信号。

(2) 当信源为连续信号时需要信源编码。对话音信号, 由于它本身多余度较大, 一般不需要信道编码。根据信道传输特性可分为基带传输和频带传输两种方式。

复 习 题

(1) 模拟信号与数字信号, 它们之间的区别是什么?

(2) 试绘出话音信号、数字数据信号的基带传输和频带传输时的通信系统方框图。

第二节 话音信号的数字化方式

采用数字信号传输话音信息时, 需要信源编码, 即需要对话音信号进行数字化处理, 这一处理过程称为模数变换(A/D变换)。话音信号的模数变换方法很多, 归纳起来可分为两类:

①根据话音波形的统计特性进行数据压缩的波形编码, 例如脉冲编码调制(PCM)或增量调制(DM)等。

②根据话音形成的机理, 对话音音素(元音、辅音等)进行分

析——合成的参数编码。此方式一般地称为声码器。在本节中只简要介绍波形编码的基本概念。参数编码将于第八章中介绍。

一、PCM 通信系统

PCM通信系统是数字通信系统中的主要形式之一，采用基带传输的PCM通信系统如图 1-2-1 所示。它由三个部分组成，即①相当于信源编码部分的模数变换（A/D）；②相当于信道部分的再生中继；③相当于信源解码部分的数模变换（D/A）。

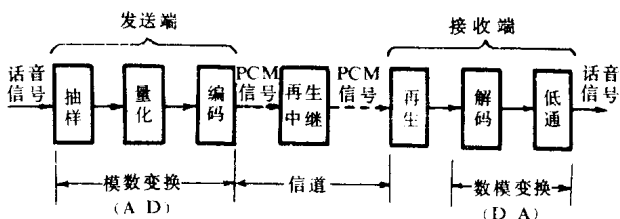


图 1-2-1 PCM通信系统（基带传输）

1. 语音信号的数字化——模数变换

语音信号（模拟信号）的数字化的过程是：抽样—量化—编码（这里所指的编码是指窄义讲的。而信源编码是指广义讲的，它包括模数变换的全过程）。

（1）抽样——语音信号在时间上离散化

语音信号不仅在幅度取值上是连续的，而且在时间上也是连续的。因此要使语音信号数字化，首先要在时间上对话音信号进行离散化处理，这一处理过程是由抽样来完成的。所谓抽样就是每隔一定的时间间隔 T ，取出一次模拟信号的瞬时幅度值（简称样值）。抽样后所得出的一串在时间上离散的样值称为样值序列或样值信号。模拟信号与其对应的样值序列如图 1-2-2 所示。显然抽样后的样值序列是脉幅调制（PAM）信号，其幅度取值是连续的，因此它仍是

模拟信号。

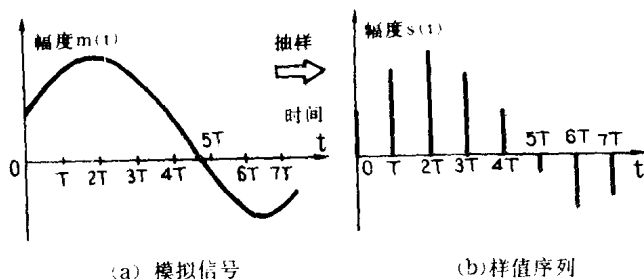


图 1-2-2 模拟信号与其对应的样值序列

将话音信号抽样后，信号在信道上所占用的时间被压缩了，因而给时分复用奠定了基础，同时也给数字化提供了条件。但样值序列必须含有原始模拟信号的信息，同时在接收端要能从样值序列恢复出原始信号的信息，否则PCM通信将无法实现。为达到上述要求，抽样的时间间隔 T ——抽样周期不能太长，它必须满足一定的条件，对此将在第二章介绍。

(2) 量化——幅值的离散化

由于样值序列仍是模拟信号，其幅度在取值上是连续的，它可有无限多种取值，因此要想使它成为数字信号，还应把它的样值进行离散化处理，将幅度为无限多种连续样值变成为有限种的离散值，这一处理过程称为量化。

量化就是将样值的幅度变化范围划分成若干个小间隔，每一个小间隔叫做一个量化级。当某一样值落在某一间隔内时，就用这个间隔内的中间值来近似表示这个样值的大小，如图 1-2-3 所示。于图中，话音信号的幅度变化范围被限定在 $-U$ 伏到 U 伏，在 $-U \sim +U$ 范围内均匀地等分 N ($N=8$) 个小间隔，每一小间隔——量化间隔 Δ 为：

$$\Delta = \frac{2U}{N} \quad (1-2-1)$$

式中: Δ : 量化间隔;

N : 量化级数 (等于离散值的数目);

U : 过载电压—量化幅度范围的峰值。

于图 1-2-3 中, 设 $U = 4\Delta$, 均匀量化间隔为 Δ , 则量化级数 N 为:

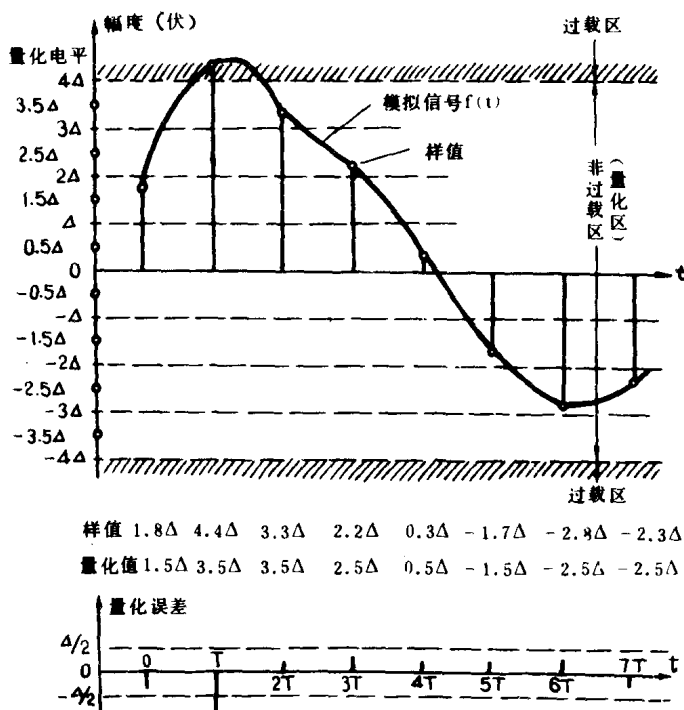


图 1-2-3 量化值与量化误差

$$N = 2U/\Delta = 2 \times 4\Delta/\Delta = 8 \text{ 级}$$

这样就把连续变化电平 ($-4\Delta \sim 4\Delta$) 划分为 8 个量化级, 每一量化级内的连续幅值都用一个离散值来近似表示, 此离散值称为量化值。量化值是取各量化级电压的中间值, 如表 1-2-1 所示。