

通信工程丛书

数字通信(3)

数字通信工程基础

张应中 温启荣 陈继努 编著

中国通信学会主编·人民邮电出版社出版

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 数字信号和模拟信号	(1)
§ 1.2 模拟通信与数字通信	(4)
一、模拟通信.....	(4)
二、数字通信.....	(7)
§ 1.3 数字通信的主要特点	(16)
一、主要优点.....	(16)
二、主要缺点.....	(19)
§ 1.4 国内外数字通信的概况	(20)
第二章 脉冲编码调制 (PCM)	(23)
§ 2.1 模拟信号的抽样	(23)
一、抽样信号的频谱.....	(24)
二、抽样定理.....	(30)
三、带通型信号抽样.....	(33)
四、抽样电路.....	(35)
§ 2.2 保持	(39)
一、抽样充电阶段.....	(41)
二、保持阶段.....	(42)
三、清除阶段.....	(43)
§ 2.3 量化	(43)

一、均匀量化与非均匀量化	(44)
二、量化噪声功率	(46)
三、均匀量化时的信噪比	(50)
§ 2.4 压缩律	(53)
一、理想对数压缩律	(53)
二、A压缩律的导出	(55)
三、 μ 压缩律的导出	(57)
四、 μ 255/15折线压缩律	(59)
五、A87.6/13折线压缩律	(63)
§ 2.5 编码	(67)
一、编码的码字和码型	(67)
二、逐次反馈编码原理	(72)
三、逐次反馈编码器	(76)
四、级联与逐次反馈混合编码器	(94)
五、级联型编码	(98)
§ 2.6 解码	(105)
一、方框图	(105)
二、各部分工作原理	(107)
三、解码示例	(113)
四、权电流解码网络的误差分析和计算	(114)
§ 2.7 分路及模拟信号的恢复	(125)
一、PAM信号的分离	(125)
二、孔径效应及其补偿措施	(125)
三、模拟信号的恢复	(132)
§ 2.8 PCM30/32路典型终端设备介绍	(136)
一、基本特性	(136)
二、帧与复帧结构	(137)
三、端机方框图介绍	(138)
§ 2.9 PCM单路编解码器	(144)

第三章 增量调制 (ΔM 或DM) (149)

§ 3.1 增量调制的概念和工作原理 (149)

§ 3.2 增量调制的实现 (151)

一、增量调制的编码..... (151)

二、增量调制的解码..... (153)

三、简单增量调制电路示例..... (156)

§ 3.3 简单增量调制的特性 (159)

一、过载特性..... (159)

二、量化噪声..... (162)

三、增量调制的编码动态范围..... (167)

四、信道误码对系统的影响..... (171)

§ 3.4 改进型的增量调制 (177)

一、增量总和调制 ($\Delta-\Sigma M$) (177)

二、自适应增量调制 (ADM) (184)

三、数字检测音节压缩 $\Delta-\Sigma M$ 系统 (189)

四、其他改进型增量调制简介..... (192)

§ 3.5 差值脉冲编码调制 (DPCM) (195)

一、DPCM的基本原理 (196)

二、DPCM的基本特性 (198)

§ 3.6 自适应差值脉冲编码调制 (ADPCM) (201)

§ 3.7 60路PCM—ADPCM转换器..... (206)

第四章 数字信号对载波的调制与解调..... (210)

§ 4.1 引言 (210)

§ 4.2 数字振幅调制 (212)

一、线性调制..... (212)

二、双边带振幅键控信号 (DSB—ASK) (215)

三、单边带振幅键控信号 (SSB—ASK) (218)

四、残留边带振幅键控信号 (VSB-ASK)	(223)
五、线性调制信号的解调	(228)
六、二进制ASK调制信号的频谱特性	(231)
§ 4.3 数字频率调制	(234)
一、数字调频信号的调制和解调	(234)
二、数字调频信号的频谱特性	(242)
§ 4.4 数字相位调制	(244)
一、二相调相信号的调制与解调	(246)
二、二进制调相信号的频谱特性	(252)
§ 4.5 多进制数字调制	(253)
一、多进制数字振幅调制	(256)
二、多进制数字频率调制	(259)
三、多进制数字相位调制	(260)
§ 4.6 数字调制系统抗干扰性能的简单比较	(276)
附录: $P_s(\omega)$ 公式的推导	(280)

第五章 信道与干扰

§ 5.1 信道的定义和模型	(285)
§ 5.2 恒参信道	(291)
一、幅度—频率特性	(291)
二、相位—频率特性	(292)
§ 5.3 变参信道	(294)
一、短波电离层反射信道的情况	(294)
二、微波对流层散射信道的情况	(296)
三、信道传输延时随时间而变	(297)
四、多径传播效应	(298)
§ 5.4 关于干扰	(305)
一、加性干扰	(305)
二、限带白噪声的模拟与测量	(307)

第六章 数字信号传输系统	(311)
§ 6.1 再生中继系统的功能	(311)
一、再生中继器的功能.....	(312)
二、再生中继系统的特点.....	(313)
§ 6.2 基带传输特性	(314)
一、基带数字信号在信道传输中的特点.....	(315)
二、无码间干扰的基带传输特性.....	(316)
三、幅度特性的滚降.....	(318)
四、码间干扰的估价—眼图.....	(321)
§ 6.3 PCM基带传输系统	(323)
一、PCM基带传输模型.....	(323)
二、PCM基带传输系统的均衡特性.....	(327)
三、有理函数型均衡.....	(329)
§ 6.4 典型的中继电路简介	(338)
一、自动增益控制 (AGC) 均衡放大器.....	(339)
二、定时提取电路.....	(344)
三、判决再生电路.....	(349)
§ 6.5 中继传输系统的质量分析	(350)
一、信噪比和误码率.....	(350)
二、误码的积累.....	(353)
三、信道误码对通信质量的影响.....	(355)
四、脉冲相位抖动对PCM传输的影响.....	(358)
§ 6.6 线路传输码型	(360)
一、传输码型.....	(361)
二、传输码型特性的分析比较.....	(367)
第七章 定时与同步	(370)
§ 7.1 定时系统	(371)

一、基群PCM设备定时脉冲的种类及参数	(371)
二、定时系统电路举例	(372)
三、收定时系统	(380)
§ 7.2 同步系统	(386)
一、如何实现帧同步	(386)
二、帧同步系统典型电路分析	(390)
三、复帧同步系统	(402)
四、同步系统的理论分析	(405)
五、同步系统的告警	(421)

第八章 脉冲编码调制通信系统的质量分析

(422)

§ 8.1 串话	(423)
一、通带的高频端对串话的影响	(424)
二、通带的低频端对串话的影响	(426)
§ 8.2 折迭噪声	(430)
§ 8.3 量化噪声及量化信噪比	(432)
一、过载噪声功率与均匀量化时的总信噪比	(433)
二、非均匀量化噪声的基本公式	(436)
三、按A律压扩时的信噪比	(437)
四、按 μ 律压扩时的量化信噪比	(449)
五、采用折线编码时的量化信噪比	(454)
§ 8.4 群路编码的量化信噪比	(461)
一、群路编码的特点	(461)
二、群路编码的量化信噪比	(462)
§ 8.5 脉码调制通信系统的特性测试	(467)
一、净衰减电平及音频转接点阻抗	(468)
二、振幅特性 (增益随输入电平的变化)	(470)
三、衰减频率特性	(471)
四、空闲信道噪声	(472)

五、路际串话	(473)
六、总失真(包括量化失真)	(474)
七、交调失真	(476)
八、谐波失真(寄生带内信号)	(478)
九、群时延	(478)
十、电平持恒度	(479)
十一、信令干扰	(480)
十二、2048千比每秒接口指标	(481)
十三、64千比每秒接口指标	(485)
十四、设备监测告警性能	(493)
第九章 差错控制	(495)
§ 9.1 概述	(495)
一、基本概念	(495)
二、纠错编码的基本原理	(498)
§ 9.2 反馈纠错	(501)
一、奇偶监督码	(501)
二、行列监督码	(502)
三、恒比码	(505)
四、自动要求重发系统—ARQ的原理	(507)
§ 9.3 前向纠错	(509)
一、重复码	(510)
二、汉明码	(512)
三、循环码	(515)
四、连环码(卷积码)	(524)
五、纠正成群差错的方法	(528)
§ 9.4 差错控制的性能估算及其应用	(534)
第十章 数字通信发展中的几个问题	(539)

§ 10.1	脉冲编码调制通信系统的复用序列·····	(540)
§ 10.2	PCM高次群复接和分接·····	(542)
	一、复接原理·····	(545)
	二、二次群的帧结构·····	(549)
	三、二次群复接分接设备 (<i>Muldex</i>) 的构成·····	(554)
	四、三次群和四次群复接设备的帧结构·····	(558)
§ 10.3	PCM/TDM—SSB/FDM复用转换设备·····	(558)
	一、TDM↔FDM变换的基本考虑·····	(562)
	二、韦弗—达林顿 (<i>Weaver—Darlington</i>) 方法·····	(564)
	三、贝朗加 (<i>Bellanger</i>) 采用的快速付氏变换(FFT) 和多相网络方法·····	(567)
§ 10.4	数字交换·····	(575)
	一、数字交换系统的基本组成·····	(576)
	二、数字交换终端——集线器系统·····	(578)
	三、数字交换网络·····	(583)
§ 10.5	数字网的同步·····	(593)
	一、网同步的必要性·····	(594)
	二、网同步的方式·····	(599)
§ 10.6	数字语音插空·····	(606)
	一、概述·····	(606)
	二、语音插空的工作原理·····	(608)
	三、语音插空技术的应用概况·····	(612)

第一章 绪 论

数字通信是用数字信号进行通信的一种通信方式，它主要包括数字电话通信和数据通信两大类。在这一章里主要介绍数字通信中常用的一些概念、数字信号如何形成，即如何将模拟信号数字化、数字化的一些主要过程、数字通信系统和多路复用通信（时分多路复用和频分多路复用）的构成，并介绍数字通信的几个主要特点。通过这一章的学习，读者可以对数字通信的基本概念有一般的了解，这样将有利于以后各章对数字通信的各个主要环节和基本原理进行较为深入的探讨。

§ 1.1 数字信号和模拟信号

通信系统的作用是传递信息。

在人类的各种活动中经常需要了解客观事物的状态，而客观事物状态的变化就产生信息。因此，信息的传递是社会活动中不可缺少的重要一环。

人们用语言、文字、或图画等来表达信息，也可以用收发双方事先约定的编码来表达信息。但是这些语言、文字、图画、编码等本身不是信息而被称为消息，而信息就包含在消息之中。

消息中包含的信息数量可用“比特”（bit）来度量，即以“比特—写作比或b”、作为度量信息源所发出的或在通信系统中传递的消息所包含的信息量的单位。它在信息论中有严格的定义，我们这

里主要着眼于应用。在二进制数字通信中若从消息转换过来的数字序列中“1”和“0”出现的概率各为 $\frac{1}{2}$ ，并且前后码元是相互独立的，那么这个数字序列中每个码元的信息量即为 $\log_2 2 = 1$ 比。

由于消息不便于直接向远方传输，因此需要把传输的消息通过某种设备先变成电信号。这种电信号与所要传递的消息变化，例如语言的声音变化或者图画的颜色变化等相对应，因而在电信号中就包含了所要传递的信息。

因此，我们可以把电信号理解为“传递信息的函数”。信号有连续时间信号、离散时间信号、模拟信号和数字信号之称。连续时间信号是指时间变量连续变化而幅度则可以是连续也可以不是连续的信号。如图1.1所示，常简称为连续信号。离散时间信号是指时间变量是离散的。信号仅在时间变量的离散值上才有定义，如图1.2所示。这也常简称为离散信号。



图 1.1 连续信号示意图

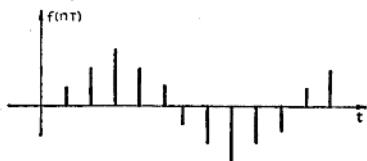


图 1.2 离散信号示意图

模拟信号是指代表消息的信号及其参数（幅度、频率或相位）随着消息连续变化的信号。它在幅度上连续，但在时间上则可以连

续也可以不连续。例如连续变化的语音信号，电视图象信号以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)、脉冲宽度调制(PWM)这些时间上不连续的信号也都是模拟信号，如图1.3(a)、(b)所示。

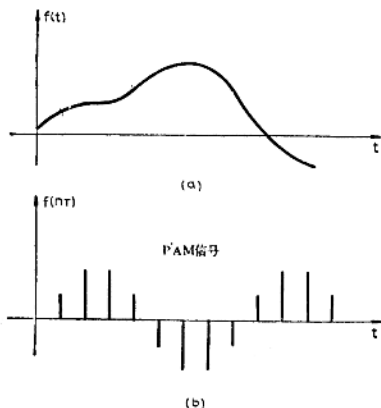


图 1.3 模拟信号示意图

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信号，如图1.4所示。例如电报、计算机输入输出信号、数据信号、

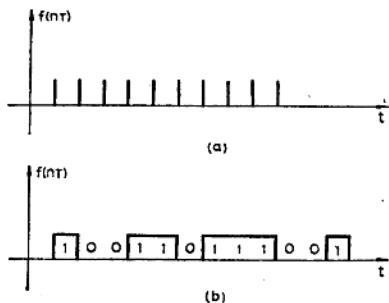


图 1.4 数字信号示意图

脉冲编码调制的数字电话信号、数字化电视或图象信号等都是数字信号。

§ 1.2 模拟通信与数字通信

前面已谈及信号有模拟信号和数字信号之分，因此在通信中也就有模拟通信和数字通信两种系统。模拟通信系统是利用模拟信号传递消息的系统；而数字通信系统则是利用数字信号传递消息的系统。两地通信时可以用有线（明线、电缆或光纤）信道传输，也可以用无线（长波、中波、短波、微波）信道传输。凡用以传输模拟信号的信道称为模拟信道，用以传输数字信号的信道称为数字信道。

一、模拟通信

模拟通信系统按其调制方法不同又可以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)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。

为了扩大通信容量使之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办法。复用的方法在连续调制系统中多采用频率分割复用(FDM)，简称为频分复用；在脉冲调制系统中则采用时间分割复用(TDM)，简称时分复用。

模拟通信系统的频分复用原理如图1.5所示。

在发送端由 K_1 、 K_2 、 \dots 、 K_N 送出的音频信号分别进入通路调制器 M_1 、 M_2 、 \dots 、 M_N ，并用不同的载频 f_1 、 f_2 、 \dots 、 f_N 分别进行调制（一般为了节省频带，多数情况都用单边带调制）。然后分别用

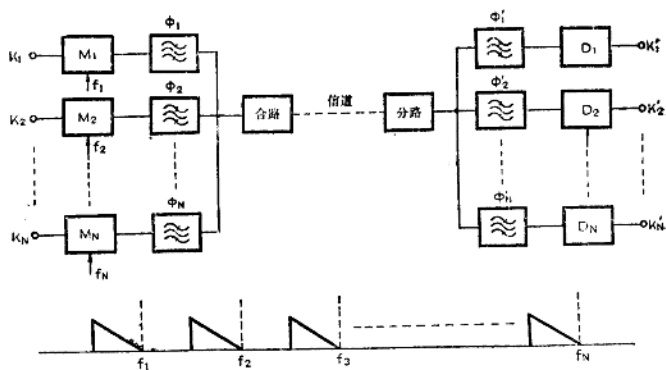


图 1.5 频分复用通信原理图

带通滤波器 ϕ_1 、 ϕ_2 …、 ϕ_N 进行滤波，以限制每一话路中的已调波使之处在规定的频带内，在合路时把它们的输出汇在一起得到各路频率互不干扰的总和信号，并将此总和信号送入信道。在接收端，将总和信号送到各个支路的滤波器 ϕ'_1 、 ϕ'_2 …、 ϕ'_N ，每一滤波器只通过各话路所需的与发端相应支路所发出的频带。然后分别送到解调器 D_1 、 D_2 …、 D_N 中，再用与发端相同的载频 f_1 、 f_2 …、 f_N 进行解调。在解调器的输出端便可分别获得与发端相同或基本相同（考虑了失真）的信息 K'_1 、 K'_2 …、 K'_N 。

图中信道部分如用传输线（明线或电缆），就成为我们所熟知的有线载波通信；若信道部分发端加到发射机和天线，收端使用接收机和天线，就成为无线通信。

模拟通信系统中的时分复用原理如图1.6所示。

图中 K_1 、 K_2 …、 K_N 选出音频信号， S 和 S' 为电子转换开关、两者以同样的速度和同样的顺序严格地同步旋转（由同步信号进行同步）。当 S 开关接上 K_1 的瞬间， S' 开关刚好接上 K'_1 。当开关旋转速度满足一定要求，例如通话时速度达到8000转/秒，则发端经 K_1

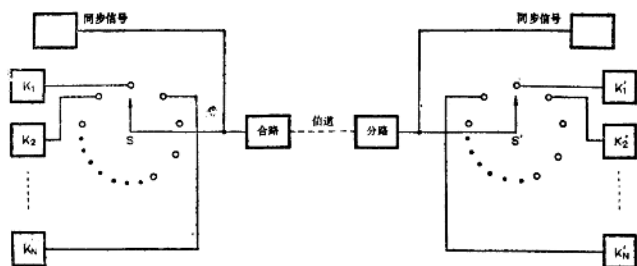


图 1.6 时分复用通信原理图

发出的离散话音的中断现象将不会为对方 K_1' 所觉察，即所听到的声音还是连续的。

图中的传输信道同样适用于有线、无线及光纤等通信。图 1.5 和 1.6 都只是示意图，不是实际的复用通信系统，只不过用来说明复用的原理。

模拟通信方式目前我国仍占主导地位。但是，随着社会发展的需要，通信容量将大大增加。在通信过程中，工业干扰、通信机相互间的干扰以及电波传播引入的干扰、人为干扰等将愈来愈严重，因此通信的可靠性和有效性问题也随之愈来愈重要。另一方面，随着集成技术的迅速发展，计算机应用和工业自动化的日益发展，各类数据业务也必然愈来愈发展，新的业务如数字电话通信、数字图象通信、电子计算机通信以及与信息处理相结合的多功能的新型通信业务均将蓬勃发展，这些都要求通信数字化。由于这些原因，目前国际上电信通信的方式正在从模拟通信向数字通信发展，我国当然也不会例外，尽速掌握数字通信技术已是刻不容缓。

二、数字通信

1. 数字通信是如何实现的

所谓数字通信概括地说就是把原始消息转化成简单的数字形式、再传递给对方的通信方式。下面先说明原始消息是怎样转化成数字形式的。

为了容易说明问题，先以大家比较熟悉的电报为例。我们知道，发电报先要把文字译成代码。例如“要”字，先要把它译成代码6008后，再把这个代码发出去，对方收到6008代码后再译成“要”。

在老式的电报通信中，代码是由报务员用电键发出长短不同的脉冲来传递给对方的。发一个单位的短脉冲叫“点”，发一个长脉冲（长度等于三个单位短脉冲）叫“划”，点与划之间的间隔也是三个单位短脉冲，而一个字与一个字之间相隔五个单位短脉冲，例如0到9的代码用符号表示为：

0	-----	5
1	·-----	6	-.....
2	··-----	7	--.....
3	···-----	8	---.....
4	····-	9	-----·

上面举的例子“要”字，其代码为6008，用以上规定的符号发出的电报脉冲为：

- · · · · - - - - - - - - - - - - - - - · · ·

对方收到这种“点”“划”表示的符号后译成代码6008，再译成“要”字。

上述代码称为莫尔斯码(Morse Code)。近代的电报机不再直接传送上述代码，因为莫尔斯码的每个符号长度是不相同的，它给通信系统的设计，特别是自动化的通信系统带来许多不便。现在数字

通信中采用的是二进制数码，其符号只有“1”和“0”，这是电路中最容易实现的一种信号。有脉冲为“1”，没有脉冲为“0”，用四位二进制码来表示上面所述的代码6008时则成为0110 0000 0000 1000，对方收到后即可译成6008。

从上述可见，电报就是一种最早的数字通信方式。下面我们再简单谈谈模拟电话通信是如何数字化的。

为了紧密结合实际，就以脉冲编码调制(Pulse Code Modulation—PCM)来说，采用PCM的办法把模拟电话信号数字化，一般要通过下述三个步骤：

第一步：对模拟电话信号进行“抽样”(Sampling)，这是将连续信号在时间上离散化的过程。

第二步：将已在时间上离散化了的信号进行“量化”(Quantization)，这是将时间上离散化的信号在幅度上也离散化的过程。

第三步：将时间上和幅度上都已离散化了的信号进行“编码”(Encode)成为数字形式，这是完成数字化的最后过程。

现在举一个简单的例子，如图1.7(a)所示的模拟话音信号来说明上述过程。

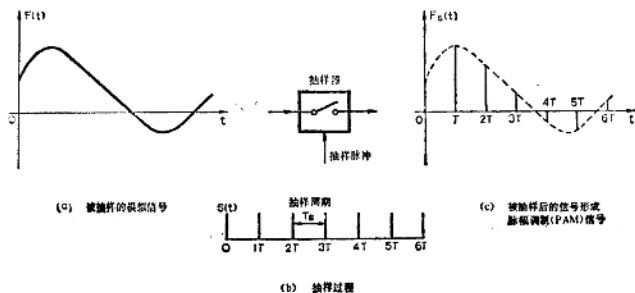


图 1.7 模拟信号被抽样过程