

通信工程丛书

数字通信工程

张应中 张德民 温啟荣 编著
陈继努 胡 庆

中国通信学会主编·人民邮电出版社出版

内 容 提 要

本书是“通信工程丛书”之一，主要介绍了数字通信的基础理论知识和现代数字通信技术。内容包括脉冲编码调制，增量调制，数字复接技术，数字信号对载波的调制与解调，语音压缩编码，数字信号的传输、定时与同步等，最后还对数字通信中的新技术如SDH、ATM、ISDN、智能网、多媒体技术等也作了相应的介绍。

本书可供从事通信的工程技术人员、管理人员及大专院校的师生学习参考。

通信工程丛书

数字通信工程

张应中 张德民 温啟荣 编著
陈继努 胡 庆

*

人民邮电出版社出版发行
北京朝阳门内南竹杆胡同 111 号
北京顺义振华印刷厂印刷
新华书店总店北京发行所经销

*

开本：850×1168 1/32 1996年8月 第1版
印张：29.25 1996年8月 北京第1次印刷
字数：779千字 插页：3 印数：1—5 000册

ISBN 7-115-05953-5/TN·1011

定价：49.00元

丛 书 前 言

为了帮助我国通信工程技术人员有系统地掌握有关专业的基础理论知识，提高解决专业科技问题、做好实际工作的能力。了解通信技术的新知识和发展趋势，以便为加快我国通信建设、实现通信现代化作出应有的贡献，我会与人民邮电出版社协作，组织编写这套“通信工程丛书”，陆续出版。

这套丛书的主要读者对象是工作不久的大专院校通信学科各专业毕业生、各通信部门的助理工程师、工程师和其他通信工程技术人员。希望能够有助于他们较快地实际达到通信各专业工程师所应有的理论水平和技术水平。

这套丛书的特点是力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。丛书内容从我国实际出发，密切结合当前通信科技工作和未来发展的需要，阐述通信各专业工程师应当掌握的专业知识，包括有关的系统、体制、技术标准、规格、指标、要求，以及技术更新等方面。力求做到资料比较丰富完备，深浅适宜，条理清楚，对专业技术发展有一定的预见性。这套丛书不同于高深专著或一般教材，不仅介绍有关的物理概念和基本原理，而且着重于引导读者把这些概念和原理应用于实际；论证简明扼要，避免繁琐的数学推导。

对于支持编辑出版这套丛书的各个通信部门和专家们，我们表示衷心感谢。殷切希望广大读者和各有关方面提出宝贵的意见和建议，使这套丛书日臻完善。

中国通信学会

前 言

这本书是以原人民邮电出版社出版的《数字通信工程基础》为基础改写的。结合目前数字通信工程发展的情况，原书有许多资料已不再需要，有些则可以尽量简化，而许多发展的技术则应尽可能补充进去。例如：增加了许多有用的调制方式，增加了语音压缩编码；同步数字系列（SDH），同步光纤网（SONET），异步转移模式（ATM），窄带、宽带综合业务数字网（N 或 B—ISDN），智能网（IN），多媒体（Multimedia）信号处理技术，最近才提出来的“信息高速公路”等也都用专门章节加以介绍。

全书共 11 章，第一章至第三章的章节仍按原书编排，只是内容按现在要求作了改写。第四章改为“数字复接技术”，重点介绍了同步数字复用系列（SDH）。第五章改为“数字信号对载波的调制与解调”，将 QAM、QPR，以及数字移动通信中常采用的 QPSK、MSK 及 GMSK 调制和解调方式都扼要作了介绍。为了适应数字编码技术发展的需要，增加了“语音压缩编码”一章。又考虑到目前的情况，把原来的“信道与干扰”精简后与传输系统合并为一章，并重点增加了光纤传输、微波传输和卫星传输。在第十一章重点介绍了窄带和宽带综合业务数字网（N 或 B—ISDN）、异步转移模式（ATM），以及智能网（IN）、多媒体（Multimedia）技术和“信息高速公路”。

在编写中力求具有理论性、实用性、系统性和方向性。并密切结合我国的实际。

本书撰写总的由张应中同志负责。其中第四章、第六章全部，第二、三两章的部分，第七章、第十一章的部分由张德民同志增写或改写。第二章及第三章的大部分，以及第十章的全部由温啟荣同志改写。第八章的一、二节以及第七章的二、三两节由陈继努同志改

写。第七章的一，四，五，六节由胡庆同志改写或增写。其余各章节则由张应中同志改写，全书由张应中、张德民同志统一审阅定稿。全书的修改、缮写则由温啟荣、胡庆同志进行。

由于水平所限，书中不妥或错误之处仍望读者指正。

作者

1995年1月于重庆邮电学院

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
1.3 数字通信的主要特点.....	16
1.4 国内外数字通信的简况.....	21
第二章 脉冲编码调制 (PCM)	25
2.1 模拟信号的抽样.....	25
2.2 保持.....	41
2.3 量化.....	45
2.4 压缩律.....	55
2.5 编码.....	70
2.6 解码.....	97
2.7 分路及模拟信号的恢复	117
2.8 PCM30/32 路典型终端设备介绍	128
2.9 PCM 集成电路及其构成的 PCM30/32 路系统	138
第三章 增量调制 (ΔM 或 DM)	157
3.1 增量调制的概念和工作原理	157
3.2 增量调制的实现	159
3.3 简单增量调制的特性	167
3.4 改进型增量调制	185
3.5 自适应差值脉冲编码调制	200
3.6 60 路 PCM—ADPCM 转换	209
第四章 数字复接技术	216
4.1 概述	216

4.2	复接原理	222
4.3	数字复接设备	241
4.4	同步数字复用系列 (SDH)	260
4.5	零 (0) 次群数字码流的复用	279
第五章	数字信号对载波的调制与解调	283
5.1	引言	283
5.2	数字振幅调制	285
5.3	数字相位调制	312
5.4	正交幅度调制	355
5.5	数字频率调制	369
5.6	不同制式的数字调制抗干扰性能的简单比较	394
第六章	语音压缩编码	401
6.1	数字信号处理基础	401
6.2	语音信号模型及特征参数	451
6.3	语音压缩编码技术	461
6.4	线性预测编码 (LPC) 技术	482
6.5	矢量量化技术	496
6.6	话音插空技术	508
第七章	数字信号传输系统	516
7.1	信道与干扰	516
7.2	数字信号的传输	531
7.3	电缆传输系统	570
7.4	数字光纤传输系统	576
7.5	数字微波中继传输系统	614
7.6	卫星传输系统	637
第八章	定时与同步	653
8.1	定时系统	653
8.2	同步系统	660
8.3	数字网的同步	694

第九章 脉冲编码调制通信系统的质量分析	707
9.1 串话	708
9.2 折叠噪声	714
9.3 量化噪声及量化信噪比	716
9.4 群路编码的量化信噪比	744
9.5 脉码调制通信系统的特性测试	750
第十章 差错控制	781
10.1 概述.....	781
10.2 反馈纠错.....	787
10.3 前向纠错.....	796
10.4 差错控制的性能估算及其应用.....	821
第十一章 数字通信发展中的几个动向	826
11.1 PCM/TDM-SSB/FDM 复用转换设备	826
11.2 数字交换.....	842
11.3 综合业务数字网 (ISDN) 简介	869
11.4 异步转移模式 (ATM) 技术	892
11.5 智能网 (Intelligent Network IN)	906
11.6 多媒体技术.....	910
11.7 信息高速公路.....	918

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，它主要分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，这样将有利于对以后各章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”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 $1/2$ ，并且前后码元是互相独立的，那么这个数字序列中每个码元的信息量即为 $\log_2 2 = 1\text{bit}$ 。

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。这种电信号随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，因而在电信号中也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”。信号分连续时间信号、离散时间信号。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。它也常简称为离散信号。

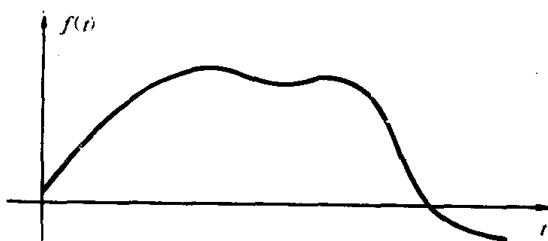


图 1.1 连续信号示意图

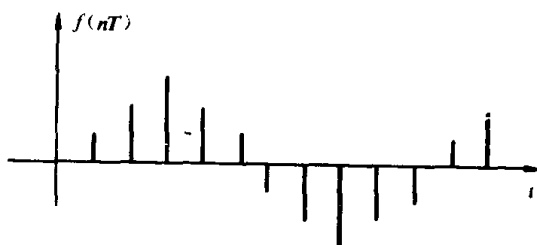
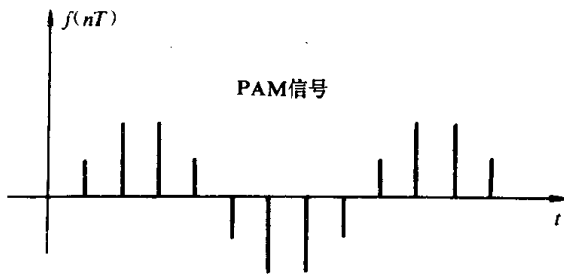


图 1.2 离散信号示意图

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、电视图像信号以及许多

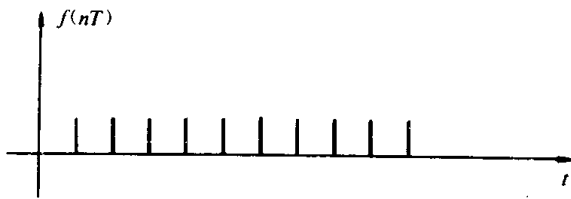


(a)

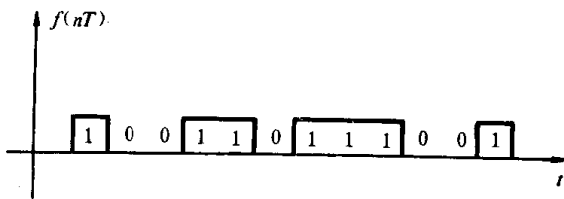


(b)

图 1.3 模拟信号示意图



(a)



(b)

图 1.4 数字信号示意图

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。

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。例如电报信号、计算机输入输出信号、数据信号、脉冲编码调制的数字电话信号、数字化电视或图像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）。然后分别用带通滤波器 ϕ_1 、 ϕ_2 、 \dots 、 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 、 \dots 、 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 、 \dots 、 D_N 中，再用与发端相同的载频 f_1 、 f_2 、 \dots 、 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 、 \dots 、 K'_N 。

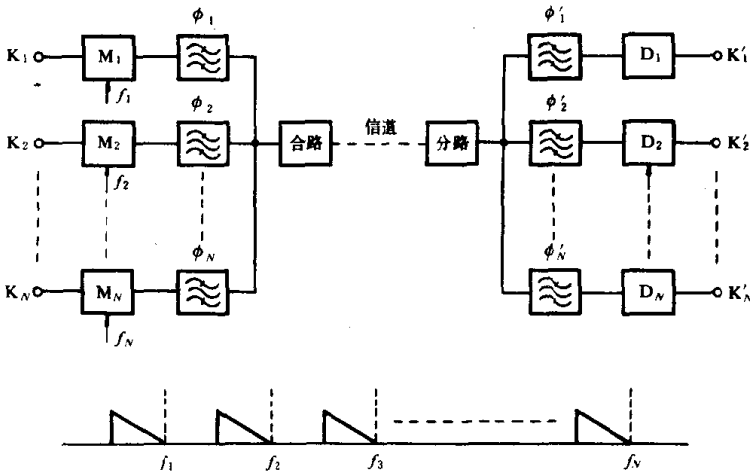


图 1.5 频分复用通信原理图

图 1.5 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。

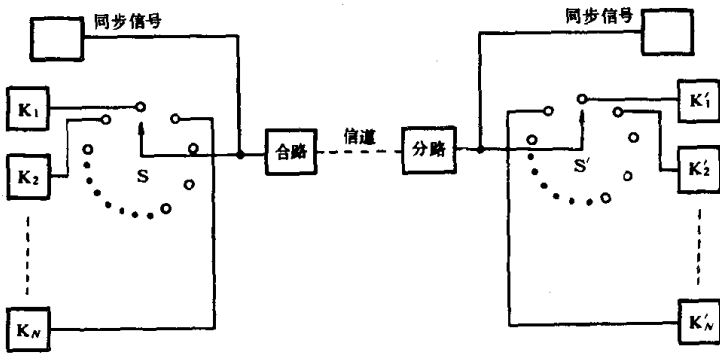


图 1.6 时分复用通信原理图

图 1.6 中 K_1 、 K_2 、 \dots 、 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 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 1.6 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有一定地位。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、数字图像通信、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，再传送给对方的通信方式。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送给对方的。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,其符号只是“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,用如图 1.7 (a) 所示的模拟话音信号来说明上述过程。

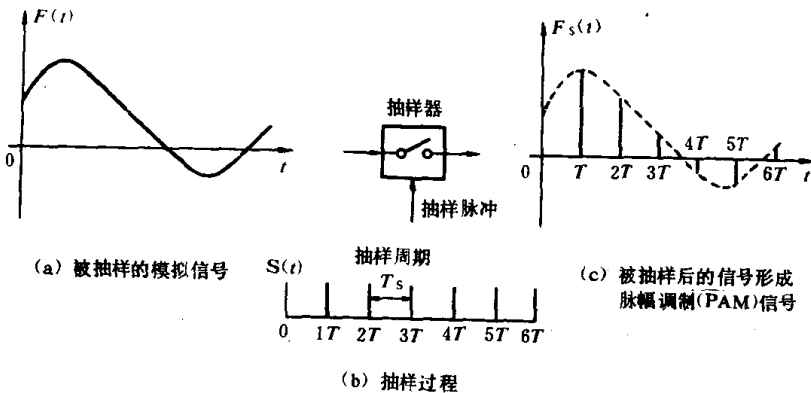


图 1.7 模拟信号被抽样过程

第一步：“抽样”

所谓“抽样”，简单地说是从连续的信号中取出“样品”，称为“样值” (Sample)。如果取出的“样值”足够多，这些“样值”序列即可代表连续信号。问题是样值要取多少才行？这个问题以后要深入地讨论，现在只简单地说明，如果一个连续信号 $F(t)$ ，其最高频率为 f_m ，只要使抽样频率 f_s 按 $f_s \geq 2f_m$ 进行抽样，这样取出的样值序列就完全可以代表 $F(t)$ 。当接收端收到这些样值序列时，再通过一个截止频率为 f_m 的理想矩形低通滤波器便可从其输出得到原来的连续信号 $F(t)$ 。这是后面要详细讨论的“抽样定理”为依据的。根据这一定理，如果语音的最高频率 $f_m = 3.4\text{kHz}$ ，则抽样频率一般采用 8kHz ($8\text{kHz} > 2 \times 3.4\text{kHz}$)。抽样过程如图 1.7 (b) 所示，在抽样器上加一个抽样脉冲 $s(t)$ ，对 $F(t)$ 进行脉冲调制，即可取出语言信号的瞬时幅值，如图 1.7 (c)。

第二步：量化

量化是把抽样得到的幅度连续的信号进行幅度离散化的过程，实际是要通过量化测定该瞬时样值的幅度。为此要将信号的幅度分成许多量度单元，一个量度单位称为一个量化级，用 Δ 表示。如果一个量化级为 1mV ，则信号的幅度为 $0 \sim 1\text{V}$ 时便有 $0 \sim 1000\Delta$ 。每个瞬时样值都要用量化级去度量，以测定它为多少量化级。一般情况，如果一个量化级为 1Δ ，则样值在 $0 \sim \Delta$ 范围内时只好均取其中间值，故其量化值均为 0.5Δ 。样值在 $\Delta \sim 2\Delta$ 范围内则为 1.5Δ 。可见用量化级去量度得来的量化值与原样值的幅度是有区别的，这就是由于量化而产生的误差，称为量化误差 (Quantization error)。

图 1.7 (c) 的样值序列被量化后可画成图 1.8。

这里设样值幅度范围为 $-4\Delta \sim +4\Delta$ ，量化级分为 8 个单位，每个单位为 1Δ 。从图 1.8 中可以看出，原样值为 2.7，而量化值则为 2.5；原样值为 3.8，量化后为 3.5；原样值为 1.2，量化后为 1.5。与原样值幅度相比均有一定的量化误差，如图 1.8 (b) 所示。最大的量化误差不超过半个量化级，即：量化误差 $e(t) = \text{量化值} - \text{样值} \leq \frac{\Delta}{2}$ 。