

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

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 \rightarrow 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	语音插空技术	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

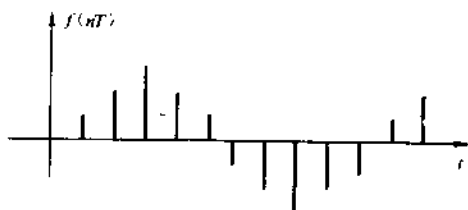
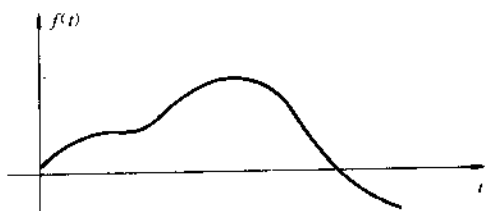
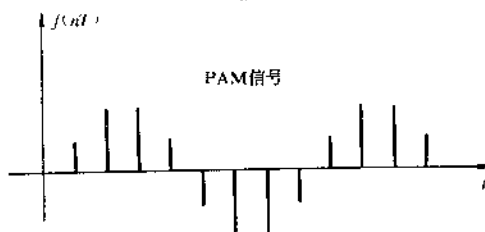


图 1.2 离散信号示意图

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

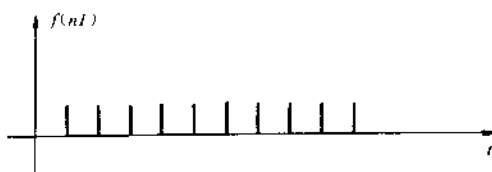


(a)

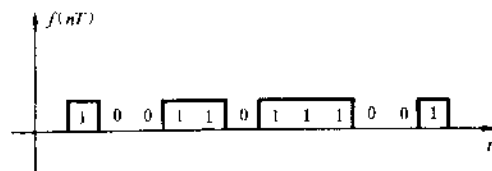


(b)

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 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$ 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 $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N$, 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 。

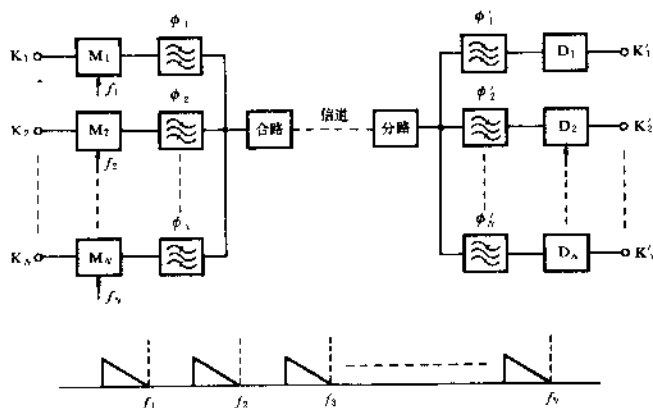


图 1.5 频分复用通信原理图

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。

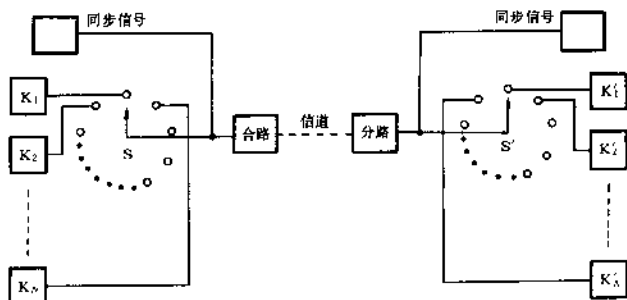


图 1.5 时分复用通信原理图

图 1.6 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_i 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 发出的离散语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。

模拟通信方式目前在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) 所示的模拟语音信号来说明上述过程。

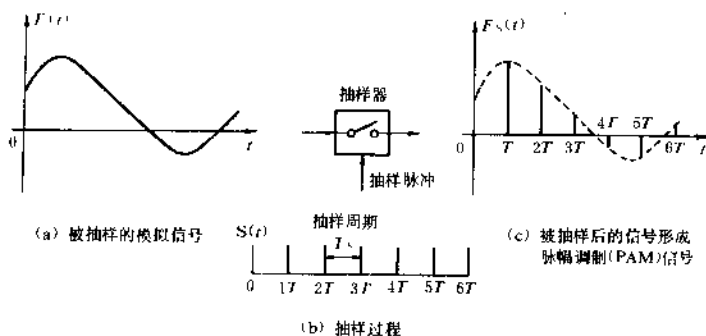


图 1.7 模拟信号被抽样过程

第一步：“抽样”

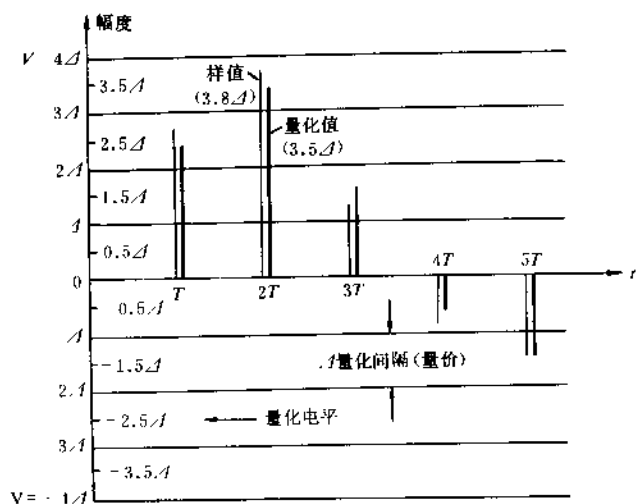
所谓“抽样”，简单地说是从连续的信号中取出“样品”，称为“样值”（Sample）。如果取出的“样值”足够多，这些“样值”序列即可代表连续信号。问题是样值要取多少才行？这个问题以后要深入地讨论，现在只简单地说明，如果一个连续信号 $F(t)$ ，其最高频率为 f_m ，只要使抽样频率 f_s 按 $f_s \geq 2f_m$ 进行抽样，这样取出的样值序列就完全可以代表 $F(t)$ 。当接收端收到这些样值序列时，再通过一个截止频率为 f_m 的理想矩形低通滤波器便可从其输出得到原来的连续信号 $F(t)$ 。这是后面要详细讨论的“抽样定理”为依据的。根据这一定理，如果语音的最高频率 $f_m = 3.4\text{kHz}$ ，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，在抽样器上加上一个抽样脉冲 $s(t)$ ，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

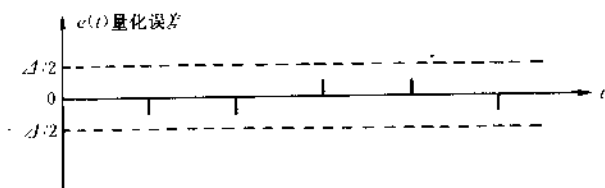
量化是把抽样得到的幅度连续的信号进行幅度离散化的过程，实际是要通过量化测定该瞬时样值的幅度。为此要将信号的幅度分成许多量度单元，一个量度单位称为一个量化级，用 Δ 表示。如果一个量化级为 1mV ，则信号的幅度为 $0 \sim 1\text{V}$ 时便有 $0 \sim 1000\Delta$ 。每个瞬时样值都要用量化级去度量，以测定它为多少量化级。一般情况，如果一个量化级为 1Δ ，则样值在 $0 \sim \Delta$ 范围内时只好均取其中间值，故其量化值均为 0.5Δ 。样值在 $\Delta \sim 2\Delta$ 范围内则为 1.5Δ ，可见用量化级去量度得来的量化值与原样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



(a)



(b)

图 1.8 量化后的样值序列及量化误差

由此可见,在样值幅度一定的情况下,如果量化级取得愈多,即量化级愈小,对原样值幅度的量度就愈精确,由量化所产生的量化误差则愈小。也可以这样理解:量化级值一定时,样值幅度大的大信号,其信号幅度与量化误差之比大;样值幅度小的小信号其信号幅度与量化误差之比小。

第三步: 编码

编码是将模拟信号数字化的最后一步。样值幅度量化以后要传

输给对方,最简单的表示法是用二元数字。如上所述量化级分为 8 个单位即 8 级,用二元数字表示则需要 3 位码($2^3=8$)。

由于样值有正有负,故 3 位码中要用 1 位码表示量化值的极性,其余 2 位码表示幅度值。图 1.8 (a) 中的量化值编成二进码如图 1.9 所示。

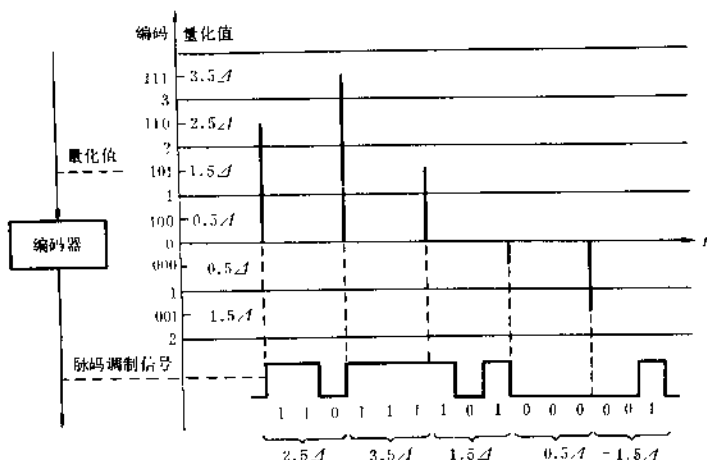


图 1.9 编码示意图

这里是规定 0~1 按 0 级量化, 编码为 100; 1~2 按 1 级量化, 编码为 101; 2~3 按 2 级量化, 编码为 110; 3~4 按 3 级量化, 编码为 111。

上述例子采用的是均匀量化,即在样值幅度范围内的量化间隔是相等的。这种量化级值一定的量化方式,正如前面已提到的,从最大量化误差 $\leq \frac{\Delta}{2}$ 来看,小信号的信号幅度与量化噪声之比(S/N)要比大信号的小。为了改善小信号的量化信噪比,就必须使小信号的量化间隔比大信号的量化间隔小,也就是说要采用量化级值不一定的量化方式。这种量化称为“非均匀量化”,从上例也可以看出,量化级数愈多,则量化噪声愈小,而量化级愈多则所需编码的位数

也愈多，这样会使编码设备复杂，同时信码的传输时间也长了，因此要折衷设计所采用的量化和编码方案。

完成了编码过程之后，模拟信号已转换成了数字信号，进而可将此数字信号变换成适于信道传输的波形传到对方。对方收到传输的信号后再反变换成与发端完全一样的编了码的数字信号。将此数字信号经过解码器解码恢复成表示样值形式的 PAM 信号，再通过低通滤波器即可重新得到原来的模拟信号，如图 1.10 所示。

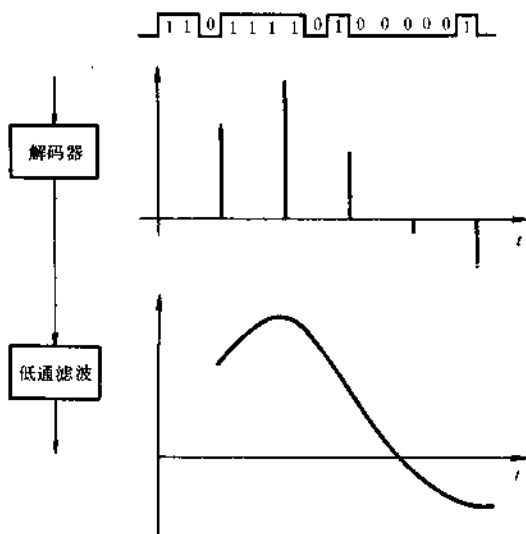


图 1.10 数字信号恢复成模拟信号过程示意图

2. 数字通信系统

数字通信系统就是利用数字信号来传递信息的通信系统。一个有加密装置的数字通信系统可以用图 1.11 表示。

图 1.11 中的消息源可以是声音也可以是图像、数据或其他。模数转换器的功能是把输入的模拟信号转换成由数字信息单元组成的数字序列信号。

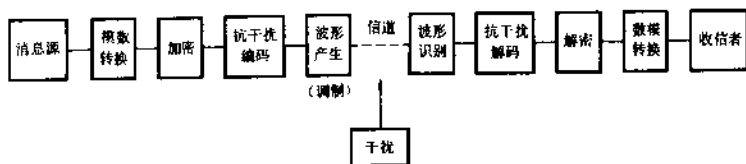


图 1.11 有加密装置的数字通信系统

加密器是在需要实现保密通信时才用的器件。通过加密器可以产生密码，人为地把被传输的数字序列搅乱。这种编码可以采用周期非常长的伪随机序列，甚至采用完全无规律的噪声码。这个处理过程就叫做加密。在接收端利用与发端完全相同的密码复制品，可对接收到的数字序列进行解密。

干扰和噪声会损害传输的数字信息，从而出现差错。为了尽量把差错纠正过来，采用一种对传输的原始信息按一定的规则加入保护成分的办法，组成所谓“抗干扰编码”。在接收端按一定的规则进行解码，从解码过程中能发现错误或纠正错误，这种技术称为“差错控制技术”。

波形产生器（又称调制器）的任务是把各种数字信息脉冲转换成适于信道传输的数字波形。这些数字波形要根据信息的特点来选择。波形识别器（又称解调器）的任务是对收到的数字波形进行识别，并把数字波形序列转换成原数字信息脉冲。

此外，数字通信系统还有一个必不可少的组成部分叫“定时同步”（在图上没有画出）。在数字通信中，因为数字信息序列是按一定的节拍传输的，因此发、收两地的节拍一定要一致，否则就会出现混乱。另外，发送的数字信息序列常常是编组的（例如电报、数字电话的“帧”等等），在收端必须知道这些编组的头尾，否则就无法把收到的信息序列恢复成原始的消息。

为了更具体些，我们结合上述脉冲编码调制（PCM）方式的数字电话通信，画出其示意图如图 1.12 所示。