

第一篇 概论及信源编码

重要内容

1. 信息量与评价通信系统质量的主要技术指标
2. 压扩原理
3. A律 13 折线编码方法
4. 量化及量化噪声计算
5. DPCM 编码原理
6. ΔM 编码原理

第 1 章 概 述

内容提要

1. 模拟与数字通信系统组成及特点
2. 信息与信道容量定义
3. 评价通信系统的技术指标

重要概念

1. 信息量
2. 信道容量
3. 误码率
4. 信息传输速率

1.1 通信发展史

通信是进行信息的传递和交换，是人类社会活动的工具。我国古代的烽火告警和驿马传令，以及近代的电报、电话、广播、传真、电视、雷达、遥控、遥测甚至人工智能都属于通信的范畴。当今世界由物质、能量和信息三大要素构成。担负信息传递重任的通信技术的发展水平代表着人类社会的文明与进步程度。因此，从事通信方面的人们应该了解通信的过去和现在，预测其未来的发展。

人类自存在以来，在生存斗争中总要进行思想交流和消息传递。远古时代的人类用表情和动作进行信息交换，这是最原始的通信。在漫长的生活和劳动中，人类创造了语言和文字，进而用它们（书信）进行消息的传递。这种通信方式一直沿用至今。

在电信号出现之前，人们还创造了许多种消息传递的方式，如古代的烽火台、金鼓、旌旗，航行用的信号灯等等。这些方式，可以在较远的距离之间及时地完成消息的传递。

大约从 1800 年，伏打（Volta）发明电源以来，人们就试图用电技术进行通信。1837 年，莫尔斯（Morse）第一个发明了电信号的通信，即有线电报通信。这种通信是利用导线中电流的有无来区别传号和空号，并利用传号和空号的长短进行电报符号的编码，这给远距离的消息传递揭开了崭新的一页。当电磁感应现象被发现后，1876 年贝尔（A. G. Bell）利用电磁感应原理发明了电话机，从而使人们可以直接利用导线上电流的强弱来传送语音信号，这样使通信技术的发展又进了一步。这种有线电通信方式一直保留到现在。但这种有线传送消息的系统要花费很大的代价建造线路，甚至在有些情况下（如隔海洋）是难以实现的。

1864 年麦克斯韦（Maxwell）预言了电磁波辐射的存在，1887 年赫兹（Hertz）通过实验加以证实，这为现代的无线电通信提供了理论根据。无线电波可以在大气媒质中传播，不需要价格昂贵的线路投资。这一理论的创立大大推动了通信技术的发展。

在实践中，人们发现正弦波易于产生和控制，所以在 20 世纪初期就出现了代表消息的信

号去控制高频正弦振幅的调制方式。这就是最早出现的调幅制方式 AM 制。它的出现使通信出现了新局面，它不仅可以传送语音，还可以传送音乐、图像等。这种 AM 通信方式使点对点通信发展到点对面通信（如广播），它促进了人类社会的文化交流和宣传教育的发展，深刻地影响着人们的生活。

调幅制传送信号容易接受噪声干扰，使信号失真，影响传信质量。1936 年，发明了抗干扰能力比 AM 制强的调频技术（FM）。FM 制不仅提高了抗干扰能力，而且大大推动了移动通信的发展。AM 制和 FM 制的应用标志着 20 世纪 30 年代是世界上模拟通信的兴旺时期。

自从 1928 年奈奎斯特（Nyquist）定理被提出到 1937 年瑞维斯（A. H. Reeves）发明 PM（脉冲编码调制）通信，通信技术由频分制（FDM）发展到时分制（TDM），由模拟通信发展到数字通信。利用数字通信（模拟信号被数字化后传送），进一步提高了抗干扰能力。但由于器件的限制，当时未能实现，直到晶体管出现后，1950 年贝尔实验室才造出了第一台实用的 PCM 设备。新器件的出现对通信技术的发展起着很大的推动作用。

数字通信不仅能使人和人之间通信，而且能完成人与机器、机器与机器之间的通信和数据交换，为现代通信网奠定了良好的基础。

随着通信容量的增加和通信范围的扩大，1955 年皮尔斯（Pierce）提出了卫星通信的设想。1962 年发射了人类历史上第一颗通信卫星（TELSTAR），为国际通信开辟了道路。这一技术的发展与大规模集成电路（LSI）的出现有着密切的关系。集成电路的出现，使通信设备小型化，可靠性提高，对空间通信起了促进作用。

更大容量和更加可靠的光纤通信，在 20 世纪 60 年代初已问世。在这方面，我国正在紧追世界先进水平。目前，我国的光纤通信正处于推广应用阶段。

当今社会处于“信息时代”，人们要求通信能够更加迅速、有效、准确、可靠地传递信息，从而充分利用社会上现有的财富，更好地发挥各种资源的效应。一个综合性的信息交换网正在形成。这就是“计算机技术、通信系统和自动化系统”构成的完整信息交换系统。全数字化的综合业务数字网（ISDN）是目前通信界所关注和研究的新内容。20 世纪 80 年代初，发达国家已建立了 ISDN 试验网。国际电报电话咨询委员会（CCITT）在有关建议中已提出关于 ISDN 的概念，指出 ISDN 是一个服务于语音和非语音数据通信业务的综合网。1984 年 CCITT 有关组织（IEEE 的第 802 委员会）推出了 I 系列关于 ISDN 的功能、网络结构、接口及网络互联等方面的建议。可以预计 ISDN 是今后一二十年世界通信网发展的必然趋向。

随着各种通信网的建立和数字通信的发展，相应的安全保密通信技术也将进一步引起人们的注意。

此外，由于通信容量增加，要求对频率资源开发向着更高的频段发展（如微波接力通信已达 20GC 移动通信已达 800MC 等）。然而，在信源数据的处理上要求进一步压缩，提高通信的有效性。

回顾通信的发展历史，可以看到通信技术是一门年轻但发展迅速的新技术！它仅仅在 100 年左右的时间，从简单的通信技术发展为通信科学。其原因在于除了生活实际、社会要求和器件发明的推动之外，通信理论的指导也起着十分重要的作用。在 20 世纪 40 年代至 50 年代通信理论的发展出现了高峰，滤波和预测理论、香农信息论、纠错编码理论、信号和噪声理论、调制理论及信号检测理论等使通信理论在有效性和可靠性等方面的研究出现了突破。这些理论的出现使通信技术变成通信科学。尽管如此，通信目前仍不能满足人们越来越高的要求。一般来说，技术来源于科学，它与社会互相推动，共同发展。电信技术也是这样。可以预见，它将

和其他科学一样正朝着更高的水平突飞猛进。

1.2 通信系统的基本概念

一、信号分类

通信就是传递消息。为了使消息可以在信道中传送，首先应将消息转换为可以传送的电信号。按代表消息的信号的参量取值方式，一般分为两类：一类为模拟信号，又叫连续信号，如电话机送出的语音信号、摄像机产生的图像信号等，它们的电压（或电流）波形的取值为连续的时间函数；另一类为数字信号，又称离散信号，如电报符号、雷达数据、遥控指令及计算机数据等，这种信号的取值为有限个离散值，且不是时间的连续函数。

通常把传送模拟信号的通信系统称为模拟通信系统，把传送数字信号的通信系统称为数字通信系统。

在模拟通信系统中，传送的信号是一个模拟的波形，它要求接收机能够高度保真地重现波形信号。所以，在模拟通信系统中追求的主要质量指标是较高的信噪比，在接收端对信号的检测就是对信号连续波形的参量估值。可见，对模拟信号的检测理论就是参量估值理论。

在数字通信系统中，传送的信号是取有限个值的离散脉冲，在有干扰存在的情况下，接收端要求正确判决发送的是哪一种离散状态。只要脉冲波形的失真不足以引起错误判决就不会影响通信质量。因此，衡量数字通信的主要质量指标是误码率，研究数字通信系统检测的主要理论是统计判决理论。

二、模拟通信系统

1. 组成

传输模拟信号的通信系统称模拟通信系统。

电话的语音消息和传真、电视的图像消息都是模拟信号（连续信号）。以语音为例，它的声压随时间的变化是连续的，如图 1-1 所示。

把这种连续消息通过变换器变成适合信道传输的电信号后，若其电流或电压仍然是随时间变化的，则这种系统显然是模拟通信系统。其具体构成如图 1-2 所示。

在该系统中，发信者发的语音信号经过非电/电变换器（发话器）转换为电信号。为了适应具体信道的传输，通常还要把经过第一次变换后的电信号再进行第二次变换。这种第二次变换称作调制，调制后的电信号称作已调信号，它仍然是一种连续信号。这种信号的变换由调制器完成。已调信号通过信道传输到接收端的解调器和电/非电变换器（收话器），它们与发送端的调制器和发话器一一对应，起着反变换的功能，把已调信号恢复成语音的连续消息。在发送端调制器之前和接收端解调器之后的信号是一种原始电信号，它具有频率较低的频谱，相对于已调信号（具有频率较高的频谱）而言，通常称这种原始信号为基带信号。



图 1-1 语音信号

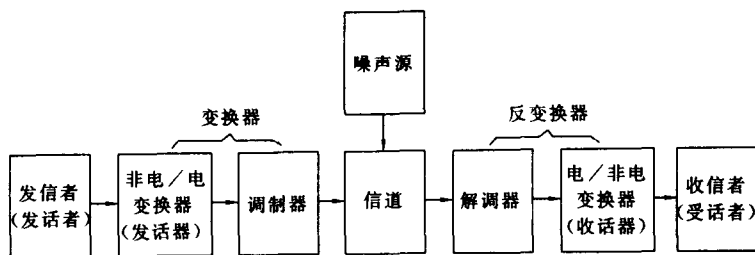


图 1-2 模拟通信系统

2. 模拟通信系统的优缺点

优点：

通过信道的信号频谱比较窄，因此信道的利用率高。

缺点：

- (1) 传输的信号是连续的，混入噪声干扰后不易清除，即抗干扰能力差。
- (2) 不易保密通信。
- (3) 设计不易大规模集成化。
- (4) 不适于飞速发展的计算机通信要求。

三、数字通信系统

1. 组成

有一些信源的消息本来就是离散的，如电报符号和数据等。所谓离散消息也称为数字消息，其消息的状态是可数的，不随时间作连续变化，最简单的一种数字信号如图 1-3 所示。它在时间上是不连续的，而在幅度上只有两个值。另外，还可把信源的连续消息变为离散的消息进行传输，到接收端再把它反变成连续消息。这两种对原始消息（无论是离散的还是连续的）进行各种数字处理后的通信系统，都称为数字通信系统，其构成模型如图 1-4 所示。

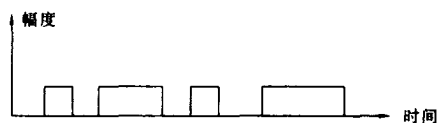


图 1-3 数字信号

在该系统中，如果原始信号已经是数字信号如数据信号等，则它相当于一次编码器的输出，如果原始消息是模拟的，要进行数字通信则需从左边第一个方框开始。现设发信者发的仍是语音信号，经过“非电/电”变换器（此时即为发话器）变成模拟的电信号，然后经一次编码器，把模拟信号转换为数字信号，这种变换通常称作模拟/数字变换。有时通信需要保密，则上面的数字信号可经加密器，按照内定的规律加上一些密码，对一次信号进行“扰乱”。有时为了控制由于信道噪声使传输的数字信号所造成的差错，可以在数字信号内再附加一定数量的数字码，形成新的数字信号，使其内部数码间的关系形成一定的规律性，一旦新的数字信号发生差错，接收端就会按照一定的规律自动检查出来或进行自动纠正。这种功能叫作自动差错控制。它

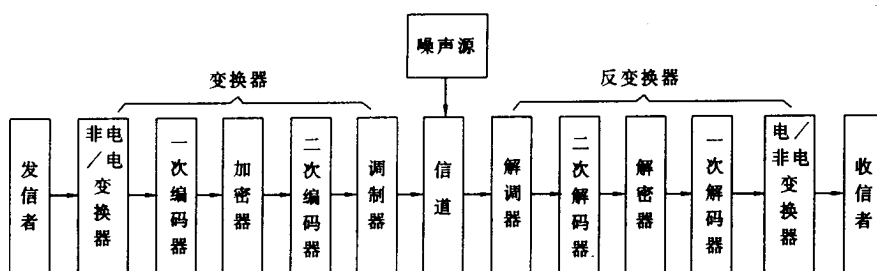


图 1-4 数字通信系统

由二次编码器（差错控制编码器）来完成。为了使这一级输出的信号能适应信道传输的要求，有时还需要再加一级调制器，使信号能较好地通过信道到达接收端。接收端的几个方框，其功能是进行与发送端的几个方框一一对应的反变换。必须指出，具体的数字通信系统并非一定要按照图 1-4 所示那样包括所有的方框，若仅对数字消息进行传输，则加密器以前的和解密器以后的方框可去掉。在无需保密时，连加密器、解密器也可以去掉。这样构成的系统称作数据通信系统。相反地，除信道以外，如把加密器以后和解密器之前的方框去掉（同样地，加密器与解密器也应视是否需要保密而进行取舍），这又构成了另一种系统，广义地称为信源编码通信系统。后者是本书的重点。当然这一系统还可视具体情况的需要，再单独外加一对二次编码解码器，或单独外加一对调制解调器，甚至把这二对全部加上，形成一个较完整的数字通信系统。

2. 数字通信的优缺点

(1) 优点：

(a) 抗噪声（即抗干扰）能力强，尤其是数字信号通过中继再生后可消除噪声积累，理论上数字信号可以传送无限远。

(b) 数字通信可以通过差错控制编码，提高通信的可靠性。

(c) 由于数字信号传输一般采用二进制码，所以可以使用现代计算机对数字信号进行处理。数字通信可以完成计算机之间的通信，实现复杂的距离控制，例如由雷达、数字通信、计算机及导弹系统组成的自动化防空系统。

(d) 数字通信系统可以传送各种消息（模拟的和离散的），使通信系统灵活、通用，因而可以构成信号处理、传送、交换的现代数字通信网。

(e) 数字信号易于加密处理，所以数字通信保密性强。

另外，数字通信系统还具有易于集成化、体积小、重量轻、可靠性高等优点。

(2) 缺点：

数字通信较突出的缺点是比模拟通信占带宽，如一路模拟电话占 4kHz 带宽，而一路数字电话约占 20~64kHz 的带宽。然而，在当前由于毫米波和光纤通信的出现，带宽问题已基本上得到解决。

因为卫星信道和光纤信道的工作频率带宽通常可达几十兆赫、几百兆赫甚至更高，所以数字通信占用频带宽的矛盾可得到解决。

1.3 信 道

一、信道的分类

各种电信号都要通过信道才能从甲地传送到乙地。根据分类的不同，信道的构成也有所不同。

1. 按传播媒介分

(1) 有线信道，包括：

- (a) 有线信道——铜线信道、铁线信道等；
- (b) 对称电缆信道；
- (c) 同轴电缆信道；
- (d) 波导管信道（方波导、圆波导、椭圆波导）；
- (e) 光纤信道。

(2) 无线信道，包括：

- (a) 长波信道；
- (b) 中波信道；
- (c) 短波信道；
- (d) 超短波信道；
- (e) 微波信道；
- (f) 卫星信道。

2. 按信息多路复用的形式分

(1) 频率分割信道（频分信道），包括：

- (a) 载波信道；
- (b) 频分短波信道；
- (c) 频分微波信道；
 -) 频分卫星信道；
 -) 其他频分信道。

时间分割信道（时分信道），包括：

-) 时分基带信道；
-) 时分短波信道；
-) 时分微波信道；
-) 时分卫星信道；
-) 其他时分信道。

按信道传输的信息类型分

模拟信道：与频分信道相同，另外还包括基带模拟信道。

(2) 数字信道：与时分信道基本相同，但数字信道所传送的信号一定要数字化，它不包括

时分信道中一些非数字化的时分信号，如脉冲调幅、脉冲调宽、脉冲调相等信号。

我们知道，除有线信道的明线和电缆可以直接传输基带模拟信号和基带数字信号外，其他各种信道媒介都工作在较高的频段上。因此，无论是模拟信号还是数字信号，都必须经过一次高频调制，使信号驾驭在适合于信道传输的频率上。据此，在图 1-4 所示的通信系统中，调制与解调这两个方框可分别分成低频调制和低频解调，以及高频调制与高频解调。这里的高频调制与解调，也可称作发送终端机与接收终端机，其作用主要是为了把基带信号调制到适合信道传输的频率上。通常也把它们并入到信道的范畴内，这对于系统设计往往是有利的。关于低频调制与解调，则是针对不同信道的具体情况，用以提高信号的抗干扰能力和降低所占用的频带。

还需指出的是，上面划分的模拟信道（或频分信道）和数字信道（或时分信道），可以互相构成一种混合信道。这样，既可以把频分信道的模拟信号再变换成数字信号通过数字信道传输，也可以把时分信道的数字信号通过模拟信道调制后进行传输。在以前我国通信网中数字信道尚不够多的情况下，普遍采用后一种混合信道。但从通信的质量和经济性考虑，数字信号还是采用数字信道传输为好。

二、信道对传输信号的影响

信道对传输信号的影响主要是对数字信号的影响。数字信号在信道中所遇到的主要危害来自两个方面：一为信道的弥散现象；二为信道的噪声干扰。

1. 弥散现象

一般说来，信道都是由传输媒介、调制终端机以及传输媒介在中途设立的中继站（对衰减了的信号进行放大）组成。它们合成的总衰减频率特性和总相移频率特性都不是理想的，如图 1-5 所示。其中，图（a）表明信道对各频率成分的衰减不一样，会造成信号各频率成分幅度间的比例失调；图（b）表明信道对各频率成分的相移在坐标上是不过零点的一条直线，会使信号各频率的相位关系错乱。这二者都会使传输的波形产生失真。对数字波形而言，相移失真比幅度失真所造成的影响要显著，因此，减小弥散现象的重点应放在减小信道的相移失真上。通常是先测出信道折合到基带后的相移频率特性，然后根据这一特性，设计一个相移均衡器，使二者特性之和为一条过零点的直线（如图 1-5 所示），这样会消除相移失真。

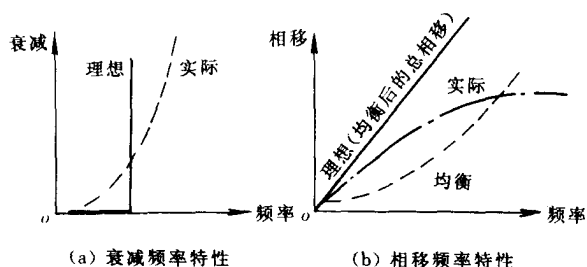


图 1-5 信道折合到基带后的频率特性

实际上，均衡器的校正不会把总特性完全校正成一条直线，只能是尽可能地接近直线，这样也可大大地减小信号的相移失真。

2. 噪声干扰

信道中的噪声归纳起来可分为两种：(1)高斯噪声（即正态噪声）；(2)脉冲噪声（即突发噪声）。高斯噪声最普遍的来源是电子元器件的热噪声，是不可避免的，因此不存在没有高斯噪声的传输系统。各种噪声，凡是由许多独立噪声源的合成作用所引起的噪声，其瞬时值服从高斯分布律（或正态分布律）的，都可称作高斯噪声；所谓脉冲噪声，是指突然发生的一种噪声，如雷电、电火花等，其能量在时间上比较集中，它在数学统计上的分布规律比较复杂，因此，到目前为止，这种噪声很难用数学表达式表达，在测量上也有困难，它不像高斯噪声那样容易表达和测量。但是，在实际分析时可以得出这样一个结论：对于各种传输系统，可用高斯的规律衡量它们性能的优劣，也可对有脉冲噪声的情况下进行定性分析。在设计传输设备时，往往只着重考虑高斯噪声的影响，而不去考虑脉冲噪声这一因素，当出现脉冲噪声而引起较多的数码差错时，导致这一段时间内的通信失效。

三、数字信道

1. 数字信道的构成

数字信道在使用传输媒介方面与模拟信道相同，它既可以利用有线传输的各种媒介，又可以利用无线传输的各种媒介。数字信道在进行多路通信时，是在时间轴上对通路进行分配的。图 1-6(a) 是三路时间分割的示意图。在时间轴上它在第 1~3 段时隙里依次传送第 1~3 路信息，并不断循环，这样构成了时分信道的时隙分配。在此基础上，每一路时隙（路时隙）根据信息的参量编成数码，如图 1-6(b) 所示，其中 1、0 等数码所占用的每一个单元时隙（位时隙），既可以是二进制数码，也可以是多进制数码，一般地主要是二进制数码。所有的单元时隙，既可以使用矩形表示数字脉冲的波形，也可以使用其他形式的波形，这样，就构成了数字信道。

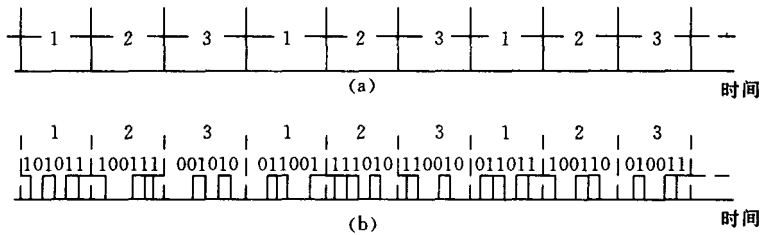


图 1-6 数字信道构成示意图

2. 数字信道的特点

(1) 每个数字码所占的时隙越窄，则对时间的利用率越高。

(2) 时隙越窄，从频率域来看，其所占用的频带就越宽，因此，一个给定的信道可以最多划分为多少路，受信道频带的限制。

(3) 无论是分路的间隔还是数字的时间间隔都应尽量保持不变。而发收两端控制这些时间间隔由做定时系统的装置来完成。因此，发、收两端的定时系统应该稳定，且应保持收、发两端相应的时间间隔要同步，这又需用一个同步系统来承担。如果定时不稳或同步不灵，就会造成路际串音，甚至无法通信。

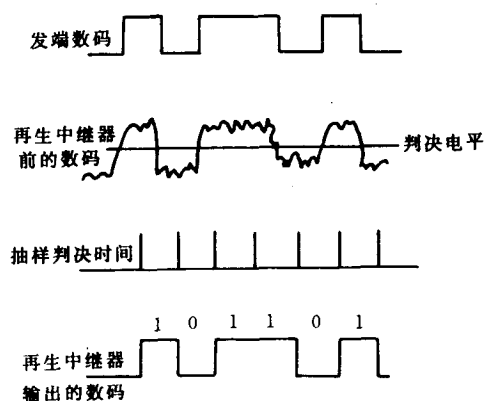


图 1-7 再生过程示意图

(4) 信道具有对于数码的再生能力。

数字信号在传输过程中不可避免地要受到噪声的干扰。信道中当噪声叠加在数码上而在即将超过数码的判决电平之前，就需设置一个再生中继器，让它对传输的数码进行抽样判决。在判决时间上，带有噪声的数码电平超过判决电平者判为“1”否则判为“0”。这样，通过再生中继器的数码信号就会恢复到未受噪声干扰之前的形状。通过图 1-7 所示的波形可以了解再生的作用。在整个信道中，每当数码恶化，但尚能判决识别时，信道设置的再生中继器就将波形再生一次，使其恢复到原始的形状。因此，理论上可认为噪声不会积累。当然，一旦数码波形受到干扰而不能正确判决时，就会产生误码，这种误码是会积累的。

1.4 信息量与信道容量

一、信息量

通信中所传送的消息都含有一定的信息量。所谓信息量，是指对消息中所含信息的不确定性的度量。消息中所含信息量大小与消息发生的概率有着密切的关系。一件事发生的概率愈小，愈使人感到意外和惊奇，则此消息所含的信息量就愈大。若消息出现的概率接近于零，则消息的信息量趋向于无穷大；若消息发生的概率为 1，是一个必然事件，则其所含的信息量为 0。消息所含的信息量可用消息发生的概率倒数的对数来表示。在信息论中，消息所含的信息量按以下表达式定义：

$$\frac{1}{P} \Delta_{\text{nat}} \quad (1-1)$$

式中： I 为消息所含的信息量； P 为消息发生的概率。式 (1-1) 中，对数的底决定了度量信息的单位。若对数底为 2，则 I 的单位为比特 (bit)，简称 **b**；若对数的底为 e ，则 I 的单位为奈特 (nat)。在以下各节中都用比特作为信息量的单位，因此，式 (1-1) 又可定义为：

$$I = \log_2 \frac{1}{P} = -\log_2 P(\text{bit}) \quad (1-2)$$

由式 (1-2) 可以看出：当消息发生的概率 $P=1/2$ 时，消息所含的信息量为 1bit；当消息发生的概率 $P=1/4$ 时，消息所含的信息量为 2bit；当消息发生的概率 $P=1/8$ 时，消息所含的信

息量为 4bit。从传输这些消息所用的二进制脉冲数来看，它与消息的信息量有密切的关系。若传送等概率出现的两个消息之一（ $P=1/2$ ）时，至少需要一位二进制脉冲；若传输 8 个等概率出现的消息之一（即 $P=1/8$ ）时，至少需要三位二进制脉冲。由以上分析可以看出，当消息的信息量用比特表示时，它所含的信息量可以用传送它所需要的最少二进制脉冲数来表示。

从表面上看，以上结论仅对离散消息而言，但是，在信息论中有一个重要结论，就是任何形式的待传信息都可以用二进制形式表示而不失其主要内容。抽样定理告诉我们，一个频带有限的连续信号中的信息，可以用每秒一定数目的离散抽样值代替。而这些离散的抽样值可以用二进制的脉冲序列来表示。可见，以上信息量定义同样适用于连续的信息。

二、平均信息量

在由多个消息所形成的消息串中，每个消息（或符号）所含的信息量的统计平均值，称为信源中消息（或符号）的平均信息量。平均信息量的计算是由每个消息的信息量的概率加权求和得到的。例如，某一信源由 A、B、C 三种符号组成，出现 A 的概率 $P(A)$ ，出现 B 的概率为 $P(B)$ ，出现 C 的概率为 $P(C)$ ，则消息的平均信息量为：

$$H = - [P(A)\log_2 P(A) + P(B)\log_2 P(B) + P(C)\log_2 P(C) + P(D)\log_2 P(D)] \quad (1-3)$$

在由 n 个独立的符号 x_1, x_2, \dots, x_n 所构成的消息源中，每个符号出现的概率分别为 $P(x_i)$ ，则此信源中每个符号的统计平均信息量为：

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i)\log_2 P(x_i) \quad (1-4)$$

由于此平均信息量的定义与统计热力学中熵的定义相似，所以称 $H(x)$ 为信源的熵 (Entropy)。

由式 (1-4) 可知：在消息等概率（ $P=1/n$ ）时， $H(x)$ 具有最大值，这时平均信息量就是每个符号的信息量，即：

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (1-5)$$

三、信道容量

在有干扰的信道中，由于信道带限和噪声的存在，使信道传输信息的最大能力受到限制。信息论中的鼻祖香农 (Shannon) 把信道传输信息的最大极限速率定义为信道容量，并已严格地证明了：在信道中存在白色高斯噪声时，信道的容量 C 可用下式表示：

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-6)$$

式中： S 为信号的平均功率； N 为高斯白噪声的平均功率； B 为信道带宽。

式 (1-6) 的严格证明已超出本书范围，这里仅从工程的观点给以粗略的证明。

在式 (1-6) 中涉及到信息的传输速率问题。信息传输速率就是指在单位时间内所传输的信息量。如果已知每个符号的平均信息 H 和每秒传输的符号的个数（即传输符号的速率） r ，那么，系统传输信息的速率可由下式计算：

$$R = rH(\text{bit/s}) \quad (1-7)$$

在有干扰信道中，传输每个符号需要一定幅值的脉冲。如果要传送 M 个符号，可用 M 种不同幅度值的脉冲代表。若各种幅值的出现是等概的（即符号出现的概率相等），则传送每一种

幅值的脉冲代表着传送 $10\lg_2 M$ bit 的信息量。为了提高传送的脉冲信息量，希望 M 增加。在传输的信号功率受限的情况下，脉冲幅度取值的数目越多，则各种脉冲取值之间的量化分层间隔越小。当脉冲取值间隔小到一定程度时，由于信道中噪声的干扰，使接收端难以分辨出所发送的是哪一个幅度的脉冲，将无法获得信息。若信道中白色高斯噪声的功率为 $N(W)$ 则它的均方根电压值为 \sqrt{N} （认为负载为 1Ω ）。为了使信号幅度分层数（或称量化取值数）最多而又能使接收端可分辨，则各取值之间的最小间隔应大于等于 \sqrt{N} 。若信号功率为 S ，则接收端功率为 $S+N$ ，这时接收端信号的最大分层数为：

$$M = \frac{\sqrt{S+N}}{\sqrt{N}} = \left(1 + \frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-8)$$

设 M 种幅值分层出现的概率相等，则每个脉冲出现所代表的信息量为：

$$H = -\log_2 \frac{1}{M} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1-9)$$

若信道带宽为 B ，可以证明，此信道每秒最多可传送 $2B$ 个脉冲，即传送脉冲的最高速率 $r = 2B$ 。根据式 (1-7)、(1-9)，可以得出此信道传输信息的最大速率，即信道容量 C 为：

$$C = [R]_{\max} = 2B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1-10)$$

这就是著名的香农信道容量公式。式中 S/N 为信噪比。

由式 (1-10) 可以看出，扩大信道的传输带宽或提高信号传输的信噪比都可以增加容量。但应当注意，由于信号功率的受限和噪声的存在，信噪比不能无限增加。而且信道中白色高斯噪声的功率与信道带宽成正比，即 $N = n_0 B$ (n_0 为信道中噪声的功率谱密度)。在信道带宽无限扩大时，信道容量趋于一极限值。可见，在有干扰信道中，信道容量不可能无限大， C 总是一个有限值。

香农信道容量公式还表明，在信道容量给定的情况下，信道带宽和信噪比大小可以互换，即在信道容量保持不变的条件下，可以用较大的带宽，较小的信噪比，也可以用较小的带宽，较大的信噪比来传输信息。这一原理对通信系统的设计有指导性意义，同时，也为现代的扩频通信的发展奠定了理论基础。

1.5 评价数字通信系统质量的主要技术指标

对于一个通信系统的评价，往往涉及到许多性能指标，如系统的有效性、可靠性、适应性、经济性、标准性及使用维修方便性等，这些指标从各方面评价了通信系统的质量。对于一个数字通信系统也是这样。这里仅从信息传输的角度来讨论数字通信的质量指标，也就是说主要讨论通信系统的有效性和可靠性问题。

一、通信系统的有效性

一个数字通信系统有效性的描述可从以下三个指标来说明：码元传输速率、信息传输速率及系统的带宽利用率。

1. 码元传输速率 R_b

又称传码率，是单位时间（每秒）内所传送的码元（四脉冲）数目，单位为“波特”（Boud）。

2. 信息传输速率 R_b

又称传信率，是单位时间内系统所传送的信息量，单位为比特/秒 (bit/s)。

码元传输速率 R_B 和信息传输速率 R_b 统称为系统的传输速率。在二进制码元的传输中，每个码元代表一个比特的信息量，所以这时码元的传输速率和信息的传输速率在数值上是相等的，即 $R_B = R_b$ ，只是单位不同。而在多进制脉冲传输中，码元的传输速率与信息传输速率不相等。如在 M 进制中，每个码元脉冲代表 $\log_2 M$ 个比特的信息量。这样传信率和传码率之间的关系是：

$$R_b = R_B \log_2 M \text{ (bit/s)} \quad (1-11)$$

例如在四进制中 ($M=4$)，已知码元的传输速率 $R_B=600$ ，则信息的传输速率 $R=1200$ bit/s。

3. 系统的频带利用率 ρ

在比较两个通信系统的有效性时，单看它们的传输速率是不够的，或者说虽然两个系统传输速率相同，但它们的系统效率可以是不一样的，因为两个系统可能具有不同的带宽。从式 (1-10) 可看出通信系统的带宽不同，它们传输信息的能力不同。所以，衡量系统效率的另一个重要指标是系统频带的利用率 ρ 。

通信系统的频带利用率 ρ ，是在单位时间 (秒)、单位频带上传输信息量的多少，单位为比特/秒/赫兹 (bit/s/Hz 即 bit/(s·Hz))。在二进制基带系统中最高频带利用率 $\rho=2\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。在多进制基带系统中频带利用可以大于 $2\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。在频带系统中，不同的调制方式可能有不同的频带利用率，如二进制调幅系统频带利用率仅等于 $1/2$ ，而多进制的调幅、调相系统频带利用率目前达到 $6\text{bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})$ 。总之，系统的单位频带利用率越高，系统的有效性就发挥得越好。

二、通信系统的可靠性

由于在数字通信系统中 (尤其是在信道中) 存在噪声干扰，接收到的数字码元可能会发生错误，而使通信的可靠性受到影响。对于数字通信系统的可靠性指标主要用误码率 P_e 和误信率 P_b 来衡量。

1. 误码率 P_e

是指通信过程中系统传错码元的数目与所传输的总码元数目之比，也就是传错码元的概率，即：

$$P_e = \frac{\text{传错码元个数}}{\text{传输码元的总数}} \quad (1-12)$$

2. 误比特率 P_b

又称误信率，是指传错信息的比特数目与所传送的总信息比特数之比，即：

$$P_b = \frac{\text{传错的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \quad (1-13)$$

三、误码率与误信率的关系

误码率是指由于信码在传输过程中受到干扰致使接收端错误判决而造成的误码比例，而误信率是指由于码元的错判而造成传送信息错误的比例。在二进制系统中，显然误码数目等于错传输信息量的比特数，即 $P_e = P_b$ ；而在多进制传输中，每错一个码元并不等于传错一个比特的信息量，这时误码率与误信率不相等。具体的误信率的计算要看多进制脉冲传错的程度。可以证明，多进制（ M 进制）中平均误比特率与误码率有以下关系：

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e \approx \frac{1}{2} P_e \quad (1-14)$$

对通信系统，总是希望它的效率和可靠性都很高。但对于实际的通信系统，这两方面的指标是相互制约，相互矛盾的。为了在实际的通信系统中两种性能相互兼顾，必须在满足一定可靠性的基础上尽量提高效率。不同的通信对可靠性的要求是不一样的，所以，在设计通信系统时，应根据对这两种性能的不同要求进行合理的安排。

对于通信系统性能的衡量，有时涉及到传输方向性的系统功能。对图（1-4）的数字通信模型，这个系统中信号的传输是单向的，称这种通信为单工通信。若一个通信系统能使通信的双方同时发送和接收信息，则称这种通信为双工通信。若通信的双方都可收可发，但只能一方发另一方收，则称这种通信为半双工通信。

一个通信系统性能的衡量除了以上所讨论的两个方面外，还涉及到其他的指标，如适应性、经济性、使用维修的方便性等等，这些不同的性能指标对于不同的通信系统有着不同的要求。

本章小结

本章主要介绍数字通信的基本知识，以期对数字通信系统建立一个总体概念，为此本章主要内容有通信系统的组成和分类；数字通信的主要技术问题及其特点；消息、信号、信息及其度量；数字通信系统的主要性能指标；数字通信的发展趋势与受限因素。

从给出的数字通信系统模型可以看出，数字通信涉及的技术问题很多，其中有信源编码解码的问题、保密编码解码问题、信道编码解码参数问题、数字调制解调问题、信道与噪声问题、同步与数字复接、复用与多址通信问题等等。

通信系统视传输信号的形式不同，分为模拟通信和数字通信系统，两者从总体组成上讲基本相同，只是在具体结构上有区别，特别是变换器和反变换器部分，数字通信系统因传输二进制数字信号，要求对变换器部分先进行编码，再进行调制后进入信道，编码分信源编码和信道编码，前者的任务是将模拟信号数字化，并按实际信息的统计特性进行变换，进一步压缩数码率，以提高信息传输的有效性为目的，后者的任务是设法提高数码在传输过程中的抗干性和可靠性。

无论是模拟通信还是数字通信，评价和衡量一个通信系统性能优劣的主要性能指标是通信的有效性和可靠性。其中信息速率（比特率）、传输数码率、频带利用率等是描述数字通信系统有效性的重要参数指标，而误码率是描述数字通信系统可靠性的重要参数指标，这两者是矛盾的两方面，但又有着内在的联系，往往有效性或可靠性其中一方面的改善将以牺牲另一方面的利益为代价。有效性涉及系统频带带宽问题，可靠性涉及噪声问题。带宽和噪声是研究通信

系统的两个要素。要提高信道有效性，信道复用是基本技术之一，要改善可靠性，可采用改善信道及适当选择调制或编码方式等方法。譬如采用数字通信本身就是提高通信可靠性的重要途径之一，但这时系统可靠性的提高是以增加信号有效传输频带，即降低系统的有效性为代价而获得的。因此，在研究和设计通信系统时，一般应当从有效性和可靠性两个方面并结合信道、噪声、具体技术要求等综合考虑。而这种考虑所必须掌握的知识正是本课程要着重介绍的内容。

通信的根本目的是发出信息、传输信息、接受信息。因此，需要从理论上研究如何度量信息，分析信息源发出信息的多少，信道传输信息的容量，以及信息传输有效性和可靠性的矛盾和统一，有效性和可靠性互换的最高水平等基本问题，这些将在后续课程信息基本理论中得到探讨。

习 题

1. 什么是模拟通信？什么是数字通信？数字通信有哪些主要优点？

2. 数字通信模型中各主要组成部分的功能是什么？

3. 由信道容量公式 $C = B \log \left(1 + \frac{S}{N} \right)$ ，讨论 C 、 B 、 S/N 之间的关系，并证明：

$B \rightarrow 0$ 时 $\lim C \approx 1.44s/n_0$ (其中 n_0 为高斯白色噪声的单边功率谱密度)。

$B \rightarrow \infty$ 时，传信速率达到信道容量极限，即 $R=C$ 。试证明码元能量与噪声功率谱密度之比为 $E_b/n_0 \approx -1.16\text{dB}$ 。这就是极限最小信噪比。

4. 一个由字母 A、B、C、D 组成的信源，对传输的每一个字母用二进制脉冲编码：00 代表 A，01 代表 B，10 代表 C，11 代表 D。又知每个脉冲的宽度为 5ms，试求：

不同字母等概出现时，传输的平均信息速率以及传输码元速率。

若各个字母出现的概率分别为： $P_A=1/5, P_B=1/4, P_C=1/4, P_D=3/10$ ，试计算平均信息速率。

5. 英文字母中 t 出现的概率为 0.105， C 出现的概率为 0.023， O 出现的概率为 0.001，试计算它的信息量。

6. 某气象广播员用明线报告天气预报，有 4 种可能的消息：晴、云、雨和雾。若每个消息等概出现，发送每个消息最少所需的二进制脉冲数为多少？若这四个消息出现的概率不等，且分别为 $1/4, 1/8, 1/8$ 和 $1/2$ ，在这种情况下试计算每个消息的平均信息量。

7. 一个平均功率受限的理想信道，宽带为 1MHz，受高斯白噪声干扰，信噪比等于 10，试求：

信道容量为多少？

若信噪比降为 5，在信道容量相同时，带宽应等于多少？

若带宽降到 0.5MHz，保持同样信道容量时，信噪比应为多少？

8. 具有 1MHz 带宽的高斯信道，若信号功率与噪声的功率谱密度之比为 $s/n_0 = 1 \times 10^5 \text{Hz}$ ，试计算信道容量。

9. 一个系统传输 4 个脉冲组，每个脉冲宽度为 1ms，高度分别为 0、1、2 和 3V 且等概出现。每 4 个脉冲之后紧跟一个 1V 的脉冲（宽度为 1ms）把各组脉冲分开（即不带信息的同步脉冲），试计算系统传输信息的平均速率。

10. 一个电压波形 $S_a(2000\pi t)$ 要以不超过 1/80V 的不确定性发送，试计算所需信道容量

(注意波形信号最大值为 1V 时最小值为 $-0.2V$)。

11. 什么是数字信道，它有何特点？
12. 信道对传输信号有哪些主要影响？
13. 模拟信号与数字信号之间的区别是什么？
14. 试画出话音信号、数字数据信号的基带传输和频带调制传输时的通信系统方框图。
15. 信道容量是如何定义的？香农公式有何意义？信道容量与信道的哪些要素有关，关系如何？
16. 在数字通信系统中，其可靠性和有效性指的是什么？各有哪一些重要的指标？
17. 设在 $125\mu\text{s}$ 内传输 256 个二进制码元，计算信息传输速率是多少？若该信码在 2s 内有 3 个码元产生误码，试问其误码率是多少？
18. 假设频带带宽为 1024kHz 的信道，可传输 2048kb/s 的比特率，试问其传输效率各为多少？
19. 设有四个消息 A,B,C,D，分别以概率 $1/4, 1/8, 1/8$ 和 $1/2$ 传送，每一消息的出现是相互独立的，试计算其平均信息量。
20. 设高斯信道的带宽为 5kHz，信号与噪声的功率比为 63，试计算其信道容量。