

# 第 1 章 绪 论

随着数字通信技术和计算机技术的快速发展以及通信网与计算机网络的相互融合,信息科学技术已成为 21 世纪国际社会和世界经济发展的强大推动力。信息作为一种资源,只有通过广泛地传播与交流,才能产生利用价值、促进社会成员之间的合作、推动社会生产力的发展、创造出巨大的经济效益。信息的传播与交流,是依靠各种通信方式和技术来实现的。学习和掌握现代通信原理和技术是信息社会每一位成员,尤其是未来的通信工作者的迫切需求。

本教材作为现代通信的导论,将讨论信息的传输、交换及通信网的基本原理(侧重信息传输原理)。作为本书主题的导引,本章将简要介绍通信系统的基本概念、组成和分类、信息的度量以及评价通信系统性能的指标,并对通信的发展趋势进行展望。

## 1.1 通信系统的组成

从古到今,人类的社会活动总离不开消息的传递和交换,古代的消息树、烽火台和驿马传令,以及现代社会的文字、书信、电报、电话、广播、电视、遥控、遥测等,这些都是消息传递的方式或信息交流的手段。人们可以用语言、文字、数据或图像等不同的形式来表达信息。但是这些语言、文字、数据或图像本身不是信息而是消息,信息是消息中所包含的人们原来不知而待知的内容。因此,通信的根本目的在于传输含有信息的消息,否则,就失去了通信的意义。基于这种认识,“通信”也就是“信息传输”或“消息传输”。

实现通信的方式很多,随着社会的需求、生产力的发展和科学技术的进步,目前的通信越来越依赖利用“电”来传递消息的电通信方式。由于电通信迅速、准确、可靠且不受时间、地点、距离的限制,因而近百年来得到了迅速的发展和广泛的应用。当今,在自然科学领域涉及“通信”这一术语时,一般均是指“电通信”。广义来讲,光通信也属于电通信,因为光也是一种电磁波。本书中的通信均指电通信。

### 1.1.1 通信系统的一般模型

通信是从一地向另一地传递和交换信息。实现信息传递所需的一切技术设备和传输媒质的总和称为通信系统。基于点与点之间的通信系统的模型可用图 1-1 来描述。

信源是消息的产生地,其作用是把各种消息转换成原始电信号,称之为消息信号或基带信号。电话机、电视摄像机和电传机、计算机等各种数字终端设备就是信源。前者属于模拟信源,输出的是模拟信号;后者是数字信源,输出离散的数字信号。

发送设备的基本功能是将信源和信道匹配起来,即将信源产生的消息信号变换成适合

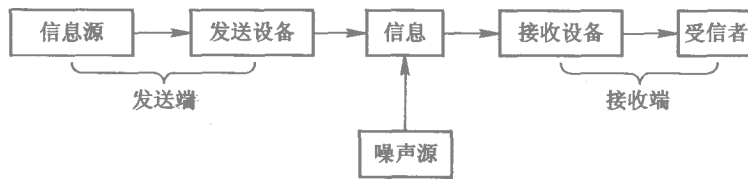


图 1-1 通信系统的一般模型

在信道中传输的信号。变换方式是多种多样的，在需要频谱搬移的场合，调制是最常见的变换方式。对数字通信系统来说，发送设备常常又可分为信源编码与信道编码。

信道是指传输信号的物理媒质。在无线信道中，信道可以是大气（自由空间）；在有线信道中，信道可以是明线、电缆或光纤。有线和无线信道均有多种物理媒质。媒质的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。根据研究对象的不同，需要对实际的物理媒质建立不同的数学模型，以反映传输媒质对信号的影响。这一点将在第 3 章中讨论。

噪声源不是人为加入的设备，而是通信系统中各种设备以及信道中所固有的，并且是人们所不希望的。噪声的来源是多样的，它可分为内部噪声和外部噪声，而且外部噪声往往是从信道引入的，因此，为了分析方便，把噪声源视为各处噪声的集中表现而抽象加入到信道。

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换，即进行解调、译码、解码等。它的任务是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始基带信号来，对于多路复用信号，还包括解除多路复用，实现正确分路。

信宿是传输信息的归宿点，其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

图 1-1 概括地描述了一个通信系统的组成，它反映了通信系统的共性，因此称之为通信系统的一般模型。根据研究的对象以及所关注的问题不同，图 1-1 模型中的各小方框的内容和作用将有所不同，因而相应有不同形式的更具体的通信模型。今后的讨论就是围绕着通信系统的模型而展开的。

### 1.1.2 模拟通信模型和数字通信模型

图 1-1 中，信源发出的消息虽然有多种形式，但可分为两大类：一类称为连续消息；另一类称为离散消息。连续消息是指消息的状态连续变化或是不可数的，如语音、活动图片等。离散消息则是指消息的状态是可数的或离散的，如符号、数据等。

消息的传递是通过它的物质载体——电信号来实现的，即把消息寄托在电信号的某一参量上（如连续波的幅度、频率或相位；脉冲波的幅度、宽度或位置）。按信号参量的取值方式不同，可把信号分为两类，即模拟信号和数字信号。

凡信号参量的取值是连续的或取无穷多个值的，且直接与消息相对应的信号，均称为模拟信号，如电话机送出的语音信号、电视摄像机输出的图像信号等。模拟信号有时也称连续信号，这个连续是指信号的某一参量可以连续变化，或者说在某一取值范围内可以取无穷多个值，而不一定在时间上也连续，如图 1-2(b)所示的抽样信号。

凡信号参量只能取有限个值，并且常常不直接与消息相对应的信号，均称为数字信号，如电报信号、计算机输入/输出信号、PCM 信号等。数字信号有时也称离散信号，这个

离散是指信号的某一参量是离散变化的，而不一定在时间上也离散，如图 1-3(b)所示的 2PSK 信号。

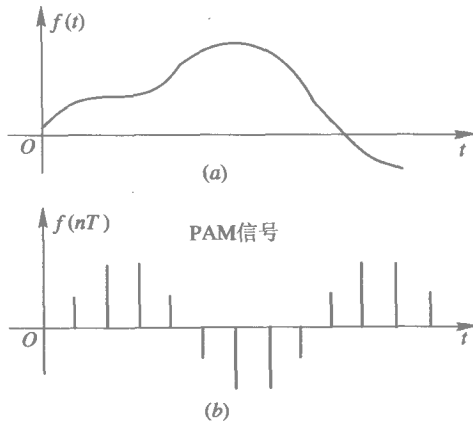


图 1-2 模拟信号波形  
(a) 连续信号；(b) 抽样信号

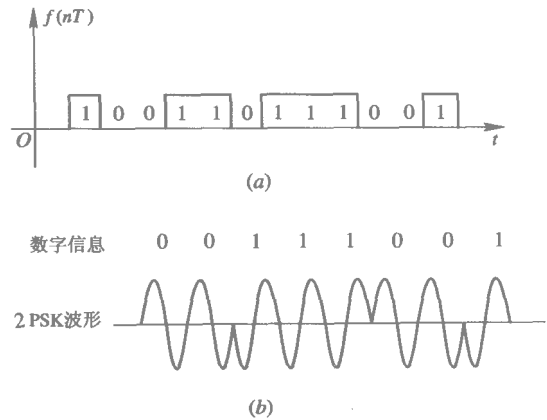


图 1-3 数字信号波形  
(a) 二进制波形；(b) 2PSK 波形

因此，按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

### 1. 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统。我们知道，信源发出的原始电信号是基带信号，基带的含义是指信号的频谱从零频附近开始，如语音信号为 300~3400 Hz，图像信号为 0~6 MHz。由于这种信号具有频率很低的频谱分量，一般不宜直接传输，这就需把基带信号变换成其频带适合在信道中传输的信号，并可在接收端进行反变换。完成这种变换和反变换作用的通常是调制器和解调器。经过调制以后的信号称为已调信号。已调信号有三个基本特征：一是携带有信息，二是适合在信道中传输，三是信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频，因而已调信号又称频带信号。

需要指出，消息从发送端到接收端的传递过程中，不仅仅只有连续消息与基带信号和基带信号与频带信号之间的两种变换，实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。由于调制与解调两种变换对信号的变化起决定性作用，而其他过程对信号不会发生质的变化，只是对信号进行了放大或改善了信号特性，因而被认为是理想的而不予讨论。

模拟通信系统模型可由图 1-1 略加演变而成，如图 1-4 所示。图中的调制器和解调器就代表图 1-1 中的发送设备和接收设备。

### 2. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统，如图 1-5 所示。数字通信涉及的技术问题很多，其中主要有信源编码/译码、信道编码/译码、数字调制/解调、数字复接、同步以及加密等。下面对这些技术作简要介绍。

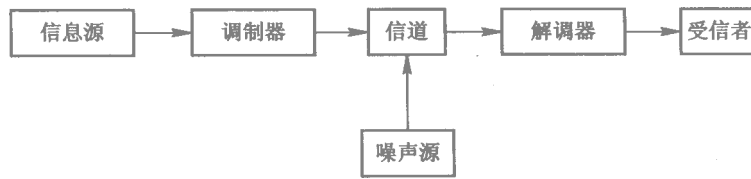


图 1-4 模拟通信系统模型

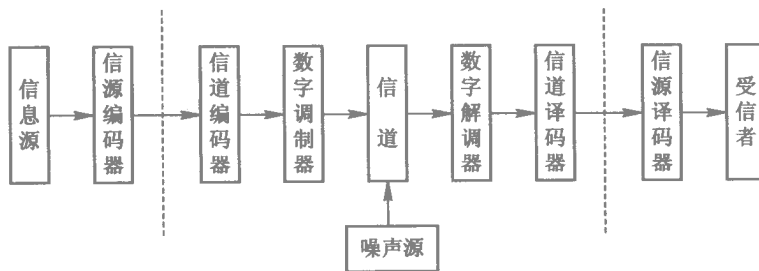


图 1-5 数字通信系统模型

### 1) 信源编码与译码

信源编码的作用之一是设法减少码元数目和降低码元速率，即通常所说的数据压缩。码元速率将直接影响传输所占的带宽，而传输带宽又直接反映了通信的有效性。作用之二是，当信息源给出的是模拟语音信号时，信源编码器将其转换成数字信号，以实现模拟信号的数字化传输。第 6 章中将讨论模拟信号数字化传输的两种方式：脉冲编码调制 (PCM) 和增量调制 ( $\Delta M$ )。信源译码是信源编码的逆过程。

### 2) 信道编码与译码

数字信号在信道传输时，由于噪声、衰落以及人为干扰等，将会引起差错。为了减少差错，信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分（监督元），组成所谓“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按一定规则进行解码，从解码过程中发现错误或纠正错误，从而提高通信系统抗干扰能力，实现可靠通信。

### 3) 加密与解密

在需要实现保密通信的场合，为了保证所传信息的安全，人为将被传输的数字序列扰乱，即加上密码，这种处理过程叫加密。在接收端利用与发送端相同的密码复制品对收到的数字序列进行解密，恢复原来信息，叫解密。

### 4) 数字调制与解调

数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处，形成适合在信道中传输的频带信号。基本的数字调制方式有振幅键控 ASK、频移键控 FSK、绝对相移键控 PSK、相对(差分)相移键控 DPSK。对这些信号可以采用相干解调或非相干解调还原为数字基带信号。对高斯噪声下的信号检测，一般用相关器接收机或匹配滤波器实现。数字调制是本教材的重点内容之一，将在第 7 章中讨论。此外，第 9 章还将介绍一些现代调制技术。

### 5) 同步与数字复接

同步是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的不可缺少的前提条件。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致。按照同步的功用不同,可分为载波同步、位同步、群同步和网同步,这些问题将集中在第 11 章中讨论。

数字复接就是依据时分复用基本原理把若干个低速数字信号合并成一个高速的数字信号,以扩大传输容量和提高传输效率。复用与复接概念将在第 10 章中介绍。

需要说明的是图 1-5 是数字通信系统的一般化模型,实际的数字通信系统不一定包括图 1-1 中的所有环节。如在某些有线信道中,若传输距离不太远且通信容量不太大时,数字基带信号无需调制,可以直接传送,称之为数字信号的基带传输,其模型中就不包括调制与解调环节,详见第 5 章。

应该指出的是,模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输,数字电话系统就是以数字方式传输模拟语音信号的例子。当然,数字信号也可以在模拟通信系统中传输,如计算机数据可以通过模拟电话线路传输,但这时必须使用调制解调器 (*Modem*) 将数字基带信号进行正弦调制,以适应模拟信道的传输特性。可见,模拟通信与数字通信的区别仅在于信道中传输的信号种类。

### 3. 数字通信的主要特点

目前,无论是模拟通信还是数字通信,在不同的通信业务中都得到了广泛的应用。但是,数字通信的发展速度已明显超过模拟通信,成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比,数字通信更能适应现代社会对通信技术越来越高的要求,其特点是:

(1) 抗干扰能力强。以二进制为例,信号的取值只有两个,这样接收端只需判别两种状态。信号在传输过程中受到噪声的干扰,必然会发生波形畸变,接收端对其进行抽样判决,以辨别是两个状态中的哪一个。只要噪声的大小不足以影响判决的正确,就能正确接收。而模拟通信系统中传输的是连续变化的模拟信号,它要求接收机能够高度保真地重现信号波形,如果模拟信号叠加上噪声后,即使噪声很小,也很难消除它。此外,在远距离传输,如微波中继通信时,各中继站可利用数字通信特有的判决再生接收方式,对数字信号波形进行整形再生而消除噪声积累。

(2) 差错可控。可以采用信道编码技术使误码率降低,提高传输的可靠性。

(3) 易于与各种数字终端接口,用现代计算技术对信号进行处理、加工、变换、存储,从而形成智能网。

(4) 易于集成化,从而使通信设备微型化。

(5) 易于加密处理,且保密强度高。

但是,数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价而换取的。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4 kHz 带宽,但一路接近同样话音质量的数字电话可能要占据 20~60 kHz 的带宽,因此数字通信的频带利用率不高。另外,由于数字通信对同步要求高因而系统设备比较复杂。不过随着新的宽带传输信道如光导纤维的采用、窄带调制技术和超大规模集成电路的发展,数字通信的这些缺点已经弱化。随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展和广泛应用,数字通信在今后的通信方式中必将逐步取代模拟通信而占主导地位。

## 1.2 通信系统分类与通信方式

### 1.2.1 通信系统的分类

#### 1. 按通信业务分类

按通信业务分，通信系统有话务通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位，它属于人与人之间的通信。近年来，非话务通信发展迅速，非话务通信主要是分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。由于电话通信最为发达，因而其他通信常常借助于公共的电话通信系统进行。未来的综合业务数字通信网中各种用途的消息都能在一个统一的通信网中传输。此外，还有遥测、遥控、遥信和遥调等控制通信业务。

#### 2. 按调制方式分类

根据是否采用调制，可将通信系统分为基带传输和频带（调制）传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如音频市内电话。频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多，表 1-1 列出了一些常见的调制方式。

表 1-1 常见的调制方式

		调制方式	用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK、DPSK、QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM	军用、民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
	其他语音编码方式 ADPCM、APC、LPC	中低速数字电话	

### 3. 按信号特征分类

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

### 4. 按传输媒质分类

按传输媒质分，通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信是用导线如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等作为传输媒质完成通信的，如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息的目的的，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

### 5. 按工作波段分类

按通信设备的工作频率不同可分为长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信等。表 1-2 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-2 通信波段与常用传输媒质

频率范围	波 长	符 号	传输媒质	用 途
3 Hz~30 kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频、电话、数据终端长距离 导航、时标
30~300 kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300 kHz~3 MHz	$10^2 \sim 10^3$ m	中频 MF	同轴电缆 短波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业 余无线电
3~30 MHz	$10 \sim 10^2$ m	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	移动无线电话、短波广播定点 军用通信、业余无线电
30~300 MHz	1~10 m	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	电视、调频广播、空中管制、 车辆、通信、导航
300 MHz~3 GHz	10~100 cm	特高频 UHF	波导 分米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、 雷达
3~30 GHz	1~10 cm	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、 雷达
30~300 GHz	1~10 mm	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^7 \sim 10^8$ GHz	$3 \times 10^{-5} \sim$ $3 \times 10^{-4}$ cm	紫外可见光 红外	光纤 激光空间传播	光通信

工作波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 (\text{m/s})}{f (\text{Hz})} \quad (1.2-1)$$

式中,  $\lambda$  为工作波长,  $f$  为工作频率,  $c$  为光速。

## 6. 按信号复用方式分类

传输多路信号有三种复用方式, 即频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围; 时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间; 码分复用是用正交的脉冲序列分别携带不同信号。传统的模拟通信中都采用频分复用, 随着数字通信的发展, 时分复用通信系统的应用愈来愈广泛, 码分复用主要用于空间通信的扩频通信中。

### 1.2.2 通信方式

前述通信系统是单向通信系统, 但在多数场合下, 信源兼为信宿, 需要双向通信, 电话就是一个最好的例子, 这时通信双方都要有发送和接收设备, 并需要各自的传输媒质, 如果通信双方共用一个信道, 就必须用频率或时间分割的方法来共享信道。因此, 通信过程中涉及通信方式与信道共享问题。下面只对通信方式作一简单介绍。

#### 1. 按消息传递的方向与时间关系分

对于点与点之间的通信, 按消息传递的方向与时间关系, 通信方式可分为单工、半双工及全双工通信三种。

单工通信, 是指消息只能单方向传输的工作方式, 因此只占用一个信道, 如图 1-6(a) 所示。广播、遥测、遥控、无线寻呼等就是单工通信方式的例子。

半双工通信, 是指通信双方都能收发消息, 但不能同时进行收和发的工作方式, 如图 1-6(b) 所示。例如使用同一载频的对讲机收发报机以及问询、检索、科学计算等数据通信都是半双工通信方式。

全双工通信, 是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式。一般情况全双工通信的信道必须是双向信道, 如图 1-6(c) 所示。普通电话、手机都是最常见的全双工通信方式,

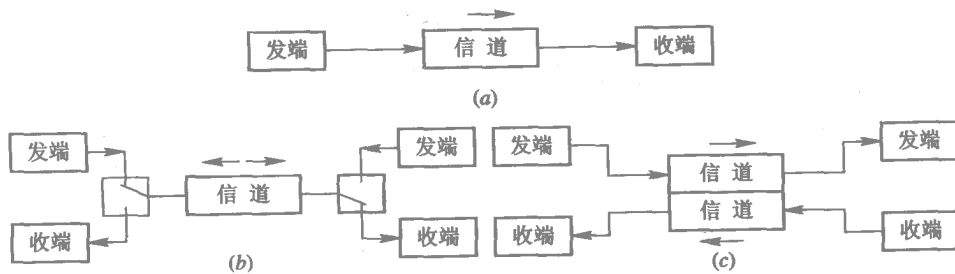


图 1-6 单工、半双工和全双工通信方式示意图

(a) 单工; (b) 半双工; (c) 全双工

计算机之间的高速数据通信也是这种方式。

## 2. 按数字信号排列顺序分

在数字通信中，按数字信号代码排列的顺序可分为并行传输和串行传输。

并行传输是将代表信息的数字序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输，如图 1-7(a)所示。并行传输的优点是节省传输时间，但需要传输信道多，设备复杂，成本高，故较少采用，一般适用于计算机和其他高速数字系统，特别适用于设备之间的近距离通信。

串行传输是数字序列以串行方式一个接一个地在一条信道上传输，如图 1-7(b)所示。通常，一般的远距离数字通信都采用这种传输方式。

此外，还可以按通信的网络形式划分。由于通信网的基础是点与点之间的通信，所以本课程的重点放在点与点之间的通信上。

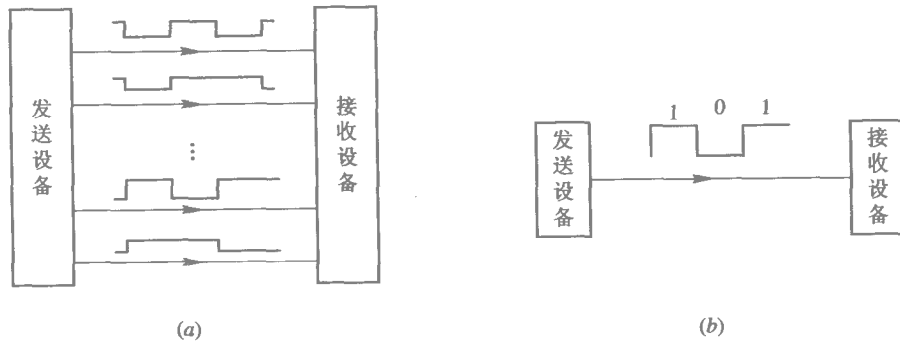


图 1-7 并行和串行通信方式示意图

(a) 并行传输；(b) 串行传输

## 1.3 信息及其度量

前已指出，信号是消息的载体，而信息是其内涵。任何信源产生的输出都是随机的，也就是说，信源输出是用统计方法来定性的。对接收者来说，只有消息中不确定的内容才构成信息；否则，信源输出已确切知晓，就没有必要再传输它了。因此，信息含量就是对消息中这种不确定性的度量。

首先，让我们从常识的角度来感觉三条消息：太阳从东方升起；太阳比往日大两倍；③ 太阳将从西方升起。第一条几乎没有带来任何信息，第二条带来了大量信息，第三条带来的信息多于第二条。究其原因，第一事件是一个必然事件，人们不足为奇；第三事件几乎不可能发生，它使人感到惊奇和意外，也就是说，它带来更多的信息。因此，信息含量是与惊奇这一因素相关联的，这是不确定性或不可预测性的结果。越是不可预测的事件，越会使人感到惊奇，带来的信息越多。

根据概率论知识，事件的不确定性可用事件出现的概率来描述。可能性越小，概率越

小；反之，概率越大。因此，消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越小，消息中包含的信息量就越大。假设  $P(x)$  是一个消息发生的概率， $I$  是从该消息获悉的信息，根据上面的认知，显然  $I$  与  $P(x)$  之间的关系反映为如下规律：

(1) 信息量是概率的函数，即

$$I = f[P(x)]$$

(2)  $P(x)$  越小， $I$  越大；反之， $I$  越小，且

$$P(x) \rightarrow 1 \text{ 时, } I \rightarrow 0$$

$$P(x) \rightarrow 0 \text{ 时, } I \rightarrow \infty$$

(3) 若干个互相独立事件构成的消息，所含信息量等于各独立事件信息量之和，也就是说，信息具有相加性，即

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \dots$$

综上所述，信息量  $I$  与消息出现的概率  $P(x)$  之间的关系应为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.3-1)$$

信息量的单位与对数底数  $a$  有关。 $a=2$  时，信息量的单位为比特 (bit)； $a=e$  时，信息量的单位为奈特 (nit)； $a=10$  时，信息量的单位为十进制单位，叫哈特莱。目前广泛使用的单位为比特。

下面举例说明信息量的对数度量是一种合理的度量方法。

[例 1-1] 设二进制离散信源，以相等的概率发送数字 0 或 1，则信源每个输出的信息含量为

$$I(0) = I(1) = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \text{ (bit)} \quad (1.3-2)$$

可见，传送等概率的二进制波形之一 ( $P=1/2$ ) 的信息量为 1 比特。同理，传送等概率的四进制波形之一 ( $P=1/4$ ) 的信息量为 2 比特，这时每一个四进制波形需要用 2 个二进制脉冲表示；传送等概率的八进制波形之一 ( $P=1/8$ ) 的信息量为 3 比特，这时至少需要 3 个二进制脉冲。

综上所述，对于离散信源， $M$  个波形等概率 ( $P=1/M$ ) 发送，且每一个波形的出现是独立的，即信源是无记忆的，则传送  $M$  进制波形之一的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P} = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \text{ (bit)} \quad (1.3-3)$$

式中， $P$  为每一个波形出现的概率， $M$  为传送的波形数。若  $M$  是 2 的整幂次，比如  $M=2^K$  ( $K=1, 2, 3, \dots$ )，则式 (1.3-3) 可改写为

$$I = \log_2 2^K = K \text{ (bit)} \quad (1.3-4)$$

式中， $K$  是二进制脉冲数目，也就是说，传送每一个  $M(M=2^K)$  进制波形的信息量就等于用二进制脉冲表示该波形所需的脉冲数目  $K$ 。

如果是非等概情况，设离散信源是一个由  $n$  个符号组成的符号集，其中每个符号  $x_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ) 出现的概率为  $P(x_i)$ ，且有  $\sum P(x_i) = 1$ ，则  $x_1, x_2, \dots, x_n$  所包含的信息量分别为  $-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$ 。于是，每个符号所含信息量的统计平均值，即平均信息量为

$$\begin{aligned}
 H(x) &= P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \cdots + P(x_n)[- \log_2 P(x_n)] \\
 &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \quad (1.3-5)
 \end{aligned}$$

由于  $H$  同热力学中的熵形式一样，故通常又称它为信息源的熵，其单位为 bit/符号。显然当信源中每个符号等概独立出现时，式 (1.3-5) 即成为式 (1.3-3) 此时信源的熵有最大值。

[例 1-2] 一离散信源由 0, 1, 2, 3 四个符号组成，它们出现的概率分别为  $\frac{3}{8}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ，且每个符号的出现都是独立的。试求某消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解 此消息中，0 出现 23 次，1 出现 14 次，2 出现 13 次，3 出现 7 次，共有 57 个符号，故该消息的信息量为

$$I = 23 \log_2 \frac{8}{3} + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108 \text{ (bit)}$$

每个符号的算术平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{108}{57} = 1.89 \text{ (bit/符号)}$$

若用熵的概念来计算，由式 (1.3-5) 得

$$\begin{aligned}
 H &= - \frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\
 &= 1.906 \text{ (bit / 符号)}
 \end{aligned}$$

则该消息的信息量为

$$I = 57 \times 1.906 = 108.64 \text{ (bit)}$$

可见，两种算法的结果有一定误差，但当消息很长时，用熵的概念来计算比较方便。而且随着消息序列长度的增加，两种计算误差将趋于零。

以上我们介绍了离散消息所含信息量的度量方法。对于连续消息，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主要内容。抽样定理告诉我们：一个频带受限的连续信号，可以用每秒一定数目的抽样值代替。而每个抽样值可以用若干个二进制脉冲序列来表示。因此，以上信息量的定义和计算同样适用于连续信号。

## 1.4 主要性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此，评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的有效性和可靠性。有效性是指在给定信道内所传输的信息内容的多少，或者说是传输的“速度”问题，而可靠性是指接收信息的准确程度，也就是传输的“质量”问题。这两个问题相互矛盾而又相对统一，通常还可以进行互换。

模拟通信系统的有效性可用有效传输频带来度量，同样的消息用不同的调制方式，则需要不同的频带宽度。可靠性用接收端最终输出信噪比来度量。不同调制方式在同样信道信噪比下所得到的最终解调后的信噪比是不同的。如调频信号抗干扰能力比调幅好，但调频信号所需传输频带却宽于调幅。

数字通信系统的有效性可用传输速率来衡量。可靠性可用差错率来衡量。

### 1. 传输速率

码元传输速率  $R_B$  简称传码率，又称符号速率等。它表示单位时间内传输码元的数目（单位是波特 Baud），记为 B。例如，若 1 秒内传 2400 个码元，则传码率为 2400 B。

数字信号有多进制和二进制之分，但码元速率与进制数无关，只与传输的码元长度  $T$  有关：

$$R_B = \frac{1}{T} \text{ (B)} \quad (1.4-1)$$

通常在给出码元速率时，有必要说明码元的进制。由于  $M$  进制的的一个码元可以用  $\log_2 M$  个二进制码元去表示，因而在保证信息速率不变的情况下， $M$  进制的码元速率  $R_{BM}$  与二进制的码元速率  $R_{B2}$  之间有以下转换关系：

$$R_{B2} = R_{BM} \log_2 M \text{ (B)}$$

信息传输速率  $R_b$  简称传信率，又称比特率等。它表示单位时间内传递的平均信息量或比特数（单位是比特/秒，可记为 bit/s，或 b/s，或 bps）。

每个码元或符号通常都含有一定 bit 数的信息量，因此码元速率和信息速率有确定的关系，即

$$R_b = R_B \cdot H \text{ (b/s)} \quad (1.4-2)$$

式中， $H$  为信源中每个符号所含的平均信息量（熵），等概传输时熵有最大值  $\log_2 M$ ，信息速率也达到最大，即

$$R_b = R_B \log_2 M \text{ (b/s)} \quad (1.4-3)$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 M} \text{ (B)} \quad (1.4-4)$$

式中， $M$  为符号的进制数。例如码元速率为 1200 B，采用八进制（ $M=8$ ）时，信息速率为 3600 b/s；采用二进制（ $M=2$ ）时，信息速率为 1200 b/s，可见，二进制的码元速率和信息速率在数量上相等，有时简称它们为数码率。

频带利用率  $\eta$  比较不同通信系统的有效性时，单看它们的传输速率是不够的，还应看这样的传输速率下所占的信道的频带宽度。所以，真正衡量数字通信系统传输效率的应当是单位频带内的码元传输速率，即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \text{ (B/Hz)} \quad (1.4-5)$$

数字信号的传输带宽  $B$  取决于码元速率  $R_B$ ，而码元速率和信息速率  $R_b$  有着确定的关系。为了比较不同系统的传输效率，又可定义频带利用率为

$$\eta = \frac{R_b}{B} \text{ (b/(s \cdot Hz))} \quad (1.4-6)$$

### 2. 差错率

衡量数字通信系统可靠性的指标是差错率，常用误码率和误信率表示。

误码率 (码元差错率)  $P_e$ 。是指发生错误的码元数在传输总码元数中所占的比例, 更确切地说, 误码率是码元在传输系统中被传错的概率, 即

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.4-7)$$

误信率 (信息差错率)  $P_b$ 。是指发生错误的比特数在传输总比特数中所占的比例, 即

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.4-8)$$

显然, 在二进制中有

$$P_b = P_e.$$

## 1.5 通信发展趋势

在过去三四十年间, 对数据传输需求的增长以及大规模集成电路的发展, 促进了数字通信的发展。目前数字通信在卫星通信、光纤通信、移动通信、微波通信等领域有了新的进展。下面我们就从这几个方面来了解通信的现状和未来发展趋势。

### 1. 卫星通信系统

卫星通信系统是将通信卫星作为空中中继站, 它能够把地球上某一地面站发射来的无线电信号转发到另一个地面站, 从而实现两个或多个地域之间的通信。根据通信卫星与地面之间的位置关系, 可以分为静止通信卫星 (或同步通信卫星) 和移动通信卫星。静止通信卫星是轨道在赤道平面上的卫星, 它离地面高度为 35 780 km, 采用三个相差 120° 的静止通信卫星就可以覆盖地球的绝大部分地域 (两极盲区除外)。卫星通信系统由通信卫星、地球站、上行线路及下行线路组成。上行线路和下行线路是地球站至通信卫星及通信卫星至地球站的无线电传播路径, 通信设备集中于地球站和通信卫星中。

卫星通信的特点是: 通信距离远、覆盖地域广、不受地理条件限制、通信容量大、可靠性高等。自从 1957 年 10 月第一颗卫星发射成功以来, 卫星通信作为一种重要的通信手段被广泛用于国际、国内和区域通信。21 世纪的卫星通信将向更高频段、更大容量方向发展。卫星间的通信将采用速度快、频带宽、保密性强的激光通信。预计到 2010 年前, 星间激光通信的传输速率将达到 40 Gb/s, 地面终端设备将日益小型化, 甚小天线卫星地球站 (VSAT) 将会继续发展。

### 2. 光纤通信系统

光纤通信是以光导纤维 (简称光纤) 作为传输媒质, 以光波为运载工具 (载波) 的通信方式。光纤通信具有容量大、频带宽、传输损耗小、抗电磁干扰能力强、通信质量高等优点, 且成本低, 与同轴电缆相比可以大量节约有色金属和能源。自从 1977 年世界上第一个光纤通信系统投入运营以来, 光纤通信发展迅速, 已成为各种通信干线的主要传输手段。

目前, 单波长光通信系统速率已达 10 Gb/s, 其潜力已不大, 采用密集波分复用 (DWDM) 技术来扩容是当前实现超大容量光传输的重要技术。近年来, DWDM 技术取得了较大的进展, 美国 AT&T 实验室等机构已成功地完成了 Tb/s 的传输实验。

光传送网是通信网未来的发展方向，它可以处理高速率的光信号，摆脱电子瓶颈，实现灵活、动态的光层联网，透明地支持各种格式的信号以及实现快速网络恢复。因此，世界上许多国家纷纷进行研究、试验，验证由波分复用、光交叉连接设备及色散位移光纤组成的高容量通信网今后的可行性。

### 3. 数字蜂窝移动通信系统

数字蜂窝移动通信系统是将通信范围分为若干相距一定距离的小区，移动用户可以从一个小区运动到另一个小区，依靠终端对基站的跟踪，使通信不中断。移动用户还可以从一个城市漫游到另一个城市，甚至到另一个国家与原注册地的用户终端通话。数字蜂窝移动通信系统主要由三部分组成：控制交换中心、若干基地台、诸多移动终端。通过控制交换中心进入公用有线电话网，从而实现移动电话与固定电话、移动电话与移动电话之间的通信。

目前广泛应用的是第二代移动通信系统，采用窄带时分多址（TDMA）和窄带码分多址（CDMA）数字接入技术，已形成的国家和地区标准有欧洲的 GSM 系统、美国的 IS-95 系统、日本的 PDC 系统。我国主要采用欧洲的 GSM 系统。

第二代移动通信系统实现了区域内制式的统一，覆盖了大中小城市，为人们的信息交流提供了极大的便利。随着移动通信终端的普及，移动用户数量成倍地增长，第二代移动通信系统的缺陷也逐渐显现，如全球漫游问题、系统容量问题、频谱资源问题、支持宽带业务问题等。为此，从 20 世纪 90 年代中期开始，各国和世界组织又开展了对第三代移动通信系统的研究，它包括地面系统和卫星系统，移动终端既可以连接到地面的网络，也可以连接到卫星的网络。第三代移动通信系统工作在 2000 MHz 频段，预期在 2002 年左右投入商用，为此国际电信联盟正式将其命名为 IMT-2000。IMT-2000 的目标和要求是：统一频段，统一标准，达到全球无缝隙覆盖，提供多媒体业务，传输速率最高应达到 2 Mb/s，其中车载为 144 kb/s、步行为 384 kb/s、室内为 2 Mb/s；频谱利用率高，服务质量高，保密性能好；易于向第二代系统过渡和演进；终端价格低。目前第三代移动通信系统有多个标准，我国所提出的 TD-SCDMA 标准也是其中之一。这充分体现了我国在移动通信领域的研究已达到国际领先水平。

人类对新技术的追求是无止境的，对新的通信系统和通信技术的研究仍在不断进行，新的通信系统和通信技术也将会不断服务于人类。

### 思考题

- 1-1 什么是数字信号和模拟信号？两者的区别是什么？
- 1-2 何谓数字通信？简述数字通信系统的主要优缺点。
- 1-3 画出数字通信系统的一般模型，并简述各小方框的主要功能。
- 1-4 在数字通信系统中，其可靠性和有效性指的是什么？各有哪些重要指标？
- 1-5 按信号的流向和时间分类，通信方式有哪些？
- 1-6 何谓码元速率和信息速率？它们之间的关系如何？
- 1-7 简述未来通信的发展趋势。

## 习 题

1-1 已知英文字母 e 和 v 出现的概率分别为 0.105 和 0.008, 试求 e 和 v 的信息量各为多少。

1-2 已知二进制信源 (0, 1), 若 0 符号出现概率为 1/3, 求出现 1 符号的信息量。

1-3 某信源符号集由 A、B、C、D、E、F 组成, 设每个符号独立出现, 其概率分别为 1/4, 1/4, 1/16, 1/8, 1/16, 1/4, 试求该信息源输出符号的平均信息量。

1-4 一个由字母 A、B、C、D 组成的字, 对于传输的每一个字母用二进制脉冲编码, 00 代替 A, 01 代替 B, 10 代替 C, 11 代替 D 每个脉冲宽度为 5 ms。

(1) 不同的字母是等可能出现时, 试计算传输的平均信息速率;

(2) 若每个字母出现的可能性分别为

$$P_A = \frac{1}{5}, P_B = \frac{1}{4}, P_C = \frac{1}{4}, P_D = \frac{3}{10}$$

试计算传输的平均信息速率。

1-5 设一数字传输系统传送二进制码元的速率为 2400 B, 试求该系统的信息速率; 若该系统改为传送十六进制信号码元, 码元速率不变, 则这时的系统信息速率为多少? (设各码元独立等概出现)

1-6 某信息源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成, 设每一符号独立出现, 其出现概率分别为 1/4, 1/8, 1/8, 3/16 和 5/16 信息源以 1000 B 速率传送信息。

(1) 求传送 1 小时的信息量;

(2) 求传送 1 小时可能达到的最大信息量。

1-7 设有四个消息符号, 其前三个符号出现概率分别是 1/4, 1/8, 1/8。各消息符号出现是相对独立的。求该符号集的平均信息量。

1-8 已知二进制数字信号的传输速率为 2400 b/s, 试问变换成四进制数字信号时, 传输速率为多少波特?

1-9 已知某四进制数字传输系统的传信率为 2400 b/s, 接收端在半小时内共收到 216 个错误码元, 试计算该系统的误码率  $P_e$ 。

1-10 某系统经长期测定, 它的误码率  $P_e=10^{-5}$  系统码元速率为 1200 B 问在多长时间可能收到 360 个误码元。

## 第 2 章 随机过程

从第 1 章获知,信息与不确定性有关。如果一个待接收的信号或消息事先已经确知,它就不可能载有任何信息。因此载有信息的信号必须是不可预测的,或者说带有某种随机性。干扰信息信号的噪声更是不可预测的。这些不可预测的信号和噪声都是随机过程的例子。但随机信号和噪声的不可预测性的意义完全不同,随机信号的不可预测性是它携带信息的能力,而噪声的不可预测性则是有害的,它将使有用信号受到污染。

在通信系统中,随机过程是重要的数学工具。它在信息源的统计建模、信源输出的数字化、信道特性的描述、设计用以处理来自信道载荷信息信号的接收机以及评估通信系统的性能等方面都是很重要的。

本章将扼要介绍通信系统所必需的内容,即随机过程的基本概念、统计特性及其通过线性系统的分析方法,并主要介绍用于全书的几个重要结论,这些对于设计通信系统及其性能的评估都是十分有用的。

### 2.1 随机过程的基本概念和统计特性

#### 2.1.1 随机过程

自然界中事物的变化过程可以大致分成为两类。一类是其变化过程具有确定的形式,或者说具有必然的变化规律,用数学语言来说,其变化过程可以用一个或几个时间  $t$  的确定函数来描述,这类过程称为确定性过程。例如,电容器通过电阻放电时,电容两端的电位差随时间的变化就是一个确定性函数。而另一类过程没有确定的变化形式,也就是说,每次对它的测量结果没有一个确定的变化规律,用数学语言来说,这类事物变化的过程不可能用一个或几个时间  $t$  的确定函数来描述,这类过程称为随机过程。下面我们给出一个例子:

设有  $n$  台性能完全相同的接收机。我们在相同的工作环境和测试条件下记录各台接收机的输出噪声波形(这也可以理解为对一台接收机在一段时间内持续地进行  $n$  次观测),测试结果将表明,尽管设备和测试条件相同,记录的  $n$  条曲线中找不到两个完全相同的波形。这就是说,接收机输出的噪声电压随时间的变化是不可预知的,因而它是一个随机过程。

由此我们给随机过程下一个更为严格的定义:设  $S_k(k=1, 2, \dots)$  是随机试验。每一次试验都有一条时间波形(称为样本函数或实现)记作  $x_k(t)$ ,所有可能出现的结果的总体  $\{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t), \dots\}$  就构成一随机过程,记作  $\xi(t)$ 。简言之,无穷多个样本函数的总体叫做随机过程,如图 2-1 所示。

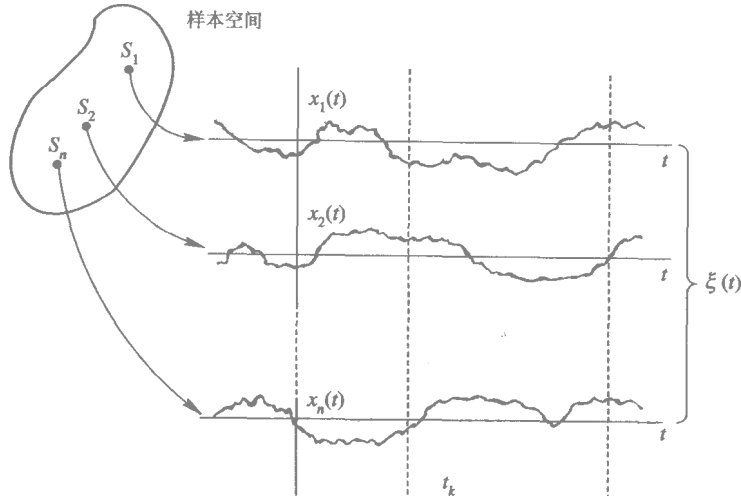


图 2-1 样本函数的总体

显然，上例中接收机的输出噪声波形也可用图 2-1 表示。我们把对接收机输出噪声波形的观测可看作是进行一次随机试验，每次试验之后， $\xi(t)$  取图 2-1 所示的样本空间中的某一样本函数，至于是空间中哪一个样本，在进行观测前是无法预知的，这正是随机过程随机性的具体表现。其基本特征体现在两个方面：其一，它是一个时间函数；其二，在固定的某一观察时刻  $t_1$  全体样本在  $t_1$  时刻的取值  $\xi(t_1)$  是一个不含  $t$  变化的随机变量。因此，我们又可以把随机过程看成依赖时间参数的一族随机变量。可见，随机过程具有随机变量和时间函数的特点。下面将会看到，在研究随机过程时正是利用了这两个特点。

### 2.1.2 随机过程的统计特性

随机过程的两重性使我们可以用与描述随机变量相似的方法，来描述它的统计特性。

设  $\xi(t)$  表示一个随机过程，在任意给定的时刻  $t_1 \in T$  其取值  $\xi(t_1)$  是一个一维随机变量。而随机变量的统计特性可以用分布函数或概率密度函数来描述。我们把随机变量  $\xi(t_1)$  小于或等于某一数值  $x_1$  的概率  $P[\xi(t_1) \leq x_1]$  简记为  $F_1(x_1, t_1)$ ，即

$$F_1(x_1, t_1) = P[\xi(t_1) \leq x_1] \quad (2.1-1)$$

式 (2.1-1) 称为随机过程  $\xi(t)$  的一维分布函数。如果  $F_1(x_1, t_1)$  对  $x_1$  的偏导数存在，即有

$$\frac{\partial F_1(x_1, t_1)}{\partial x_1} = f_1(x_1, t_1) \quad (2.1-2)$$

则称  $f_1(x_1, t_1)$  为  $\xi(t)$  的一维概率密度函数。显然，随机过程的一维分布函数或一维概率密度函数仅仅描述了随机过程在各个孤立时刻的统计特性，而没有说明随机过程在不同时刻取值之间的内在联系，为此需要进一步引入二维分布函数。

任给两个时刻  $t_1, t_2 \in T$ ，则随机变量  $\xi(t_1)$  和  $\xi(t_2)$  构成一个二元随机变量  $\{\xi(t_1), \xi(t_2)\}$ ，称

$$F_2(x_1, x_2; t_1, t_2) = P\{\xi(t_1) \leq x_1, \xi(t_2) \leq x_2\} \quad (2.1-3)$$

为随机过程  $\xi(t)$  的二维分布函数。如果存在