

第1章 通信基础知识

1.1 通信的概念

通信在形式上就是发消息 (message), 但本质上则是传信息 (information), 即要求通信的双方能将信息从某一方准确而安全地传送到另一方。通信应用的例子很多, 古代有烽火传军情、鸿雁传书、击鼓进军、鸣金收兵等, 近代有海军旗语、信号灯等, 而现代有电话、电视、移动通信、网络等。这里消息中包含信息, 是信息的载体, 通过收到消息从而获得信息; 而信息则是消息的不确定性, 因为对于通信双方都确定 (或已知) 的消息, 就没必要传递了。

虽然消息中可能承载有信息, 却与能量无关, 实际上可在通信系统中传输。能被人们生理器官所感知的消息, 只是消息的某种物理体现, 称之为信号 (signal)。作为消息的载体, 信号可以是模拟的, 也可以是数字的, 例如文字、数据、语言、图片、视频等多种形式。举例来讲, 烽火台上突然升起狼烟, 就是以光信号的形式向外发出消息, 这消息具有不确定性, 因而传递了信息; 但如果烽火台上一直烟火不断、习以为常, 那就是确定消息, 没有传递信息。由此可见: 信号 (可见光) 是消息 (发烟火) 的载体, 而消息又是信息 (可能有紧急军情) 的载体。

同一则信息也可以由不同形式的消息和信号来载荷。仍如上例信息, 也可通过喊叫以声音信号的形式发出消息。当然, 声音信号没有光信号传得快和远, 但可以通过沿途的军民击鼓传花帮着喊, 仍然可以把信息传到远方。这也正是接力通信甚至网络通信的基本概念。

从通信的观点, 能够承载消息的各种信号形式必须具有两个条件: 一是能够被通信双方所理解, 二是可以传递。由于电信号和光信号可以光速来传递信息, 准确可靠, 且很少受到时间、地点、空间距离等方面的限制, 因而发展迅速, 应用广泛。其所要研究的内容就是如何把信息大量、快速、准确、广泛、方便、经济和安全地从发送端通过传输介质传送到接收端。

通信原理是介绍支撑各种通信技术基本概念和数学理论基础的课程, 主要内容包括常用的电信号及噪声分析方法, 信道特性, 不同通信系统的组成、工作原理和性能等, 其侧重点是信息的传输。

1.2 通信系统的组成

通信系统用以完成信息的传输过程, 包含完成通信过程的全部设备和传输媒质。当通信系统是利用电磁波在自由空间传输时, 称之为无线通信系统; 而利用导引媒质中的传输机理来实现传输时, 称之为有线通信系统; 当电磁波的频率达到光波范围时的通信系统又称为光通信系统。

1.2.1 通信系统一般模型

通信系统可用图 1-1 所示的一般模型来描述, 该模型概括地说明了通信系统的共性特点, 图中各部分模块的功能如下:

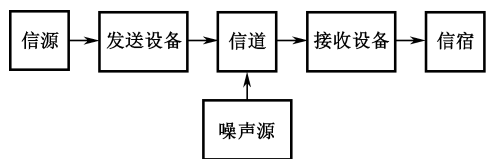


图 1-1 通信系统模型

(1) 信源：是指信息的源，通常就是承载了信息的信息。消息有多种形式，包括文字、数据、图像和视频等。信源又可以分为模拟信源和数字信源。模拟信源的输出幅度是连续变化的模拟信号，但在时间上，则既可以是连续的（如电话机将声音转换成音频信号、摄像机将图像转换成视

频信号等），也可以是离散的（如脉冲雷达信号、莫尔斯电报信号等）；如果时间离散信源（如语音采样值）或空间离散信源（如图像采样值）在幅度上也是离散的，即为数字信源或数据（data），如计算机磁盘文件、手机所拍摄的照片或视频。

(2) 发送设备：由于表征消息的数据或信号在大多情况下不适合在信道中直接传输，因此需要通过调制过程，将信源变换成适合于在信道中传输的电信号。发送设备完成信号的调制并将信号送入信道传输。

(3) 信道：信道是传输信号的物理通道，即信号的传输媒质。信道可分为有线信道和无线信道两类，有线信道包括对称电缆、同轴电缆和光缆等，电磁波在介质中传输；无线信道包括地波传播、短波电离层反射、微波视距中继、人造卫星中继以及各种散射信道等，无线信道是发送端和接收端之间通路的一种形象比喻，实际上没有一个有形的连接，传播路径也可能有多条。

(4) 噪声：信道对有用信号提供了通路，也对噪声信号提供了通路。噪声一般是人们所不需要的，但又是不可避免客观存在的干扰。噪声的来源很多，可分为内部噪声和外部噪声。内部噪声包括设备内部电路引起的噪声，半导体材料本身形成的噪声，电器机械运动产生的噪声等；外部噪声包括雷电、电气设备等引起的噪声等。噪声干扰会使信号传输失真，严重的会使通信无法正常进行。

(5) 接收设备：接收设备完成发送设备的反过程，即进行解调、译码、解码等。由于进入接收设备的调制信号中包含有噪声，因此接收设备需要从带有干扰的信号中正确地恢复出原始的电信号。

(6) 信宿：信宿是传输信息的归宿，其作用是将复原的信息转换成相应的消息。电话接收机是将有线信道传来的电信号转换为声音，因此它是电话传输的信宿。

1.2.2 模拟通信系统

对于连续信源，如语音，其声波振动的幅度是随时间连续变化的，若将它转换为随时间连续变化的电信号，则信号幅度是时间的连续函数，这样的信号称为模拟信号。因此，模拟信号是指参量取值连续变化的电信号。

模拟通信系统就是利用模拟信号来传递信息的通信系统，其模型如图 1-2 所示。

在图 1-2 中，信源将连续的非电信号转换成模拟基带电信号；信宿则完成相反的过程，将模拟基带电信号还原为输入端的连续非电信号。所谓基带信号，其特点是信号中可能含有直流分量或低频成分，即其频谱从零附近开始。调制器的作用是将基带电信号变换成适合于在信道中传输的频带信号，而解调器的作用相反，是将信道中传输的频带信号还原成基带电信号。

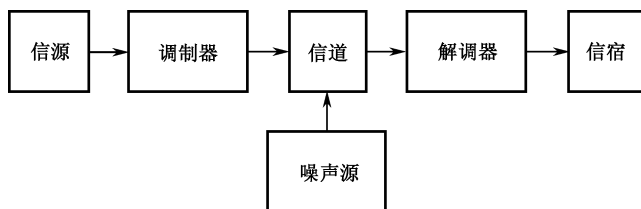


图 1-2 模拟通信系统模型

模拟通信的优点是：信号在信道中传输所占用的频谱比较窄，因此可通过多路频分复用使信道的利用率得到提高。

模拟通信的缺点是：所传输的信号是连续的，不容易消除叠加在其上的噪声，抗干扰能力较差；不容易实现保密通信；设备不容易大规模集成；不能适应快速发展的计算机通信的要求。

模拟通信在历史上占有主导地位，但近年来随着超大规模集成电路工艺的成熟，以及计算机和数字信号处理技术的发展，大多数的模拟通信系统已被数字通信系统所取代。

常用的模拟通信系统包括中波、短波无线电广播，模拟电视广播，调频立体声广播等。

1.2.3 数字通信系统

1. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号传递消息的通信系统，其模型如图 1-3 所示。

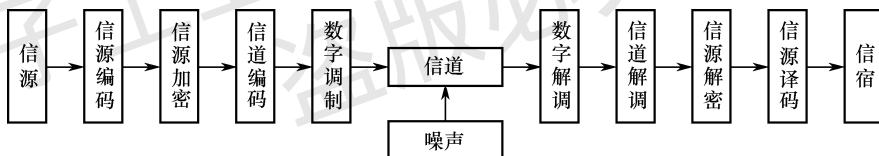


图 1-3 数字通信系统模型

数字通信系统比模拟通信系统的组成要复杂一些，其中包括了信源编码、信源（或数据）加密、信道编码、数字调制、信道解调、信源解密、信源译码等一些区别于模拟通信系统的问题。

1) 信源编码与译码

信源编码的作用包含两个方面：一是将模拟消息数字化，即模/数（A/D）转换；二是进行数据压缩，即通过减少数字消息中的冗余，从而降低信源传输的码元速率和带宽，提高传输和处理效率。信源译码是信源编码的逆过程。

2) 信源加密与解密

加密技术是以某种特殊的算法改变原有的信息数据，使得未授权用户即使获得了信息，也无法获知信息的内容。解密技术则是将接收到的加密信源再用相同方法或不同方法进行还原的过程。数字信源易于实现加密和解密。

3) 信道编码与译码

数字信号在传输中由于各种原因,会使传送的数据流产生误码,从而在接收端产生图像跳跃、不连续、马赛克等现象。为使系统具有一定的纠错能力或抗干扰能力,提高通信的可靠性,可在信源编码的基础上,按一定规律加入一些新的监督码元,这一过程称为信道编码。信道译码则是按编码相对应的反向规律恢复编码前的信号。

4) 数字调制与解调

与模拟基带信号类似,数字基带信号在很多情况下也不适于在信道中直接传输,需要进行转换,将信号的频谱搬移到高频处,从而形成适于在信道传输的调制信号。数字调制是以数字信号作为控制信号来改变载波参数的技术;数字解调与数字调制正好相反,是将已调数字信号还原为数字基带信号。

2. 数字通信的主要特点

数字通信的主要优点表现在:

(1) 抗干扰能力强,无噪声积累。这是数字通信最突出的优点。由于信号在传输过程中不可避免地会叠加噪声,这些噪声会随着传输距离的增加而积累,从而使传输质量下降。对于数字信号,由于信号的波形为有限个离散值,比如对二进制信号只有两个取值,在传输过程中受到噪声干扰并恶化到一定程度时,可通过判决再生的方法,恢复出原有数字信号的状态,从而达到噪声不积累的效果。

(2) 便于加密处理。数字信号的加密处理比模拟信号要容易得多,一些加密过程甚至可通过简单的逻辑运算来实现。

(3) 便于存储、处理和交换。数字信源与计算机数据一致,因此便于用计算机进行存储、处理和交换,也便于计算机之间的网络连接。

(4) 可通过差错控制编码的方法,来减小信息传输中的误码率,提高通信系统的可靠性。

数字通信的主要缺点表现在:

(1) 需要较大的传输带宽。一路模拟电话的带宽大约是 4 kHz,而一路数字电话的带宽大约为 20~60 kHz。

(2) 需要严格的同步系统。同步是数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提,为了实现信号的同步,需要相对复杂的设备支持。

需要指出的是,随着通信技术朝着小型化、智能化、高速和大容量的方向迅速发展,数字通信的缺点将会逐步淡化,最终会完全取代模拟通信。

1.3 通信系统的分类

通信系统有多种不同的分类方法,主要有以下几种情况。

1. 按照传输信号的特征分类

当信道中传输的是模拟信源时所对应的通信系统称之为模拟通信系统;当信道中传输的是数字信源所对应的通信系统称之为数字通信系统。

2. 按照通信业务类型分类

通信业务有包括符号、文字、语言、数据、视频在内的多种类型，因此通信系统可分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、广播电视通信系统等。这些通信系统可以是专用的，但通常是兼容的或并存的。长期以来，电话业务在电信领域中占主导地位，因而其他通信常常借助于公共的电话通信系统进行。然而，近年来非电话业务通信发展迅速，包括计算机通信、电子邮件、可视图文、会议视频等数据通信正在成为通信的主流。

3. 按调制方式分类

根据是否将信源信号进行调制，可将通信系统分为基带传输系统和频带传输系统。基带传输是将未经调制的信号直接在信道中传送，这既可以是模拟基带信号也可以是数字基带信号；频带传输则是对各种基带信号进行调制后再进行传输。

按载波是连续波还是数字脉冲，调制方式可以分为连续波调制和脉冲调制。连续波调制用正弦波或余弦波作为载波，而脉冲调制用数字脉冲作为载波。

连续波调制又可分为模拟调制与数字调制。如果将模拟基带信号对载波波形的某些参量，如幅度、频率、相位进行控制，使载波的这些参量随基带信号的变化而变化，则是模拟调制。如果将数字信号寄生在载波的幅度、频率、相位上，即用数据信号来进行幅度、频率和相位调制，则是数字调制。

4. 按传输介质分类

按传输介质的不同，可将通信系统分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信系统需要以传输缆线作为传输介质，比如对称电缆、同轴电缆、光纤等。无线通信系统则是无线电波在自由空间的传输，比如移动通信、微波通信、卫星通信等。

5. 按信号的复用方式分类

复用是指将若干个彼此独立的信号，合并成一个可在同一信道上同时传输的复合信号的方法，目的是为了地更好地共享信道资源。按信号的复用方式可分为频分复用（FDM）、时分复用（TDM）、码分复用（CDM）和波分复用（WDM）等。

频分复用将传输信道的总带宽划分成若干个子信道，每个子信道传输 1 路信号，为了保证各子信道中所传输的信号互不干扰，在各子信道之间设立隔离带，以保证各路信号互不干扰；时分复用是用脉冲调制的方法使不同的信号占据不同的时间区间，即利用不同时段来传输不同的信号；码分复用是利用互相正交的码型来区分各路原始信号，各路信号可在通信时间内使用同样的频带，每路信号分配一个地址码，互不重叠；波分复用与频分复用相类似，是将两种或多种不同波长的光载波信号在发送端经复用器汇合在一起，并耦合到光线路的同一根光纤中进行传输的技术。

6. 按工作频段分类

由于不同电磁波频率具有不同的传输特点和业务容纳能力，为了更好地管理和利用无线电频谱资源，同时体现技术及应用发展的历程和现状，需要对频率范围进行合理的分类。表 1-1 列出了频率在 3 000 GHz 以下的主要无线电频谱划分与典型应用，3 000 GHz 以上的电磁波已属于光通信系统的范畴。

表 1-1 无线电频谱划分与典型应用

频带名称	频率范围	波段名称	波长范围	典型应用
超低频 (SLF)	30~300 Hz	超长波	10~1 Mm	对潜通信、输电
特低频 (ULF)	0.3~3 kHz	特长波	1000~100 km	对潜通信
甚低频 (VLF)	3~30 kHz	甚长波	100~10 km	远程通信、水下通信、声呐
低频 (LF)	30~300 kHz	长波	10~1 km	导航、水下通信、无线电信标
中频 (MF)	300~3 000 kHz	中波	1 000~100 m	广播、海事通信、测向、遇险求救
高频 (HF)	3~30 MHz	短波	100~10 m	广播、电报、军用通信、业余无线电、超视距雷达
甚高频 (VHF)	30~300 MHz	米波	10~1 m	电视、调频广播、空中管制、导航、车辆通信
特高频 (UHF)	300~3 000 MHz	分米波	10~1 dm	微波接力、卫星通信、电视、雷达
超高频 (SHF)	3~30 GHz	厘米波	10~1 cm	微波接力、卫星通信、雷达、移动通信
极高频 (EHF)	30~300 GHz	毫米波	10~1 mm	雷达、卫星通信、铁路业务、射电天文学
至高频 (THF)	300~3 000 GHz	丝米波或亚毫米波	1~0.1 mm	射电天文学, 波谱学

7. 按照通信方式分类

通信方式是指通信双方之间的工作方式或信号传输方式。

对于点对点之间的通信,按消息传送的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种,如图 1-4 所示。

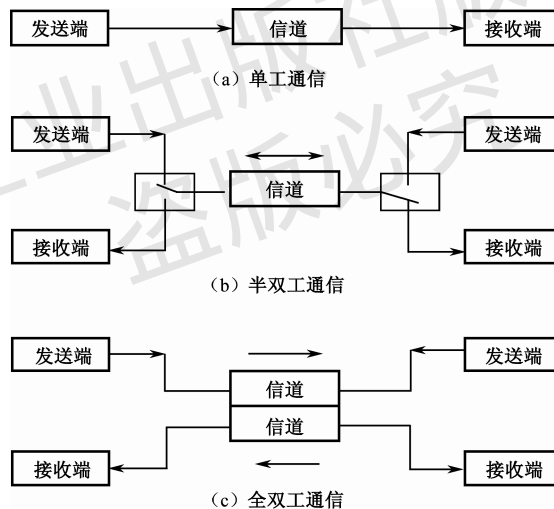


图 1-4 按通信方式分类

(1) 单工通信,是指消息只能单方向传输的工作方式,例如遥控、遥测、广播。单工通信信道是单向信道,发送端和接收端的身份是固定的,发送端只能发送信息,不能接收信息;接收端只能接收信息,不能发送信息,数据信号仅从一端传送到另一端,即信息流是单方向的。

(2) 半双工通信,是指可以实现双向的通信,但不能在两个方向上同时进行,必须轮流交替地进行。也就是说,通信信道的每一端都可以是发送端,也可以是接收端,但同一时刻,信息只能有一个传输方向。典型的半双工通信有无线对讲机等。

(3) 全双工通信,是指通信的双方可以同时发送和接收数据,即在通信的任意时刻,线路上存在双向信号传输。全双工通信要求通信系统的每一端都设置有发送器和接收器,因此,能

控制数据同时在两个方向上传送。全双工方式无须进行方向的切换，因此，没有切换操作所产生的时间延迟。典型的全双工通信有电话、手机、计算机等。

对数字通信，按数字信号排列的顺序的不同，还可分为串行通信传输和并行传输，如图 1-5 所示。

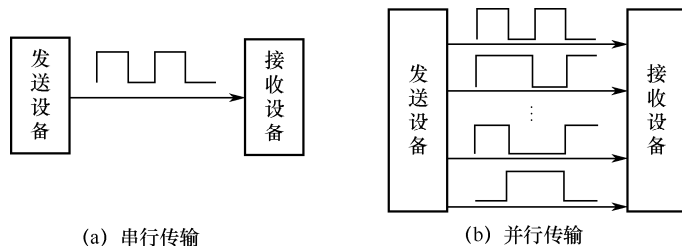


图 1-5 串行与并行传输

串行通信是指使用一条数据线，将数据一位一位地依次传输，每一位数据占据一个固定的时间长度，只需少数几条线就可以在系统间交换信息，节省了传输线，特别适用于计算机与计算机、计算机与外设之间的远距离通信。

并行通信是指一组数据的各数据位在多条线上同时被传输，其特点是传输速度快、效率高，多用在实时、快速的场合，由于传输所需要数据线根数多，因此传输的成本较高，不太适合远距离传输。典型的并行传输例子是打印机与计算机之间的通信传输。

1.4 通信技术发展概况

真正意义上的电通信始于 1837 年美国画家莫尔斯发明的有线电报，他利用电流交替地通电和切断产生不同的信号，即点、划和空白，以这三者不同组合创造了表达 26 个字母和数字的莫尔斯电码。

1876 年，美国人亚历山大·贝尔发明了电话，这是通信发展历史上具有划时代意义的事件，通过电话可以把语音转化为电信号直接进行传输。

1864 年，英国物理学家麦克斯韦建立了完整的电磁场理论，预言了电磁波的存在，并将电和光统一起来，这是 19 世纪物理学发展的最光辉的成果。

1887 年，德国物理学家赫兹通过实验的方法产生了无线电波，并测量了波长和速度。赫兹实验不仅从实验方面证实了麦克斯韦电磁理论正确性，更为无线电、电视和雷达等现代通信技术的发展找到了新的途径。

1896 年，意大利无线电工程师马可尼成功地发明了无线电报，并于 1901 年成功进行了跨大西洋的越洋无线电信号的接收，这使无线通信达到实用阶段。

1904 年，英国物理学家弗莱明研制出世界上第一只电子管，即真空二极管，这标志着世界从此进入了电子时代。

1906 年，美国发明家福雷斯特对真空二极管加以改进，研制出真空三极管，从而可将微弱的电信号放大成强信号，解决了无线电的接收问题，这是人类打开电子时代大门过程中的重要事件。

1918 年，美国发明家阿姆斯特朗研究成功超外差接收机，这是为了适应远程通信对高频率、弱信号接收的需要，在外差原理的基础上发展而来的，至今仍广泛应用于远程信号的接收。

1927年,美国物理学家奈奎斯特提出了著名的抽样定理,指出要使模拟信号抽样后能够不失真还原,其抽样频率必须大于信号最高频率的两倍。

1933年,阿姆斯特朗发明了调频无线电收发机系统,这一新的辉煌成就在无线电、电视、微波中继通信以及卫星通信中得到广泛应用。

1946年,世界上第一台电子计算机ENIAC诞生,这个庞然大物占地面积达 170 m^2 ,重达 30 t ,可在 1 s 内进行了 $5\,000$ 次加法运算和 500 次乘法运算。在ENIAC中,电子管是最基本的元件。

1947年,美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿组成的研究小组,研制出一种点接触型的锗晶体管。这使得人们能用一个小巧的、低功耗的电子器件来代替体积大、功率消耗大的电子管。晶体管是20世纪的一项重大发明,是微电子革命的先声。

1948年香农发表了著名的论文《通信中的数学理论》,提出了信息熵、信道容量等概念,定量地揭示了通信的实质问题,成为信息论的开端。

1957年,前苏联发射了世界上第一颗人造卫星,人类开始了空间通信。1962年,美国发射了具有转发和放大功能的民用通信卫星,实现了电话和电视信号的传播。中国也于1970年发射了东方红1号人造卫星。

1958年,美国德州仪器公司的基尔比发明了称之为“相移振荡器”的集成电路,他将包括晶体管、电阻、电容在内的所有元件用同一种半导体材料制成,彼此没有干扰。集成电路的发明开创了世界微电子学的历史。

1960年,美国科学家梅曼发明了第一个红宝石激光器,与普通光相比,激光谱线很窄,方向性及相干性极好,是一种理想的相干光源和光载波。由激光发展起来的激光通信有高度的相干性和空间定向性,通信容量大、体积较小并且具有较高的保密性。所以激光是光通信的理想光源,它的出现是光通信发展的重要一步。

1966年,中国香港物理学家高锟提出了用玻璃代替铜线的大胆设想,即利用玻璃清澈、透明的性质,使用光来传送信号,从而使传输的信息量更多、速度更快、距离更远。随着第一个光纤系统于1981年成功问世,改变了世界的通信格局,光纤通信以其超大的容量,逐步取代了电线、电缆和微波接力,成为现代电信网的骨干。

20世纪80年代以来,随着通信理论和微电子技术的成熟,移动通信的全方位投入使用得以实现。第1代移动通信系统(1G)是以模拟技术为基础的无线电话系统,只能进行语音通信。第2代数字移动通信系统(2G)的主要特性是提供数字化的语音业务及低速率数据业务,频谱利用率高,理论数据速率达 9.6 kb/s 以上,且保密性好。第3代移动通信系统(3G)在2G的基础上,发展了包括图像、音视频和可视电话在内的宽带多媒体通信业务,其最高理论速率达 2 Mb/s 以上。第4代移动通信系统(4G)以正交频分复用(OFDM)技术为核心,在网速、容量和稳定性等方面相对于3G有了跳跃性的提升,传输速率可达到 100 Mb/s ,能够满足用户对于无线服务的多种要求。第5代移动通信系统(5G)是面向2020年的新一代移动通信系统,在传输速率和资源利用率等方面会比4G再高一个量级,其无线覆盖性能、传输时延、系统安全、用户体验等都将比4G有倍数的改善,能够更好地满足蓬勃发展的物联网的传输要求。

由于传统的通信技术在保密安全方面存在隐患,因此近年来基于量子计算技术的量子通信受到日益重视,其理论和应用成为世界研究热点。我国在量子通信研究领域取得重要成果,2016年,我国成功发射世界上首颗量子科学实验卫星“墨子号”,这使我国在全球首次实现卫

星和地面之间的量子通信，从而构建天地一体化的量子保密通信与科学实验体系。

1.5 信息的量度

1.5.1 信息量的定义

通信的目的是为了传输消息中所包含的信息，因此需要采用一定的物理量来对被传输的信息进行量度，这个物理量称之为信息量。

消息是多种多样的，因此度量消息中所含信息的方法，必须能够用来度量任何消息的信息量，而与消息种类无关。同时，这种度量方法也与消息的重要程度无关。

香农信息论指出，信息是事物运动状态或存在方式的不确定性的描述，可用概率来量度这种不确定性的程度。在信息论中，把消息用随机事件来表示，而发出这些消息的信源则用随机变量来表示。

先从以下天气预报来感知3个不同的消息：(1) 明天晴转多云；(2) 明天有大暴雨；(3) 明天温度将超过 50℃。在这3条消息中，第一条带来的信息量较小，因为这样的事件发生很正常，人们不感到惊奇；第二条带来了较大的信息量，因为人们对这样的极端天气重视程度很高，需要提前做好防范；第三条带来的信息量高于第二条，因为这样的事件在一般情况下几乎是不可能发生的，听后使人感到十分吃惊。这个例子表明，对接收者而言，事件越不可能，越不可预测，越能使人感到意外和惊奇，所包含的信息量也就越大。

哈特莱首先提出采用消息出现概率的对数作为离散消息的信息量表示，即某离散消息 x 所携带的信息量为

$$I(x) = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.5-1)$$

式中， $P(x)$ 为消息 x 发生的概率。当底数 $a=2$ 时，信息量单位用比特 (bit) 表示，简称为 b；当底数 $a=e$ 时，信息量单位用奈特 (nat) 表示；当底数 $a=10$ 时，信息量单位用哈特 (Hart) 表示。3种单位中以比特最为实用，因此本书中都是以比特作为信息量的单位，即

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (\text{b}) \quad (1.5-2)$$

式 (1.5-1) 实际上反映了信息量的大小与消息出现的概率之间存在如下对应关系：

(1) 事件出现的概率越小，消息中包含的信息量越大；反之，事件出现的概率越大，消息中包含的信息量越小。

(2) 事件出现的概率等于 0，即属于不可能出现的事件时，对应的信息量等于无限大；反之，事件出现的概率等于 1，即属于必然出现的事件时，对应的信息量等于 0。

(3) 如果消息是由若干个独立事件所构成，那么消息总的信息量等于这些独立事件信息量的总和，数学关系可表示成

$$\begin{aligned} I[P(x_1)P(x_2)\cdots] &= -\log_2 [P(x_1)P(x_2)\cdots] \\ &= -\log_2 P(x_1) - \log_2 P(x_2) - \cdots = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots \end{aligned} \quad (1.5-3)$$

【例 1-1】 设信源是由两个状态构成的消息，高电平表示一种状态，用符号“1”表示，低电平表示另一种状态，用符号“0”表示。(1) 若出现“0”的概率为 1/3，求出现“1”的信息量。(2) 若“1”和“0”出现的概率相等，求出现“1”的信息量。

【解】 (1) 由于出现“1”和“0”全概率为1, 所以出现“1”的概率为 $2/3$, 由式(1.5-2), “1”所包含的信息量为

$$I(1) = -\log_2 \frac{2}{3} = 0.585 \text{ (b)}$$

(2) “1”和“0”等概率出现时, “1”和“0”包含的信息量相等为

$$I(1) = I(0) = -\log_2 \frac{1}{2} = 1 \text{ (b)}$$

从这个例子中看出, 一个等概率二进制波形之一的信息量恰好就是1b。在工程中也习惯于将一个二进制码元称为1b码元。

如果消息中包含4个离散状态, 比如天气状况的晴、阴、雨、多云, 则需要用4种不同的波形来传递, 这时可用四进制信号波形来表示天气的4种状况。当用二进制脉冲来表示四进制波形时, 每一个四进制波形需要用两个二进制脉冲信号表示。如果四进制波形出现的概率相等, 则传输四进制波形之一的信息量为2b。图1-6描述了这种四进制波形与二进制脉冲表示之间的关系。

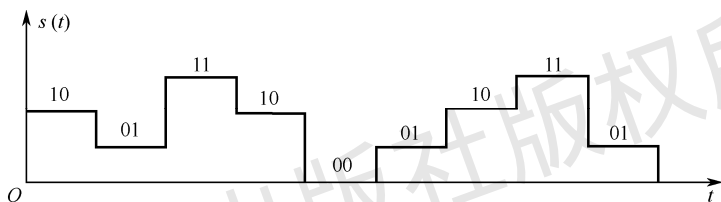


图 1-6 四进制波形与二进制脉冲表示

推广到离散信号是 M 个波形且为等概率发送情况, 由于

$$P(x_1) = P(x_2) = \cdots = P(x_i) = \cdots = P(x_M) = \frac{1}{M} \quad (1.5-4)$$

因此每一个信号的信息量为

$$I[P(x_i)] = -\log_2 \left(\frac{1}{M} \right) = \log_2 M \text{ (b)} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (1.5-5)$$

当离散消息个数 M 是 2 的整数次幂, 即 $M=2^K$, $K=1, 2, 3, \dots$, 则等概率 M 进制波形中任一个波形的信息量为

$$I[P(x_i)] = \log_2 2^K = K \text{ (b)} \quad (i=1, 2, \dots, M) \quad (1.5-6)$$

K 实质上代表的是描述每一个 M 进制波形所需要的二进制脉冲数目, 因此式(1.5-6)说明了 $M=2^K$ 进制波形之一的信息量等于二进制波形之一信息量的 K 倍。

【例 1-2】 某离散信源由 0, 1, 2, 3 四种符号组成, 其统计特性为

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 3/8 & 1/4 & 1/4 & 1/8 \end{pmatrix}$$

且每个符号的信息量是独立的。求消息

102010230213001203210100321010023102002013120321001202100

的信息量。

【解】 这是一个非等概率离散信号传输问题。此消息共有 57 个符号, 其中“0”出现 23 次, “1”出现 14 次, “2”出现 13 次, “3”出现 7 次。总的信息量可由下式计算得到:

$$I = -\sum_{i=1}^N n_i \log_2 P(x_i) \quad (1.5-7)$$

式中, $P(x_i)$ 表示符号 x_i 出现的概率, n_i 表示符号 x_i 出现的次数, N 表示不同的符号数, 故

$$I = -\sum_{i=1}^4 n_i \log_2 P(x_i) = 23 \log_2 \frac{8}{3} + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108 \quad (\text{b})$$

1.5.2 平均信息量

信源的平均信息量是指传输的每个符号所含信息量的统计平均值。对于通信问题, 由于传输的消息很长, 且符号出现的概率不相等, 因此用符号出现概率来计算信息量很麻烦, 引入平均信息量的概念十分必要。

设离散信源由 M 个独立的符号组成, 每个符号 x_i 出现的概率为 $P(x_i)$, 且有 $\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$ 。由于符号 x_i 所含的信息量为 $-\log_2 P(x_i)$, 因此 M 个符号的平均信息量定义为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{b/符号}) \quad (1.5-8)$$

用式 (1.5-8) 表示的平均信息量也称之为信源的熵, 它表示 M 个符号组成的离散信源中每一个符号的平均信息量。

对于符号 x_i 等概率出现, 即 $P(x_i) = 1/M$, 则式 (1.5-8) 转化为式 (1.5-5)。可以证明, 式 (1.5-5) 对应着式 (1.5-8) 的最大值, 即当离散信源中每个符号等概率出现, 而且各符号的出现为统计独立时, 该信息源的熵达到最大值。

【例 1-3】 计算【例 1-2】信息源的平均信息量。

【解】 由式 (1.5-8), 平均信息量为

$$\begin{aligned} H(X) &= -\sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \quad (\text{b/符号}) \end{aligned}$$

该消息的总信息量为

$$I = M \cdot H = 57 \times 1.906 = 108.64 \quad (\text{b})$$

计算得到的总信息量与【例 1-2】算得的结果不完全相同, 原因是这里熵的计算采用的是统计平均 (概率), 而【例 1-2】中采用的是算术平均 (频率), 只当消息序列足够长时两者差别才趋于消失。一般情况下消息序列都很长, 采用熵的概念比较方便。

如果信源发出的消息是连续可变的, 则需要引入连续消息出现的概率密度 $f(x)$, 这时平均信息量可用下面的积分计算:

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} [f(x) \log_2 f(x)] dx \quad (1.5-9)$$

【例 1-4】 有一连续消息源, 其输出信号在 $(-1, +1)$ 范围内具有均匀的概率密度函数, 求消息的平均信息量。

【解】 信号取值在 $(-1, 1)$ 均匀分布, 其概率密度函数 $f(x) = 1/2$, 故平均信息量为

$$H(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} [f(x) \log_2 f(x)] dx = -\int_{-1}^1 \frac{1}{2} \left(\log_2 \frac{1}{2} \right) dx = 1 \quad (\text{b})$$

1.6 通信系统的性能指标

在设计或评估通信系统时,需要涉及通信系统的性能指标,用以衡量通信系统的优劣。通信系统的性能指标包括通信系统的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性以及可维护性等等。

从消息的传输角度来说,对通信系统的优劣评价起主要作用的有两个,即有效性和可靠性。有效性是指消息传输的“速度”问题,即快慢问题;而可靠性是指消息传输的“质量”问题,即好坏问题。有效性的提高与可靠性的提高之间存在一定矛盾,只能在满足可靠性要求下尽可能提高有效性,或者在满足有效性的前提下尽可能提高可靠性。

由于模拟通信系统与数字通信系统存在差别,因此对有效性和可靠性的量度方法有所不同。

1.6.1 模拟通信系统有效性与可靠性

1. 有效性

对模拟通信系统,有效性可用传输信号的频带来度量。对于同样的消息,采用不同的调制方式传输,需要的频带宽度也不相同。比如,模拟调制中采用的双边带调幅占用的频带宽度是单边带调幅的两倍;又如,宽带调频信号的频带宽度远大于一般调幅信号的频带宽度。因此从有效性考虑,传输相同信号所需要的频带越窄,则传输的有效性越高。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性用接收端输出信号功率 S 与噪声功率 N 之比,即信噪比 (S/N) 来度量。不同的调制方式在同样信道中传输,输出信噪比也不相同,信噪比越大,抗干扰能力越强,可靠性越高。比如调频广播可靠性远大于调幅广播可靠性。

1.6.2 数字通信系统有效性与可靠性

1. 有效性

对数字通信系统,有效性用码元传输速率或频带利用率来度量。

码元传输速率 R_B 定义为单位时间 (s) 内传输的码元数目,其单位为波特 (Baud),简称为 Bd, $1 \text{ Bd}=1 \text{ 码元/s}$,因此码元速率也称为波特率。如果传输每个码元所需的时间是 T (s),则码元速率为

$$R_B = 1/T \text{ (Bd)} \quad (1.6-1)$$

注意这里对码元采用何种进制没有限制,可以是二进制的,也可以是多进制的。

信息传输速率 R_b 定义为单位时间 (s) 内传输的比特数目,其单位是 b/s (或 bps)。信息传输速率也简称为比特率。常把码元传输速率和信息传输速率统称为传输速率。

由于等概率发送的二进制码元所携带的信息量为 1 b ,而等概率发送的 M 进制码元所携带的信息量为 $\log_2 M$ (b),因此信息速率 R_b 与码元速率 R_B 存在下面的关系

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (1.6-2)$$

数字通信的频带利用率 η 定义为:所传输的信息速率 R_b 或码元速率 R_B 与系统带宽 B 之比,其单位为 $\text{b}\cdot\text{s}^{-1}/\text{Hz}$ 或 Bd/Hz ,即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \quad \text{或} \quad \eta = \frac{R_B}{B} \quad (1.6-3)$$

频带利用率是衡量数据通信系统有效性的重要指标，这是因为在比较通信系统有效性时，不能仅看信号的传输速率，还要看其占用的频带宽度。

【例 1-5】 某信息源输出四进制等概率信号，码元宽度为 $125 \mu\text{s}$ ，求码元速率和信息速率。

【解】 码元宽度 $T=1.25 \times 10^{-4} \text{s}$ ，故码元速率为

$$R_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{1.25 \times 10^{-4}} = 8000 \text{ (Bd)}$$

信息速率为

$$R_b = R_B \log_2 M = 8000 \times \log_2 4 = 1.6 \times 10^4 \text{ (b/s)}$$

2. 可靠性

数字信号码元在传输过程中，由于信道不理想以及噪声的干扰等因素，使接收到的码元可能会出现错误，这称之为误码。误码的多少用误码率 P_e 来衡量，表示单位时间内错误接收的码元数与发送的总码元数之比，即

$$P_e = \frac{\text{错误接收的码元数}}{\text{发送的总码元数}} \quad (1.6-4)$$

误码率是传输系统可靠性的度量，是一个无量纲的数，误码越多，误码率越大，可靠性越差。

数字通信的可靠性也可用误信率来度量，它表示单位时间内错误接收的比特数与发送的总比特数之比，即

$$P_b = \frac{\text{错误接收的比特数}}{\text{发送的总比特数}} \quad (1.6-5)$$

1.7 MATLAB 与通信仿真

1.7.1 MATLAB 简介

MATLAB 是 Matrix Laboratory（矩阵实验室）的简称，是美国 MathWorks 公司推出的商用数学软件，是国际公认的优秀工程应用开发环境。MATLAB 功能强大、简单易学、编程效率高，深受科技工作者的欢迎，也特别受到非计算机专业科技人员的青睐。

MATLAB 的基本数据单位是矩阵，它的指令表达式与数学、工程中常用的形式十分相似，因此用 MATLAB 解算问题比用 C 语言和 FORTRAN 语言等来完成相同的事情要简捷得多。在进行科学计算和工程运算方面，MATLAB 能使通常难以实现的运算和功能变得简单而准确，其产生的工作进程和效率是用通常的编程方法所无法比拟的。

高版本的 MATLAB 语言是建立在流行的 C++ 语言基础上的，其语法特征与 C++ 语言十分相似，而且更为简单，符合科技人员对数学表达式的书写格式。MATLAB 语言可移植性好，可拓展性极强，这也是 MATLAB 能够深入到科学研究及工程计算各个领域的重要原因。

MATLAB 在函数图形绘制方面也同样具有很强的优势，可以将向量和矩阵用图形表现出来，并进行多种形式的标注。高层次的作图包括二维和三维的可视化、图像处理、动画和表达

式作图。高版本的 MATLAB 对整个图形处理功能做了很大的改进和完善，使它在图形的光照处理、色度处理以及四维数据的表现等方面具有出色的处理能力。对一些特殊的可视化要求，例如图形对话框，MATLAB 也有相应的功能函数，保证了用户不同层次的要求。另外，MATLAB 还在图形用户界面（GUI）的制作上有了很大的改善，使得对这方面有特殊要求的用户能够得到满足。

MATLAB 对许多专门的领域开发了功能强大的模块集和工具箱，用户可以直接使用工具箱进行学习和应用，而不需要自己编写代码。目前，MATLAB 已经把工具箱延伸到了科学研究和工程应用的诸多领域，如通信、信号处理、图像处理、数据采集、数据库接口、小波分析、优化、电力系统仿真等。

1.7.2 通信仿真技术

实际的通信系统是功能结构相当复杂的系统，对这个系统做出的任何改变都可能影响到整个系统的性能和稳定。因此，在对原有的通信系统做出改进或建立一个新系统之前，通常对这个系统进行建模和仿真，通过仿真结果衡量方案的可行性，从中选择最合理的系统配置和参数设置，然后再应用到实际系统中，这个过程就是通信仿真。

在对通信系统进行仿真之前，首先需要研究通信系统的特性，通过归纳和抽象建立通信系统的仿真模型。通信系统仿真是一个往复的过程，它从当前系统出发，通过分析建立起一个能够在一定程度上描述原通信系统的仿真模型，然后通过仿真实验得到相关数据。通过对仿真数据的分析可以得到相应的结论，然后把这个实验结论应用到对当前通信系统的改造中。如果改造后通信系统的性能并不像仿真结果那样令人满意，还需要重新实施通信系统仿真，这时候改造后的通信系统就成了当前系统，并且开始新一轮的通信系统仿真过程。因此，通信系统仿真一般分为 3 个步骤，即仿真建模、仿真实验和仿真分析。这 3 个步骤可能需要循环执行多次才能获得满意的结果。

对于通信系统的简单问题，一般可以通过直接编写程序的方法进行数值计算，从而在编程的实践过程中加深对通信原理基础理论的理解，获得直观的仿真效果。但对于较为复杂的问题，往往以 MATLAB 自带的 Simulink 作为建模和仿真的平台。“Simulink”中的“Simu”表示它可用于系统仿真，“link”表示它可进行系统连接。在 Simulink 环境下，可以在屏幕上调用现成的模块，并将它们适当连接起来以构成系统的可视化模型。建模以后，以该模型为对象运行仿真程序，从而对模型进行仿真，并可以随时观察仿真结果和干预仿真过程。Simulink 建模直观，贴近系统工程设计的思维模式，将强大的数值计算能力和丰富的数据可视化能力、友好的图形用户界面融合为一体。

通信技术是在实践中不断发展完善起来的，也应该在实践中进行学习和使用。因此，在本书的主要章节中，力图通过一些短小的 MATLAB 程序、可视化图形等来加强对通信原理基本概念和基本理论的学习与理解，并在第 11 章中利用 Simulink 仿真平台，对常用的一些数字通信系统进行建模和仿真，从而避免单纯学习通信理论知识，却无法在实践中进行应用的局面。

1.8 本章小结

通信的目的是为了传输消息中所包含的信息，通信中形式上传输的是消息，但本质上传输的是信息。

通信系统就是用电信号（或光信号、声信号）传输信息的系统，一般包含信源、发送设备、信道、噪声源、接收设备、信宿 6 个大的部分。利用模拟信号来传输信息的系统是模拟通信系统，利用数字信号来传输信息的系统是数字通信系统。

与模拟通信比较，数字通信的主要优点表现在：抗干扰能力强，无噪声积累；便于加密处理；便于存储、处理和交换；可通过差错控制编码的方法，来减小信息传输中的误码率，提高通信系统的可靠性等。主要缺点表现在：需要较大的传输带宽；对同步系统要求高，需要相对复杂的设备支持。随着通信技术朝着小型化、智能化、高速和大容量的方向迅速发展，数字通信最终会完全取代模拟通信。

离散消息的信息量可采用消息出现概率的对数来定量描述，出现的概率越低，所包含的信息量越大。零概率事件的信息量等于无限大；必然事件的概率等于 1，信息量等于 0。

信息源平均信息量是指传输的每个符号中所含信息量的统计平均值，又称为信源的熵。

评价通信系统好坏的指标主要有两个：有效性和可靠性。模拟通信系统的有效性和可靠性分别用带宽和信噪比来衡量；数字通信系统的有效性和可靠性分别用码元传输速率和误码率来衡量。

现代通信系统的研究、设计和开发离不开系统建模和计算机仿真，利用 MATLAB 编程和 Simulink 仿真是设计现代通信系统的重要手段。

思考题

- 1-1 通信系统一般由哪几个大的部分所组成？各组成部分的功能是什么？
- 1-2 简述数字通信的主要优缺点。
- 1-3 什么叫作基带信号？
- 1-4 VHF 和 UHF 属于什么频段的电磁信号？有哪些典型应用？
- 1-5 离散信号和连续信号的平均信息量如何表示？
- 1-6 串行传输与并行传输有哪些主要特点？
- 1-7 单工、半双工和全双工通信如何定义，有哪些主要应用？
- 1-8 通信系统的主要性能指标有哪些？对模拟信号和数字信号，它们是如何表示的？
- 1-9 误码率和误信率如何定义，两者之间的关系是怎样的？
- 1-10 什么是频带的利用率？引入频带利用率的意义是什么？
- 1-11 MATLAB 与通信系统设计有怎样的关系？

习题

- 1-1 英文字母 E 出现的概率为 0.105，Q 出现的概率为 0.001，求字母 E 和 Q 的信息量。
- 1-2 某信源符号集由 A、B、C 和 D 组成，每一符号独立出现，出现的概率分别为 1/4、1/8、1/8 和 1/2，求：
 - (1) 每个符号的信息量；
 - (2) 信源的熵；
 - (3) 每个符号等概率出现时信源的熵。
- 1-3 某数字通信系统用正弦载波的 4 个相位 0 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 来传输信息，这 4 个相位是互相独立的，求：
 - (1) 当 4 个相位在每秒内出现的次数分别为 500、125、125、250 时，每个符号所包含的平均信息量；
 - (2) 此通信系统的码元速率和信息速率。

1-4 已知某四进制离散等概信源 (0, 1, 2, 3), 其符号出现概率分别为 1/2, 1/4, 1/8, 1/8, 且互相独立, 信源发送的消息为 13201010100201300200100210300101020010030103210, 求:

- (1) 消息中实际包含的信息量;
- (2) 用熵的概念计算消息的信息量。

1-5 某信息源的符号集由 A、B、C、D、E 组成, 每个符号独立出现, 出现的概率分别为 1/4、1/8、1/8、3/16 和 5/16, 信源以 2 000 Bd 速率传送信息, 求:

- (1) 传送 1 h 的信息量;
- (2) 传送 1 h 可能达到的最大信息量。

1-6 某系统采用脉冲组方式传送信息, 已知每个脉冲组中包含 4 个信息脉冲和 1 个休止脉冲, 每个信息脉冲和休止脉冲的宽度均为 1 ms, 且 4 个信息脉冲等概出现, 求:

- (1) 码元传送速率;
- (2) 平均信息速率。

提示: 休止脉冲不包含信息, 在计算信息速率时应将它去掉。

1-7 消息源由相互独立的字母 A、B、C、D 所组成, 对传输的每一个字母用二进制码元编码, 即 A 编为 00, B 编为 01, C 编为 10, D 编为 11, 每个二进制脉冲宽度为 $T_b=5$ ms, 求

- (1) 4 个字母等概出现时, 传输的码元速率和平均信息速率;
- (2) 4 个字母不等概出现, 且 $P(A)=1/4$, $P(B)=1/5$, $P(C)=1/4$, $P(D)=3/10$ 时, 传输的码元速率和平均信息速率。

1-8 有一个四进制数字通信系统, 码元速率是 1 kBd, 连续工作 1 小时后, 接收端接收到的错误码元数目为 20 个。

- (1) 求系统的误码率;
- (2) 如果 4 个符号独立等概, 且错一个码元时发生 1b 信息错误, 求误信率。

1-9 已知一个独立等概的四进制数字传输系统的误码率为 5×10^{-6} , 该系统的信息速率为 4 800 b/s。求接收端接收到 300 个错误码元所需的时间。

1-10 数字通信系统 A 传输速率为 2 400 Bd, 数字通信系统 B 传输速率为 3 600 Bd, 在同一时间测量时, A 系统测到 120 个错误码元, B 系统测到 240 个错误码元, 试从有效性和可靠性两方面比较这两个系统的性能。