

第1章 绪 论

1.1 通信的基本概念

人类在生产生活和社会活动中总是伴随着信息的传递，信息在空间或（和）时间上的传输就是通信。在通信的研究中，常涉及三个紧密联系而又互相区别的概念，即消息、信号和信息。消息是由信源产生的、由通信系统传输的具体内容，消息中包含信息。信号是消息的物理载体，是消息的具体表现形式，如文字、声音、图形等。而信息则是消息中对接收者而言新的、有意义的且可被理解的东西，因而是抽象的。如“今天是星期一”，这是一个用文字信号来承载的消息，对于不知道今天是星期几的接收者而言提供了一个有价值的东西。同样的消息可以用不同形式的信号来承载，如“今天是星期一”这个消息是用文字信号来承载的，也可以用语言来承载，还可以用信号灯来承载。而同样的信号，在不同场合可能承载的是不同的消息。

通信普遍存在于人类生活之中，如人与人之间的交谈就是一个通信过程。对于远距离的通信，在古代有烽火台、驿站等方式，而在现代则有电话、电报、电视、电子邮件等方式。现代的通信系统都是以电信号作为消息的载体，因此也称为电信系统。

1.2 通信系统模型

1.2.1 通信系统一般模型

通信系统模型一般包括信源、发送机、信道、接收机和信宿，如图 1-1 所示。

信源也称发信者，产生待传输的消息信号，如语音、文字、图像、数据等。如果信源产生的原始消息信号不是电信号的形式，则需要通过转换器将其转换为电信号。如麦克风能将声音信号转换为电信号，而图像传感器则能将图像信号转换为电信号。

信道是将载荷消息的电信号从发送端传送到接收端的传输媒质，可以是架空明线、电缆、光缆等有线信道，也可以是传输电磁波的自由空间（即无线信道）。信号在信道中的传输过程总是伴随着噪声的干扰。图 1-1 中的噪声是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集中表示。

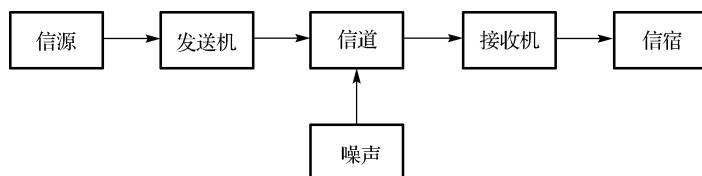


图 1-1 通信系统模型

通信系统中发送机的基本功能是将信源产生的原始电信号变换成适合在信道中传输的信号。接收机的功能是从有干扰的接收信号中恢复出相应的原始电信号。而信宿（也称收信者）的功能是将接收机输出的电信号转换成原始形式的消息信号。

1.2.2 模拟信源与数字信源

如果一个信源输出的消息来自于一个元素数量有限的消息集，则为数字信源。反之，如果一个信源输出的消息来自于一个元素数量无限的消息集，则为模拟信源。例如，一个电话机键盘的符号有数字 0~9，以及符号*和#，共有 12 种符号（消息），因此就是一个数字信源。而麦克风的输出是幅度连续取值的信号，是一个模拟信源。

模拟信源产生的信号通过模数变换后可变换成有限取值的信号，此时把模拟信源和模数变换器合在一起看作等效数字信源。

模拟信源产生的消息是用模拟信号来承载的。一个信号如果其一个或几个参量，如幅度、频率、相位等是连续变化的，则称为模拟信号，模拟信号示意图如图 1-2 所示。

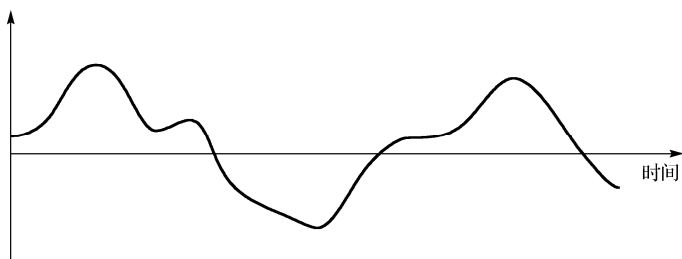


图 1-2 模拟信号示意图

数字信源产生的消息是用数字信号来承载的。一个信号如果其参量，如幅度、频率、相位等，只能取离散值，也就是取值的数量是有限的，则称为数字信号，数字信号示意图如图 1-3 所示。

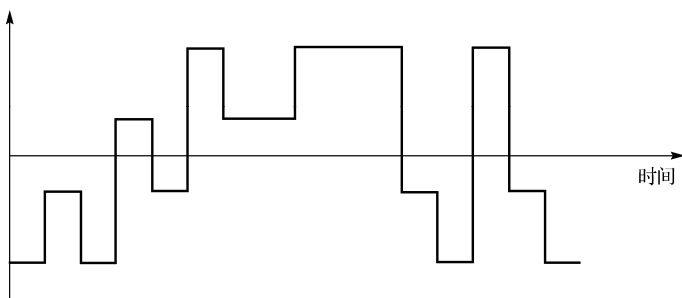


图 1-3 数字信号示意图

需要注意的是，时间上是否离散并不是区分信号为模拟信号还是数字信号的特征。时间离散信号如果其取值是连续的，则仍然是模拟信号。区分模拟和数字信号的关键在于：数字信号是以一个特定的时间间隔发送消息，这个消息又称为符号。而在一个间隔内，承载消息的信号波形可以是时间连续的，也可以是时间离散的，但信号波形的种类数是有限的。如图 1-4 所示的两种幅度调制信号，图(a)中信号的幅度可以连续变化，因此是模拟信号，即在第 3 章中要介绍的模拟调幅信号；而图(b)中的信号幅度在一个符号时间间隔内是

固定的，但不同的时间间隔内可以不同，共有4种幅度，其波形也只有4种，因此是数字信号，也就是将在第6章中介绍的幅移键控信号。

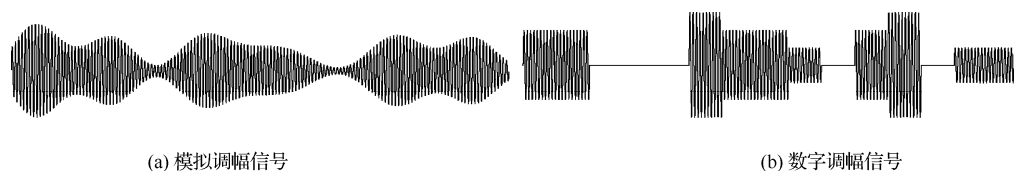


图 1-4 模拟调幅和数字调幅信号示意图

1.2.3 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号传输模拟消息的通信系统，其系统模型如图 1-5 所示。

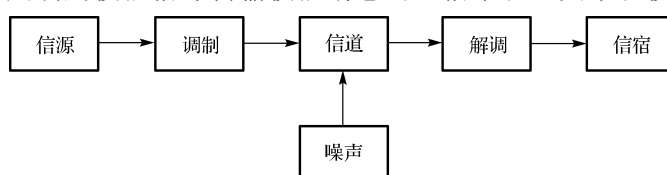


图 1-5 模拟通信系统模型

模拟信源输出模拟消息，并把消息变换成原始的模拟电信号。原始的电信号的频率范围一般在零频率附近，称为低通信号，也称为基带信号。

调制器的作用是将原始信号变换成适合于信道传输的信号。如果信道只能传送高频的带通信号，则需要通过调制将基带信号的频谱进行搬移，从零频率附近搬移到载波频率附近，变换成适合在信道中传输的频带信号。此外，调制器通过变换信号形式，还具有提高信号的抗噪声性能、并有效利用信道传输频带的功能。在接收端，解调器则将接收到的已调制信号还原成原始电信号。

信宿将接收到的电信号转换为消息的原始信号形式。

在模拟通信系统中，如果不对基带信号进行频谱搬移，则称为基带传输系统。有线电话就是一个典型的基带通信系统。绝大多数模拟通信系统中需要对基带信号进行频谱搬移，称为频带通信系统，如无线电广播系统。

1.2.4 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号传输数字消息的通信系统，其系统模型如图 1-6 所示。

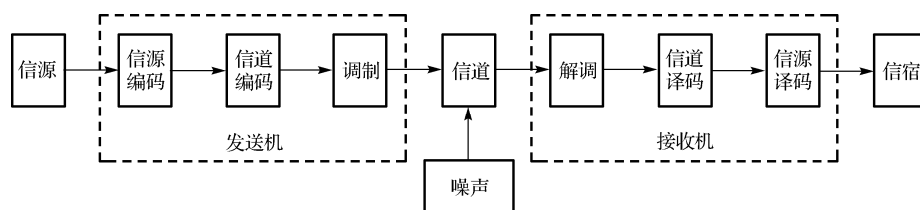


图 1-6 数字通信系统模型

信源（或等效数字信源）按照一定的节奏产生数字消息。原始的数字消息可能会有较大的冗余，信源编码的作用就是在不失真或允许一定失真的条件下，用尽可能短的数字序列来表示信源产生的消息，提高信息传输的有效性，因此又称为有效性编码。如“清华大

学”、“北京大学”、“北京邮电大学”、“重庆邮电大学”可以用“清华”、“北大”、“北邮”、“重邮”等简称，其也包含了与原名称一样的信息。又如一张标准的音乐 CD 可存储 74 分钟的标准 PCM 格式的音乐，而如果存储 MP3 格式的音乐，则在音质差别很小的情况下可存储约 700 分钟的音乐。这里 MP3 格式就是一种采用信源编码进行压缩后音乐的存储格式。通过信源编码对信源消息进行压缩后，可在占用相同的信道资源下，传输更多的消息；或者在传输同样的消息时减少占用的信道资源。

承载消息的信号在信道上传输时，由于受到噪声的影响，接收端接收到的信号与发送信号不会完全相同，因此有可能导致部分消息出现传输错误。信道编码就是在表示消息的码元序列中按照一定的规则增加一定数量的冗余码元，接收方通过该规则识别或纠正在传输中出现的错误。由于信道编码用于差错控制，所以又叫差错控制编码或纠错编码。下面是一个重复码的例子。

假如要传送 A、B 两个消息，两个消息出现的概率相同。编码方案 1：消息 A 用“0”表示，消息 B 用“1”表示。此时编码后的序列没有冗余，但若传输中产生错码，接收端无法发现，没有检错纠错能力。编码方案 2：消息 A 用“00”表示，消息 B 用“11”表示，增加了一个冗余位。若传输中产生一位错码，变成“01”或“10”，接收端可判断出有错，但无法确定错码位置，不能纠正，具有检出一位错码的能力。编码方案 3：消息 A 用“000”表示，消息 B 用“111”表示，增加了两个冗余位。传输中产生一位和两位错码，接收端都能检测出来，具有检出两位错码的能力，或者接收端根据“大数”法则进行判决，能纠正一位错码，具有纠正一位错码的能力。

重复码的效率很低，实际上采用的信道编码要复杂得多，同时效率也要高得多。

与模拟通信系统中的调制器类似，数字通信系统中数字调制器的作用是将经过纠错编码的序列映射为适合于信道传输的信号波形。 M 进制数字调制器可产生 M 种信号波形，分别与 M 种编码序列对应。多数数字通信系统中都采用二进制的信道编码，因此信道编码器输出的是二进制序列。 M 进制数字调制器将 $\log_2 M$ 个编码数据为一组，对应地映射为一个信号波形。

数字调制器输出的信号如果是带通信号，则称为数字频带调制；如果输出的是低通信号，则称为数字基带调制。

数字解调器对被噪声污染的接收信号进行处理，判断最有可能的发送信号波形，恢复相应的（二进制）数字序列。

数字解调器恢复得到的数字序列可能有错，信道译码器对解调器输出的接收码字进行检错或纠错，最大可能正确地恢复出原始的消息序列。解调器也可以不对信号波形进行判决，而是给出符号的软信息，信道译码器利用该软信息进行译码，可获得更好的性能，称为软判决译码；相应地，利用解调器判决后的序列进行译码称为硬判决译码。

数字通信系统还有一个重要的组成部分，即同步系统。由于数字通信中传输的符号是时间离散的，因此需要通信系统的收、发两端按照相同的节奏进行消息的发送和接收。同步系统的功能就是使接收端数据的接收与发送端的发送同步，有序而准确地接收和恢复消息。

1.2.5 数字通信的特点

数字通信系统传输的波形种类有限，这是区别于模拟通信系统最根本的特点，也使其相比较模拟通信系统有如下优点。

(1) 抗噪声性能好, 可避免噪声积累。信号在信道传输的过程中, 不可避免地要受到噪声的污染, 导致信号波形失真。在数字通信系统中, 由于发送的波形种类有限, 接收机可通过接收信号判断发送的是何种波形。只要信号波形失真限制在一定程度, 接收方就能以很大的概率正确识别出发送的信号波形, 正确恢复出发送的消息。在长距离传输时, 可在收发之间设置中继器, 中继器对叠加了噪声的信号波形进行判决, 然后再根据判决结果重新产生信号波形发送。这种中继称为再生中继, 其信号再生的示意图如图 1-7 所示。通过中继再生信号波形, 去除了这个中继段中叠加的噪声, 使得噪声不会在传输中积累, 传输距离不受限制。而在模拟通信系统中, 由于信号波形取值有无限多种, 中继器不能通过再生的方法消除叠加在信号上的噪声, 只能对信号进行放大, 但放大信号的同时噪声也被放大了, 因此在模拟通信系统中噪声会随传输距离的延长而积累。为保证一定的接收信号质量, 模拟通信系统的传输距离是受到限制的。

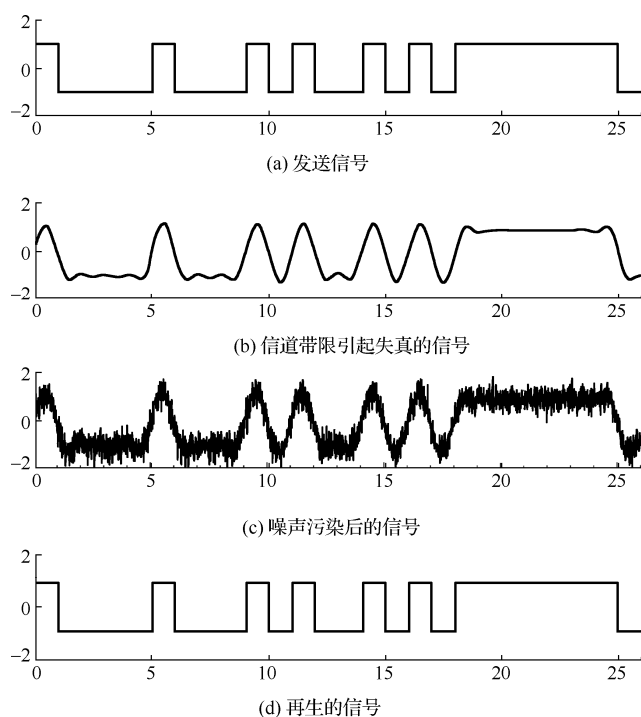


图 1-7 数字再生中继信号示意图

(2) 可通过信道编码进一步改善传输质量, 提高传输的可靠性。

(3) 易加密。数字通信系统中传输的消息可通过数学方法和数字信号处理技术增强保密性能。

(4) 数字信号便于进行信号处理。数字信号可以采用数字信号处理技术进行处理, 可以用数字逻辑电路实现, 也可在数字信号处理器上, 甚至在通用的处理器上用软件的方式实现。同时, 数字信号处理可以实现的功能也远比模拟信号处理复杂和灵活。

(5) 可通过信源编码压缩冗余, 提高传输的有效性。

(6) 不同的数字消息通过信源编码后可统一为形式相同的二进制的数字流, 可在同一个通信系统中混合进行传输和处理。

数字通信系统中需要复杂的同步系统，相比较模拟通信系统需要耗费更多的系统资源实现收发设备间，甚至整个通信网内设备间的同步。另外，传输同样的信息，数字通信系统一般需要消耗更多的带宽，但随着数字通信技术的发展，数字通信系统的频谱效率也在不断提高。

1.2.6 广播通信与点对点通信

广播通信系统中（见图 1-8(a)）有一个发送者，有多个接收者，信源发送的消息可被多个接收者接收。无线电广播和电视就是广播通信。

点对点通信系统中（见图 1-8(b)）一个发送者连接一个接收者，信源发送的消息只送给一个接收者。常规的电话通信就是典型的点对点通信。

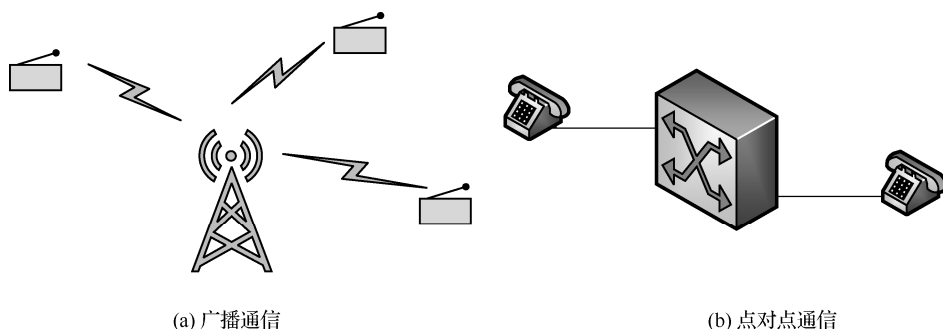


图 1-8 广播通信与点对点通信

1.2.7 单工与双工通信

通信可以是单向通信也可以是双向通信。单工通信只能在一个方向上传输消息，如无线广播系统中，收音机只能接收广播电台发送的信号，而不能向电台发送信号，就是单工通信（见图 1-9(a)）。如果能双向传输消息，则称为双工通信。如果双向传输能同时进行，则称为全双工通信（见图 1-9(c)），如电话通信系统；而如果双向传输不能同时进行，则称为半双工通信（见图 1-9(b)），如对讲机通信。

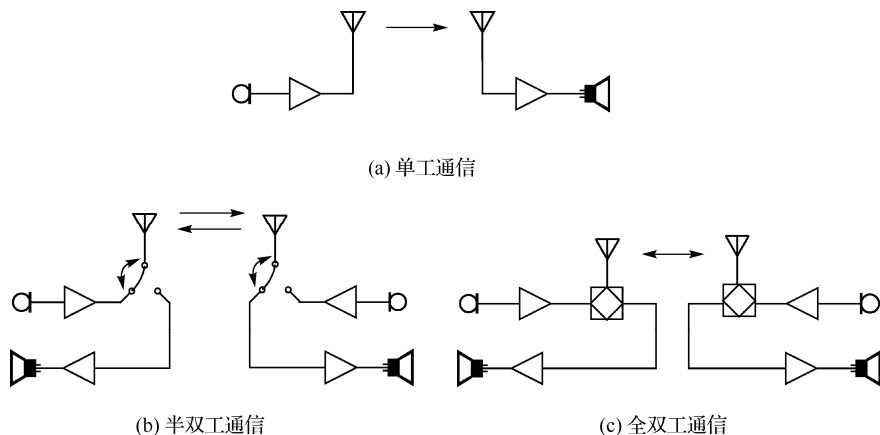


图 1-9 单工与双工通信

1.2.8 存储系统

存储系统也是一个通信系统（见图 1-10），数据的存储和读出过程就是一个通信过程。例如可读写光盘存储设备中，通过激光头向光盘写入数据的过程可以看作是将数据送入信道，而用激光头将数据从光盘中读取并输出的过程也就是接收机接收信道输出的信号并恢复为原始数据的过程。这里，作为存储介质的光盘就是通信系统中的信道。通过存储介质的写入和读出，可实现信息在时间上或（和）空间上的转移。

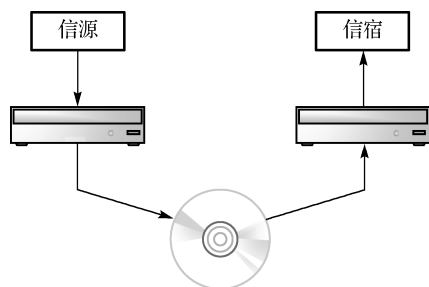


图 1-10 存储系统也是通信系统

1.3 信 道

信道是发信者和收信者间电信号传输的通道。根据信号在信道中的传输模式，信道可分为导向传输信道和自由传输信道两大类。前者主要是电缆、光纤等有线信道，后者则主要是无线信道。

1.3.1 信道对信号的影响

信道对所传输信号有两个基本的影响，一是信号在传输过程中会衰减，信号功率会随着传输距离的增加而下降；二是信号传输中会叠加噪声。由于噪声是叠加在信号上的，因此又称为加性噪声。噪声可来自于通信设备的外部，即外部噪声，也可来自于设备的内部，即内部噪声。

外部噪声又可分为人为噪声和自然噪声两大类。人为噪声是由人类的活动产生的，如电钻运行和电气开关瞬间造成的电火花、汽车点火系统产生的电火花、荧光灯产生的干扰、家电设备产生的电磁波辐射，以及其他通信设备和系统产生的电磁干扰等。自然噪声是自然界中存在的各种电磁波辐射，如闪电、大气噪声，以及来自太阳和银河系等的宇宙噪声等。

内部噪声主要是通信设备内部的电子器件中电子的热运动所产生的热噪声。热噪声的强度与器件的工作温度有关，温度越高，噪声的功率就越大。

通信系统模型中的“噪声源”是分散在通信系统各处的加性噪声的集中表示。在通信系统的理论研究中，通常认为电子器件中的热噪声是主要的噪声。根据概率论中的中心极限定理，热噪声可认为服从高斯分布，且在相当宽的频率范围内其功率谱是均匀分布的。因此，通信系统中的噪声常常被近似地描述成加性高斯白噪声。关于加性高斯白噪声将在第 2 章中详细讨论。

信道对信号的另一个影响是会引起信号的畸变，这种畸变不是加性的。如信道可能会对信号中的不同频率成分产生不同的衰减和延迟，从而导致信道输出的信号波形发生畸变。

1.3.2 有线信道

在有线信道上信号是导向传输。常见的有线信道包括双绞线、同轴电缆、光纤等。

1. 双绞线

双绞线（见图 1-11）由两根包裹绝缘材料的实心铜线扭绞而成，一般将多对双绞线一起放在一个保护套内，做成双绞线电缆。双绞线的特征阻抗为 $90\sim 110\Omega$ 。通过扭绞，可以增强抵抗电磁干扰的能力。双绞线的传输性能与铜线的线径有关，铜线越粗，传输性能越好。双绞线的传输距离较近，传输信号的频带从几百赫兹到几百千赫兹，短距离传输的情况下甚至可到上百兆赫兹。例如，电话接入采用的就是双绞线，由于话音频率较低，传输损耗相对较低，传输距离最远可达几千米。局域网中也采用双绞线，如常见的四类线、五类线，信号频率从几十兆赫兹到几百兆赫兹，传输距离较短，一般只有几十米。

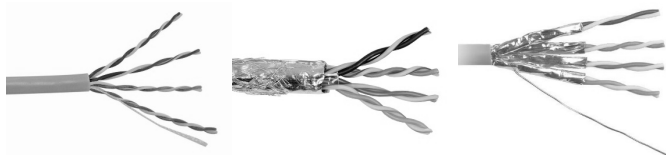


图 1-11 双绞线

2. 同轴电缆

同轴电缆（见图 1-12）由同轴的内导体、外导体，以及分割内外导体的介电层和最外面的保护层组成。内导体采用铜线，外导体采用铜或者其他金属（如铝）制成。根据同轴电缆的尺寸，有小同轴电缆、中同轴电缆、大同轴电缆。电缆的尺寸越大，传输性能越好，可用带宽和传输距离都更大。同轴电缆的特征阻抗为 50Ω 或者 75Ω 。相比较双绞线，同轴电缆受外部电磁辐射的影响更小，传输带宽更宽，传输损耗更小。在光纤大量应用之前，长途传输干线主要采用同轴电缆。另外，有线电视网中用户接入也主要采用同轴电缆。同轴电缆信号频带从几兆赫兹到几百兆赫兹。

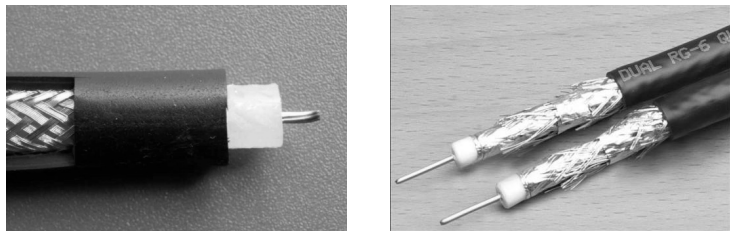


图 1-12 同轴电缆

3. 光纤

光纤（见图 1-13）是光导纤维的简称。光纤由内芯、包层和外覆层构成，有时也将几根光纤组合在一起，加上包套构成光缆。光纤的内芯是用高度透明的石英玻璃制作的。由于内芯和包层的折射率不同，光到达内芯和包层间时发生全反射，使得光一直在光纤中传播。相比较电导线，光缆有以下优点：①传输带宽大，光传输时载波频率如果为 $2\times 10^{14}\text{Hz}$ ，以载波频率的 10% 计算，其带宽可达到 $2\times 10^{13}\text{Hz}$ ；②传输损耗可低至 0.1dB/km ，无中继直接传输的距离就可达到几百千米；③对电磁干扰有天然的免疫力；④光纤内芯的直径与人的头发相当，体积小、重量轻；⑤制成光纤的主要材料是石英砂，价格低廉，因此制作成本远低于电缆。

光纤已得到了广泛的应用，长途传输的干线基本采用光纤。随着光纤价格的下降，光纤也在接入网中广泛使用。

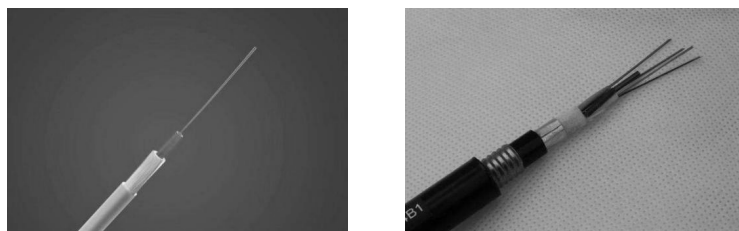


图 1-13 光纤和光缆

1.3.3 无线信道和电波传播

无线通信中，信号的传输为自由传播方式，真空、大气层等都是信号传输的介质。无线通信中信号为电磁波，而电磁波的能量由天线辐射到传输介质中。为获得较高的辐射效率，天线的物理尺寸应在电磁波波长的十分之一以上。例如，在 1MHz 上的中波广播，广播电台的天线尺寸要在 30 米以上。

由于电磁波传播的开放性，同时适合用于通信的频谱范围有限，需要由专门的机构来管理和分配频谱。国际上频谱的管理机构是国际电信联盟（ITU）。国际电信联盟是联合国的一个机构，总部位于瑞士的日内瓦。国际电信联盟制定频谱划分和使用的标准，而在各个国家则由各自的管理部门负责本国国内频谱的使用。各国在使用频谱时一般会遵从国际电信联盟的标准。在中国，负责管理无线电频谱的机构是工业和信息化部无线电管理局（国家无线电办公室）。

表 1-1 给出了无线电频谱的频带、名称、传播特性和典型应用，表 1-2 给出了超高频和特高频频带各频带的名称。

表 1-1 电磁波频带名称（1）

频 带	名 称	传播特性	典型应用
3~30kHz	甚低频（VLF）	地波传播	远距离导航，潜艇通信
30~300kHz	低频（LF）	地波传播	远距离导航，海洋通信无线信标
300~3000kHz	中频（MF）	地波传播，夜间天波传播	海事通信，无线定向，调幅广播
3~30MHz	高频（HF）	电离层反射传播	业余无线电，国际广播，军用通信
30~300MHz	甚高频（VHF）	视线传播	电视，调频广播，航空导航
0.3~3GHz	极高频（UHF）	视线传播	电视，蜂窝通信，导航，雷达，GPS，微波通信
3~30GHz	超高频（SHF）	视线传播	卫星通信，雷达
30~300GHz	特高频（EHF）	视线传播	卫星通信，雷达
$10^3 \sim 10^7$ GHz	红外线，可见光，紫外线	视线传播	光通信

电磁波的传播特性与其频率有关，主要的传播模式有三种：地波传播、天波传播和视线传播。

地波传播模式是电磁波沿着地球表面传播（见图 1-14），是频率在 2MHz 以下电磁波

的主要传播模式。中波调幅广播的电磁波主要就是以这种模式进行传播的。这种传播模式的噪声源主要是大气噪声、人为噪声和电子器件的热噪声。大功率的中波广播电台的覆盖范围可达上百千米。

表 1-2 电磁波频带名称（2）

频 带	名 称	频 带	名 称
1.0~2.0GHz	L	27.0~40.0GHz	Ka
2.0~4.0GHz	S	33.0~50.0GHz	Q
4.0~8.0GHz	C	40.0~75.0GHz	V
8.0~12.0GHz	X	75.0~110.0GHz	W
12.0~18.0GHz	Ku	110.0~170.0GHz	D
18.0~27.0GHz	K		

天波传播模式是电磁波依靠电离层的反射进行传播的模式（见图 1-15），是 2~30MHz 频率范围内电磁波的主要传播模式。在一天的时间中，受到太阳光照射变化的影响，电离层的厚度和结构也在变化，导致其对电磁波的作用特性也在变化。电磁波到达电离层后，可能有三种情况：反射、吸收、穿透。只有第一种情况下电磁波才会返回地面。电离层由 D、E、F₁、F₂ 等层组成，D 层吸收电磁波，吸收程度与电磁波的频率成反比，E 层和 F 层则能反射频率在 30MHz 以下的电磁波。白天受到阳光照射，D 层电离浓度很高，能够大量吸收电磁波，频率较低的电磁波基本被吸收，只有频率较高的电磁波才能反射回地面。在夜间，D 层浓度降低，频率较低的电磁波也能到达 E、F 层并被反射回地面，甚至中波频段的电磁波也能通过天波方式传播。经过电离层的反射，电磁波能够传输到很远的地方，因此收音机的短波频段能够收听到距离很远的电台的广播，夜间效果更好。由于电离层会随时间变化，因此天波传播的传播特性也会随时间变化。

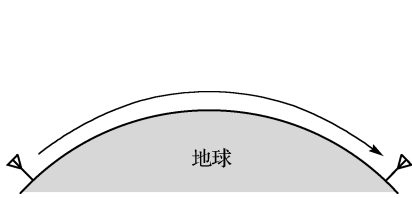


图 1-14 地波传播示意图

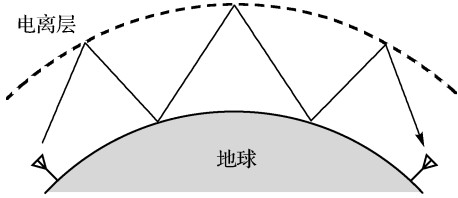


图 1-15 天波传播示意图

频率超过 30MHz 的电磁波能直接穿过电离层，基本不会反射回地面，同时也不能沿地球表面传播，其主要的传播模式是视线传播。视线传播就是收发天线间的直线传播。卫星通信时电磁波的传输模式就是视线传播。在地面通信中，由于地球是球体，采用视线传播时的传输距离受到地球曲率和收发天线高度的限制，天线越高，视线距离越远，如图 1-16 所示。因此采用视线传播方式时，收发天线都会设在山顶、高塔或者建筑物的顶部。

不同类型的无线通信系统使用的电磁波频带不尽相同，根据电磁波的传播方式，常见的无线信道有无线电视线中继信道、卫星中继信道、无线电广播信道和移动通信信道等。

（1）无线电视线中继信道

无线电中继通信系统的工作频率在几百兆赫兹到几吉赫兹，电磁波为视线传播模式，传输距离受到地球曲率的限制，一般在 100km 以内。当发送端和目的端距离过远时，需要

在二者之间设置中继站进行转发。这种通信系统中采用定向天线,通过中继转发实现通信,发送端到目的端间的传输通道称为视线中继信道,如图 1-17 所示。无线电视线中继信道容量较大,性能较为稳定。



图 1-16 视线传播示意图

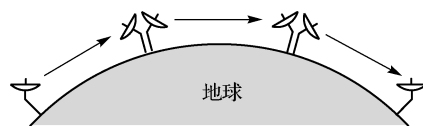


图 1-17 无线电视线中继传输示意图

(2) 卫星中继信道

卫星通信是利用人造卫星作为中继站进行中继转发的通信方式,如图 1-18 所示。由于卫星高度较高,卫星信号的覆盖区域很大。如在地球同步轨道(离地面 35866km)上的卫星,其覆盖范围最大可达地球表面积的三分之一。卫星中继信道中电磁波采用视线传播模式,覆盖区域广,不受地面环境的限制,传输性能较为稳定。但由于传输距离较长,卫星中继信道的传输延迟较大。

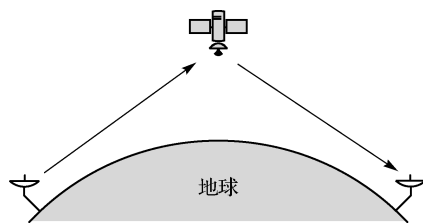


图 1-18 卫星中继传输示意图

(3) 无线电广播信道

无线电广播中,中波广播使用的频段在几百千赫兹到几兆赫兹间,短波广播使用的频段在几兆赫兹到几十兆赫兹间,而调频广播则在一百兆赫兹附近。中波波段的电磁波主要为地波传播方式,信道的大气噪声水平较高,传输损耗也较大。短波波段的电磁波主要为天波传输方式,传输距离较远,但信道特性波动较大。中波和短波波段由于频率不高,相对传输带宽较小。调频广播使用的频带在超短波范围,采用视线传播,传输质量相对稳定,但覆盖范围受地球曲率限制在几十千米范围。

(4) 移动通信信道

地面移动通信系统采用的频带在几百兆赫兹到几吉赫兹范围内。为了获得较大的系统容量,移动通信系统采用蜂窝方式,基站发射功率比广播电台小得多,基站的覆盖范围在几十米到几千米间。由于基站和终端间存在大量的障碍物和散射物,发射机发射的信号会经过多条路径传输后到达接收机,即多径传输。多径传输导致移动通信信道存在衰落现象,同时由于收发设备和环境物体的移动性,移动通信信道还存在时变性。相对其他几种无线信道,移动通信信道的特性要复杂得多。

1.4 信息及其度量

通信的目的是实现信息在发送者和接收者之间的传输。前面已经介绍,消息是信息的具体表现形式,而信号是消息的载体。本节介绍如何定量地衡量消息中包含的信息量。

如下面两个消息:“老张的彩票中奖了”,“老杨的彩票没有中奖”,显然前者提供给我们的信息量要大得多,因为彩票中奖的可能性要比不中奖的可能性小得多。又如,“老张的彩票中了头奖”与“老李的彩票中了末奖”两个消息,前一个消息提供的信息量更多,因

为中头奖的可能性要比中末奖的可能性小。可见，一个消息提供的信息量实际上与这个消息对应的事件发生的可能性有关，或者说，在事件发生前，我们对事件是否发生的不确定度有关。如在第 1 个例子中，不中奖的不确定度显然小于中奖的不确定度。反映事件可能性或不确定度的数学工具是概率，香农给出了通过概率来计算消息包含的信息量的计算公式：

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.4-1)$$

式中， $P(x)$ 为消息（或事件） x 出现的概率。信息量 I 有两个含义：消息 x 发出前， x 的不确定性；收到消息 x 后获得的信息量。

信息量的单位与对数的底 a 有关。当 $a=2$ 时，单位为“比特”（bit）；当 $a=e$ 时，单位为“奈特”（nat）；当 $a=10$ 时，单位为“哈特莱”（Hartley）或“哈特”（hart）。需要注意的是，“比特”（bit）也被用来表示二进制数据码元，其含义与作为信息量单位的“比特”是不同的。

【例 1.1】 某信源发送的消息为 4 种符号 0、1、2、3 之一，它们出现的概率分别为 3/8、1/4、1/4、1/8，求消息序列 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 总的信息量。设序列中各符号的出现是独立的。

解： 4 个符号的信息量分别为

$$I_0 = \log_2 \frac{8}{3} = 1.415 \text{ (bit)}$$

$$I_1 = I_2 = \log_2 4 = 2 \text{ (bit)}$$

$$I_3 = \log_2 8 = 3 \text{ (bit)}$$

序列中“0”出现 23 次，“1”出现 14 次，“2”出现 13 次，“3”出现 7 次。总的信息量为

$$I_{\text{all}} = 23 \times I_0 + 14 \times I_1 + 13 \times I_2 + 7 \times I_3 = 107.545 \text{ (bit)}$$

平均每个符号信息量为

$$\bar{I} = \frac{I_{\text{all}}}{57} = 1.886 \text{ (bit)}$$

信源发出的消息会有多种，还需要知道信源发送消息的平均信息量。假设信源 X 发出的消息共有 N 种，分别为 $x_1, x_2, \dots, x_N$ ，发出这些消息的概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_N)$ ，则信源发出消息的平均信息量为各消息信息量的统计平均：

$$H(X) = -\sum_{n=1}^N P(x_n) \log_a P(x_n) \quad (1.4-2)$$

信源发送消息的平均信息量称为信源的熵， $a=2$ 时的单位为“比特/符号”。

信源的熵与信源输出消息的概率分布有关，可以证明，当各消息等概率出现时信源的熵最大。

【例 1.2】 求例 1.1 中信源的熵和同样长度的序列的平均信息量。

解：

$$H(X) = -\sum_{n=1}^N P(x_n) \log_2 P(x_n)$$

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{3}{8}\log_2\frac{3}{8} - \frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4} - \frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4} - \frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8} \\
 &= 1.9055 \text{ (比特/符号)}
 \end{aligned}$$

序列的平均信息量为

$$I = 57 \times H(X) = 108.6135 \text{ (bit)}$$

1.5 通信系统的主要性能指标

通信系统中有两个主要的资源：发送功率和信道带宽。一些系统中带宽资源更为稀缺，这种系统称为带宽受限系统；另一些系统则功率资源更为稀缺，称为功率受限系统。如移动通信系统，收发设备间距离较近，信道损耗较小，且设备供电也较方便，功率资源相对较为充裕，但由于需要在有限的可用频谱范围内为大量的用户提供服务，带宽资源更为稀缺，是典型的带宽受限系统。深空通信系统或卫星通信系统，传输距离远，传输中信号损耗大，航天器或卫星的发射功率又受供电的限制而较小，使得接收机接收功率非常小，而可用带宽相对较大，是典型的功率受限系统。

通信系统设计的目标就是要尽可能高效地利用带宽和功率资源实现信息的可靠传输，因此衡量通信系统性能的基本指标有两个，一是有效性，反映通信系统利用资源的效率；二是可靠性，反映系统信息传输的可靠程度。

1.5.1 数字通信系统的主要性能指标

数字通信系统的有效性一般可用频带利用率来衡量。先介绍几个概念。

码元传输速率：也称为符号传输速率、传码率，是系统单位时间传输的码元（或符号）数，单位为符号/秒或波特（Baud），简称为“Bd”。本书中码元传输速率用符号 R_s 来表示。

信息传输速率：或称为传信率，是系统单位时间传输的信息量，单位是比特/秒（bit/s，bps）。本书中信息传输速率用符号 R_b 来表示。

若信源的熵为 $H(X)$ （单位：比特/符号），则传信率和传码率之间的关系为

$$R_b = R_s H(X) \quad (1.5-1)$$

若系统的传输符号为 M 进制符号，即信源产生 M 种符号，在各符号等概率出现时，信源的熵为最大值 $\log_2 M$ （比特/符号），此时传信率和传码率的关系为

$$R_b = R_s \log_2 M \quad (1.5-2)$$

在信道带宽一定的情况下，系统实现的传信率越高，则有效性越高，系统的有效性可用频带利用率（又叫频谱效率、带宽效率）来衡量。频带利用率定义为传信率与信道带宽的比值：

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (1.5-3)$$

式中， B 为信道的带宽（单位为 Hz）。频带利用率表示通信系统占用单位带宽资源时实现的信息传输速率，单位为 bit/s/Hz，也可写为 bit/(s·Hz)、bps/Hz。某些情况下，也使用单位

带宽上实现的符号传输速率作为评价通信系统的有效性的指标,称为符号频带利用率,主要用来衡量波形设计的有效性,其定义式为:

$$\eta_s = \frac{R_s}{B} \quad (1.5-4)$$

单位为 Baud/Hz。相应地, η_b 也被称为信息频带利用率。

数字通信系统接收机的根本任务是根据受噪声污染、失真了的接收信号恢复发送的消息(信息),而恢复的过程可能会出现错误。数字通信系统的可靠性可用接收机恢复消息时的差错概率来衡量。有两种基本的错误概率:误符号率(symbol error rate, SER)和误比特率(bit error rate, BER)。误符号率是符号传输错误的概率,误比特率是信息比特传输错误的概率。在通信系统中,可通过测量传输错误的符号(比特)占传输的总符号(比特)的比例来获得误符号率(误比特率),即

$$\begin{aligned} \text{SER} &= \frac{\text{错误的符号数}}{\text{传输的总符号数}} \\ \text{BER} &= \frac{\text{错误的比特数}}{\text{传输的总比特数}} \end{aligned} \quad (1.5-5)$$

1.5.2 模拟通信系统的主要性能指标

模拟通信系统的有效性可用传输带宽来衡量。模拟通信系统中,采用不同的传输方法传输同样的模拟消息,需要的带宽可能是不同的。传输同样的消息占用的带宽越小,则系统的有效性就越高。如在同样的模拟基带信号条件下,采用不同的调制方式得到的传输信号的带宽会不一样。

模拟通信系统的可靠性可用接收机输出信号的信噪比来衡量。信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)是信号功率与噪声功率的比值。信号的信噪比越大,则信号的失真就越小,信息接收者错误理解消息的可能性就越小。如在电话通信中,如果最终由受话器还原的语音中混有很大的噪声,则一方会听不清对方所说的话,有可能听错,而信噪比越高,听错的可能性就越小。

通信系统的有效性和可靠性是相互制约的,提高有效性会导致可靠性降低,而提高可靠性又有可能降低有效性。通信系统设计的一个重要目标就是在一定的可靠性要求下,尽可能地提高消息传输的有效性;或反过来,在一定有效性的要求下,尽可能地提高消息传输的可靠性;或者在一定资源制约下,实现有效性和可靠性间的一个折中。

1.5.3 香农公式

前面介绍了通信系统中有发送功率和信道带宽两个主要资源,实际上这两个资源也可以看成是信道资源。通信系统设计的目标就是高效地利用信道资源实现信息的可靠传输。那么理论上通信系统能达到的有效性和可靠性最高值是多少呢?香农给出了信道极限传输能力,即信道容量,反映了通信系统所能达到性能的上界。

当一个信道中的噪声为加性高斯白噪声(additive white Gaussian noise, AWGN)时称为加性高斯白噪声信道。当 AWGN 信道的带宽为 B Hz,信号功率为 S W,噪声功率为 N W 时,其信道容量为

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1.5-6)$$

该公式即著名的香农公式。信道容量为信息可靠传输条件下通过信道传输信息的最大速率，其单位与传信率一样，即 bit/s。

关于香农公式，给出以下讨论和说明。

(1) 任何一个信道，都有信道容量，信道容量由信道的物理特性决定，与通信系统采用的通信方式无关。如果通过信道传输的信息速率不大于信道容量，则理论上存在一种方法，可以使信息以任意小的差错率通过信道传输；否则，如果信息传输速率大于信道容量，则信息在传输中必然会出现差错。

(2) 香农公式中的 $\frac{S}{N}$ 是接收机接收信号的信噪比。增大信噪比，信道容量增大。增大信道带宽，信道容量也增大。

(3) 可以通过不同信噪比和信道带宽的组合实现同样的信道容量，也就是说当信道容量一定时，信噪比和带宽资源可以互换。

(4) 无限增大信道带宽时并不能使信道容量无限增大。若 AWGN 的单边功率谱密度为 N_0 (单位为 W/Hz) 时，噪声功率为 $N = N_0 B$ 。当带宽无限增大时，噪声功率也无限增大，信道容量的极限值为

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0 B} \right) \approx 1.44 \frac{S}{N_0} \quad (1.5-7)$$

可见在信道带宽无限增大时，信道容量是有限的。

【例 1.3】 已知彩色电视图像由 5×10^5 个像素组成。设每个像素有 64 种彩色度，每种彩色度有 16 个亮度等级。假设所有彩色度和亮度等级的组合机会均等，像素间统计独立，画面间也相互独立。(1) 试计算每秒传送 25 个画面所需的信道容量；(2) 如果接收机信噪比为 30dB，为了传送彩色图像所需信道带宽为多少？

解：(1) 每像素显示的色彩共有 64×16 种，则每个像素的平均信息量为

$$I_p = \log_2(64 \times 16) = 10 \text{ (bit)}$$

每帧图像的平均信息量为

$$I_f = 5 \times 10^5 \times I_p = 5 \times 10^6 \text{ (bit)}$$

由于每秒传送 25 个画面，信息传输速率就为 25 个图形的信息量：

$$R_b = 25 \times I_f = 1.25 \times 10^8 \text{ (bit/s)}$$

因为信息速率必须小于或等于信道容量，所以信道容量为

$$C \geq R_b = 1.25 \times 10^8 \text{ (bit/s)}$$

(2) 信噪比为 $\frac{S}{N} = 10^{30/10} = 1000$ ，根据香农公式得到最小信道带宽为

$$B \geq \frac{C}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)} = \frac{1.25 \times 10^8}{\log_2(1 + 1000)} = 1.254 \times 10^7 \text{ (Hz)} \approx 12.5 \text{ (MHz)}$$

【例 1.4】 设传真图像在电话线路中传输，一个图像有 2.25×10^6 个像素，每个像素有 12 个亮度等级。假设所有的亮度等级等概，像素间的取值无关。电路带宽 3kHz，信噪比 30dB。求传输一个图像所需要的最短时间。

解： 每像素的平均信息量为

$$I_p = \log_2 12 = 3.58 \text{ (bit)}$$

每个图像的平均信息量为

$$I_f = 2.25 \times 10^6 \times I_p = 2.25 \times 10^6 \times 3.58 = 8.06 \times 10^6 \text{ (bit)}$$

信道容量为

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) = 3 \times 10^3 \times \log_2 (1 + 1000) = 2.99 \times 10^4 \text{ (bit/s)}$$

传输一个图像的最短时间为

$$T = \frac{I_f}{R_b} \geq \frac{I_f}{C} = \frac{8.06 \times 10^6}{2.99 \times 10^4} = 2.696 \times 10^3 \text{ (s)} = 4.49 \text{ (min)}$$

式 (1.5-6) 给出的信道容量实际是单位时间内信道能可靠传输的信息量的最大值，该值还与信道带宽有关。通信系统的研究和设计中，香农公式的另一种形式是带宽单位化时的信息传输速率的最大值，也称为信道的极限带宽效率（或频谱效率），即

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \text{ (bit/s/Hz)} \quad (1.5-8)$$

有的文献中的信道容量就是单位带宽时的信道容量，可以通过单位进行区分。

前面提到在一定的信道容量下，带宽和信噪比可以互换，下面讨论在带宽无限增大时对信噪比要求的变化情况。记系统传输一个信息比特的能量为 E_b （称为比特能量），由能量与功率关系可知

$$E_b = S \times T_b = S / R_b \Rightarrow S = E_b R_b \quad (1.5-9)$$

式中， T_b 为传输一个比特的时间，与传信率 R_b 互为倒数。假设系统以最高传信率，即信道容量 C 进行传输，则信号功率与比特能量间的关系为

$$S = E_b C \quad (1.5-10)$$

将上式代入式 (1.5-8)，并注意到噪声功率为 $N = N_0 B$ ，得到

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{C}{B} \cdot \frac{E_b}{N_0} \right) \quad (1.5-11)$$

进一步得到

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{2^{C/B} - 1}{C/B} \quad (1.5-12)$$

式中， $\frac{E_b}{N_0}$ 是一个无量纲的物理量，也是信噪比的一种度量（后面的章节将进行详细的介绍），称为比特信噪比、归一化信噪比。

对式 (1.5-11) 求带宽 B 趋近于无穷大, 也就是带宽效率 $\frac{C}{B}$ 趋于零的极限, 得

$$\begin{aligned}\lim_{C/B \rightarrow 0} \frac{E_b}{N_0} &= \lim_{C/B \rightarrow 0} \frac{2^{C/B} - 1}{C/B} = \ln(2) \\ &= 0.693 = -1.6\text{dB}\end{aligned}\quad (1.5-13)$$

上式表示, 在通信系统中, 可以通过增大带宽, 即降低频谱效率来降低对信噪比的要求, 但要保证信息的可靠传输, 信噪比最低不能低于 -1.6dB , 这就是在信息论和编码理论中著名的香农限。

根据式 (1.5-12) 绘出比特信噪比与带宽效率的关系如图 1-19 所示。图中 $R_b=C$ 的曲线是由香农公式确定的极限带宽效率, 也就是理论上通信系统在可靠通信条件下, 在特定信噪比下可能达到的最大带宽效率; 曲线右下方区域为理论上通信系统在可靠通信条件下, 在特定信噪比下, 能达到的带宽效率的区域; 而曲线左上方区域为理论上通信系统无法实现可靠通信的带宽效率区域。

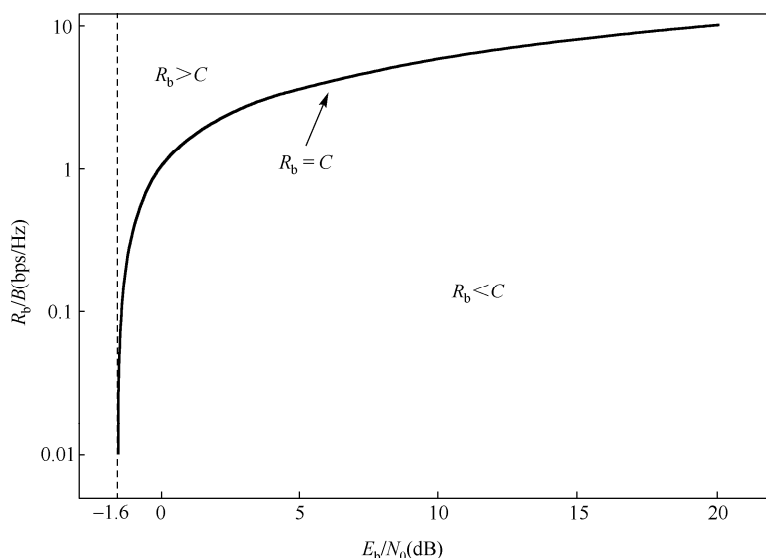


图 1-19 比特信噪比与带宽效率的关系

1.6 通信发展简史

1831 年, 法拉第发现了电磁感应现象, 开启了电通信时代的大门。本节简单介绍电通信发展中的重要历史事件。

1834 年, 高斯 (Gauss) 和韦伯 (Weber) 发明了电报, 莫尔斯 (Morse) 进一步发展和完善了电报, 设计了莫尔斯电码, 并在 1837 年实验成功。1844 年第一条长途电报线路在华盛顿和巴尔的摩间投入运营。

1864 年, 麦克斯韦发展了电磁理论, 并预言了电磁波的存在。赫兹 (Hertz) 则在 1887 年用实验的方式证明了电磁波的存在。1894 年洛奇 (Lodge) 演示了 150 码距离的无线通信。1895 年马可尼 (Marconi) 实现了 2 千米距离的无线电信号的传输。1901 年, 马

可尼在纽芬兰岛的信号山 (Signal Hill) 接收到了从英格兰康沃尔 (Cornwall) 发送的无线电信号, 二者相距 2700 多千米。

1875 年, 贝尔 (Bell) 发明了电话, 第 1 次实现了声音通过电信号的实时传输。1897 年, 史端桥 (Strowger) 发明步进制自动电话交换机。

1904 年, 弗莱明 (Fleming) 发明真空二极管, 1906 年福雷斯特 (Forest) 发明真空三极管。

1918 年, 阿姆斯特朗 (Armstrong) 发明了超外差式无线电接收机。1920 年第一个调幅广播电台开始广播。随后阿姆斯特朗发明了调频, 并在 1933 年验证了第一个调频通信系统。

1928 年, 法恩斯沃思 (Farnsworth) 验证了第一台电视机, 1929 年兹沃里金 (Zworykin) 也对电视进行了验证。1936 年英国广播公司 (BBC) 的第一个商用电视广播系统开始播出。

1928 年, 奈奎斯特 (Nyquist) 发表了电报信号传输的经典论文。

1937 年, 里弗斯 (Reeves) 发明了语音信号的脉冲编码调制。

1943 年, 诺斯 (North) 发明了匹配滤波器。范弗莱克 (Van Vleck) 和米德尔顿 (Middleton) 在 1946 年独立得到了相似的结果。

1948 年, 香农 (Shannon) 发表论文“通信中的数学理论”, 奠定了数字通信和信息论的理论基础。随后, 编码理论开始发展。1949 年和 1950 年高莱 (Golay) 和汉明 (Hamming) 分别提出了最早的纠错编码——高莱码和汉明码。

1948 年, 布拉顿 (Brattain)、巴丁 (Bardeen) 和肖克利 (Shockley) 发明三极管。1958 年诺伊斯 (Noyce) 和基尔比 (Kilby) 制作出第一片集成电路。

1962 年, 电视转播通信卫星 Telstar I 发射。1965 年商用通信卫星开始提供服务。

1963 年, 加拉格尔 (Gallager) 提出 LDPC 码; 1993 年, Berrou 等提出 Turbo 码; 1995 年, Mackay 等重新发现 LDPC 码, 这是两种逼近香农极限的信道编码。

1966 年, 高锟和霍克汉姆 (Hockham) 发明光纤。1977 年光纤通信系统开始商用。

1969 年, Internet 的前身 ARPANET 开始联机。1990 年代 Internet 开始流行。

1981 年, 第一个模拟蜂窝系统 NMT 商用, 1983 年 AMPS 系统商用。1988 年数字蜂窝系统 GSM 系统商用。

1997 年, IEEE 802.11b 标准发布, 1993 年、2003 年, IEEE 802.11a、IEEE 802.11g 标准发布, 无线局域网开始普及。

2001 年, 第 3 代移动通信系统开始商用; 2009 年, 第 4 代移动通信系统开始商用。

习 题 1

1-1 英文字母中 c、e、o、x 出现的概率分别为 0.023、0.105、0.001、0.002, 试求它们的信息量。

1-2 某信源发出的符号有 A、B、C、D 四种, 各符号出现是相互独立的, 出现的概率分别为 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/8$, 试求该信源的熵。若信源每秒钟发出 1000 个符号, 信源发出信息的速率为多少?

1-3 电话机的数字键盘包括数字 0~9, 以及“*”和“#”共 12 个按键。应用中, 每

个数字键被按的概率均为 0.099，而 “*” 和 “#” 键被按的概率都为 0.005。

- (1) 求每按一键后电话机产生的平均信息量；
- (2) 若采用等长的二进制码组来表示按键，则需要用多长的码组来表示按键？

1-4 电话信道的传输频带为 300~3400Hz。

- (1) 若信噪比为 30dB，信道容量为多少？
- (2) 假设信源发出信息的速率为 9600bit/s，为实现信息的可靠传输，信道的信噪比至少应为多少？

1-5 传输一个 A4 幅面的黑白灰度图像，幅面尺寸为 210mm×297mm，扫描分辨率为 100dpi×100dpi（dpi 即每英寸长度上的像素点数，1 英寸=25.4mm）。共 256 个灰度等级，假设扫描图像点间的灰度取值相互独立。若通过传输频带为 300~3400Hz 的电话信道传输，信噪比为 20dB，传输所需要的最短时间为多少？

1-6 假设电视图像的分辨率为 640×480，每个像素点的色彩用 24bit 的码组表示，每个像素点的色彩是相互独立的，每秒钟 25 帧图像，帧与帧之间也是相互独立的。假设信道信噪比为 30dB。试求实时传输该电视图像所需的最小带宽。