

第 1 章 绪 论

【本章导读】

- 通信系统的模型
- 通信系统的分类
- 通信方式
- 通信系统的性能指标

1.1 通信的基本概念

什么是通信？简单地说，通信（communication）就是互通信息。具体地说，通信就是利用电信号（signal）传递消息（message）中的信息（information），信息、消息、信号之间关系密切。

自然界中，信息无处不在，万事万物都在传递着各种各样的信息。但是，信息又是无形的、抽象的，它必须依附于某种物理形式才能表现出来，如语音、图像、温度、文字、数据、符号等形式。可见，消息就是信息的外在物理表现形式，是系统传输的对象，具有多种形式。信息蕴含在消息中，是消息的内涵，或者说是消息中包含的不确定性，这里的“不确定性”是指消息中包含受信者事先未知的内容。例如，孩子出生前，是男是女的概率各占一半，出生后医生首次告诉父母是个男孩，则这条消息中包含有信息，如果护士再次告诉父母是个男孩，则这条消息就不含有信息了。同一个信息可用不同形式的消息来表达，如天气预报可用语音消息、也可以用文字消息来表达。消息的传输必须要有合适的物理载体，我们把传递消息的物理载体称之为信号。信号有多种形式，例如，面对面交流可以采用声音这个载体来传递消息，古代的烽火台是通过光（狼烟）这个载体来传递消息，而现代通信往往以电的形式来传递消息（如电报、电话、短信、E-mail等）。因此，信号是消息的物理载体，是消息的电表现形式。根据搭载消息的信号参量的取值连续或离散，信号分为模拟信号和数字信号。“连续”的含义是无穷多、不可数，“离散”的含义是有限种、可数的。因此，我们可以用图 1-1-1 来描述信息、消息和信号三者之间的关系。

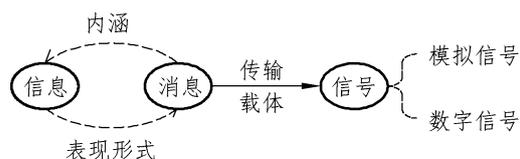


图 1-1-1 信息、消息和信号三者之间的关系

在现实的物理世界中，信号的种类千差万别，如语音信号、图像信号、温度信号等。但从数学的观点看，信号均可表示为一个或多个自变量的函数（function）。例如，语音信号是单变量函数，这个自变量为时间；图像信号是具有两个自变量的函数，这两个自变量就是图像中某一点的坐标。可见，函数就是信号的数学模型。因此，在讨论信号的有关问题时，“信号”与“函数”两个词、“ $s(t)$ ”与“ $f(t)$ ”两个符号通用。

在现实的物理世界中，信号通常都是一个时间的历程，随时间变化而变化，若从数学观点看，信号就是一个时间的函数（function）或者说函数是信号的数学模型。因此，在讨论信号的有关问题时，“信号”与“函数”两个词、“ $s(t)$ ”与“ $f(t)$ ”两个符号通用。

1.2 通信系统的组成和分类

1.2.1 通信系统的一般模型

通信的功能是由通信系统来实现的。通信系统是指完成信息传递的传输媒介和全部设备。以最简单的点对点通信为例，通信系统的一般模型如图 1-2-1 所示。

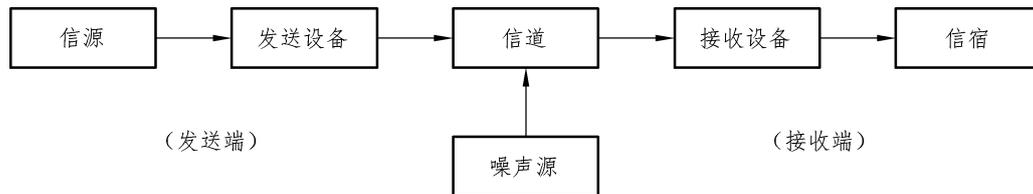


图 1-2-1 通信系统的一般模型

下面简要概述各组成部分的功能。

1. 信源

信源的功能是将各种不同形式的消息转换成原始电信号。根据消息种类的不同，信源可分为模拟信源和数字信源，模拟信源输出连续的模拟信号，如话筒、电视机和摄像机等；离散信源输出离散的数字信号，如电传机、计算机等各种数字终端。

2. 发送设备

发送设备的功能是将信源产生的信号变换成适合在信道上传输的信号。发送设备可能是调制电路、编码电路或滤波电路等。

3. 信道和噪声源

信道是传输信号的物理媒介。信道有多种形式，通常分为有线信道和无线信道，在有线信道中，信道可以是架空明线、双绞线、电缆或光缆，在无线信道中，信道可以是大气（自由空间）。

我们将信道中存在的不要的干扰电信号统称为噪声（noise）。噪声在通信系统中客观

存在且处处存在。噪声的来源是多方面，为分析方便起见，在通信系统模型中，将各种噪声集中由一个噪声源来表示。关于信道与噪声的详细内容将在第3章中讨论。

4. 接收设备

接收设备的功能是完成发送设备的反变换。接收设备可能是解调电路、译码电路或滤波电路等。

5. 信宿

信宿的功能与信源相反，即将原始电信号恢复为相应的消息，如扬声器。

图1-2-1所示的通信系统模型高度概括了各种通信系统传递信息的全过程，反映了通信系统的共性，本书的讨论也是围绕通信系统的模型展开的。

1.2.2 通信系统的分类

1. 按传输信号分类

根据判断信号的因变量的取值是连续还是离散，信号可分为模拟信号和数字信号。信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统，信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。其模型分别如图1-2-2和图1-2-3所示。

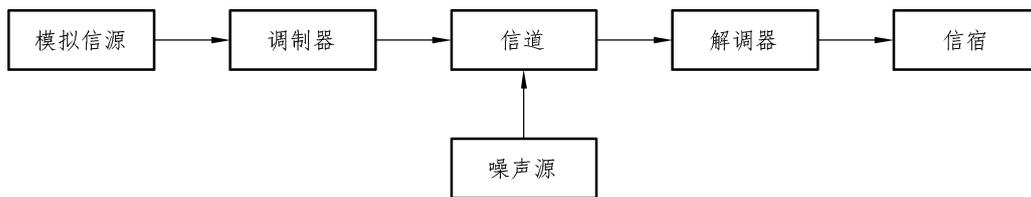


图 1-2-2 模拟通信系统模型

通信原理

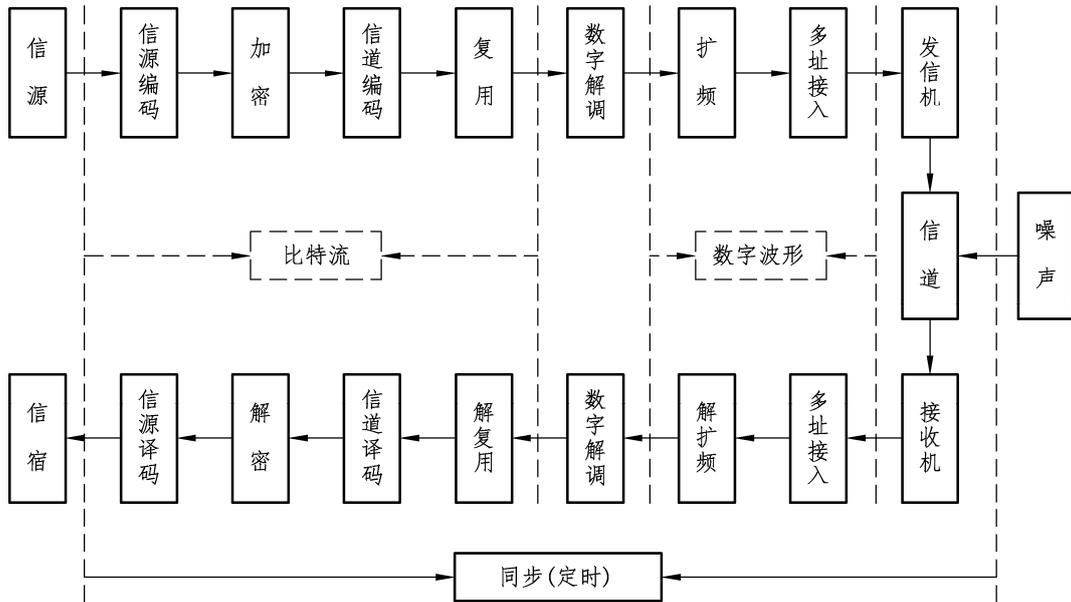


图 1-2-3 数字通信系统模型

比较图 1-2-1 和图 1-2-2 不难发现,模拟通信系统是在通信系统一般模型的基础上略加改变而成的,这里,发送设备是调制器,接收设备是解调器。在该系统中存在两种重要变换,第一种变换是在发送端的信源和接收端的信宿进行的,信源将非电量的连续消息转换成电信号(也称基带信号),信宿完成相反的变换。由于基带信号具有很低的频率分量,一般不宜直接进行传输,因而还要进行第二种变换,即把基带信号转换成适合在信道上传输的信号,并在接收端进行反变换,完成这种变换和反变换的设备通常是调制器和解调器。我们把待传输的基带信号称为调制信号,把经过调制的信号称为已调信号(也称频带信号或带通信号)。已调信号具有三个特征:一是携带基带信息;二是适合在信道上传输;三是信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频,即调制是实现频谱搬移的过程。

应该指出,除上述两种主要变换外,模拟通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射等信号处理过程。调制和解调两种变换在通信系统中起主要作用,而其他处理只是对信号进行波形或性能上的改善,不会使信号发生质的变化。

图 1-2-3 所示为一个较完善的数字通信系统模型。从图中可以看出,数字通信系统与模拟通信系统的主要区别是多了信源编码(译码)、加密(解密)、信道编码(译码)、复用(解复用)、数字调制(解调)、扩频(解扩频)和多址接入等模块。这里主要介绍一下信源编码(译码)和信道编码(译码)模块的功能。信源编码的功能主要有两个:一是将信源输出的模拟信号转换成数字信号,以实现模拟信号的数字化传输;另一个是通过相关措施降低码元速率(即减少编码位数),提高系统传输的有效性。信源译码是信源编码的逆过程。信道编码的主要功能是将信源编码输出的数字信号转换成适合信道传输的码型,以提高通信系统传输的可靠性。信道译码是信道编码的逆过程。

需要说明的是,实际的数字通信系统不一定包括图 1-2-3 的所有环节,比如数字基带传输系统中发送端就没有调制模块,而是有基带信号形成器,接收端也没有解调模块,而是有接收滤波器。还有些模块分散在系统各处,如同步(定时)系统。

数字通信系统与模拟通信系统相比，有很多优点，如抗干扰能力强，信号便于处理、变换、存储、加密等；缺点是需要较大的传输带宽和严格的收发同步。

2. 按传输媒介分类

按照传输媒介的不同，通信系统分为有线通信和无线通信。利用无线电波、红外线、超声波、激光等进行通信的系统称为无线通信系统，如广播系统、电视系统、移动电话系统等；利用导线（包括架空明线、同轴电缆、光缆或波导等）作为媒介的系统称为有线通信系统，如市话系统、有线电视系统等。

随着通信技术、计算机技术和网络技术的发展，单纯的有线或无线通信已越来越少，常常是“有线”中有“无线”，“无线”中有“有线”。

3. 按调制方式分类

按照信道中传输的信号是否经过调制，可将通信系统分为基带传输系统和频带（又叫调制或带通）传输系统。基带传输系统是将未经调制的信号直接进行传输，具体内容将在第6章中讨论；频带传输系统是将基带信号调制后送入信道进行传输，具体内容将在第7章中讨论。

4. 按通信业务分类

按照通信业务类型的不同，可将通信系统分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统和图像通信系统等。

需要说明的是，数字通信与数据通信习惯上的区分方法是：将模拟信号经数字化处理后，用数字信号的形式来传送的通信方式，称为数字通信；把信源本身发出的数字形式的消息（如计算机或其他数字终端作为信源发出的数据、指令等），不管用何种形式的信号来传输这类消息的通信方式，均称为数据通信。

5. 按工作波段分类

按照通信设备的工作频率（或波长）不同，分为长波通信、中波通信、短波通信和微波通信等。表 1-2-1 列出了无线电波的划分及其对应的应用领域。

表 1-2-1 通信用无线电波段划分表

波段	波长范围	频率范围	频段	主要用途
超长波	10 ~ 100 km	3 ~ 30 kHz	甚低频 (VLF)	高功率、长距离、点对点通信，如声呐、水下通信等
长波	1 ~ 10 km	30 ~ 300 kHz	低频 (LF)	长距离点对点通信，如导航、越洋通信等
中波	100 ~ 1 000 m	300 ~ 3 000 kHz	中频 (MF)	广播、遇险求救通信，港口船舶调度通信等
短波	10 ~ 100 m	3 ~ 30 MHz	高频 (HF)	中远距离的各种广播与通信，如电离层反射通信等
米波	1 ~ 10 m	30 ~ 300 MHz	甚高频 (VHF)	短距离通信、雷达、电视、交通管制及散射通信等
分米波	10 ~ 100 cm	300 ~ 3 000 MHz	特高频 (UHF)	卫星通信、微波接力通信、雷达、导航、全球定位等
厘米波	1 ~ 10 cm	3 ~ 30 GHz	超高频	短距离通信、波导通信、微波接力、雷达、

			(SHF)	空间通信等
毫米波	1 ~ 10 mm	30 ~ 300 GHz	极高频 (EHF)	遥感遥测、光通信等
亚毫米波	<1 mm	>300 GHz		

6. 按复用方式分类

传输多路信号有三种基本复用方式：频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用调制（频谱搬移）的方法使不同信号占用不同的频段，如图 1-2-4 (a) 所示；时分复用是用抽样（脉冲调制）的方法使不同信号占用不同的时隙，如图 1-2-4 (b) 所示；码分复用是用正交的脉冲序列分别携带不同信号，如图 1-2-4 (c) 所示。

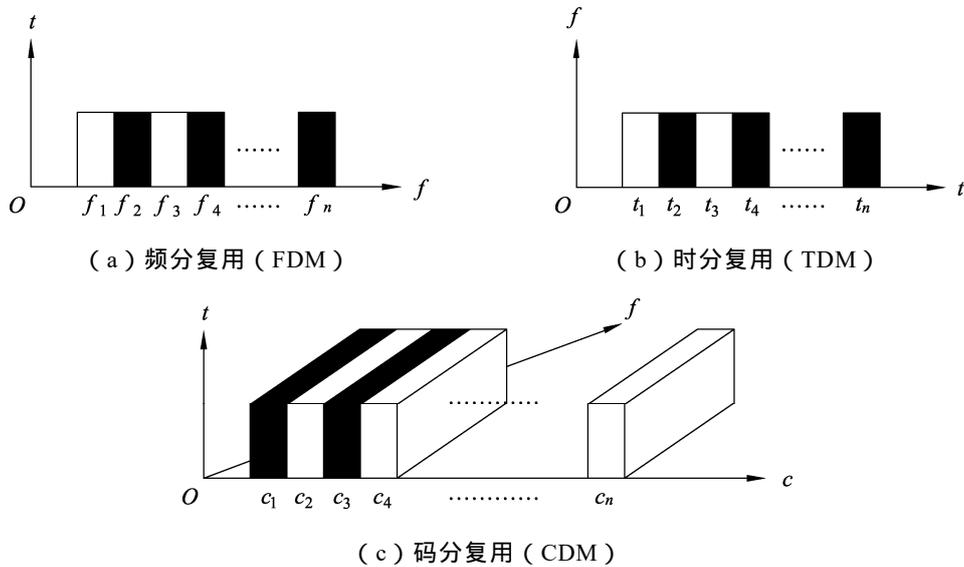


图 1-2-4 复用方式示意

另外，通信还有其他一些分类方法，如按用户类型可分为公用通信和专用通信。

1.3 通信方式

通信方式是指通信双方之间的工作方式或信号传输方式。

1.3.1 串行通信和并行通信

在数字通信中，常用时间间隔相同的符号（波形）来表示数字信号，这样的时间间隔内的符号（波形）称为码元，对应的时间间隔称为码元周期（码元长度，用符号 T_s 表示），它是承载信息的基本信号单位。在二进制数字通信系统中，码元有两种离散状态，多进制 (M)

数字通信系统中，码元的离散状态有 M 种。

按照数字信号码元排列方式的不同，可分为串行通信和并行通信。

串行通信是将数字信号码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输，如图 1-3-1 (a) 所示，远距离数字通信通常采用串行通信方式。

并行通信是将数字信号码元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 1-3-1 (b) 所示，近距离数字通信通常采用并行通信方式。

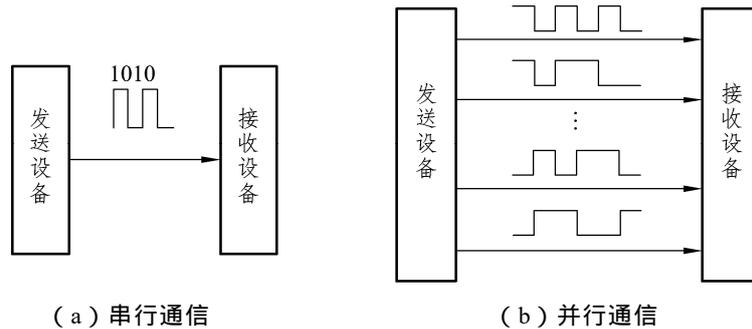


图 1-3-1 串行通信和并行通信

1.3.2 同步通信和异步通信

在数字通信中，发送端和接收端必须做到严格同步，按照信息传输过程中收、发两端采取的不同同步原理，可将信号的通信方式分为异步通信和同步通信两类。

1. 异步通信

异步通信一般是以字符为单位来传输信息的，而且每次只传送一个字符，按照空闲位、起始位、数据位、奇偶校验位、停止位的规则进行传输。由于异步通信中每一个字符的发送都是随机和独立的，并以不均匀的速率发送，所以这种通信方式称为异步通信。

具体传输过程：字符的传输由起始位（如逻辑电平 0）引导，表示字符的开始，其宽度为一个码元的时间，被传输字符的后面通常附加一个校验位（或不用），校验位后面为停止位（如逻辑电平 1），通常为 1、1.5 或 2 个码元宽度（可根据需要选择）。在下一个字符的起始位收到之前，线路一直处于逻辑 1 状态。接收端可根据从 1 到 0 的跳变来识别一个新字符的开始，如图 1-3-2 所示。

通信原理

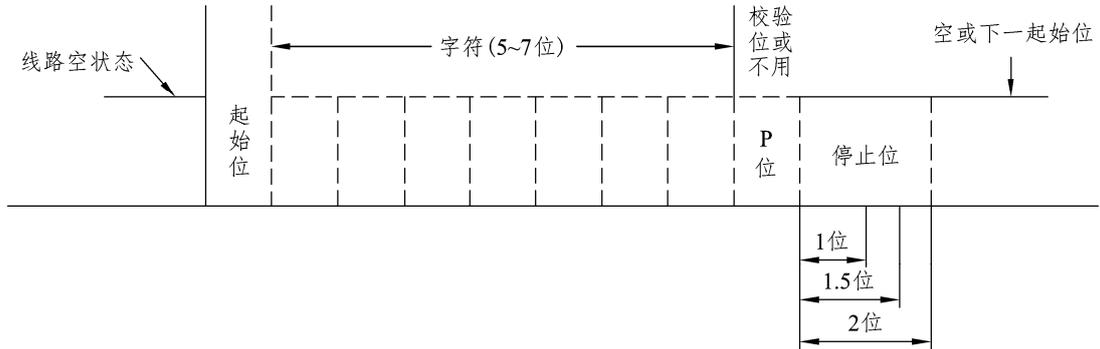


图 1-3-2 异步通信帧结构

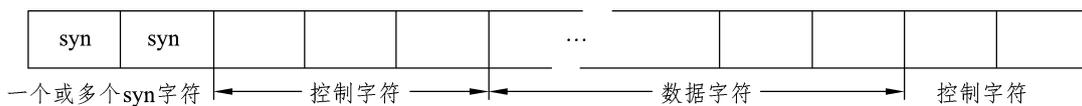
异步传输的优点是简单、可靠，适用于面向字符的、低速的异步通信场合。例如，计算机与 Modem（调制解调器）之间的通信就是采用这种方式。其缺点是通信开销大，每传输一个字符都要额外附加 2~3 位，通信效率比较低。例如，在使用 Modem 上网时，普遍感觉速度很慢，除了传输速率低之外，与通信开销大、通信效率低也密切相关。

2. 同步通信

同步通信不是以一个字符为单位而是以一个数据块为单位进行信息传输的。每个数据块的头部和尾部都要附加一个特殊的同步字符或比特序列(头部的称为前文,尾部的称为后文),这种加有前文和后文的一个数据块称为数据帧(或称组,或称包)。

前文 (preamble) 类似于异类通信中的起始位,用于通知接收方一个帧已经到达,但它同时还能确保接收方的采样速度和比特的到达速度保持一致,使收发双方进入同步;后文 (postamble) 类似于异类通信中的停止位,用于表示在下一帧开始之前没有别的即将到达的数据了。

图 1-3-3 所示为面向字符型和面向比特型的帧结构。面向字符型的方案中,每个数据块以一个或多个同步字符 (syn) 作为开始,后文是一个确定的控制字符;面向比特型的方案中,前文和后文则采用标志字段“01111110”区分一帧的开始和结束。



(a) 面向字符型的帧结构



(b) 面向比特型的帧结构

图 1-3-3 同步通信帧结构

同步传输通常要比异步传输快速得多，且通信开销较少。

1.3.3 点对点通信和网通信

按照通信设备与传输线路之间的连接类型，可分为点对点通信（专线通信，如图 1-3-4 所示）、点到多点和多点之间通信（网通信，如图 1-3-5 所示）。



图 1-3-4 点对点通信示意图

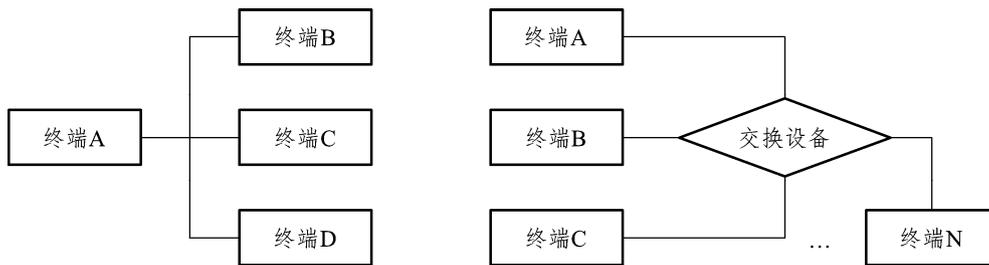


图 1-3-5 网通信示意图

由于通信网的基础是点对点通信，所以本书重点讨论点对点通信。

1.3.4 单工、半双工和全双工

对于点对点通信，按照信息传递的方向和时间，通信方式分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种。

单工通信是指信息只能单方向传输的工作方式，如图 1-3-6 (a) 所示。广播、遥控、无线寻呼等就是单工通信方式。这里，信号（消息）只能从广播发射台、遥控器和无线寻呼中心分别发送到收音机、遥控对象和 BP 机（寻呼机）上。

半双工通信是指通信双方都能收发信息，但不能同时进行收和发的工作方式，如图 1-3-6 (b) 所示。对讲机、收发报机等就是半双工通信方式。

全双工通信是指通信双方可同时进行收发信息的工作方式，如图 1-3-6 (c) 所示。固定电话、手机等就是全双工通信方式。



(a) 单工通信



(b) 半双工通信

通信原理



(c) 全双工通信

图 1-3-6 通信方式示意图

1.4 通信系统的主要性能指标

衡量一个通信系统性能优劣的基本因素是有效性和可靠性。有效性是指传输一定量信息时所占用的信道资源（频带宽度和时间间隔），或者说是传输“速度”的问题；可靠性是指信道传输信息的准确程度，或者说是传输“质量”的问题。这两个因素相互矛盾而又相互统一，并且还可以相互转换。

1.4.1 模拟通信系统的性能指标

模拟通信系统的有效性用信号在传输中所占用的传输带宽来表示，传输带宽越窄，有效性越好，反之越差；可靠性用接收端最终输出的信噪比来度量，输出信噪比越高，可靠性越好，反之越差。

信噪比是输出端信号的平均功率与噪声平均功率比值的简称，用 SNR (Signal to Noise Ratio) 或 S/N 表示，它的单位一般使用分贝 (dB)，其值为 10 倍对数信噪比，即 $SNR (dB) = 10 \lg(S/N)$ 。

1.4.2 数字通信系统的性能指标

数字通信系统的有效性可用码元传输速率、信息传输速率和频带利用率来衡量。

1. 码元传输速率 R_B

码元传输速率是指单位时间内传送码元的数目，又称为码元速率、波特率或传码率，用符号 R_B 来表示，单位为“波特”，常用符号“Baud”表示，简称为“B”。

$$R_B = \frac{1}{T_s}$$

需要注意的是，码元速率仅表示每秒钟传输的码元数，只与码元周期有关，而与何种进制的码元无关，码元的进制数取决于发送码元的通信系统。

2. 信息传输速率 R_b

信息传输速率又称为比特率或传信率。是指每秒钟传送二进制的位数，单位为比特/秒，简记为 b/s。

在二进制通信系统中，每个码元携带 1 比特的信息量，因此信息速率等于码元速率，但两者的单位不同。

在多 (M) 进制通信系统中，由于每个码元携带 $\log_2 M$ 比特的信息量，因此信息速率与码元速率的关系式为

$$R_b = R_B \log_2 M$$

3. 频带利用率 η

在比较不同的数字通信系统有效性时，单看它们的信息速率或码元速率是不够的，还应考虑传输信息所占用的频带宽度，即频带利用率。它定义为单位频带 (1 Hz) 内的传输速率，即

$$\eta_B = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Baud/Hz})$$

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1})$$

数字通信系统的可靠性常用误码率 P_e 和误比特率 P_b 来衡量。

1. 误码率

误码率是指接收的错误码元数与传输的总码元数的比值，即

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{总的传输码元数}}$$

2. 误比特率

误比特率是指接收的错误比特数与传输的总比特数的比值，即

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{总的传输比特数}}$$

在二进制数字通信系统中， $P_e = P_b$ 。

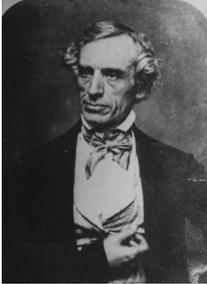
1.5 通信技术发展简史

表 1-5-1 总结了通信技术发展的历史。

表 1-5-1 通信技术发展简史

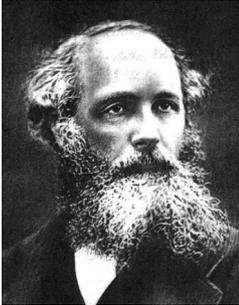
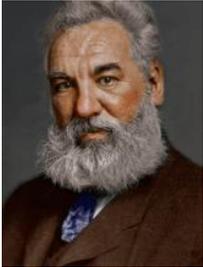
时间	事件	代表人或物
----	----	-------

通信原理

1807 年	<p>提出“任一函数都可以展成三角函数的无穷级数”的论断，即傅里叶级数，后扩展为傅里叶变换，在信号处理、概率论、统计学、密码学、声学、光学等领域有着广泛的应用</p>		傅里叶
1820 年	<p>法国物理学家安培提出著名的安培定则即右手螺旋定则，阐述了磁场方向与电流方向之间的关系。被麦克斯韦誉为“电学中的牛顿”。为了纪念他在电磁学上的杰出贡献，电流的单位“安培”以他的姓氏命名</p>		安培
1831 年	<p>英国物理学家、化学家法拉第首次发现电磁感应现象，并得到产生交流电的方法，发明了发电机和电动机。提出电磁感应定律，解释了电与磁之间的关系。被称为“电学之父”和“交流电之父”。为了缅怀他在电学上无与伦比的贡献，电容以法拉作为单位</p>		法拉第
1837 年	<p>美国发明家莫尔斯成功研制出世界上第一台有线电报机。1844 年，莫尔斯坐在华盛顿国会大厦联邦最高法院会议厅中，向 64.4 km 以外的巴尔的摩城发出了人类历史上的第一份电报：“上帝创造了何等奇迹！”</p>		莫尔斯

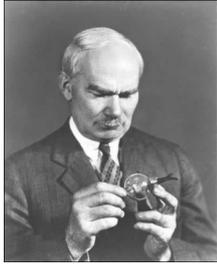
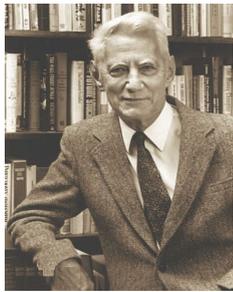
续表

时间	事件	代表人或物
----	----	-------

1873 年	英国物理学家麦克斯韦证实了变化的电场产生磁场,预言了电磁波的存在,完成巨著《电磁学通论》,建立了一套电磁理论,将电学、磁学、光学统一起来,说明了电磁波与光具有相同的性质,两者都是以光速进行传播。科学史上,称牛顿把天上和地上的运动规律统一起来,实现了第一次大综合,麦克斯韦把电、光统一起来,实现了第二次大综合		麦克斯韦
1876 年	美国发明家贝尔取得世界上第一部可用电话的专利,1878 年在相距 300 千米的波士顿和纽约之间进行了首次长途电话实验,并获得了成功,这是模拟通信的开始。声音的强度单位分贝(用 dB 表示)以贝尔的名字命名		贝尔
1888 年	德国物理学家赫兹用实验证实了电磁波的存在,证明了麦克斯韦的电磁学理论,揭示了光的本质是电磁波。频率的国际单位制单位以他的名字命名		赫兹
1895 年	意大利人马可尼成功研制了无线电接收机。1901 年,马可尼发射无线电波横跨大西洋,从而开辟了无线电技术的新领域,被称作“无线电之父”		马可尼
1904 年	英国物理学家弗莱明发明了真空二极管		弗莱明

续表

通信原理

时间	事 件	代表人或物	
1906 年	美国科学家德富雷斯特发明了真空三极管		德富雷斯特
1928 年	美国物理学家奈奎斯特提出著名的抽样定理，并相继提出消除符号（码元）间干扰的三个准则，为近代信息理论做出了突出贡献		奈奎斯特
1947 年	晶体管问世，由美国贝尔实验室的肖克利、巴丁和布拉顿组成的研究小组研制		晶体管
1948 年	美国数学家、信息论的创始人香农发表论文《通信的数学理论》，奠定了信息论的理论基础，提出香农公式		香农
1966 年	华裔科学家高锟发表了一篇题为《光频率介质纤维表面波导》的论文，开创性地提出以光代替电流，以玻璃纤维代替导线传输信息，被誉为“光纤之父”		高锟

生活中，汽车在公路上行驶时必须遵守相关的交通规则，这些规则是由交通管理部门制定的。类似的，信号在信道上传输时也必须遵守相关的标准和协议，这些标准和协议是由相关的协会和机构制定的，通信领域比较重要的国际组织有以下几个。

1. ISO

国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 成立于 1947 年 2 月 23 日，总部设在瑞士日内瓦，是世界上国际标准最大的推动者。

2. ITU

国际电信联盟 (International Telecommunication Union, ITU) 是联合国的一个专门机构，总部设在瑞士日内瓦。负责分配和管理全球无线电频谱与卫星轨道资源，制定全球电信标准，向发展中国家提供电信援助，促进全球电信发展。ITU 由电信标准化部门 (ITU-T)、无线通信部门 (ITU-R) 和电信发展部门 (ITU-D) 组成。其中 ITU-T 是由原来的 CCITT 和从事标准化工作的部门 CCIR 合并而成。

3. IEEE

电气和电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 是一个美国的电子技术与信息科学工程师的协会，是目前世界上最大的非营利性专业技术学会。

IEEE 被 ISO 授权为可以制定标准的组织，设有专门的标准工作委员会，其中比较出名的是 IEEE 802 委员会，主要任务是制定局域网的国际标准。

随着通信技术、计算机技术和网络技术的发展，通信已经由单一的通信设备、技术、制式发展演变为一个集光纤通信、移动通信、卫星通信和微波中继通信等多种通信手段于一体、具有多种业务功能的复杂的综合通信网，满足“任何人 (Whoever) 在任何地方 (Wherever) 任何时间 (Whenever) 可以同任何人 (Whomever) 进行任何形式 (Whatever) 通信”的需求。

本章小结

(1) 通信的目的是信息传递。信息是消息中 useful (消除不确定性) 的部分，信号是信息的载体。

(2) 通信系统是指完成通信任务的传输媒介和全部设备。按照传输信号的特征，通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统；按照传输媒介的不同，通信系统分为有线通信系统和无线通信系统；按调制方式，通信系统分为基带传输系统和频带传输系统；按复用方式，通信系统分为频分复用通信系统、时分复用通信系统和码分复用通信系统。

(3) 通信方式是指通信双方之间的工作方式或信号传输方式。按照信息传递的方向和时间，通信方式分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种；按照数字信号码元排列方式的不同，可分为串行通信和并行通信两种通信方式；按照同步方式的不同，可分为同步通信和异步通信两种通信方式。

(4) 衡量一个通信系统性能优劣的基本因素是有效性和可靠性。模拟通信系统的有效性