第 1 章　通信系统与网络概述

自有人类以来，就离不开消息的传递，因为消息中包含了收信者所需要的信息。我国古代利用烽火传送边疆警报，用驿站间的快马接力传送各种文件，都是一种原始的通信手段。随着社会的进步，这些古老的通信方式早已不能适应社会发展的需要。为了能在远距离快速、准确地传递信息，就必须寻找新的通信方式。进入 19 世纪，人们发现电能以光速沿导线传播。基于这一发现，1837 年莫尔斯(Morse. 1791—1872)发明了电报，1876 年贝尔(Bell. 1847—1942)又发明了电话。1864 年，麦克斯韦(Maxwell. 1831—1879)从理论上证明了电磁波的存在，这一理论于 1887 年被赫兹(Hertz. 1857—1894)用实验证实。接着马可尼(Marconi. 1874—1937)和波波夫(Popov. 1859—1906)等人利用电磁波做了远距离通信的试验，获得了成功。从此通信进入了电通信的新时代。到了 20 世纪 30 年代，尤其是在 50 年代之后，在通信理论上先后形成了香农信息论、纠错编码理论、调制理论、信号检测理论、信号与噪声理论、信源统计特性理论等，这些理论使现代通信技术日趋完善。尤其是晶体管、集成电路相继问世后，不仅更加促进像电话通信那样的模拟通信的高速发展，而且出现了具有广阔发展前景的数字通信。20 世纪 50 年代，1 吉赫以下频段的小容量微波中继通信系统投入使用；70 年代，数字微波中继通信系统开始用于通信。1965 年美国的对地静止卫星“国际通信卫星”I 号和前苏联的对地非静止卫星“闪电”I 号相继发射成功，标志卫星通信技术进入实用阶段。1966 年，美籍华裔科学家高锟发表了光纤技术的奠基性论文。1977 年，第一代光纤通信系统投入运行。此后光纤通信技术进入了快速发展阶段，80 年代以后光纤通信逐步成为固定通信网中最主要的传输手段。计算机问世后，不仅使通信技术中的许多环节实现了微机控制和管理，而且使通信的对象由人与人之间的通信扩大到人与机器和机器与机器之间的通信。通过传输系统和交换系统将大量的用户终端(如电话、传真、电传和计算机等)联接起来的现代通信网，已不再是单一的电话网或电报通信网，而是一个综合性的为多种信息服务的通信网。现代通信已经成为支撑现代文明社会和工农业生产的重要基础结构之一，随着信息高速公路的建立，将把世界构筑成为一个全球性的信息社会。

1.1　通信系统的组成

传递信息所需的一切技术设备的总体称为通信系统。通信系统的种类繁多，对于最简单的点对点通信来说，一般都可以用图 1.1 所示的基本模型来表示。它包括以下几部分。

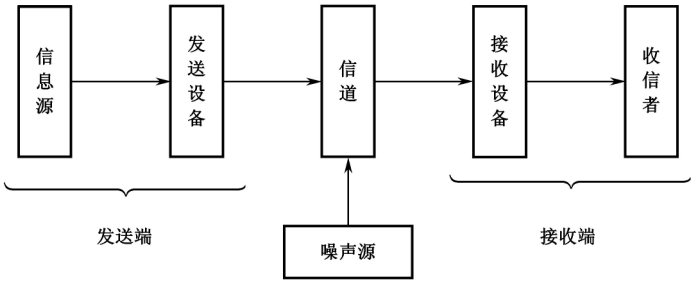


图 1.1　通信系统的基本模型

1. 信息源

信息源产生消息。发信者可以是人,也可以是机器。根据信源输出信号的性质不同可分为连续信源和离散信源。连续信源(如电话机、摄像机)输出连续幅度的信号;离散信源(如传真机、计算机)输出离散的符号序列或文字。模拟信源可通过抽样和量化变换为离散信源。信源的另一个作用是把待传送的消息(语音、报文、数据和图像等)转变为原始电信号。原始电信号包含了较多的低频分量,常称其为基带信号。

2. 发送设备

发送设备的任务的是将基带信号改变为适合在给定信道中传输的信号,以提高传输质量和效率。其中最主要的一种变换是调制。经过调制后的信号,不仅适于在信道中传输,并且能够提高抗干扰能力和实现多路复用。

3. 信道

传输信号的通路称为信道。信道是通信系统的重要组成部分,一方面它为信号提供传输的通路,另一方面它又对信号造成损害(如使信号产生畸变)。有两种划分信道的方法:如果仅包含传输媒质,就是狭义信道;如果不仅包含传输媒质,还包括收/发信设备就是广义信道。狭义信道又可分为有线信道和无线信道两大类。前者如架空明线、同轴电缆及光纤等,后者如中长波地表波传播、超短波及微波视距传播和短波电离层反射,等等。广义信道又可分为调制信道和编码信道两大类,将在后面介绍。

在传输过程中产生的各种噪声均以噪声源集中表示。

4. 接收设备

接收设备的基本功能是完成和发送设备相反的变换,如解调、译码等。其任务是从传输媒质输出的带有噪声和干扰的信号中恢复出原始消息。

5. 收信者

收信者是将复原的原始电信号转换为相应的消息(如耳机、扬声器将恢复的原始电信号变换为语声)。

图 1.1 所示通信系统模型是单向的。通常点对点通信系统都应该是双向的,即通信的双方都拥有收/发信设备和终端设备。

1.2 通信系统的分类

1. 按消息的物理特征分类

根据消息的物理特征的不同,可分为电报通信、电话通信、数据通信和图像通信等。这些系统可以是专用的,但通常是兼容的或并存的。由于电话通信最为普遍,因而其他通信常常借助公共电话通信系统进行。例如,电报通信常常是从电话电路中分出一部分频带传送,或者是用一个话路传送多路电报;又如,伴随着计算机发展而迅速发展起来的数据通信,近距离多用专线传送,而远距离则常常借助电话通信线路传送。

2. 按传输媒质分类

按传输媒质的不同可分为有线通信和无线通信。有线通信的传输媒质可以是架空明线、电缆和光缆。无线通信是借助于电磁波在自由空间的传播。根据电磁波波长的不同又可分为中、长波通信、短波通信和微波通信等类型,如表 1-1 所示。

电子工业出版社版权所有 盗版必究

3. 按传输信号的特征分类

由信源发出的离散消息或连续消息，均能变换为相应的电信号(基带信号)，因而电信号也相应地分为两大类。一类称作模拟信号，通常它在时间上和取值上都是连续的；另一类称作数字信号，它在时间上和取值上都是离散的。在实际应用中，往往将模拟信号笼统地称为连续信号，而将数字信号称作离散信号。

表 1-1　电磁波波段划分和常用传输媒质

频段和波段名称		频率范围和波长范围	传输媒质	主要用途
极低频(ELF) 极长波		30～3000Hz 10～0.1km	有线线对 极长波无线电	对潜艇通信、矿井通信
甚低频(TLF) 超长波		3～30kHz 100～10km	有线线对 超长波无线电	对潜艇通信、远程无线电通信、远程导航
低频(LF) 长波		30～300kHz 10～1km	有线线对 长波无线电	中远距离通信、地下通信、矿井无线电导航
中频(MF) 中波		300～3000kHz 1000～100m	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、导航、业余无线电
高频(HF) 短波		3～30MHz 100～10m	同轴电缆 短波无线电	调幅广播、移动通信、军事通信、远距离短波通信
甚高频(THF) 超短波		30～300MHz 10～1m	同轴电缆 超短波无线电	调幅广播、电视、移动通信、电离层散射通信
微波	特高频(UHF) 分米波	0.3～3GHz 100～10cm	波导 分米波无线电	微波接力、移动通信、空间遥测雷达、电视
微波	超高频(SHF) 厘米波	3～30GHz 10～1cm	波导 厘米波无线电	雷达、微波接力、卫星和空间通信
微波	极高频(EHF) 毫米波	30～300GHz 10～1mm	波导 毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文
紫外、可见光、红外		10^5～10^7GHz 3×10^{-1}～3×10^{-6}cm	光纤、激光空间传播	光通信

传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统，而传输数字信号的通信系统则称为数字通信系统。

应当指出，并非模拟信号一定得在模拟通信系统中传输。如将模拟信号变换为数字信号，就可按数字通信方式进行传输，但必须在接收端再进行相反的变换，以还原出模拟信号，数字电话就是按这种方式传输的典型例子。同样，数字信号也可以借用模拟通信系统进行传输，当然必需配置相应的设备。

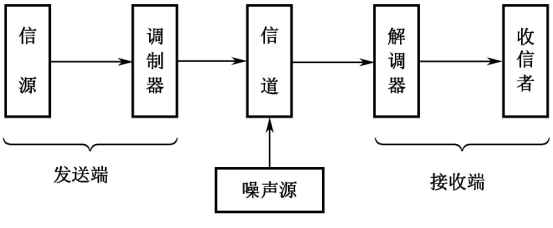


图 1.2　模拟通信系统模型

电子工业出版社版权所有 盗版必究

图 1.2 为模拟通信系统模型。图中调制器的作用是将基带信号的频谱搬移到频率较高的载体上进行传输。经过调制的信号称为已调信号。在接收端,解调器的作用相反,它将已调信号进行反变换,恢复原来的基带信号,再由收信者还原为原始消息。由于从调制器的输出端到解调器的输入端传输的是已调制的模拟信号,常将这一段通道称为调制信道。

模拟通信系统可以传输电话、电报、数据和图像等信息。与数字通信相比,模拟通信设备简单,占用频带窄,但抗干扰能力差。

图 1.3 为数字通信系统模型。在发送端增加了信源编码器和信道编码器,前者的作用是将模拟信号变换为数字信号,后者则是使数字信号与信道匹配,以提高传输的可靠性和有效性。数字调制器的作用是将数字基带信号变换为适合于信道传输的已调信号。在接收端进行相反的变换,数字解调器是将已调信号还原为数字基带信号,再由信道译码器和信源译码器将基带信号还原为模拟信号,最后再把模拟信号送到用户设备。由于从信道编码器的输出端到信道译码器的输入端传输的是经过编码的数字信号,所以把这一段通路称为编码信道。显然,编码信道包含了调制信道。

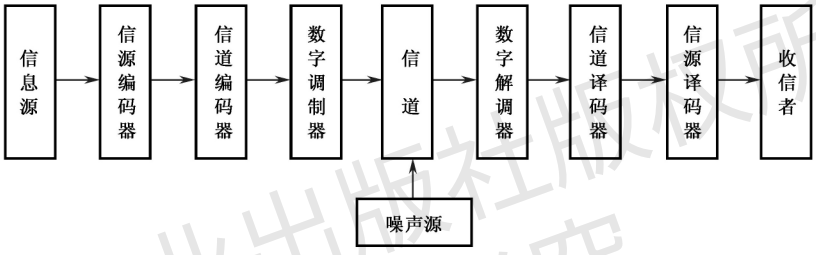


图 1.3 数字通信系统模型

和模拟通信相比,数字通信抗干扰能力强,有较好的保密性和可靠性,易于集成化,数字通信系统可以兼容数字电话、电报、数据和图像等各种信息的传输。其缺点是占用频带较宽,并且需要有较复杂的同步系统。

4. 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调制传输两大类。基带传输是将未经调制的信号直接在线路上传输,如音频市内电话和数字信号的基带传输等。调制传输是先对信号进行调制后再进行传输。调制传输又称作频带传输。

5. 按复用方式分类

在通信系统中,信道能提供比基带信号宽得多的带宽,倘若在信道中只传输一路信号,信道利用率就不高,并且是一种浪费。解决的方法是多路信号同时传送,这就是复用技术。有三种复用方式: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各路基带信号分别占用不同的频率范围。时分复用则是用脉冲调制的方法使不同路数的信号占据不同的时间区间。数字通信采用时分复用。码分复用则是用一组正交的脉冲序列来分别携带不同路数的信号。码分复用主要用于空间通信的扩频通信系统中。

1.3 通信方式

1. 点对点通信

如果通信仅在点与点之间进行,按消息传送的方向与时间,有下述几种通信方式。

电子工业出版社版权所有 盗版必究

(1) 单向通信和双向通信

一方发送,另一方只能接收信息的通信方式称为单向通信。如广播、遥控和无线电寻呼就属于这一类通信。若双方能进行发信和收信,就称为双向通信。

双向通信系统中又有单工、双工和半双工三种通信方式。

① 单工通信。通信双方都能进行发信和收信,但不能同时进行,即要求通信者“按键发话、松键收话”,如图 1.4 所示。根据使用频率的异同,又分为同频单工和异频单工。

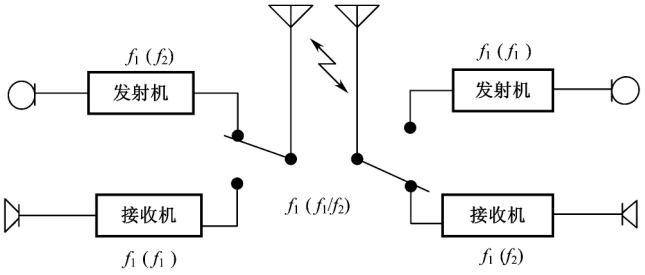


图 1.4　单工通信

采用同频单工的双方使用同一频率 f_1 进行通信。由于收/发交替工作,收、发信机可以共用一副天线。同频单工设备简单,节约频谱,但操作不便。在移动通信中,单工通信的一方是基地台,若基地台有多部发信和收信设备,则各发信机使用的频率必须相距较远,否则会产生邻道干扰。在这种情况下可采用异频单工方式工作,使用频率如图 1.4 中括号所示。通信双方的发信机分别使用两频率 f_1 和 f_2,也就是本台的发、收使用的频率。若基地台需设置多部发射机和接收机,则往往将接收机频率设置在某一频段(如较低频段),而发射机频率设置在另一频段(如较高频段),只要两频段有足够的频差,借助于滤波器等选频电路,就可大大减少发信机对收信机的干扰。

② 双工通信(或称全双工)。双方可以同时进行发信和收信的通信方式称为双工方式,如图 1.5 所示。按这种工作方式的通信双方可以像普通电话那样进行通信。在双工方式中,收/发双方分别使用不同的频率(f_1 和 f_2),这两个频率称作一对信道(或波道、频道)。图中的双工器是为了使发射和接收天线共用。双工电台操作方便,但占用信道多,电源消耗大(发射机长期处于工作状态)。

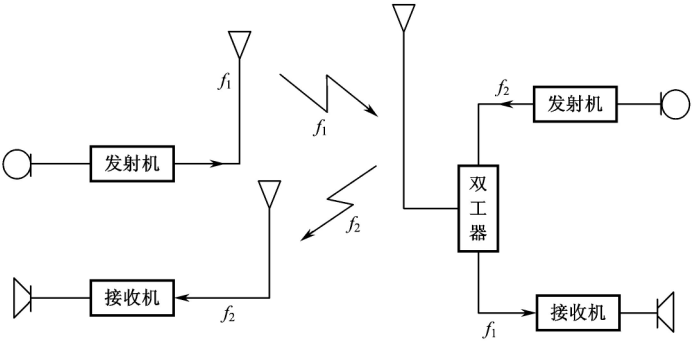


图 1.5　双工通信

③ 半双工通信。其频率使用和设备与图 1.5 相似,所不同的是有一方采用异频单工电台,即以“按键发话、松键收话”的方式进行通信。这种半双工系统可以与全双工系统兼容,因而获

得了广泛的应用。

(2) 串序/并序传输方式

在数字通信中,多数采用串序传输方式,它只占用一条通路,数字信号按时间顺序依次在信道中进行传输,有时也采用并序传输方式,这时需要占用两条以上的通路。

2. 通信网

当有多个通信点互相连接,并且它们之间的连接不止一个路由时,就形成了通信网。通信网是由一定数量的节点(包括终端节点、交换节点)和连接这些节点的传输系统有机地组织在一起的,按约定的信令或协议实现两个或多个规定点间信息传输的通信系统。现代通信网由用户终端设备、传输设备和交换设备等硬件,以及体制标准、网络结构、编号计划、信令方式、网络管理等软件构成。图 1.6 为某通信网的示意图,通信网是由若干用户终端 A、B、C……通过传输系统链接起来。终端与终端之间通过一个或多个节点链接,在节点处提供交换、处理、网络管理等功能。传输系统包括用户终端之间、用户终端与节点,以及节点之间的各种传输介质和设备。信号可以通过双绞线、同轴电缆、光纤等有线或无线介质传输。通信网根据业务内容可分电话通信网、电报通信网和数据通信网等。

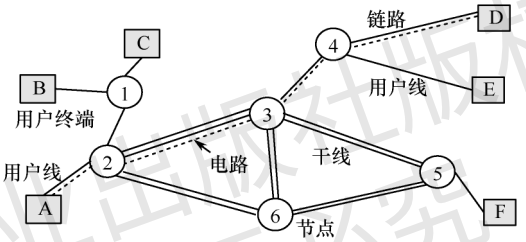


图 1.6 通信网示意图

通信网的网络形式大体可以分为五类:星形网、网形网、复合形网、环形网和总线形网,如图 1.7 所示。

(1) 星形网(辐射网)

图 1.7(a)为星形网,这种网络需要设置转接中心,网中任一节点均通过转接中心进行交换。节点数多时较网形网能节省大量的传输链路。但这种网的安全性最差,若转接中心出故障,会影响全网,转接交换设备的转接能力不足或设备发生故障时,会对网络的接续质量和网络的稳定性产生影响。一般是当传输链路费用高于转接交换设备费用时才采用这种网络结构。

(2) 网形网(全互连网)

图 1.7(b)为网形网,网中每一节点彼此互连,任何两个节点间都有直达路由,因此连接迅速。另外,如果一旦直达路由发生故障,可经其他节点转接,组织迂回路由。这是一种经济性较差的网络结构,节点数多时需要的传输链路数将很大,但这种网络的冗余度较大。因此,从网络的接续质量和网络的稳定性来看,这种网络又是有利的。

(3) 复合形网

图 1.7(c)为复合形网,由网形网和星形网复合而成,以星形网为基础并在通信量较大区间构成网形网结构。这种网络结构兼取了上述两种网络的优点,比较经济合理且有一定的可靠性。

(4) 环形网

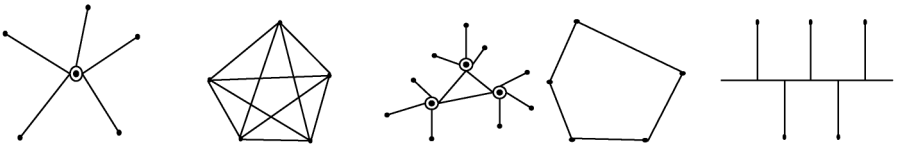
图 1.7(d)为环形网,每个节点除了收/发本节点的信息外,还必须转发其他节点的信息。

电子工业出版社版权所有 盗版必究

在这种网中，信息速率较高，要求各节点有较强的信息识别能力和信息处理能力。

(5) 总线形网

图 1.7(e)为总线形网，所有节点都连接在一个公共传输通道——总线上，这种网传输链路少，但稳定性差。



(a) 星形网　(b) 网形网　(c) 复合形网　(d) 环形网　(e) 总线形网

图 1-7　通信网的网络形式

1.4　通信系统主要性能指标

衡量通信系统性能的指标很多，但其最主要的指标有两个。这就是传输信息的有效性和可靠性，前者表示通信系统传输信息的数量多少，后者表示通信系统传输信息的质量好坏。在实际的通信系统中，这两项要求经常是矛盾的，亦即提高传输信号的有效性会降低可靠性；反之亦然。例如，在传输数字信号时，在数字信号序列中引进一些监督码元(由信道编码器来完成)，以实现自动检错和纠错，提高传输信号的可靠性。但是，由于监督码元的加入使信号长度增加，因此信号传输的速率降低，亦即有效性下降。在设计系统时，通常只能要求在满足一定可靠性指标下，尽量提高通信系统的有效性。下面分别对模拟通信系统和数字通信系统提出具体的性能要求。

在模拟通信系统中，信号传输的有效性通常可用有效传输频带来衡量。当给定信道的容许传输带宽后，就可根据每路信号的带宽来确定信道容许同时传输的最大通路数，这就是多路频率复用。例如，在频分制多路载波通信系统内使用同轴电缆作为传输线路，则其容许传输带宽可以容纳 10800 路语音信号(每路语音带宽按 3000Hz 计算)。

模拟通信系统的可靠性常用系统输出端的信噪比来衡量。信噪比越高，通信质量就越好。通常电话要求信噪比为 20dB 以上，电视则要求信噪比为 40dB 以上。输出信噪比一方面与信道内噪声大小和信号功率有关，同时又和调制方式有很大关系。

对于数字通信系统，有效性可用信息传输速率来衡量。传输速率有如下三种表示方式。

1. 码元速率 R_B

码元速率又称信号速率或波形速率，它是指每秒传输的码元数，单位为波特。目前在短波单边带线路上最常用的是每秒发送 50 个码元的电报机，即信道的传输速率为 50 波特。若码元长度或脉冲宽度为 T_S，则码元速率：

$$R_B = \frac{1}{T_S}(\text{波特}) \tag{1-1}$$

2. 信息速率 R_b

信息速率是指每秒传送的信息量，单位为比特/秒(b/s)。

比特是信息量的单位。当二进制数字“0”“1”取等值概率时，传送一个二进制字的信息量就是 1 比特(1bit)，因此信息速率又称为比特率。显然，当信道一定时，比特率越高，有效性也

就越好。

为了提高有效性，可以采用多进制传输，此时每个码元携带的信息量超过 1 比特。为了计算其信息速率，可将其折算为二进制码元计算。

设有一 M 进制码元，每一码元可表示为 k 个二进制数，设 M 进制的码元宽度仍为 T_S（码元速率 $R_B=1/T_S$），则在串行传输条件下信息速率与码元速率的关系为：

$$R_b=R_B\log_2 2^k=kR_B=\frac{k}{T_S}\ (\text{b/s}) \tag{1-2}$$

对于二进制码元，$R_b=R_B$。若 $M=8(=2^3)$进制，则 $R_b=3R_B$。

例如，某数字通信系统每秒传输 1000 个二进制码元，它的码元速率为 $R_B=1000$ 波特，则它的信息速率为 $R_b=1000\text{bit/s}$。可见在二进制信号传输时，码元速率与信息速率在数值上相等。如系统每秒传输 1000 个八进制码元(各种码元等概率出现)，其码元速率为 $R_B=1000$ 波特，则其信息速率为 $R_b=1000\log_2 8=3000\text{bit/s}$。

3. 数据传输速率

数据传输速率是指单位时间内传送的数据量。数据量的单位可以是比持、字符、码组等。时间单位可以是秒、分、小时等。通常用字/分为单位。

比较不同的数字通信系统的效率时，仅看其信息传输速率是不够的，因为即使是两个系统的信息传输速率相同，由于调制方式不同，其占用的频带宽度也可能不同，从而效率不同。对于相同的信道频带，传输的信息量越大则效率越高。

数字通信系统的可靠性用误码率或误比特率表示。其定义为：

误码率 $$P_e=\lim_{N\to\infty}\frac{\text{错误码元数 } n}{\text{传输总码元数 } N}$$

误比特率 $$P_b=\lim_{M\to\infty}\frac{\text{错误比特数 } m}{\text{传输总比特数 } M}$$

显然，在二进制中，$P_e=P_b$。

不同信号对错误率的要求不同，如传输数字电话时，误比特率通常要求为 $10^{-3}\sim10^{-6}$，而传输计算机信息时，要求更高。当信道不能满足要求时，必须加纠错措施。

习题与思考题

1.1 什么叫通信系统？画出最简单的点对点通信系统框图，并对模型各部分的功能进行简述。

1.2 简述模拟通信系统基本模型，并对模型各部分功能进行简述。

1.3 简述狭义信道含义及广义信道含义。

1.4 简述一般数字通信系统基本模型，并简要说明模型各部分的作用。

1.5 点对点通信方式有哪几种？并分别说明它们的工作方式。

1.6 衡量通信系统性能的指标有哪些？通信系统信息传输的有效性、可靠性分别表示什么？模拟通信系统和数字通信系统的有效性和可靠性分别是用什么来衡量的？

电子工业出版社版权所有 盗版必究