

# 第 1 章 引 言

## 1.1 历史背景

为了说明本书的写作动机，我们首先简单地介绍了数字通信的历史背景。在本章第一节中，我们将提到一些历史事件，它们会涉及那些对数字通信做出开创性新工作的贡献者，主要集中于三个方面：信息论与编码、互联网和无线通信。这三个方面均以它们各自的方式对数字通信产生了革命性的影响。

### 信息论与编码

数字通信的理论基础是由克劳德·香农于 1948 年在一篇论文中所建立的，这篇论文的题目是“通信的一种数学理论”。香农的论文很快就受到了狂热的称赞。或许正是因为这种反响，使得后来在与 Warren Weaver 合著的一本书出版时，香农将其经典论文的题目改成了“通信的数学理论”。值得注意的是，在 1948 年香农发表这篇经典论文以前，人们认为增加信道上的传输速率将会使差错概率也增加；当香农证明只要传输速率低于信道容量，这种结论不成立时，通信理论界感到非常震惊。

在 1948 年香农发表论文以后，接着在编码理论方面取得了三个突破性的进展，它们包括：

1. Golay 和 Hamming 分别于 1949 年和 1950 年提出了第一个非平凡纠错编码。
2. Berrou, Glavieux 和 Thitimjshima 于 1993 年提出了 Turbo 编码。在加性高斯白噪声环境下，Turbo 编码能够提供接近最优的纠错编译码性能。
3. Gallager 于 1962 年首先提出了低密度奇偶校验码 (Low-Density Parity-Check, LDPC)，后来 Tanner 于 1981 年从图的观点对 LDPC 码给出了新的解释以后它又被重新发现了一遍。最重要的是，正是因为 1993 年 Turbo 码的发现才重新激发了人们对 LDPC 码的兴趣。

### 互联网

从 1950 年到 1970 年，人们对计算机网络开展了各种不同的研究工作。然而，就对计算机通信的影响而言，其中最重要的是高级研究计划局网络 (Advanced Research Project Agency Network, ARPANET)，该网络于 1971 年投入使用。ARPANET 的研究是在美国国防部的高级研究计划局 (Advanced Research Project Agency, ARPA) 的资助下开展的。在 ARPANET 中完成了分组交换 (Packet switching) 这一创举。1985 年，ARPANET 被更名为互联网 (Internet)。然而，在互联网演进过程中的转折点发生在 1990 年，当时 Berners-Lee 提出了互联网的超媒体软件接口，它被命名为万维网 (World Wide Web)。随即仅仅在大约 2 年的时间里，万维网就从毫不存在发展到了在全球范围内的广泛流行，最后在 1994 年被商业化。互联网通过一根网线，大大改变了我们日常交流的方式。

### 无线通信

在 1864 年，James Clerk Maxwell 建立了光的电磁理论，并且预言无线电波是存在的。将电与磁

这两个物理量联系起来的四个联立方程从此刻上了他的名字。后来在 19 世纪 80 年代<sup>①</sup>，Henrich Herz 通过实验验证了无线电波是存在的。

然而，直到 1901 年 12 月 12 日，Guglielmo Marconi 才在(加拿大)纽芬兰(Newfoundland)的“信号山”(Signal Hill)接收到无线电信号；该无线电信号是从横跨大西洋的 2100 英里<sup>②</sup>以外英格兰的康沃尔郡(Cornwall)发出的。最后要指出的是，在无线通信的早期，是 Fessenden 这个自学成才的学者在 1906 年做出了值得载入史册的重要事情，他制作了第一台无线电广播机，利用一种后来被称为幅度调制(Amplitude modulation, AM)的技术来传输音乐和声音。

在 1988 年，第一个数字蜂窝系统在欧洲建立，它被称为全球移动通信系统(Global System for Mobile Communications, GSM)。建立 GSM 的最初目的，是提供一个可以替代各种互不兼容的模拟无线通信系统的泛欧标准。在建设 GSM 以后，很快又提出了北美 IS-54 数字标准。正如互联网一样，无线通信也大大改变了我们日常交流的方式。

我们在上述三个标题下介绍的内容，即信息论与编码、互联网和无线通信，它们不仅使通信完全数字化，并且也改变了通信世界，使之全球化。

## 1.2 通信过程

今天，通信以如此多的形式深入到我们的日常生活，以至于很容易忽略其自身的多面性。我们手中的电话和移动智能手机、卧室里的收音机和电视机、办公室和家里可接入互联网的计算机终端，以及报纸都可以提供来自于全球每个角落的快速通信。通信为远海中的舰船、空中的飞机以及太空中的火箭和卫星提供了感知能力。无论在什么地方，利用无线电话的通信都可以使轿车司机能够与数英里以外的办公室或者家里保持联系。通信为社交网络以不同方式(文本、对话、视频)的相互吸引提供了手段，由此世界各地的人们能够彼此相识。通信使天气预报员能够播报由许多传感器和卫星测量得到的气象情况。事实上，涉及用一种或另一种方式使用通信的应用清单几乎是无限多的。

从最本质的意义上讲，通信将信息从一点传输到另一点，包含了下面一系列过程：

1. 产生消息信号(Message signal)——声音、音乐、图片或者计算机数据等。
2. 利用一组符号(Symbol)——电子的、听觉的或者视觉的符号，在某种精度下对消息信号进行描述。
3. 以适当的形式对这些符号进行编码(Encoding)，以便能在感兴趣的物理媒介中进行传输。
4. 将编码后的符号传输(Transmission)到期望的目的地。
5. 译码(Decoding)和再生(Reproduction)原始符号。
6. 重构(Re-creation)出在一定程度上质量有所下降的原始消息信号，这种质量降低是由系统中不可避免存在的非理想特性导致的。

当然，还存在许多其他形式的通信，它不能实时地直接涉及人类的思想。例如，在包含两个或者更多计算机之间进行通信的计算机通信(Computer communication)中，只有在为计算机编制程序或者指令，或者在对结果进行监视时，人类决策才能够参与。

不管通信过程考虑采用什么形式，在每个通信系统中都包含三个基本要素，即发射机(Transmitter)、信道(Channel)和接收机(Receiver)，如图 1.1 所示。发射机位于一点，接收机位于与发射机位置不同的其他某点，信道则是将它们连接成一个完整通信系统的物理媒介。发射机的目的是将信源(Source of information)产生的消息信号转化为适合在信道上传输的形式。然而，当发射机

<sup>①</sup> 文献记载应该在 1886 年至 1888 年间，也有文献指出在 1888 年实验成功。——译者注

<sup>②</sup> 1 英里(mile)= 1.609 km。——编者注

号沿着信道进行传播时,由于信道的不完美性会使其产生失真。并且,在信道输出中还会增加噪声和干扰信号(由其他信源产生),导致接收信号(Received signal)是发射信号(Transmitted signal)受到污染的形式。接收机的任务是对接收到的信号进行处理的,以便为终端用户或者信宿(Information sink)重构出原始消息信号的可识别的形式。

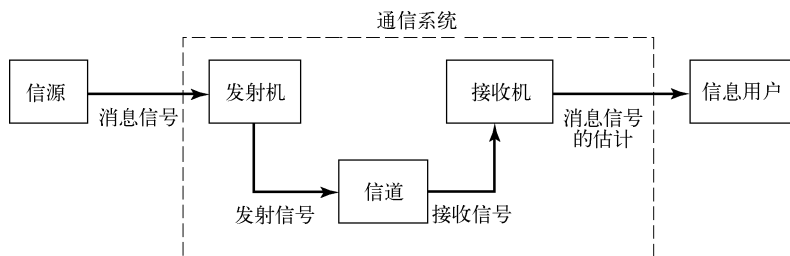


图 1.1 通信系统的要素

有两种基本的通信模式:

1. 广播模式 (Broadcasting), 它采用单个功率很大的发射机和很多个相对廉价的接收机。在这种情况下,携带信息的信号只沿着一个方向流动。
2. 点对点通信模式 (Point-to-point communication), 其通信过程是在单个发射机和一个接收机之间的链路上发生的。在这种情况下,携带信息的信号通常是双向流动的,从而要求在链路的两端都把发射机和接收机结合使用[即收发机(Transceiver)]。

无论是哪一种通信系统,其通信过程在本质上都是统计的。事实上,正是由于这个重要原因,本书许多内容都涉及数字通信系统的统计基础。为此,我们讨论了许多在学习数字通信过程中涉及的众多基本问题。

### 1.3 多址技术

现在继续讨论通信过程,多址(Multiple-access)是许多用户或者本地台站能够同时或者几乎同时共享使用通信信道的一种技术,尽管它们各自的传输可能起源于很不相同的位置。如果用另一种方式来表述,可以说多址技术是允许通信信道资源被那些试图相互通信的大量用户共享的一种技术。

需要注意的是,多址技术和多路复用(Multiplexing)技术之间存在以下细微区别:

- 多址技术指的是远程共享通信信道,比如被位置高度分散的用户所共享的卫星或者无线电信道。另一方面,多路复用技术指的是诸如被局限于本地位置的用户所共享的电话信道这类信道。
- 在多路复用系统中,用户需求通常是固定的。相反,在多址系统中,用户需求却可能随着时间发生巨大变化,在这种情况下具有动态信道分配的设备是有必要的。

由于很明显的理由,人们期望在多址系统中,信道资源的共享可以在系统用户之间不产生严重干扰的情况下完成。在此背景下,我们可以确定 4 种基本的多址类型。

#### 1. 频分多址 (Frequency-Division Multiple Access, FDMA)

在这种技术中,将不相交的子频带连续地分配给不同的用户。为了降低分配给相邻信道频带的用户之间的干扰,采用保护频带(Guard bands)作为缓冲区,如图 1.2(a)所示。由于不可能实现理想的滤波或者对不同用户进行分离,保护频带是有必要的。

#### 2. 时分多址 (Time-Division Multiple Access, TDMA)

在这种技术中,每一个用户都分配整个信道的频谱,但是只能占用短暂的时间,这段时间被称

为时隙(Time slot)。正如图 1.2(b)所示,在分配的各个时隙之间插入了保护时间(Guard time)这种形式的缓冲区。这样可以允许由于系统缺陷(特别是在同步设计中)产生的时间不确定性,从而降低用户之间的干扰。

### 3. 码分多址(Code-Division Multiple Access, CDMA)

在 FDMA 技术中,信道资源是通过沿着频率坐标轴将其分割为不相交的频带来实现共享的,如图 1.2(a)所示。在 TDMA 技术中,信道资源则是通过沿着时间坐标轴将其分割为不相交的时隙来实现共享的,如图 1.2(b)所示。在图 1.2(c)中,我们通过采用 FDMA 和 TDMA 的混合组合展示出了另外一种共享信道资源的技术,它代表了码分多址(CDMA)的一种具体形式。例如,可以采用跳频(Frequency Hopping, FH)技术来确保在每个相邻时隙内,分配给用户的频带实际上是以随机方式进行重新安排的。具体而言,在第 1 个时隙内,用户 1 占用频带 1,用户 2 占用频带 2,用户 3 占用频带 3,以此类推。在第 2 个时隙内,用户 1 跳到频带 3,用户 2 跳到频带 1,用户 3 跳到频带 2,等等。这种分配看起来好像用户在玩一种抢座位的游戏。CDMA 技术相对于 FDMA 和 TDMA 技术的一个重要优点,是它可以提供安全的(Secure)通信。在图 1.2(c)所示的 CDMA 类型中,跳频机制可以通过采用伪噪声(Pseudo-Noise, PN)序列来实现。

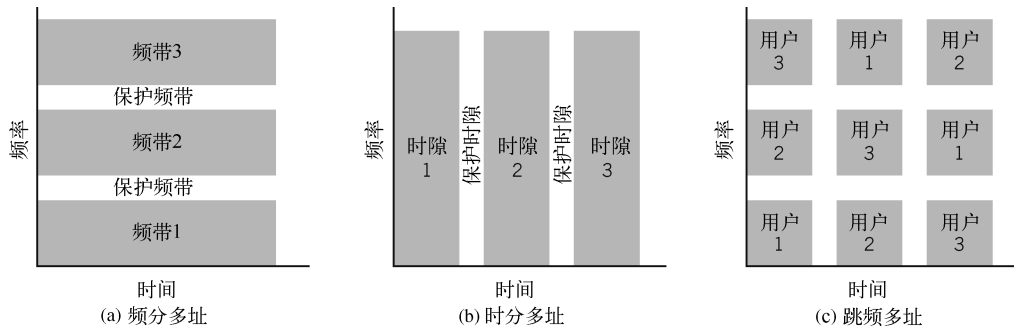


图 1.2 说明多址技术思想的示意图

### 4. 空分多址(Space-Division Multiple Access, SDMA)

在这种多址技术中,资源分配是通过利用各个用户的空间分离来实现的。特别地,多波束天线(Multibeam antenna)使无线电信号指向不同方向来对其进行分离。这样,不同用户可以在相同频率或者相同时隙同时接入信道。

上面这些多址技术具有一个共同特点:它们都是通过利用时间、频率或者空间上的不相交性(或者在较宽松意义上的正交性)来分配通信信道资源的。

## 1.4 网络

如图 1.3 所示,一个通信网络(Communication network)或者简称网络(Network)<sup>[1]</sup>是由许多由智能处理器(如微计算机)组成的节点(Node)相互连接所构成的。这些节点的主要目的是为数据在网络内流动提供路由。每个节点都有一个或者多个与之相连的终端,终端是指希望通信的设备。网络被设计作为在终端之间有效地进行数据交换的共享资源,并且还提供一种可以支持新的应用和服务的架构。传统电话网络是通信网络的一个例子,它采用电路交换(Circuit switching)方法为两个终端之间提供专用的通信路径或者电路(Circuit)。电路是由信源到目的地的一系列互联的链路所组成的。这种链路可以由时分复用(Time-Division Multiplexed, TDM)系统中的时隙组成,或者由频分复用(Frequency-Division Multiplexed, FDM)系统中的频率间隙(Frequency slot)组成。电路一旦建立起来,则在整个传输过程中都必须保持不间断。电路交换通常在已知网络结构的情况下,采用集中式分层控制机制来控制。为了建立电路交换连接,网络中必须具有一条路径可以被希望相互通信的两个终



端专用。特别地, 在开始传输以前, 呼叫请求信号必须一直传播到目的地并且被应答。于是, 网络对用户而言实际上就是透明的。这意味着在连接期间, 分配给该电路的带宽和资源实质上是被这两个终端所“拥有”的, 直到电路断开为止。因此, 从分配带宽被合理利用的程度来讲, 电路交换代表一种有效利用资源的方法。尽管电话网络被用于传输数据, 但语音仍然占据网络流量的大部分。事实上, 电路交换非常适合于传输话音信号, 因为与建立电路所需的时间(大约 0.1~0.5s)相比, 话音交谈的时间通常比较长(平均约为 2 min)。并且在大多数话音交谈时, 信息流在连接时间中所占的百分比相对比较大, 这也使得电路交换更加适合用于语音交谈。

在电路交换中, 通信链路是在固定(Fixed)分配基础上被使用该链路的会话(Session)所共享的。另一方面, 在分组交换(Packet switching)中, 共享是在需求(Demand)的基础上实现的, 因此与电路交换相比, 它的优势在于, 当某个链路有业务需要发送时, 该链路的使用可能会更加充分。

分组交换的基本网络原理是“存储-转发”。特别地, 在分组交换网络(Packet-switched network)中, 比规定容量更大的任意消息在传输以前都被分割为不超过规定容量的小段。这些小段通常被称为“分组”(Packet)。原始消息在目的地以分组为基础进行重新组合。网络可以视为网络资源(Network resource)(如信道带宽、缓冲器以及交换处理器等)的分布式水池, 其容量被那些希望相互通信的竞争用户(终端)所动态共享(Shared dynamically)。相反, 在电路交换网络中, 资源在一对终端进行会话的整个期间都被它们所专用。因此, 分组交换更加适合于计算机通信环境, 其中“突发”数据以随机的方式在终端之间进行交换。然而, 采用分组交换要求根据用户的需求很好地进行控制, 否则网络将被严重滥用。

数据网络(即其站点都是由计算机和终端组成的网络)的设计可以按照分层结构(Layered architecture)来进行, 这种结构被视为各层嵌套的分层体系。一个层(Layer)是指在计算机系统内的设计用于完成特有功能的一个过程或者设备。显然每层的设计者都将非常熟悉其内部细节和操作。然而, 在系统层次, 用户仅仅将每层视为一个“黑匣子”, 它是用输入、输出及其功能关系来描述的。在分层结构中, 每一层都将下一级更低的层视为一个或者多个黑匣子, 这些黑匣子具有更高层级用到的某些指定功能。于是, 在数据网络中高度复杂的通信问题就被分解为一组容易处理的具有明确定义的连锁功能。正是按照这种推理思路, 使得国际标准化组织的一个分会提出了开放系统互连(Open Systems Interconnection, OSI)<sup>[2]</sup>参考模型(Reference model)。这里的术语“开放”是指符合参考模型及其相关标准的任意两个系统都具有互联的能力。

在 OSI 参考模型中, 通信及相关的连接功能都被组织为一系列接口(Interfaces)被明确定义的层(Layer)或者级(Level), 并且每一层都建立在其前一层基础上。特别地, 每一层都完成基本功能的一个子集, 并且它还需要依靠下一个低层级来完成另外的基本功能。此外, 每一层都对下一个高层级提供某种服务, 并且还对其屏蔽掉这些服务的实现细节。在每对层级之间都有一个接口(Interface), 正是这个接口定义了低层向高层提供的服务。

OSI 模型由 7 层组成, 如图 1.4 所示。图中还对模型中各个层的功能进行了描述。假设在系统 A 的第  $k$  层与某个系统 B 的第  $k$  层按照一组规则和约定进行通信, 这些规则和约定共同构成了第  $k$  层协议(Protocol), 其中  $k=1, 2, \dots, 7$ (术语“协议”是从日常用法中借用过来的, 表示人类之间约定的社交行为)。在不同系统中组成对应层的实体被称为对等过程(Peer processes)。换句话说, 通信行为是在两个不同系统中的对等过程按照协议进行通信来实现的, 协议本身是由一组程序规则来定

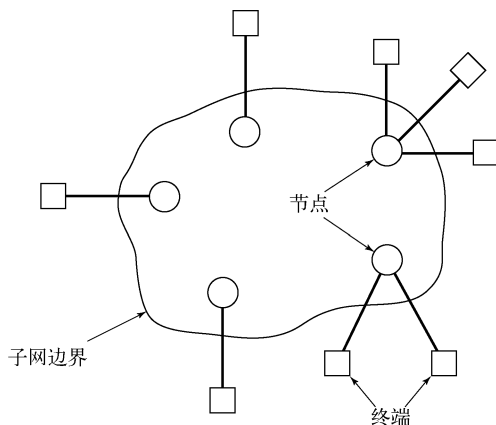


图 1.3 通信网络

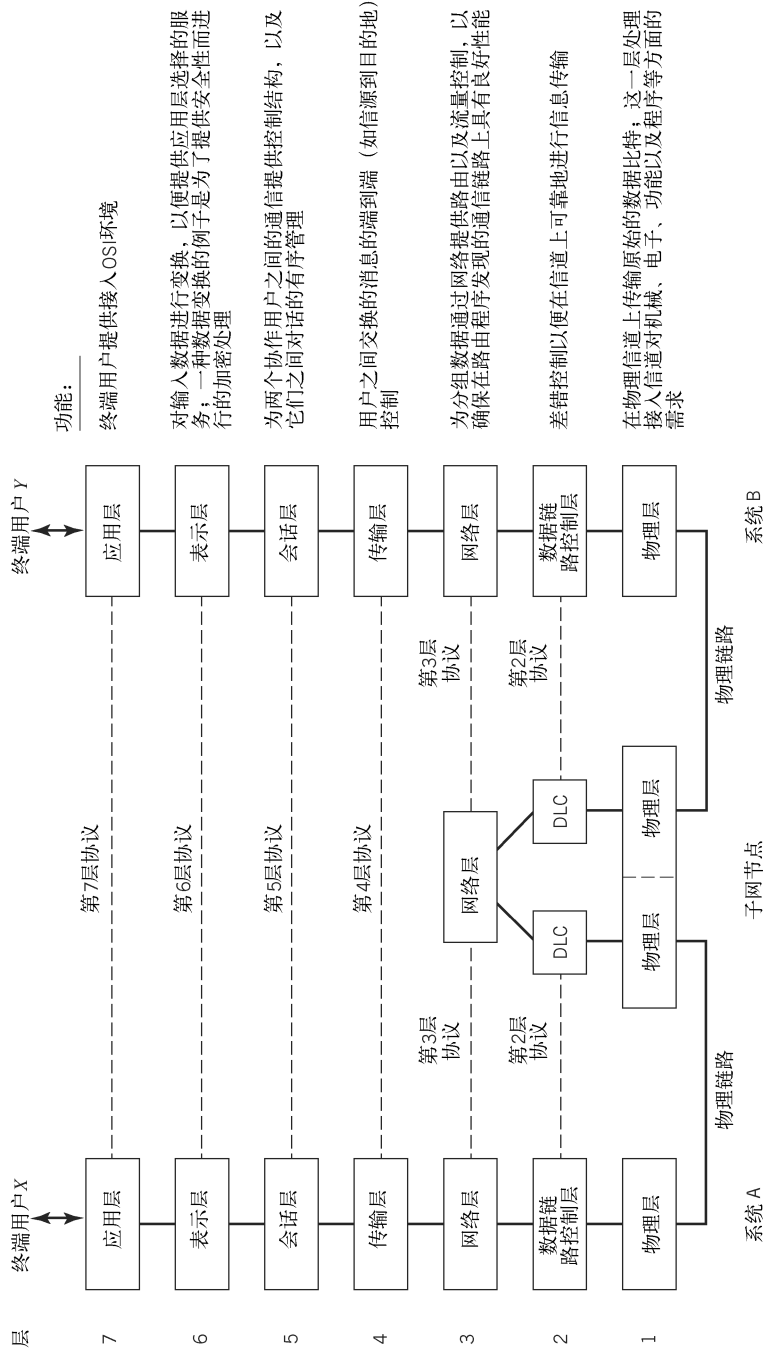


图1.4 OSI模型; DLC代表数据链路控制 (Data Link Control)

版权有限公司 盗版必究

义的。在两个对等过程之间的物理通信只在第 1 层存在。另一方面,第 2 层到第 7 层都是在与其远端的对等过程进行虚拟通信(Virtual communication)。然而,这 6 层中的每一层都能够通过层与层之间的接口与其相邻层(下一层或者上一层)交换数据和控制信息。在图 1.4 中,物理通信用实线来显示,而虚拟通信则用虚线显示。OSI 参考模型的 7 层涉及的基本原理如下:

1. 每一层都完成具有明确定义的功能。
2. 边界是在业务描述很小的点处划分的,并且使边界之间的交互次数尽可能最小。
3. 层是根据容易定位的功能产生的,使得模型结构允许对层协议的修改能够反映出技术的发展而不会对其他层产生影响。
4. 在某些点划分边界时,还需要考虑到相关接口的标准化问题。
5. 只有当需要采用不同抽象层级来处理数据时,才建立一个层级。
6. 采用层级的数量应该足够大,能够对不同层分配不同的功能,同时还应该足够小,以保持模型结构易于处理。

需要注意的是,OSI 参考模型并不是一个网络结构,而是计算机通信的一个国际标准,它只规定了每层需要完成的功能。

## 1.5 数字通信

现在的公众通信网络都是非常复杂的系统。特别地,公用电话交换网络(Public Switched Telephone Network, PSTN)、互联网和无线通信(包括卫星通信)都能为城市之间、跨海以及不同国家、语言和文化之间提供无缝连接,因此可以将地球称为“地球村”。

在 OSI 模型中有三层会对数字通信系统的设计产生影响,这三层也是本书感兴趣的主体:

1. 物理层(Physical layer)。这个 OSI 模型的最低层体现了在通信网络中任意一对节点之间传输比特(即二进制数字)所用到的物理机制。两个节点之间的通信是通过在发射机进行调制,然后经过信道进行传输,最后在接收机进行解调等过程来实现的。完成调制(Modulation)和解调(Demodulation)的模块通常被称为调制解调器(Modem)。
2. 数据链路层(Data-link layer)。通信链路几乎总是会受到不可避免的噪声和干扰的污染。因此,数据链路层的一个目的是完成纠错(Error correction)或者检测(Detection),尽管物理层也具有这项功能。通常数据链路层将重新发送那些接收错误的数据包,但是在有些应用中,数据链路层也会丢弃这些接收错误的数据包。另外,这一层还负责不同用户共享传输媒质的方式。数据链路层的一部分称为媒体访问控制(Medium Access Control, MAC)子层,它主要负责把数据帧发送到共享的传输媒质上而不会对其他节点产生干扰。这个方面被称为多址通信。
3. 网络层(Network layer)。这个层具有几个功能,其中一个是确定信息的路由(Routing),使之从信源传输到最终的目的地。第二个功能是确定服务质量(Quality of service)。第三个功能是流量控制(Flow control),以确保网络不会造成拥塞。

上述是在 7 层模型中针对通信过程中存在功能的有关 3 层模型。尽管这 3 层只占据了 OSI 模型中的一个子空间,但它们完成的功能对该模型却是异常重要的。

### 数字通信系统框图

通常而言,在设计数字通信系统时,信源、通信信道和信宿(终端用户)都是明确的。存在的挑战是在下列指导原则下对发射机和接收机进行设计:

- 对信源产生的消息信号进行编码/调制，然后发送到信道上，并且在满足终端用户需求的前提下在接收机输出端产生它的“估计”。
- 以可承受的成本完成上述任务。

在图 1.5 中框图所代表的数字通信系统(Digital communication system)中，其基本原理根植于信息论，从信道的远端开始的发射机和接收机的功能块按下列关系成对出现：

- 信源编码-译码
- 信道编码-译码
- 调制器-解调器

信源编码器将冗余信息从消息信号中去掉，并且负责对信道的有效利用。得到的符号序列被称为信源码字(Source codeword)。然后由信道编码器对数据流进行处理，得到的新的符号序列被称为信道码字(Channel codeword)。由于在构造时加入了可控的(Controlled)冗余，信道码字比信源码字更长。最后，调制器用对应的模拟符号来表示出每个信道码字的符号，这些模拟符号是从可能的模拟符号组成的有限集合中适当选取出来的。调制器产生的模拟符号序列被称为波形(Waveform)，它是适合在信道上传输的。在接收端，信道输出(接收到的信号)按照与发射端中相反的顺序来处理，从而重构出原始消息信号的可识别形式。重构的消息信号最终被送到目的地的信息用户。从上面的描述来看，很明显设计一个数字通信系统从概念术语来讲是相当复杂的，但是画出来却比较容易。并且，这个系统是鲁棒的(Robust)，比它对应的模拟系统忍耐物理效应(如温度变化、老化、机械振动等)的能力更强，因此数字通信的应用越来越广泛。

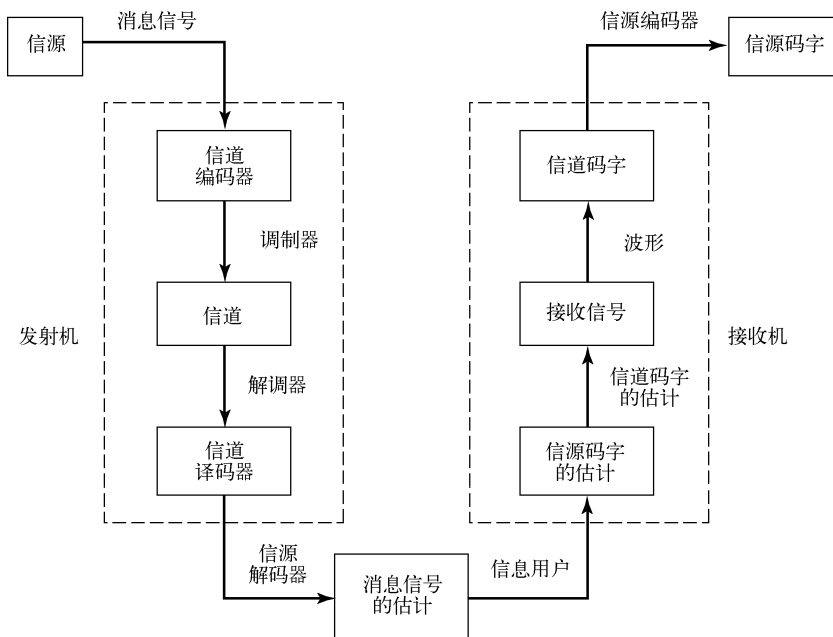


图 1.5 数字通信系统框图

## 1.6 本书组织结构

本书的主要部分包含 10 章内容，在本章引言部分以后，分为 5 个篇幅不同的部分，现简要总结如下。



## 1. 数学背景

第 2 章详细介绍傅里叶变换及其性质和算法实现。本章还包括下列两个重要的相关问题：

- 希尔伯特变换，这种变换为在不丢失信息的情况下，将实值带通信号和系统变换为其低通等效表示提供了数学基础。
- 模拟调制理论，通过回顾这些知识可以更深刻地理解模拟通信与数字通信之间的联系。

第 3 章对概率论和贝叶斯推理的数学基础进行介绍，理解这些内容对于学习数字通信而言是必不可少的。

第 4 章专门对随机过程进行研究，该理论是表示信源和通信信道特征的基础。

第 5 章从信源编码、信道容量和率失真理论等几个方面讨论了信息论的基本限制。

## 2. 从模拟通信过渡到数字通信

这部分内容在第 6 章中讨论。其中介绍了将模拟波形转化为数字编码序列的不同方法。

## 3. 信号传输技术(Signaling techniques)

本书第三部分包括下列三章内容：

- 第 7 章讨论了在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道上的不同信号传输技术。
- 第 8 章讨论了在带限信道上的信号传输技术，比如在电话信道和互联网上进行数据传输。
- 第 9 章讨论了在衰落信道上的信号传输技术，比如在无线通信中的情形。

## 4. 差错控制编码

数据在通信信道上传输的可靠性是一个非常重要的实际问题。在第 10 章中，讨论了在发送端对消息序列进行编码并在接收端对其进行译码的不同方法。这里，我们介绍了两类差错控制编码技术：

- 源于代数学的经典编码技术。
- 新一代的概率组合编码技术，代表性的是 Turbo 编码和 LDPC 编码。

## 5. 附录

最后，本书包含的附录中还提供了各章中可能需要用到的一些相关知识。

## 注释

- [1] 如果需要详细讨论通信网络，可以参考 Tanenbaum 所著的经典著作《计算机网络》(Computer Networks, 2003)。
- [2] OSI 参考模型是国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)的一个分会在 1977 年提出的。如果需要了解 OSI 7 层模型所涉及的基本原理以及对各层的具体描述，可以参考 Tanenbaum 的著作(2003)。