

# 第1章 绪 论

如今正处于称之为无形经济的时代，这样的时代并非由实际有形的实物流程推进，而是由信息流推进。比如，人们在进行大型购买时，可能会利用因特网收集相关产品的信息。短时间内通过访问相关产品的大量信息，即可完成信息的搜集，然后选择广泛认可的具体品牌。在仔细研究实现这种可瞬间接入的技术(有时称为通信与计算的融合)时，涉及两种主要的处理方式：①可靠、快捷的通信方式；②存储信息以备将来使用。

本书关注的是信息传输系统的基本理论。系统将电路和/或者器件组合起来之后完成预期的任务(比如将信息从一个地方传输到另一个地方)。从古到今，从古罗马人利用镜面的日光反射到现代电子通信(现代电子通信始于19世纪的前10年发明的电报)，已采用了许多种方法传输信息。毫无疑问，本书关注的是各种电子通信系统的理论。

电子通信系统的特性是：具有不确定性。出现这种不确定性的部分原因是任何系统中都难免存在不希望出现的干扰信号(统称为噪声)；部分原因是信息本身的特性：无法预测。因此，分析这种不确定性的系统时，需要用到概率论。

自早期的电子通信以来，从通信过程的开始到通信过程的结束，噪声问题始终存在，但在这一研究领域，直到20世纪40年代才将随机系统的分析方法和处理方法用于分析和优化通信系统[Wiener 1949; Rice 1944, 1945]<sup>1</sup>。另外，有些出人意料的是，直到20世纪40年代后期克劳德·香农的论文——“通信中的数学理论”发表之后，人们才广泛地认识到信息不可预知的特性[Shannon 1948]。这篇论文标志着信息科学理论的开始，后面将会较详细地介绍这一主题。

表1.1列出了与电子通信的发展相关联的主要历史事件。表中给出了与通信加速发展有关的各种发明、各种事件的历史轨迹。

表 1.1 与电子通信的发展相关的主要历史事件与发明

时间	事件
1791	亚历桑德罗·伏特发明原电池或者电池
1826	乔治·西蒙·欧姆通过电阻创建电压与电流之间关系的定律
1838	萨缪尔·摩尔斯演示电报
1864	詹姆斯·C. 麦克斯韦预测电磁波的辐射
1876	亚历山大·格雷厄姆·贝尔取得电话的专利权
1887	海因里希·赫兹证明麦克斯韦的理论
1897	古列尔莫·马可尼获得整个无线电报系统的专利
1904	约翰·弗莱明获得热电子二极管的专利
1905	费森登利用无线信道传输语音
1906	德福雷斯特发明三极管放大器
1915	贝尔系统公司完成美国跨州的电话线部署
1918	B. H. 阿姆斯特朗完成超外差式无线接收机
1920	J. R. 卡尔森将采样用于通信
1925~1927	英国与美国的首次电视广播

1 方括号[ ]内的参考文献表示文献的历史资料部分。

续表

时间	事件
1931	出现电传业务
1933	埃德温·阿姆斯特朗发明调频
1936	BBC 开始运营固定的电视广播
1937	亚历克·李维斯设计脉冲编码调制(Pulse-Code Modulation, PCM)
二战	开发雷达与微波系统; 将统计方法用于解决信号提取的问题
1944	计算机用于公共服务(国有单位)
1948	W. 布拉顿、J. 巴丁、W. 肖克莱发明晶体管
1948	克劳德·香农发表论文“通信中的数学理论”
1950	将时分复用技术用于电话系统
1956	越洋通信电缆首次成功
1959	杰克·凯比获得“固态电路”的专利——集成电路的前身
1960	休斯实验室的 T. H. 梅曼首次演示工作激光器(在与贝尔实验室的长达 20 年的争执之后, G. 古尔德获得了专利)
1962	首次发射通信卫星(Telstar I)
1966	传真机首次成功
1967	美国最高法院卡特电话决议: 开放调制解调器的开发
1968	月球探测的电视实况转播
1969	互联网的首次启动——ARPANET
1970	开发出低损耗的光纤
1971	发明微处理器
1975	申请以太网的专利
1976	发明苹果 I 家用计算机
1977	现场直播由光缆系统实现传输的电话业务
1977	实现星际探测: 木星、土星、天王星和海王星
1979	第一个蜂窝电话网在日本运营
1981	IBM 开发的个人计算机面向公众发售
1981	贺氏智能调制解调器进入市场(实现计算机控制的自动拨号)
1982	开发出 16 比特 PCM 的音频光碟(Compact Disk, CD)
1983	首次发售 16 比特的可编程数字信号处理器
1984	AT&T 本地业务资产剥离后成立 7 个贝尔运营公司
1985	公布程序代码的台式机首次发售; 开发以太网
1988	快闪存储器首次进入商业应用(后用于蜂窝电话等)
1988	开发出非对称数字用户环线(Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL)
1990 年代	甚小孔径卫星(Very Small Aperture Satellites, VSAT)通信系统开始流行
1991	利用回波相消技术得到成本很低的 14 400 bps 调制解调器
1993	发明接近香农极限的 turbo 码
1990 年代中期	第二代蜂窝通信系统(2G)进入商用
1995	全球定位系统进入全面运营
1996	全数字电话系统采用下载速率为 56 Kbps 的调制解调器
1990 年代后期	因特网广泛地进入个人应用与商业应用; 高清电视成为主流; 苹果 iPod 首次发售(10 月), 截至 2007 年 4 月, 销售量过亿
2001	3G 蜂窝电话系统开始登场; WiFi 与 WiMAX 可接入: ①因特网; ②需要移动到每地的电子设备
21 世纪 00 年代	最初为军事应用设计的无线传感器网络用于民用(例如环境监测、保健应用、家庭自动化以及交通管理)
21 世纪 10 年代	引入第四代蜂窝无线系统。与通信相关的设备(例如蜂窝电话、电视、个人数码助手)开始出现技术融合

引人注意的是，第一套电子通信系统——电报通信系统为数字系统，这就是说，该系统以数字代码(即由点和线构成的莫尔斯信号)的方式传输点到点的信息<sup>2</sup>。在电报出现 38 年之后，发明了电话，语音信号在电话系统中以模拟电流的形式传输，这种更便捷的通信方式已经持续了 75 年<sup>3</sup>。

在了解了通信的发展史之后，人们可能会问，为什么如今的通信领域几乎完全由数字信号控制？有如下几个理由：①信号的完整性——再生数字信号比再生模拟信号的损耗小得多；②信号的融合——无论是语音信号、图像信号，还是逼真的数字数据(例如文档)，全都以数字信号的形式进行处理；③交互的灵活性——在支持从一对一的交互到多对多的交互时，数字域的处理要方便得多；④编辑——无论是文本、语音、图形或者视频，以数字方式编辑时会很方便、容易。

根据上面对通信的简要介绍及其发展历程，下面较详细地分析构成常规通信系统的各个组成部分。

## 1.1 通信系统的结构图

图 1.1 示出了通信系统中一个通信链路的常用模型<sup>4</sup>。尽管这让人联想到两个相距很远的两个地方之间的通信，但该结构图同样适用于遥感探测系统(比如雷达或者声呐)，系统中同一端的输入与输出可以位于同一个地方。信息传输系统无论具有哪些具体的应用以及采用怎样的配置，都需要如下 3 个主要的子系统：①发射机；②信道；③接收机。本书分析相距很远的地方之间的信息传输。但是，需要强调的是，书中介绍的系统分析技术不只是针对这类系统。

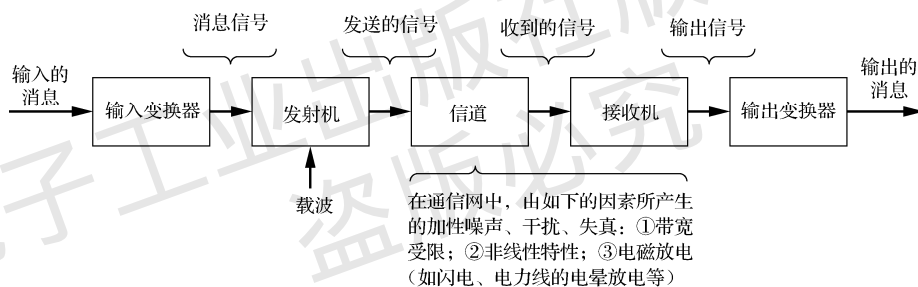


图 1.1 通信系统的方框图

下面详细地介绍图 1.1 中的每一个功能单元。

**输入变换器** 各种各样的信源产生多种形式的消息。无论消息采用哪一种形式，总可以将信号分为模拟信号与数字信号。可以把前者(即模拟信号)设计为：随着时间的变化，信号连续地发生变化(例如压力、温度、语音、音乐)；后者(即数字信号)可以用离散符号建模(例如，①书面文本；②对模拟信号(如语音信号)进行采样、量化、编码的处理)。几乎无一例外的是，必须由变换器将信源产生的消息的格式进行变换，使之适于所采用的通信系统的具体类型。例如，在电子通信中，麦克风将语音信号变换为变化的电压。把经历这一变换之后得到的消息称为消息信号。因此，可以将本书中的信号理解为量的变化(通常指电压或者电流随着时间的变化而变化)。

2 在实际的电报系统中，利用报务员的按键(即开关)来关闭和开启电路，点用短促的双击表示；利用报务员的按键方式来延长电路的关闭时间后，线用持续时间较长的双击表示。

3 参见 B. Oliver, J. Pierce, and C. Shannon, “PCM 的基本原理”, Proc. IRE, Vol. 16, pp. 1324 - 1331, November 1948.

4 常规通信系统更复杂(而非特例)，比如电视或者商业电台为一对多的情形，即多个接收机接收来自同一信源的信息；在多址通信系统中，由许多用户共享相同的信道(例如卫星通信系统)；多对多的通信环境最复杂，例如电话系统与因特网，这两种系统都能够众多用户的任意一对用户之间建立通信。尽管在复用与多址技术中介绍了共享资源的方法，但本书的绝大部分内容仅介绍最简单的单发单收的情形。

**发射机** 发射机的目的是：将消息发送到信道。尽管将输入变换器直接连接到传输介质的情形并不少，但是，(比如在一些对讲机系统中)通常需要利用来自输入变换器的信号对载波进行调制。调制指的是改变系统载波的某些属性(例如幅度、频率或者相位)，使之与消息信号的变化一致。利用载波实现调制的理由有好多，其中最重要的几条理由如下：①容易传输；②减少噪声与干扰；③信道分配；④复用(或者说，几个消息信号在单个通信信道上传输)；⑤克服对设备的限制。

除调制外，由发射机完成的其他的的主要功能包括滤波、放大、将已调信号发送到信道(例如，通过天线或者其他的合理设备发送到信道)。

**信道** 信道有许多种形式；最熟悉的信道可能是：介于商业无线电台的发射天线与收音机接收天线之间的信道。在这种信道中，发送信号经过大气(或者自由空间)的传输之后到达接收天线。发射机通过固定连接到达接收端的情形也很常见，例如大多数本地电话系统(即有线电话系统)；这种系统的信道与收音机的信道大不相同。但所有的信道都有一个共同的特性：当信号从发送端到达接收端时，信号的质量下降。尽管信号质量的下降可能出现在通信系统结构图中的任何一个地方，但通常只将其与信道联系在一起。一般来说，如下的因素会导致信号质量的下降：①噪声；②其他不需要的信号(或者干扰)；③其他的失真效应(例如衰落后的信号电平、多个传输路径、滤波)。稍后较详细地分析这些不希望出现的干扰。

**接收机** 接收机的功能是：在信道的输出端，从收到的信号中提取所需的信号，并且将其转换为适于输出变换器处理的形式。尽管放大可能是接收机首先完成的处理过程之一(特别是在无线通信中，收到的信号可能极弱)，但接收机的主要功能是：对收到的信号进行解调。在某些情况下，尽管期望接收端的输出为输入消息信号的常见函数，但通常较理想的情形是：接收端的输出等于按比例发生了变化的调制器输入消息信号，可能还存在时延。由于存在噪声与失真，因此，这样处理的效果并不理想。随着分析的深入，书中会逐步介绍完整地恢复理想消息信号的各种方式。

**输出变换器** 输出变换器是通信系统的最后一个处理环节。该器件将电信号变换为系统用户所期望的形式。最常见的输出变换器大概是扬声器或者耳机了。

## 1.2 信道的特性

### 1.2.1 各种噪声源

根据不同的来源，可以将通信系统中的噪声分为两大类。由通信系统中的元器件(例如电阻、固态电子元件)产生的噪声称为内部噪声。第二种噪声(即外部噪声)由通信系统之外的噪声源产生，包括大气噪声源、人为的噪声源、宇宙噪声源。

大气噪声主要来自于寄生的无线电波：在雷雨时的大气层内，因自然放电而产生大气噪声。通常把大气噪声称为静态噪声或者天电噪声。在频率约 100 MHz 以下时，这种无线电波的场强与频率成反比。大气噪声在时域内体现为幅度大、持续的时间短，大气噪声是典型的脉冲噪声的例子。由于大气噪声的强度与频率成反比，因此，与大气噪声对工作在 50 MHz 以上的无线电视、调频(Frequency Modulation, FM)广播的影响相比，大气噪声对工作频带为 540 kHz~1600 kHz 的商业调幅(Amplitude Modulation, AM)无线广播的影响更大一些。

人为噪声源包括高压电力线的电晕放电、电动机中的整流器产生的噪声、汽车和飞机点火启动的噪声、齿轮切换的噪声。就特性来说，点火噪声、切换噪声与大气噪声一样，也是脉冲噪声。在有线信道(例如电话信道)切换时，脉冲噪声是噪声的主要类型。对传输语音的应用而言，脉冲噪声只是让人有些不舒服；然而，在数字数据传输的应用中，脉冲噪声可能是产生严重差错的根源。

另一种重要的人为噪声源是射频发射机(这些射频发射机发射的信号并不是需要的信号)。把由干扰发射机产生的噪声称为射频干扰(Radio Frequency Interference, RFI)。当接收天线位于高密度的发射机环境下时,处理 RFI 特别麻烦(例如,在大城市的移动通信环境下,干扰发射机的数量相当大)。

宇宙噪声源包括太阳、其他的热天体(例如恒星)。由于太阳的温度高(6000°C)并且离地球近,因此影响很大。好在已经把无线信源的能量扩展到了很宽的频谱范围。同理,恒星是宽带射频噪声的根源。尽管这些恒星与地球之间的距离比太阳与地球之间的距离远得多(因此导致各个恒星所产生的噪声强度也小得多),但由于恒星的数目巨大,因此,把这些噪声汇总起来之后发现,恒星是个重要的噪声源。射电恒星(如类星体、脉冲星)也是射频噪声的重要根源。与射电天文学家们所考虑的信号源相比,通信工程师们会将这样的恒星视为另一个噪声源。太阳和宇宙噪声的频率范围介于几 MHz 与几 GHz 之间。

通信系统中的另一个干扰源是多径传输。在传输介质中,由于如下因素的作用产生了这些传输路径:①高楼、地面、飞机和轮船等物体表面的反射;②各种层次的折射。根据散射机制,由于各个发送信号产生了大量的反射分量,那么所收到的这些多径信号就成了噪声,并且四处扩散。如果多径信号分量仅由一个或者两个很强的反射分量构成,则会发生镜面反射。最后,由于传输介质中的衰减具有随机性,因此会导致通信系统中信号质量的下降。把信号经历的这种干扰称为衰减。值得注意的是,由于收到的多个信号叠加之后导致信号时强时弱,于是反射的多径信号也会发生衰减。

在电子器件内因电荷载流子的无规则运动而产生的噪声称为内部噪声。通常将其分为3种类型:①受到热运动激励后,导体内或者半导体内因自由电子的不规则运动而产生的热噪声;②在热离子管或者半导体结型器件中,因离散的电荷载流子随机到达所导致的散粒噪声;③半导体中产生的闪烁噪声(目前尚未弄清楚产生闪烁噪声的原理),频率越低,噪声越严重。第1种类型的噪声源(即热噪声)的解析模型见附录A。在采用这种模型时,附录A中还通过几个例子给出了系统所具有的特性。

## 1.2.2 传输信道的类型

有多种类型的信道。这里介绍如下3种常见信道的特性、优缺点:①电磁波传输信道;②导向型电磁波传输信道;③光纤信道。下面根据电磁波的传输对这3种传输信道的特性进行分析。由于每一种信道的特性与应用各不相同,因此分别介绍。

### 1. 电磁波传输信道

1864年,苏格兰数学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(1831~1879)根据迈克尔·法拉第的实验工作,在他的理论中给出了电磁波可以传输的预测。德国物理学家海因里希·赫兹(1857~1894)在1886~1888年进行的实验中利用快速振荡的火花产生了电磁波,因而从实验上证明了麦克斯韦的预测。所以,19世纪的后半叶为利用电磁波传输的许多现代发明(例如,收音机、电视、雷达)奠定了物理基础。

电磁波传输所涉及的基本原理是:利用辐射单元(即天线)将电磁波的能量耦合到传输介质中,可以把自由空间(或者大气)用作传输介质。根据天线的实际配置和传输介质的特性,电磁波的传输存在多种传输模式。最简单的情形是(从未出现在实际应用中):从面的角度来说,来自单点信号源的电磁波在无限的介质中传输。在这种情况下,传输的波前(相位恒定的各个平面)为同心球。从遥远的宇宙飞船向地面传输电磁能量时,可以采用这种模型。另一个理想模型是垂直于无限大平板导体的导线,该模型与商用广播天线的无线电波传输相似。本书的电磁理论中分析了这些模型以及其他的理想模型。这样处理的目的是并不是归纳所有的理想模型,而是在各种实际信道中强调传输现象的基本知识。

除了太空中两个宇宙飞船之间电磁波传输的例子,在发射机与接收机之间的传输介质不可能近似于自由空间。地面通信链路除了与所涉及的距离、辐射信号的频率有关,还与图1.2中所示的如

下因素有关：①视距传输；②地波传输；③电离层的天波传输。表 1.2 列出了频率介于  $3\text{ kHz}\sim 10^7\text{ GHz}$  之间的频带；表中用字母表示的微波频带用于雷达以及其他的应用。值得注意的是，这里的频带是指近几十年来的应用，VHF 的频率范围是 HF 频率范围的 10 倍。表 1.3 示出了特别关注的部分频带。

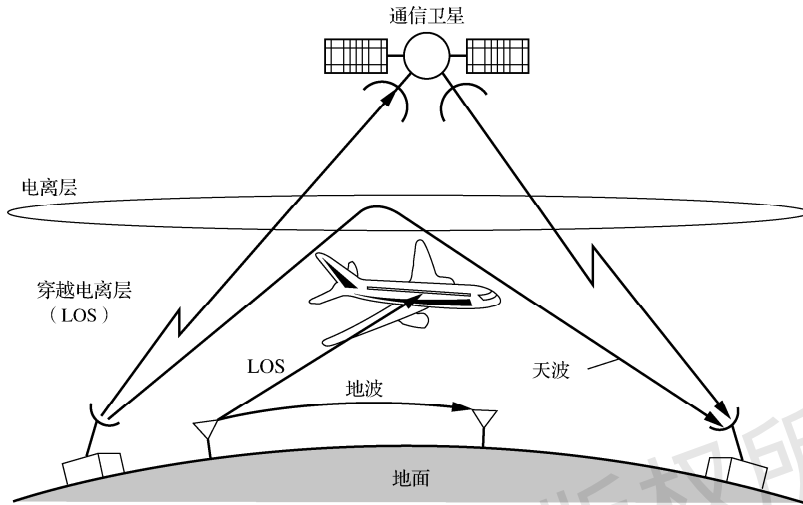


图 1.2 电磁波的各种传输方式(LOS 表示视距传输: Line of Sight)

表 1.2 频带及其名称

频率范围	频带的名称	微波频带 (GHz)	字符表示
3~30 kHz	甚低频 (VLF)		
30~300 kHz	甚低频 (LF)		
300~3000 kHz	中频 (MF)		
3~30 MHz	高频 (HF)		
30~300 MHz	甚高频 (VHF)		
0.3~3 GHz	特高频 (UHF)	1.0~2.0	L
		2.0~3.0	S
		3.0~4.0	S
		4.0~6.0	C
		6.0~8.0	C
		8.0~10.0	X
		10.0~12.4	X
		12.4~18.0	Ku
		18.0~20.0	K
20.0~26.5	K		
30~300 GHz	极高频 (EHF)	26.5~40.0	Ka
43~430 THz	红外线 (0.7~7 $\mu\text{m}$ )		
430~750 THz	可见光 (0.4~0.7 $\mu\text{m}$ )		
750~3000 THz	紫外线 (0.1~0.4 $\mu\text{m}$ )		

说明: kHz= 千赫兹 =  $\times 10^3$ ; MHz= 兆赫兹 =  $\times 10^6$ ; GHz= 吉赫兹 =  $\times 10^9$ ; THz= 太赫兹 =  $\times 10^{12}$ ;  $\mu\text{m}$  = 微米 =  $\times 10^{-6}$  米。

通过国际协议达成常规应用的频谱分配。目前，频率分配的现行体制是：由国际电信联盟 (International Telecommunications Union, ITU) 管理，ITU 负责定期召开区域性或者全球性的无线电管理会议 (1995 年之前指的是世界无线电管理大会 (World Administrative Radio Conference, WARC)、1995 年

及之后的 WRC 指的是世界无线电通信大会(World Radio-communication Conference, WRC))<sup>5</sup>。WRC 负责无线电法规的起草、修订和实施,无线电法规是无线频谱管理国际化的工具<sup>6</sup>。

表 1.3 用于公共事业的频带与用于军事通信的频带<sup>7</sup>

用 途	解 释	频 带
无线电导航		6~14 kHz; 90~110 kHz
罗兰 C 导航系统		100 kHz
标准调幅广播(AM)		540~1600 kHz
ISM 频段	工业用加热器; 电焊机	40.66~40.7 MHz
电视	2~4 频道	54~72 MHz
	5~6 频道	76~88 MHz
调频广播(FM)		88~108 MHz
电视	7~13 频道	174~216 MHz
	14~83 频道 (在美国第 2~36 频道和第 38~51 频道用于数字广播, 其他的频带做了重新分配)	420~890 MHz
蜂窝移动无线通信	AMPS, D-AMPS(1G, 2G)	800 MHz bands
	IS-95(2G)	824~844 MHz/1.8~2 GHz
	GSM(2G)	850/900/1800/1900 MHz
	3G(UMTS, cdma-2000)	1.8/2.5 GHz bands
WiFi(IEEE 802.11)		2.4/5 GHz
WiMax(IEEE 802.16)		2~11 GHz
ISM 频段	微波炉; 医疗	902~928 MHz
全球定位系统		1227.6, 1575.4 MHz
点对点微波通信		2.11~2.13 GHz
点对点微波互连基站		2.16~2.18 GHz
ISM 频段	微波炉; 免牌照的频谱	2.4~2.4835 GHz
	扩展频谱; 医疗	23.6~24 GHz
		122~123 GHz
		244~246 GHz

在美国,由联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)对频带的具体应用授权并颁发使用这些频谱的许可证。FCC 由 5 个专员实施管理,这 5 个专员由总统任命、参议院批准,任期 5 年。总统任命其中的一位专员为委员会主席<sup>8</sup>。

当频率较低(或者说波长较长)时,无线电波倾向于沿着地球的表面传输。当频率较高(或者说波长较短)时,无线电波呈直线传输。低频时发生的另一个现象是:无线电波由电离层反射(或者折射);电离层指的是:在地表上空海拔高度为 30~250 英里的一层层的带电粒子。因此,当频率低于 100 MHz

5 WARC-79、WARC-84 和 WARC-92,均在瑞士的日内瓦召开,是以 WARC 命名的最后 3 届会议;WRC-95、WRC-97、WRC-00、WRC-03、WRC-07 和 WRC-12 是以 WRC 命名的会议。2015 年召开的 WRC-15,它包括 4 个非正式的工作组:海事服务、航空和雷达服务;地面服务;空间服务;监管问题。

6 详细信息参见无线电法规网站: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2004/en>。

7 Bennet Z. Kobb, 频谱指南, 3rd ed., Falls Church, VA: New Signals Press, 1996. Bennet Z. Kobb, 无线频谱检测器, New York: McGraw Hill, 2001。

8 参见网站: <http://www.fcc.gov/>。

时,不可能存在天波的传输。在晚上,因阳光所导致的电离减少而使得处于较低位置的电离层消失,(这时 E 层、F<sub>1</sub> 层、F<sub>2</sub> 层合并为一层——F 层。)而且由于处于较高位置的单层电离层的反射,因此产生了传输较远距离的天波传输。

当频率超过 300 MHz 时,在该频率范围内,由于电离层不可能将无线电波的方向偏转到反射回地面,因此,这时的无线电波呈直线传输。而在频率更高(比如高于 1 GHz 或者 2 GHz)时,大气气体(主要是氧气)、水蒸气、降雨和冰雹会吸收和散射无线电波。这一现象体现为接收信号的衰减,而且频率越高衰减越严重(也就是说,在某些频率处,存在气体吸收峰值的谐振区域)。图 1.3 示出了氧气、水蒸气、雨水的吸收特性随频率变化<sup>9</sup>的具体衰减曲线,这里需要注意的是,1 dB = 10lg(P<sub>2</sub>/P<sub>1</sub>)。在设计微波链路(例如,用于洲际通信的电话链路、地面-卫星通信链路)时,必须分析透彻大气中的这些成分可能产生的衰减。

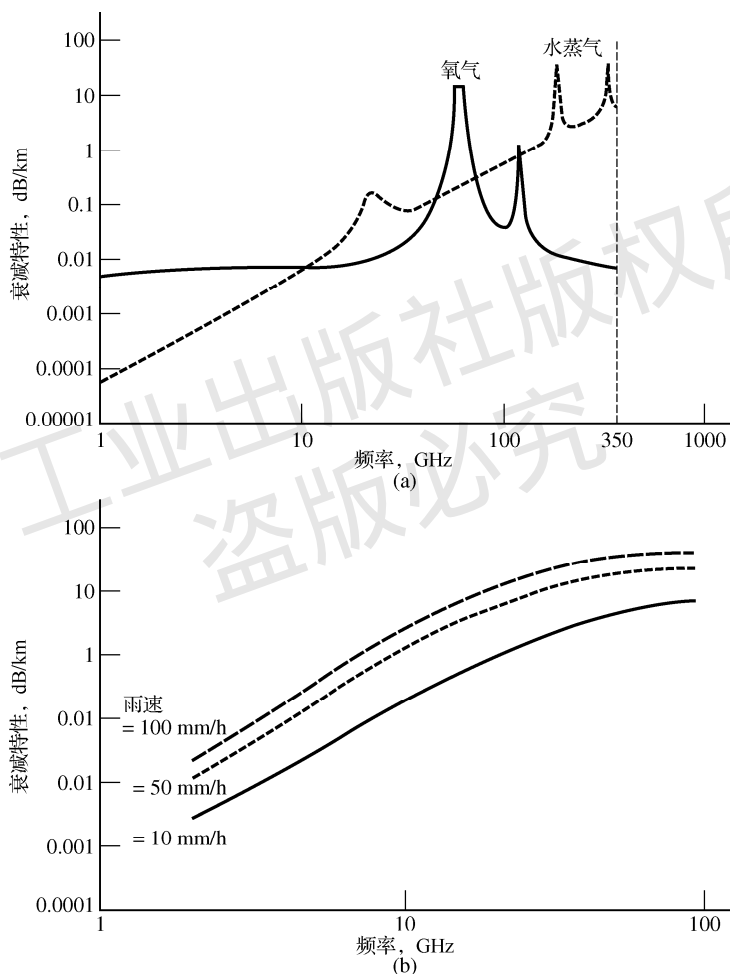


图 1.3 大气气体和雨水的衰减特性。(a)氧气和水蒸气的衰减特性(浓度: 7.5 g/m<sup>3</sup>); (b) 雨速分别为 10 mm/h、50 mm/h、100 mm/h 时的衰减特性

在频率为 23 GHz 附近,因水蒸气的吸收出现了第一个共振点;在频率为 62 GHz 附近,因氧气的吸收出现了第二个共振点。所需的信号在大气中传输时不宜采用上述的这些频率,否则会消耗过多的功率(例如,两个卫星之间相互通信时,可以把 62 GHz 用作通信链路,这时的大气吸收不会产生问题,

<sup>9</sup> 数据选自 Louis J. Ippolito, Jr., 卫星通信中无线电波的传输, Van Nostrand Reinhold 出版社, 1986, 第 3~4 章。



因而在该频率附近通信可以预防敌方在地面窃听信息)。氧气吸收的另一个频率为 120 GHz; 水蒸气吸收的另外两个频率是 180 GHz、350 GHz。

如今, 毫米波频率的通信(即, 在 30 GHz 或者更高的频率处)显得较为重要, 相比之下, 频率较低时拥塞较严重(20 世纪 90 年代中期发射的高技术卫星采用了 20 GHz 附近的上行频率和 30 GHz 附近的下行频率)。由于毫米波在各个频率处的零部件、系统存在着技术优势, 因此通信切实可行。在 30 GHz 和 60 GHz 这两个频率处, 已确定了用本地多点分配系统(Local Multipoint Distribution System, LMDS)和多信道多点分配系统(Multichannel Multipoint Distribution System, MMDS)实现地面宽带信号的传输。由于大气、雨水的吸收较大以及障碍物(如树木和高楼)的阻挡, 在这些频带设计系统时, 需要格外小心。从很大程度上说, 许多最新标准如称之为“超级无线网络”<sup>10</sup>的微波接入全球互通(Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)(有时也称为“超级无线网络”)已不再采用这些频段。

在频率高于 1 THz 的某处, 无线电波的传输特性与光的传输特性一样。二氧化碳激光器可以在波长为 10  $\mu\text{m}$  处产生相干辐射光源; 可见光激光器(例如, 氦-氖激光器)可以在波长 1  $\mu\text{m}$  或者更短的波长处辐射。在阴雨天, 采用这些频率的地面通信系统经历了巨大的衰减。地面链路的激光通信主要采用光纤。已对两个卫星相互之间激光通信的使用进行了分析。

## 2. 导向型电磁波信道

直到 20 世纪的后半期, 长途电话网络才广泛采用了有线导向型电磁波信道, 目前的长途电话网络几乎已完全由光纤取代<sup>11</sup>。起初, 地面上不同地方的人通信时, 采用了架空明线传输音频信号(低于 10 000 Hz)。当时的传输质量相当差。到了 1952 年, 开始将高频载波用于调制技术(也就是双边带技术、单边带技术)。在多对双绞线和同轴电缆上实现的通信取得了好得多的通信质量。随着 1956 年跨大西洋电缆通信的首次实现, 洲际电话通信不再限于高频无线通信, 而且洲际电话通信的质量明显改善。

同轴电缆的带宽为几兆赫兹。对更高带宽的需求启动了微波波导传输系统的开发。然而, 随着低损耗光纤的研究, 为取得更高带宽而实施的对毫米波系统的开发工作停滞不前了。实际上, 光纤的开发已经实现了城区的有线通信, 也就是说, 几乎已成为现实的是<sup>12</sup>: 数字数据、视频可以传输到市内的任一住宅或者经营场所。现代同轴电缆系统的每根电缆只能传输 13 000 路语音信息, 而光纤传输的信息则是电缆的几倍(限制因素是: 光源的电流驱动器)<sup>13</sup>。

**光链路** 在很长时间内, 光链路的应用一直限于短距离通信和中等距离的通信。随着 1988 年横跨太平洋光缆的铺设、1989 年横跨大西洋光缆的铺设, 开启了光缆的长途应用<sup>14</sup>。多项技术的突破导致了光波广泛地用于通信, 这些技术突破包括如下几个方面: ①小的相干光源(半导体激光器); ②低

10 这些术语的详细信息参见 Wikipedia 网站的 LMDS、MMDS、WiMAX、WiFi。

11 想大致了解用于电话系统的导向性传输系统, 参见 F. T. Andrews, Jr., “通信技术: 回望 25 载。Part III, 导向性传输系统: 1952—1973。”IEEE 通信学会杂志, Vol. 16, pp. 4-10, 1978 年 1 月。

12 这里的限制因素是费用昂贵——尽管有许多潜在的顾客承担费用, 但在整个城市街道穿行的成本很高。将电缆或者光纤连接到乡村的家里就会相对容易些, 但潜在用户的数量小得多, 于是增大了每个用户的成本。至于电缆与光纤孰优孰劣, 考虑成本时, “最后一英里”倾向于采用电缆。针对(有时叫做)“最后一英里问题”, 已提出了许多的解决方案, 包括: ①在电话线上实现较高速率的具体调制方案(见表 1.1 中的 ADSL); ②有线电视的双向接入(带宽足够但存在衰减问题); ③光纤(针对期望宽带而且愿意支付费用的用户); ④无线接入(参见较早的 WiMAX 文献)。针对各种情形不可能存在通用的解决方案。对该问题感兴趣的读者参见 Wikipedia。

13 在相当短的光纤上利用波分复用传输消息是最最新的研究成果。其思想是: 通过各种激光光源实现不同的波段(“颜色”)在光纤中并行传输, 因而大幅度提高了带宽——可达几 GHz。例如, 可参见 IEEE 通信杂志, 1999 年 2 月(“光纤网通信系统与设备”专刊), 1999 年 10 月(“宽带技术与实验”专刊), 2000 年 2 月(“光纤网走向成熟”专刊), 2000 年 6 月(“新世纪的智能网络”专刊)。

14 参见 Wikipedia: “光纤通信”。

损耗的光纤或者波导；③低噪检测器<sup>15</sup>。

典型的光纤通信系统中有一个光源，光源可以是发光二极管或者半导体激光器，光源的光强随消息的变化而变化。光调制器的输出是光纤的输入。接收器(或者称为光检测器)通常由光电二极管组成。在光电二极管中，平均电流与入射光的功率成正比。然而，电荷载流子(即电子)的数量是个随机数。检测器的输出为：与调制分量和噪声分量成正比的平均电流的和。这里所说的噪声分量与接收机中电子产生的热噪声的不同之处在于：具有突发性。把它称为散粒噪声(与子弹碰到金属板时发出的噪声类似)。噪声分量的存在是性能下降的原因之一。性能下降的另一个原因是：光纤本身的色散。例如，可以在接收端观察到发送到光纤中的失真之后的脉冲信号。

最后，值得注意的是，可以在自由空间实现光通信<sup>16</sup>。

### 1.3 系统分析技术概述

在确定并且分析了通信系统中的主要子系统、传输介质的某些特性之后，下面介绍本书中所用到的系统分析与设计的各项技术。

#### 1.3.1 时域分析与频域分析

根据线性系统分析中的电路课程或者之前课程的内容，已经非常清楚电子工程师总与时间、频率这两个领域打交道。再者，读者应该已经理解了时间-频率分析技术对适用叠加性原理的线性系统特别有用。在大多数情况下，尽管通信系统中出现的许多子系统及相应的处理都针对线性系统，但也有许多系统不是线性系统。然而，对通信工程师而言，与其他系统的分析师相比，频域分析是个极有价值的方式。由于通信工程师主要关注信号的带宽、信号在频域中的位置，而不关注暂态分析，因此，必不可少地采用了稳态系统的傅里叶级数与傅里叶变换的分析方法。相应地，将在第2章简要地介绍傅里叶级数、傅里叶积分及其在系统分析中的作用。

#### 1.3.2 调制及其传输理论

调制理论利用频域分析法对系统中承载信息的信号所经历的调制与解调进行分析和设计。具体地说，在信道上对采用双边带调制方式传输的消息信号  $m(t)$  进行分析和设计。将双边带调制的已调载波表示为如下的形式： $x_c(t) = A_c m(t) \cos(\omega_c t)$ ，其中， $\omega_c$  表示载波的频率，单位为弧度/秒； $A_c$  表示载波的幅度。不仅必须准备好将两个信号相乘的调制器，而且还需要为待发送的信号  $m(t)$  提供功率电平合理的放大器。在系统方案中并不关注这种放大器的精确设计。然而，已调载波的频率分量很重要，因此必须确定频率分量。为了得到这样的信息，采用时域分析法、频域分析法很有益处。

在信道的另一端，必须配置能够根据已调信号提取  $m(t)$  副本的接收机。为了得到好的效果，这时可以再次利用时域技术与频域技术。

在系统性能方面，通信理论中还包括如下两部分：①对干扰信号的影响给出分析；②在随后的设计中对于干扰信号的影响给出修正方案。这些分析都用到了调制理论。

尽管这里提到了干扰信号，但并未明确地强调信息传输的不确定性问题。未采用概率统计方法时，的确可以解决许多问题。但正如前面所指出的，概率统计方法及相应的优化处理过程已成为现代通信

15 想大致了解信号处理方法在改进光纤中的应用，参见 J. H. Winters, R. D. Gitlin, and S. Kasturia, “在数字光纤系统中减小传输损耗的影响,” IEEE 通信杂志, Vol. 31, pp. 68-76, June 1993.

16 参见论文“IEEE Communications Magazine, Vol. 38, pp. 124-139, August 2000”中“自由空间的激光通信部分”。

的重要组成部分，并且引导了 20 世纪后半程的新技术与新系统的研究与开发，这与第二次世界大战之前的局面完全不同。

下面介绍通信系统实现统计优化的几种方法。

## 1.4 系统优化的概率统计方法

如前面引用的文献所述，维纳和香农的工作是现代通信统计理论的起步。这两位研究人员在存在噪声的背景下，将概率统计方法用于提取承载了信息的信号。他们两人从不同的角度分析问题。本节简要地介绍将这两种方法用于最佳系统的设计。

### 1.4.1 信号的统计检测和估计理论

维纳分析了信号在噪声背景下的最佳滤波问题。其中，“最佳”检测方案用于降低所需信号与实际输出信号之间的平均均方误差。由此得到的滤波器结构称为维纳滤波器。这种类型的方法特别适于模拟通信系统，也就是说，经过这种滤波器的处理之后，接收端解调输出的是发送端输入消息的准确可靠的副本。

对模拟通信而言，维纳的处理方法很合理。然而，在 20 世纪 40 年代初期，文献[North 1943]提出了一种对数字通信更富有成效的方法，该文献介绍：接收机在背景噪声环境下必须能够分辨出许多种离散信号。实际上，诺斯(文献[North 1943]的作者)关注的是雷达，雷达只需要检测脉冲信号是否存在。在接收端的信号检测问题中，检测信号的保真度无关紧要，诺斯研究出的滤波器能够增大输出端信号峰值-噪声均方根的比值。把所得出的最佳滤波器称为匹配滤波器(详细的分析解释见第 9 章数字数据的传输)。后来，将维纳滤波器与匹配滤波器的核心思想与时变的背景结合之后得出了自适应滤波器。在第 9 章介绍数字数据的均衡时分析了这种滤波器的一个子类。

20 世纪 50 年代，由几个研究人员(见[Middleton 1960]第 832 页介绍的几部参考文献)将维纳和诺斯提取信号的方法按照统计学的表述方式形成正式的文本，这正是如今所说的“信号的统计检测和估计理论”的起源。设计接收机时，需要利用信道输出端的所有有效信息。文献[Woodward and Davies 1952 and Woodward, 1953]在已知可能发送消息的条件下，用这种所谓的理想接收机计算信号的接收概率。把所计算出的这些概率称为后验概率。然后，理想接收机给出如下的判决：发送消息为对应最大后验概率的单元。尽管在这一点上可能有些含混不清，但这个如今称为最大后验概率(Maximum A Posteriori, MAP)的原则是检测和估计理论的基础之一。在检测理论的研究中，另一个具有深远影响的研发成果是广义向量模型观点的应用([Kotelnikov 1959]与[Wozencraft and Jacobs 1965])。在第 9 章~第 11 章详细地介绍了这些设计思想。

### 1.4.2 信息论与编码

香农研究的基本问题是：“在已知消息源的条件下，如何表示所产生的消息才能在给定的信道上传输最大的信息量”。针对离散信源与模拟信源，香农给出了这两种情形的公式表示，不过这里只介绍离散系统的情形。很明显，在该理论中考虑的基本因素是信息的度量。一旦确定了合理的度量方式(见第 12 章的介绍)，接下来该做的是：求出信息的传输容量(或者称为信息量)，即，信道上传输信息的最高速率。显而易见，接下来面临的的问题是：“在已知的信道上，如何更接近信道的容量？所收到的消息的质量如何？”。香农理论的非常惊人而且异常重要的研究成果是：尽管存在噪声，如果传输的时间为任意值，那么在信道上以低于信道容量的速率发送信息，就可以以任意低的差错概率适当地恢复发送的消息。这是香农第二定理的要点。本书中对

这一问题的介绍限于二进制离散信源：在信道的输入端，从  $2^n$  个可能的二进制序列中，通过随机地选择码字的方式，给出了香农第二定理的证明。在对所有可能的码字求平均时，如果  $n$  的长度相当大，那么所收到的长度为  $n$  的序列的差错概率可以变得任意小。因此，存在许多适合的码，但香农并没有探索出如何求解这些码。的确，从一开始信息论就留下了这个难题，并且这个难题已成了该领域的研究热点。近些年来，在探索优质编码、解码技术方面已经取得了巨大的成就，这里的优质编码、解码技术指的是：①可以用合理的硬件实现；②只需要合理的时间就能完成译码。

第 12 章介绍了几种编码技术<sup>17</sup>。在编码领域的近代史上，最令人震惊的研究成果可能是 turbo 码的发明以及随后法国研究成员们 1993 年的出版物<sup>18</sup>。后来由几个研究人员证明了这些成果所展示的性能与香农极限只差零点几分贝<sup>19</sup>。

### 1.4.3 领域内的最新进展

在过去的几十年里，通信理论及其实际实现取得了巨大的成就。本书介绍了其中的部分进展。基本概念的分析是本书的主题。在介绍通信理论的基本概念之前，这里先介绍一下这些成就的要点。想立即阅读相关内容的读者可以参考 IEEE 会刊提供的如下两个领域的最新进展：①turbo 信息的处理(除其他应用外还用于 turbo 码的译码)<sup>20</sup>；②多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)通信理论，预计 MIMO 会对无线局域网、无线广域网的研究产生深远的影响<sup>21</sup>。若需了解现代通信理论从起步到近期的广泛发展，可以参考浓缩为一卷的论文集，论文集里的这些论文是领域内的行家对跨度 50 年时间内的进展给出的评价<sup>22</sup>。

## 1.5 本书内容的概要介绍

根据上面的介绍，在分析通信系统时应该很容易理解概率论与噪声特性的重要性了。因此，在第 2、3、4、5 章相继介绍了基本信号、系统、没有噪声条件下的调制理论、数字数据传输的基本单元之后，在第 6、7 章分别分析了概率与噪声理论。随后将这些基本工具应用到第 8 章模拟通信方案的噪声分析中。第 9 章、第 10 章在分析数字数据的传输时，则利用概率论的方法设计出最佳接收机。第 9 章、第 10 章从差错概率的角度剖析了各种类型的数字调制方案。第 11 章利用广义正交基分析信号的最佳检测和信号的估计技术，并通过信号空间技术细致地解析此前介绍的系统为什么能够实现相应的功能。如前所述，信息论与编码是第 12 章的主题。通过信息论与编码技术，可以将实际通信系统与理想通信系统的性能进行比较。第 12 章介绍了这些比较的结果，根据这些结果的比较，可

17 读者若想全面了解众所周知的香农理论，请参阅 S. Verdu 的论文“香农理论的 50 年”，IEEE Trans. on Infor. Theory, Vol. 44, pp. 2057-2078, October 1998。

18 C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, “接近香农极限的纠错编码与译码: Turbo Codes,” Proc. 1993 Int. Conf. Commun., pp. 1064-1070, Geneva, Switzerland, May 1993。

也可以参考关于编码理论的最佳的指南性文章，D. J. Costello and G. D. Forney, “信道编码: 通往信道容量的历程,” Proc. IEEE, Vol. 95, pp. 1150-1177, June 2007。

19 实际上，由 Robert Gallager 于 1963 年发明的低密度奇偶校验码是传输速率接近理论极限的第 1 种码([Gallager, 1963])。但 1963 年不可能实现，于是一直淡忘直至此前的 10~20 年中，由于理论的进步和大幅提高的处理器促进了业内人士对它的关注。

20 Proceedings of the IEEE, Vol. 95, no. 6, June 2007. Turbo 信息处理专刊。

21 Proceedings of the IEEE, Vol. 95, no. 7, July 2007. 下一代无线通信—多用户 MIMO-OFDM 特辑。

22 W. H. Tranter, D. P. Taylor, R. E. Ziemer, N. F. Maxemchuk, and J. W. Mark (eds). 精英中的精英: 通信与网络研究的 50 年历程, John Wiley and IEEE Press, January 2007。

以确定具体选择哪一种通信系统。

最后，值得注意的是，本书并未触及很多的通信技术，例如，光纤技术、计算机技术、卫星通信技术。但读者可以将本书解析的这些原理用于这些领域的分析。

## 补充书目

本章所选的参考文献体现了现代通信理论的历史发展进程。总的来说，不容易读懂这些文献。可以在参考文献的历史文献部分找到它们。也可以通过本书第2、3、4章“补充书目”中罗列出的文献，找到相关的介绍性章节。

电子工业出版社版权所有  
盗版必究