



通信技术基础

本章主要介绍通信的发展历程,通信系统的构成、分类,有线/无线传输介质,通信的多路复用技术、交换技术、同步技术;阅读材料介绍信息技术基础、保密通信常识、国际电信联盟(ITU)、国际标准化组织(ISO)、如何读懂电路原理图、常用电子元器件的故障特点等。

1.1 通信技术概述

1.1.1 通信发展历程

通信是信息或其表示方式、表示媒体的时间/空间转移。真正实现信息快速、准确、高效、远距离地传输是利用电作为信息载体才开始的。1837年美国人莫尔斯发明电报,1876年美国人贝尔发明电话以来,通信由电报、电话等单一品种扩大到传真、数据通信、图像通信、广播电视、多媒体通信等;传输介质由明线、无线短波、电缆到微波、卫星、海缆和光缆;交换设备由机电制布线逻辑方式向计算机程序控制方式发展;传输设备由模拟载波向数字脉码调制方式发展;终端设备由机电方式向微处理器控制的多功能终端发展;通信地点由固定方式转向移动方式,并逐步实现个人化。数字化、大容量、远距离、保密性、可靠性等成为现代通信的特点。通信技术的发展历程如下:

1) 电信序幕

通信的革命性变化是以电作为信息载体开始的。1753年2月17日,《苏格兰人》杂志发表了署名C.M的书信,首次提出用电进行通信的设想:把一组金属线从A地延伸到B地,每根金属线对应一个字母;A端发报时,根据报文内容将一条条金属线与静电机相连接,使它们通过相应电流;这些电流通过金属线传到与之相连的B地小球时,便将挂在小球下方的写有不同字母、数字的纸片吸起来,实现信息的远距离传输。上述电通信设想虽不成熟,且缺乏推广、应用的环境,却使人类看到了电信时代的曙光。

特别是19世纪前30年,科学技术取得许多重大进展,对通信的要求越来越高,标志着一个高速通信时代的到来,电信时代的序幕由此逐渐拉开。

2) 有线电报

1793年,法国的查佩兄弟在巴黎-里尔间架设了长230km、以接力方式传输信息的托架式通信线路,系统由许多沿通信线路择高建筑的塔站组成,通过操纵支架不同角度接力传输信息至目的地,这种能在短时间内实现信息远距离传输的“遥望通信”方式曾盛行欧洲;1832年,俄国人希林受奥斯特电磁感应理论启发,设计了用电流计指针偏转来接收信息的电报机;1837年,英国人库克获电报发明专利。

最有名的电报发明家是莫尔斯,为了把电报和人类语言联系起来,他设想“只要电流停止片刻就会出现火花,火花是一种符号,没有火花是另一种符号,没有火花的时间长短是第3种符号,这3种符号组合起来可代表数字、字母,并通过导线传输”,根据上述思想,莫尔斯用电流“通、断、长断”分别来编制代表数字、字母的电码(莫尔斯电码),以代表相应文字。1837年,莫尔斯电报机研制成功,并于1843年建成华盛顿-巴尔的摩的电报线路。1844年5月24日,莫尔斯发出人类第一份电报“上帝创造了何等奇迹”,真正开始了利用电传输信息的时代。

3) 电话通信

首先提出远距离传输语音建议的是英国人胡克。1796年,英国人休斯提出用话筒接力方式传输语音,并给这种通信方式冠以一个沿用至今的名字——电话(telephone)。

电话发明家中成就最卓著的是贝尔。他在做实验时偶然发现铁片在磁铁前振动会发出微弱声响,并通过导线传输到远处,此事给贝尔很大启发:如果对着铁片讲话,让铁片振动,铁片后面放着绕有导线的磁铁,导线中的电流就会发生相应变化;变化的电流传到目的地,又驱动电磁铁前的铁片作同样振动,即可传输声音。1876年3月7日,贝尔获得电话发明专利。1877年,相距300km的波士顿-纽约间架设了世界上第一条电话线路。同年,有人用电话给《波士顿环球报》传输新闻消息,从此开始了公众使用电话的时代。100多年来,电话通信经历了“磁石—共电—自动”的发展过程。1965年,第一部程控电话交换机在美国问世,标志着电话通信新时代的开始。2.1节将详细介绍“电话通信技术”。

4) 电磁波的发现

电报、电话的相继发明,使人类获得了远距离传输信息的重要手段。但只有线路架设到的地方才能传输信息,严重限制了其使用的范围。

1820年,丹麦人奥斯特发现,金属导线通过电流时,附近的磁针会发生偏转。据此,英国人法拉第认为“电能生磁”。实验还表明导体在磁场中运动时会产生电流,即“电磁感应”现象。英国人麦克斯韦从理论上证明了法拉第等人的研究成果,并将电磁感应理论推广到空间,认为变化的磁场周围会产生变化的电场,而变化的电场周围又将产生变化的磁场,依此类推,可把交替的电磁场传输很远。1864年,麦克斯韦发表著名的电磁场理论,首次预言电磁波的存在。1887年,德国人赫兹通过实验证实了电磁波的存在,导致无线通信的诞生,这不但是“有线通信”向“无线通信”的转折,也是整个移动通信的发源点,人类从此进入无线通信领域。

5) 无线电通信

1896年3月24日,俄国人波波夫研制的无线电发射机/接收机成功地进行了250m莫尔斯电码传输,这是世界上最早通过无线电传输有明确内容的电报。从此,无线通信揭开了新的篇章。

1897年5月18日,意大利人马可尼改进了无线电发射/接收设备,并成功进行了12km无线通信。后来,建立了世界上第一家无线电器材公司——英国马可尼公司。1901年12月,马可尼使用800kHz中波首次实现英国到加拿大长达2000mile的跨洋通信,开创了人类无线通信的新纪元。由于无须昂贵的地面通信线路,无线通信很受重视,并发挥了极其巨大的作用。

6) 移动通信

随着社会的发展,人类希望随时随地进行不需要电话线路的通信。1945年,采用单区

制的汽车移动电话在美国问世,但难以满足用户之需;1946 年,美国贝尔实验室提出将移动电话服务区划分成若干小区,每个小区设一个基站(BS),构成蜂窝状移动通信,巧妙地解决了有限频率资源与高密度用户需求量之间的矛盾,系统通信容量显著增加;1978 年该系统在美国芝加哥试验成功,并于 1983 年正式投入商用,这是移动通信史上具有划时代意义的发明,一直沿用至今。

第一代移动通信 1G (generation) 为模拟蜂窝系统,主要采用模拟技术、频分复用(FDMA)技术,终端设备体积大、功耗高、保密性差,只能实现语音通信,漫游能力差;第二代移动通信(2G)是数字蜂窝系统,主要采用数字技术、时分复用(TDMA)技术,通信容量较大,能提供多种业务,以欧洲的全球移动通信系统(GSM)为代表;第三代移动通信(3G)主要基于宽带码分复用(CDMA)技术。移动通信将人类带进“个人通信”时代,可以在任何时间、任何地点,以任何方式与任何对象建立通信联系,实现信息交互,变“服务到家”为“服务到人”,真正满足信息时代的高要求。2.3 节将详细介绍“移动通信技术”。

7) 微波通信

频率 300MHz~300GHz(波长 1m~1mm),能量集中于一点并沿直线传播的电磁波称为微波。微波通信是利用微波在视距范围内进行信息传输的一种“点—点”通信方式,可传输音频、视频和数据等。

20 世纪 40—50 年代开始使用的微波通信具有容量大、投资省、建设快和抗灾能力强等优点,成为远距离、大容量地面干线无线传输的主要手段。目前,发达国家的微波通信占长途通信 50% 以上,成为最有发展前景的手段之一。2.4 节将详细介绍“微波通信技术”。

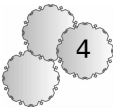
8) 卫星通信

卫星通信指利用人造地球卫星作中继站转发或反射无线电波,实现两个或多个地球站间的通信。1945 年 10 月,英国人 A. C. 克拉克发表论文“地球外的中继”,提出通过发射人造地球卫星,为地面通信建设于空间的“中继站”,首次提出用卫星进行通信的可能性。

卫星通信发展简史如表 1-1 所示。它具有覆盖范围广、通信容量大、通信距离远等优点,广泛应用于通信、广播、电视,以及定位、遥感、监控等。2.5 节将详细介绍“卫星通信技术”。

表 1-1 卫星通信发展简史

时 间	大 事 记
1945 年 10 月	英国人 A. C. 克拉克提出卫星通信的设想。他在《Wireless World》杂志发表了题为“地球外的中继”的文章,首次揭示利用卫星进行通信的可能性
1954 年 7 月	美国海军利用月球表面对无线电波的反射进行了地球上两地的电话传输试验,以此为基础,1956 年在华盛顿和夏威夷间建立了无线通信业务
1957 年 10 月 4 日	苏联发射了世界上第一颗人造地球卫星,地球上第一次收到了来自人造卫星的电波。它不仅标志着航天时代的开始,也意味着利用卫星进行通信的时代即将到来
1960 年 8 月 12 日	美国国防部把直径 30m 的“回声 1 号”发射到距地面 1600km 的圆形轨道,进行通信试验。这是世界上第一颗“无源通信卫星”,只能将信号反射进行通信。该方式效率太低,实用价值有限
1962 年 7 月 10 日	美国国家航空宇航局发射了世界上第一颗有源通信卫星“电星 1 号”,该卫星可对信号进行接收、处理、放大、再发射,显著提高了通信质量



续表

时 间	大 事 记
1963 年 7 月 26 日	美国国家航空宇航局发射“同步 2 号”通信卫星,在非洲、欧洲和美国间进行电话、电报、传真通信。该卫星有 30° 倾角,运行轨道相对于地面作“8”字形移动,非真正“同步”,还不是“静止卫星”
1964 年 8 月 19 日	美国发射了“同步 3 号”卫星,获得完全成功,这是世界上第一颗地球同步静止轨道通信卫星
1964 年 8 月 20 日	成立了以美国通信卫星有限公司为首的“国际通信卫星财团”,次年更名为“国际通信卫星组织”,即著名的 Intelsat。其宗旨是建议和发展全球通信卫星系统供世界各国使用,以便改进电信的服务。确立了卫星通信体制和标准地球站的性能标准,卫星通信业务从此正式成为国际间的商用业务
1965 年 4 月 6 日	国际卫星通信组织发射世界上第一颗实用型商业通信卫星“晨鸟”(Early Bird),又称“国际通信卫星-I”(Intelsat1),它可以开通 240 路电话,标志着卫星通信进入实用阶段
1966—1967 年	4 颗“国际通信卫星-II”升空,通信容量为 400 个双向话路,通信能力遍及全球
1968—1970 年	8 颗“国际通信卫星-III”升空,通信容量为 1200 个双向话路
1971—1975 年	8 颗“国际通信卫星-IV”升空,通信容量达 5000 个双向话路
1975—1979 年	2 颗“国际通信卫星-IV A”升空,每颗有 20 个转发器,容量为 6250 个双向话路加 2 路彩色电视
1980—1984 年	3 颗“国际通信卫星-V”升空,每颗有 27 个转发器,通信容量为 12000 个双向话路加 2 路彩色电视。第一次采用了 3 轴稳定和太阳能电池板技术
1986 年	开始发射“国际通信卫星-VI”,卫星频谱再用 6 次,有效带宽 3680MHz,有 34 个转发器,可同时传输 3 万个双向话路加 3 路彩色电视
1990 年开始	“国际通信卫星-VII”升空,使用了大量的窄波束,并开发应用了 5 种新技术。该卫星可同时传输 10 万个双向话路和 4 路彩色电视

9) 光纤通信

激光有极为丰富的频率资源,很受通信领域重视。但激光在大气中传输时受气候条件、地理条件等的影响和制约,信号衰减很大。有鉴于此,激光通信研究由“无线方式”转向“有线方式”。1966 年,英国华裔科学家高锟提出以光导纤维(简称光纤)进行远距离激光通信的设想,认为激光在光纤中的传输损耗如果降到 20dB/km,便可用于通信;1970 年,美国康宁公司根据高锟的设想制造出世界上第一根低损耗光纤,这是光纤通信的重大突破;1976 年,首条光缆实验系统在美国亚特兰大建成;1980 年,在英国苏格兰西海岸敷设了世界上第一条海底光缆。作为最有发展前途的通信技术,光纤通信具有频带宽、容量大、衰耗小、保密性强、抗干扰能力高等优点,广泛应用于邮电通信、广播电视、计算机网络等。目前,光通信正逐渐取代电通信,成为主要通信手段。2.2 节将详细介绍“光纤通信技术”。

纵观通信技术发展,其主要特点:频率由低频向高频发展,通信方式从中波、短波发展到微波、毫米波。可以说通信技术的发展历史是不断开拓更高频率的历史,也就是通信容量不断增长的历史。例如,人类掌握了数百至数千千赫的技术后,无线电及广播开始应用;数十至数百兆赫的技术成熟后,电视进入千家万户;数千至数万兆赫的载波提供了雷达、微波通信、卫星通信等通信手段。而要开发更高的载频,就势必要开拓光波,光纤通信逐渐取代

电通信成为主要通信手段是人类进入信息时代、网络时代的重要标志。现代通信技术涉及数字通信技术、程控交换技术、信息传输技术、通信网络技术、数据通信与数据网、异步传输模式(ATM)技术、宽带 IP(Internet protocol, 网际协议)技术、接入技术等,发展趋势是在数字化、综合化基础上,向智能化、移动化、宽带化和个性化方向发展。

1.1.2 通信系统模型

通信系统指利用传输信道或网络将具有收/发信息功能的终端设备有机连接起来的系统,包括终端设备、交换设备、传输信道,可实现单向/双向或单工/双工通信功能。

为把用户非电形式的消息传输到远方,发送端通过终端设备将作为信源的消息转换成电信号,并将该信号加载到某种载体上,经信道传输到接收端,接收端的用户终端设备从所接收信号中还原出受信消息。通信系统模型如图 1-1 所示。

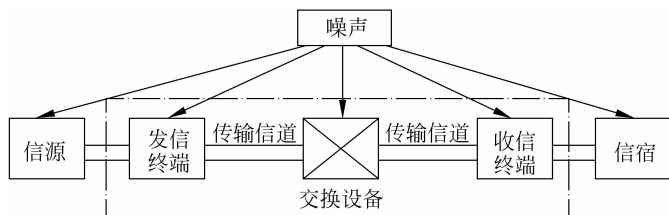


图 1-1 通信系统模型

(1) 终端设备。终端设备包括发信终端、收信终端等,除完成消息和信号的相互转换,还具有产生、识别、处理信令及信道适配等功能。不同通信业务的终端设备各异,如电话业务的电话机、传真业务的传真机、数据业务的数据终端机等。

(2) 交换设备。交换设备是通信网的核心,其基本功能是汇集、转接、分配用户信号,实现用户间的选择性连接和自由通信。不同属性通信业务要求的交换设备各异:实时性强的电话业务,要求能直接接续话路的电路交换设备;实时性要求不高的数据业务,可采用分组交换设备,把数据信号分组、存储和交换,并以分组为单位,利用各信道的空闲“见缝插针”地传输。通常,安装交换设备的局、所称为交换节点或交换中心,各交换中心有不同层次或级别,大体分接入用户的端局和疏导局间业务的汇接局。

(3) 传输设备。传输设备是连接交换节点、提供传输信号通道的系统,通常由置于系统两端的传输终端设备、通信线路和间插于线路的中继器组成。为提高传输网络的效率,现代通信采用各种复用技术,使传输系统不仅能在“点一点”间提供许多宽带信号通道,还能在线路中串入分出/插入复用设备,沿线上/下部分通道,扩大通信系统的服务范围或覆盖范围。

1.2 通信系统分类

通信系统根据传输信号特征、传输介质、调制方式、通信方式等的不同,有多种分类方法。其中,按传输信号特征的不同,分为模拟通信系统和数字通信系统。

根据信号幅度是否随时间连续变化,分模拟信号和数字信号:前者的某电参量如幅度、频率、相位等在一定取值范围内随时间连续变化,如图 1-2(a)所示,具有结构复杂、易受干

扰、占用带宽较窄等特点;后者指某电参量在一定的取值范围内不随时间连续变化,如图1-2(b)所示,具有信号结构简单、抗干扰性强、易整形和再生、占用带宽较宽等特点。采用模拟信号进行通信的系统称模拟通信系统;采用数字信号进行通信的系统称数字通信系统。

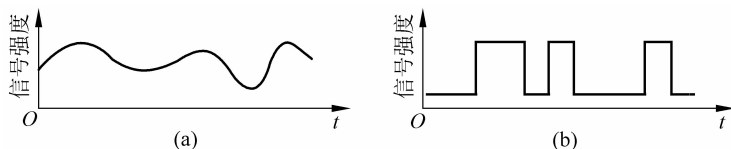


图 1-2 模拟信号和数字信号

1.2.1 模拟通信系统

模拟通信系统模型如图1-3所示。

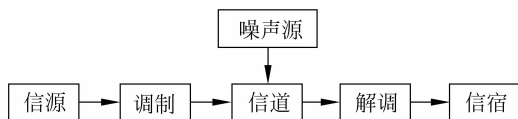


图 1-3 模拟通信系统模型

模拟通信系统中,信源多为频谱分量较低的基带信号。例如,电话信号为 $300 \sim 3400\text{Hz}$,音乐为 $20 \sim 20000\text{Hz}$,这种频谱分量较低的基带信号一般不宜直接传输。因此,模拟通信需进行两种变换:发送端,对信源信号进行调制,变为适合于信道传输的信号;接收端,将信道中传输的已调制信号进行解调,恢复为原始的电信号。

1. 调制的目的

模拟信号的调制、解调过程如图1-4所示。对不同信道,根据经济、技术等因素采用相应的调制方式。调制的主要目的如下:

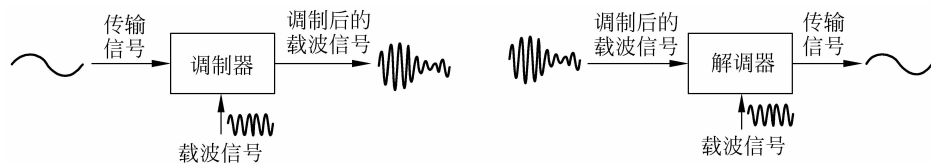


图 1-4 模拟信号调制、解调过程

(1) 频谱变换。为有效、可靠地传输信息,需将低频信号的基带频谱搬移到适当的或指定的频段。例如,人类语音信号频率为 $100 \sim 9000\text{Hz}$ (男性)、 $150 \sim 10000\text{Hz}$ (女性),这种信号从工程角度看不可能通过天线进行无线传输,因为天线辐射效率取决于天线几何尺寸与工作波长之比,一般要求天线长度应在发射信号波长的 $1/10$ 以上。因此,语音信号必须进行调制,也就是将该信号搬移到工程上能传播的信道频谱范围才能传输。

(2) 提高抗干扰能力。调制能改善系统的抗噪声性能,增强了信号的抗干扰能力。例如,提高通信的可靠性必须以降低有效性为代价,反之也一样。即通常所说的信噪比(S/N)和带宽的互换,而这种互换是通过不同调制方式实现的。当信道噪声较严重时,为确保通信

可靠性,可以选择某种合适的调制方式来增加信号频带宽度。这样,虽然降低了信号传输的有效性,但抗干扰能力增强了。

(3) 实现信道多路复用。信道的频率资源十分宝贵,一个物理信道如果仅传输一路信号 $m(t)$,显然浪费了远比 $m(t)$ 频率范围宽的信道资源。通过调制,将多个信号的频谱按一定规则排列在信道带宽相应频段,实现同一信道中多个信号互不干扰地同时传输,即 FDMA。当然,复用方式、复用路数与调制方式及信道本身的特性有关。

2. 常用调制方式

大部分调制系统将待发送的信号和某种载波信号进行有机结合,产生适合传输的已调信号。调制器可视为一个六端网络,其中一端对应传输的调制信号 $m(t)$,另一端对应输入载波信号 $c(t)=A_0\cos(\omega_c t+\phi)$,输出端对应已调波 $s(t)$ 。根据完成调制功能的调制器传输函数不同,有调幅(AM)、调频(FM)、调相(PM)等调制方式,相应波形如图 1-5 所示。

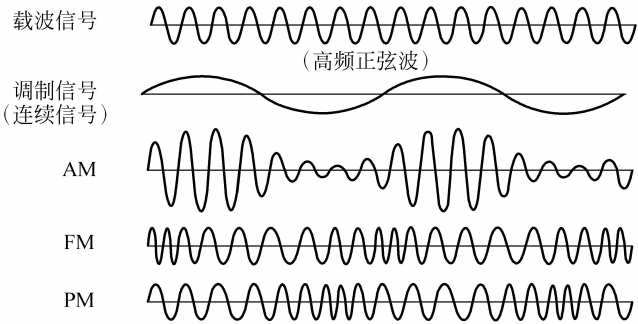


图 1-5 模拟调制 3 种基本方式

3 种调制方式相关指标比较如表 1-2 所示。

表 1-2 3 种常用调制方式比较

调制方式	AM	FM	PM
所需带宽	窄	宽	宽
频谱复杂性	简单	复杂	复杂
功率效率	差	良好	良好
调制/解调处理	简单	难	适度
抗干扰能力	弱	强	强

下面简要介绍模拟调制中的常规双边带调幅(AM)、抑制载波双边带调制(DSB-SC)、单边带调制(SSB)及残留边带调制(VSB)。

1) 常规双边带调幅(AM)

调幅是使高频载波信号的振幅随调制信号的瞬时变化而变化。发送端用调制信号来改变高频信号的幅度大小,使得调制信号的信息包含入高频信号之中,通过天线把高频信号发射出去,这样调制信号也传播出去了;接收端把调制信号解调出来,也就是把高频信号的幅度解读出来即可得到调制信号。

如果载波信号是单频正弦波,调制器输出的已调信号的包络与输入调制信号为线性关系,称这种调制为常规调幅(简称调幅)。这种调制方式在无线电广播系统中占主要地位。常规双边带调幅中,输出已调信号的包络与输入调制信号成正比,时域表达式为

$$S_{AM}(t) = [m_0 + m(t)]\cos(\omega_c t + \phi)$$

式中, m_0 为外加的直流分量; $m(t)$ 为基带调制信号(通常认为平均值为 0); ω_c 为载波的角频率; ϕ —载波的初始相位。

典型的双边带调幅波形图如图 1-6 所示。可以看出,用包络检波方法能恢复原始调制信号。但为了包络检波时不发生失真,必须满足 $m_0 + m(t) \geq 0$,否则将会因过调幅而产生失真。

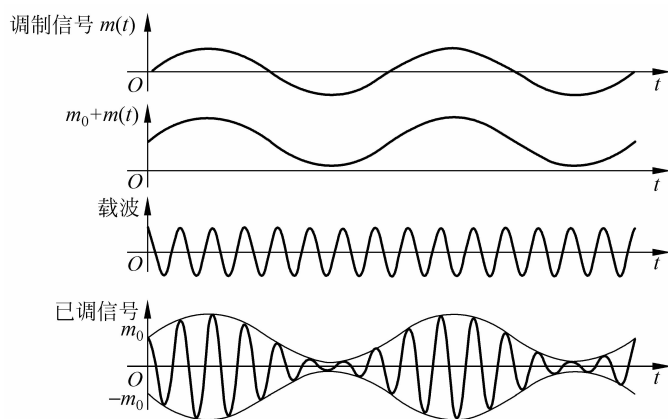


图 1-6 常规双边带调幅

2) 抑制载波双边带调制(DSB-SC)

AM 中载波功率是无用的,因为载波不携带任何信息,信息完全由边带传输。将要抑制载波,只需不附加直流分量 m_0 即可得到抑制载波的双边带调幅。如果输入的基带信号没有直流分量,则输出信号就是无载波分量的双边带调制信号(简称 DSB 信号)。此时,DSB 信号实质上就是 $m(t)$ 和载波 $\cos\omega_c t$ 的乘积,时域表达式为

$$S_{DSB(t)} = m(t)\cos\omega_c t$$

3) 单边带调制(SSB)

DSB-SC 的上、下边带完全对称,所携带的信息相同,完全可以用一个边带来传输全部信息。SSB 方式节省了载波功率,且只需传输双边带调制信号的一个边带。因此,传输单边带信号最直接的方法就是让双边带信号通过一个单边带滤波器,滤除不要的边带,即可得到单边带信号,这是最简单、最常用的方法。

4) 残留边带调制(VSB)

用滤波法产生 SSB 信号的主要缺点是需要陡峭截止特性的滤波器,制作这样的滤波器较为困难。为解决产生 SSB 信号和实际滤波器之间的矛盾,提出了 VSB。

5) 几种模拟调制系统比较

上述几种模拟调制系统的带宽、直流响应、调制与解调设备复杂性等方面的比较如表 1-3 所示。

表 1-3 模拟调制系统比较

调制方式	传输带宽	直流响应	调制/解调设备	主要应用
DSB	$2B$	有	要求相干解调,常与 DSB 信号一起传输导频	模拟数据传输,如立体声广播
SSB	$2B$	无	要求相干解调,调制器比较复杂	载波通信,短波无线通信
VSB	略大于 B	有	要求相干解调,调制器需对称滤波	广播电视,传真
AM	B	无	通常采用包络检波法,比较简单	无线电广播
FM	$2(m_f+1)\times B$	有	调制器复杂,解调器简单	微波中继,卫星通信,广播

比较条件：接收机输入端信号功率相等,输入端加性噪声均值为零,双边带功率谱密度为 $n_0/2$ 的高斯白噪声。

模拟信号具有结构较复杂、易受外界干扰等特点,故模拟通信系统设备复杂,抗干扰性差,存在噪声累积,复用方式落后,不易保密通信,设备集成困难,特别是不适应迅猛发展的数据通信要求;但占用带宽较窄,在带宽资源受限的电缆传输时代成为主要的通信系统。

1.2.2 数字通信系统

数字信号结构简单、再生能力强,故数字通信系统具有模拟通信系统无可比拟的优点,但数字通信占用带宽较宽,在带宽资源受限的电缆时代难以成为主要的通信系统。20 世纪 80 年代以来,数字处理技术、数字集成电路等已十分成熟,特别是光纤通信技术的迅猛发展和广泛应用突破了带宽资源的限制,迎来了数字通信的辉煌时代,也宣告了模拟通信时代的结束。

1. 数字通信系统模型

数字通信系统模型如图 1-7 所示。为实现数字信号远程传输,系统除包括信源编码、信源解码外,还有由信道编码、调制与复用、信道、解调与分路、信道解码等组成的传输系统,以及保证收信/发信两端设备协调一致、同步工作的数字同步系统、控制通道和网管数据通道等。

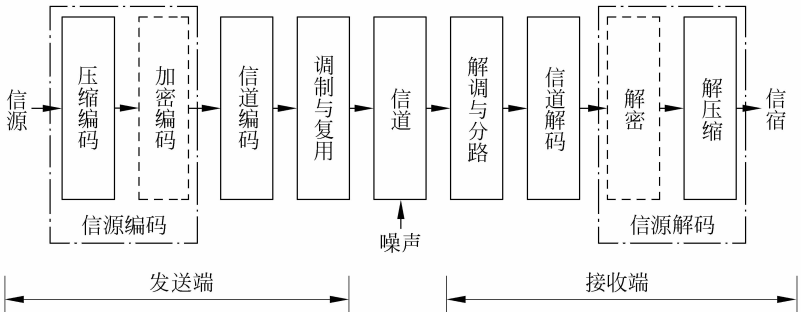


图 1-7 数字通信系统模型

1) 信源编码

信源编码的作用是提高数字信号传输的有效性。信源通常存在某些冗余信息,可根据香农定理去除这些冗余信息,用更少编码位数表示符合一定接收质量的多源符号。

具体来讲,就是针对信源输出符号序列的统计特性寻找某种方法,把信源输出符号序列

变换为最短的码字序列,使后者的各码元所载荷信息量最大,同时又能无失真地恢复原来的符号序列。最原始的信源编码是莫尔斯电码,现代通信常见的分无损编码、有损编码两类。

2) 信道编码

信道编码的作用是提高数字信号传输的可靠性。由于传输信道噪声和信道特性不理想造成的码元间干扰极易导致传输差错,而信道线性畸变造成的码间干扰可通过均衡方法基本消除,因此,信道噪声成为传输差错的主要原因。减小这种差错的基本方法是在信码组中按一定规则附加若干监视码元(冗余码),使原来不相关的数字序列变为有一定相关性的新序列。

接收端可根据这种相关性来检测或纠正接收码组中的误码,提高可靠性,故信道编码又称差错控制编码。接收端的信道解码是信道编码的逆过程。

3) 调制与复用

调制是信号的转换过程,若调制信号为数字信号,则相应的调制称为数字调制。数字信号的调制、解调过程如图 1-8 所示。

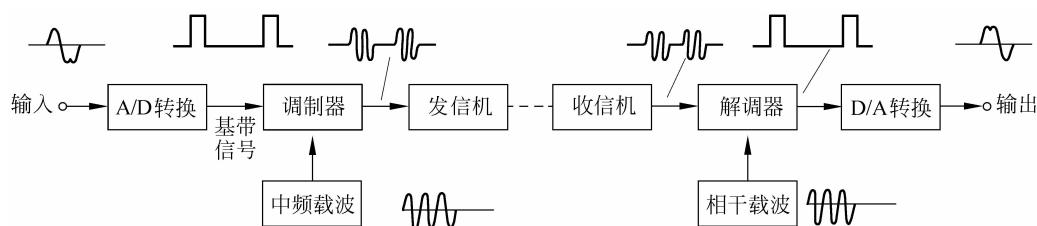


图 1-8 数字信号的调制、解调过程

常用的数字调制有幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)、相移键控(PSK)等,如图 1-9 所示。

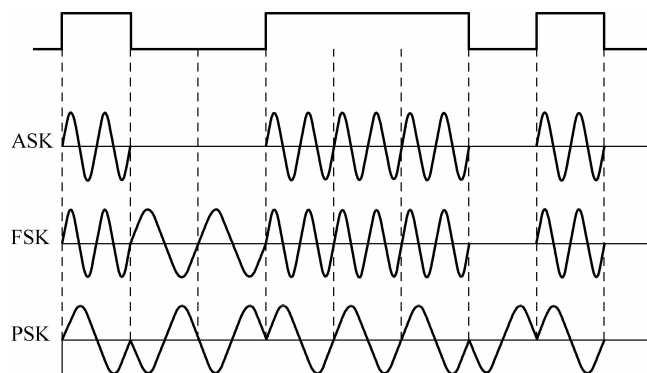


图 1-9 数字调制的 3 种基本方式

(1) ASK 方式下,用载波信号幅度来表示二进制的两种状态。ASK 方式简单易行,由于有直流信号,故抗干扰能力差,是一种低效率编码方法,用于传输速率小于 1.2kb/s 的情况。

(2) FSK 方式下,用载波频率附近的两种不同频率来表示二进制的两种状态。FSK 方式实现容易,技术简单,抗干扰能力强,是目前最常用的调制方法之一,普遍用于中速线路

中。使用 FSK 可实现全双工,达到 1.2kb/s 的传输速率。

(3) PSK 方式下,用载波的相位变化表示数据“1”和“0”,最简单的调相法是二相调制。PSK 方式抗干扰能力强,能对传输速率起加倍的作用,比 FKS 效率高,是目前数字信号模拟化中最常用的方式,特别是高速调制解调器(modem)几乎都采用该方式。

上述 3 种编码方法可以组合起来使用。最常见的是 PSK 和 ASK 结合的相位幅度调制,它是解决相移数已达到上限但还要提高传输速率的有效方法。

复用是指多路信号共享同一信道,提高资源利用率。例如,无线通信频段为 105~1012Hz,各频段、频点用于相应类型的无线信号传输,可采用 FDMA;基于有线信道的基带传输,可采用 TDMA;基于无线扩频通信的 CDMA;基于特殊媒体分离和空间分离的空分复用(SDMA)等。1.4 节“多路复用技术”将详细介绍。

2. 数字通信的特点

数字通信的主要特点如下:

(1) 抗干扰能力强,无噪声积累。模拟通信的噪声随传输距离而增加,导致传输质量下降;数字信号的幅值为有限个离散值,传输过程中虽然也存在干扰,但当干扰恶化到一定程度时,可以采用判决再生的方法,生成没有噪声干扰的和原发送端一样的数字信号,实现远距离、高质量传输。

(2) 便于加密处理。信息传输的安全性、保密性越来越重要,数字通信的加密处理比模拟通信容易得多。以语音信号为例,经过数字变换后的信号可用简单的数字逻辑运算进行加密/解密处理。

(3) 便于存储、处理和交换。数字信号形式和计算机一致,都是二进制代码,易于与计算机联网,并利用计算机进行数字信号的存储、处理和交换,使通信网的管理和维护自动化、智能化。

(4) 设备便于集成化、微型化。数字通信采用 TDMA,不需要体积较大的滤波器,可用大规模集成电路(LSI)、超大规模集成电路(VLSI)实现,设备体积小、功耗低。

(5) 便于构成综合业务数字网(ISDN)。采用数字传输方式,可以通过程控数字交换设备进行数字交换,以实现传输和交换的综合。此外,电话业务和各种非话业务都可以实现数字化,构成 ISDN。

(6) 占用频带较宽。一路数字电话约 64kHz,模拟电话仅 4kHz,这是模拟通信仍有生命力的主要原因。随着宽频带信道的大量利用和数字信号处理技术的发展,数字通信带宽已不是问题。

可以看出,数字通信优点显著,发展异常迅猛,应用日趋广泛,并朝着高速化、智能化、宽带化和综合化方向迈进。

3. 模拟信号数字化

模拟信号数字化的常用方法有脉冲编码调制(PCM)、差值编码、自适应差值编码、增量调制(DM)等。其中,最典型、最基础的数字化方式是 PCM,其通信系统模型如图 1-10 所示。

输入的模拟信号(语音信号)经发送端采样、量化、编码处理后成为 PCM 信号,经信道再生中继传输到接收端,接收端再生、解码后还原出采样值,经低通滤波器(LPF)还原为模

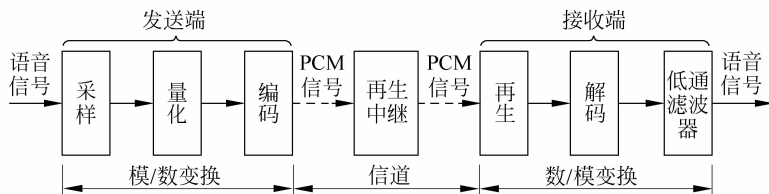


图 1-10 PCM 通信系统模型

拟信号(语音信号)。通常,称采样、量化与编码过程为模/数(A/D)转换;称再生、解码与低通滤波过程为数/模(D/A)转换。可以看出,模拟信号数字化需经过采样、量化和编码 3 个步骤,简介如下:

1) 采样

采样是将模拟信号以该信号带宽 2 倍以上的频率提取样值,变为时间轴离散的采样信号的过程。采样过程所应遵循的规律称采样定理,它说明了采样频率与信号频谱间的关系,是连续信号离散化的基本依据。1928 年,采样定理由美国人奈奎斯特提出;1933 年,苏联人科捷利尼科夫首次用公式严格地表述该定理;1948 年,信息论创始人、美国人香农正式将其作为定理引用。

采样定理基本表述:当信号 $f(t)$ 最高频率分量为 f_m 时, $f(t)$ 值可由一系列采样间隔 $\leq 1/2f_m$ 的采样值来确定,即采样频率 $f_s \geq 2f_m$,则采样后的样值序列可不失真地还原成初始信号。采样定理是采样误差理论、随机变量采样理论和多变量采样理论的基础。例如,一路电话信号频带为 300~3400Hz, $f_m = 3.4\text{kHz}$,则采样频率为 $f_s \geq 2 \times 3.4 = 6.8(\text{kHz})$ 。如果按 6.8kHz 采样频率对 300~3400Hz 的电话信号采样,则采样后的样值序列可不失真地还原成初始的语音信号。实际应用时,语音信号采样频率通常取 8kHz。采样得到的时间上离散的样值序列既可作为 TDMA 信号,也可将各个采样值经量化、编码变换成二进制数字信号。

2) 量化

量化是用有限个幅度值近似原来连续变化的幅度值,把连续幅度的模拟信号变为有限数量的离散值。采样信号(样值序列)虽然时间上离散,但仍为模拟信号,样值在一定取值范围内可以有无限多个值。

显然,无限个样值都给出数字码组对应是不可能的。为实现以数字码表示样值,采用“四舍五入”的方法把样值分级“取整”,使一定取值范围内的样值由无限多个变为有限个。量化后的采样信号与量化前的采样信号相比较,必然有失真。显而易见,分的级数越多,量化级差或间隔越小,失真也就越小。

3) 编码

采样、量化后的信号还不是数字信号,需转换成数字脉冲,该过程称为编码。最简单的是二进制编码,就是用 x 比特二进制码来表示已量化样值,每个二进制数对应一个量化值,然后把它们排列起来,得到由二值脉冲组成的数字信息流。接收端按所收到的信息重新组成原来的样值,再经过 LPF 恢复出原始信号。用这种方式组成的脉冲串的频率等于采样频率与量化比特数的积,称为所传输数字信号的数码率。显然,采样频率越高,量化比特数越大,码率就越高,所需传输带宽也越宽。例如,语音 PCM 的采样频率为 8kHz,每个量化样

值对应一个 8b 二进制码,则语音信号的数字编码速率为 $8 \times 8 = 64(\text{kb/s})$ 。

图 1-11 所示为模拟信号 $m(t)$ 的数字化过程。其中,图 1-11(b)根据采样定理, $m(t)$ 经过采样后变成时间离散、幅度连续的信号 $m_s(t)$ 。图 1-11(c)将 $m_s(t)$ 输入量化器,得到量化输出信号 $m_q(t)$,采用“四舍五入”法将每个连续采样值归结为某一临近的整数值,即量化电平。这里采用了 8 个量化级,将图 1-11(b)中 7 个准确样值 4.2、6.3、6.1、4.2、2.5、1.8、1.9 分别转换成 4、6、6、4、3、2、2。量化后的离散样值可以用一定位数的代码表示,即编码。因为只有 8 个量化电平,所以可用 3b 二进制码表示($2^3 = 8$)。图 1-11(d)是用自然二进制码对量化样值进行编码的结果。

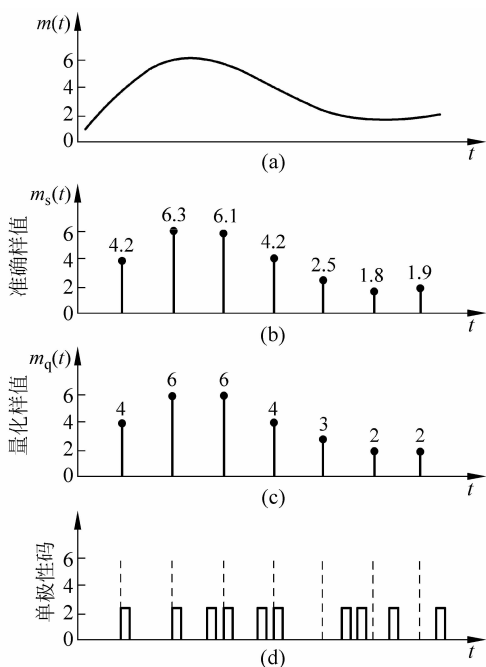


图 1-11 模拟信号数字化过程

4. 数字通信系统的技术指标

不同通信系统的技术指标各异,数字通信系统的主要技术指标有传输速率、信道容量和误码率。

1) 传输速率

传输速率用于衡量信道传输信号的快慢。数字通信系统的传输速率指信道传输信息的速度,有数据传输速率和信号传输速率两种表示方法。

(1) 数据传输速率

数据传输速率又称比特率,指单位时间传输的二进制位的个数。这里,定义信息量度量单位为 bit(简写 b),一个二进制位所含信息量为 1b,定义 1 字节(byte,单位符号为 B)为 8b,还有 TB、GB、MB、KB 等单位,换算关系为: $1\text{TB} = 2^{10}\text{GB} = 2^{20}\text{MB} = 2^{30}\text{KB} = 2^{40}\text{B}$ 。

与此相对应,数据传输速率的单位是比特/秒(b/s 或 bps),此外,还有 Tb/s、Gb/s、Mb/s、kb/s,换算关系为: $1\text{Tb/s} = 10^3\text{Gb/s} = 10^6\text{Mb/s} = 10^9\text{kb/s} = 10^{12}\text{b/s}$ 。

数据传输速率可用以下公式表示:

$$S = (1/T) \log_2 N$$

式中, S 为比特率; T 为脉冲宽度; N 为一个脉冲所表示的有效状态数,通常为 2 的整数倍。

例如,某连续信号 $f = 1200\text{Hz}$,每个信号可表示 4 个不同的状态,则数据传输速率(比特率)

$$S = (1/T) \log_2 N = 1200 \times \log_2 4 = 2400(\text{b/s})$$

(2) 信号传输速率

信号传输速率又称波特率或调制速率,指单位时间内传输的码元个数,单位为波特(Baud,单位符号为 Bd),可用公式表示为

$$B = 1/T$$

式中, B 为波特率; T 为信号周期。

(3) 比特率与波特率的关系

比特率与波特率都是衡量信息在信道传输快慢的指标,但针对的对象不同:比特率针对的是二进制位数传输;波特率针对信号波形的传输。两者关系为

$$S = B \log_2 N$$

比特率与波特率在实际应用中的相互关系如图 1-12 所示。

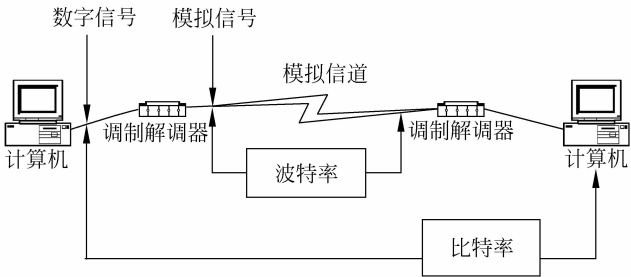


图 1-12 波特率和比特率之间的关系

2) 信道容量

信道容量用于衡量信道传输能力,指信道所能承受的最大传输速率。它受信道带宽限制,信道带宽越宽,单位时间传输的信息就越多。按信道频率范围的不同,信道分为窄带信道(0~300Hz)、音频信道(300~3400Hz)和宽带信道(>3400Hz)。这里,带宽指物理信道的频带宽度,即信道允许的最高频率和最低频率之差。通常,可以用“带宽”取代“速率”,尤其在网络技术中二者几乎是同义词。

信道容量的衡量方法有奈奎斯特公式和香农公式,二者在通信系统中的作用范围如图 1-13 所示。

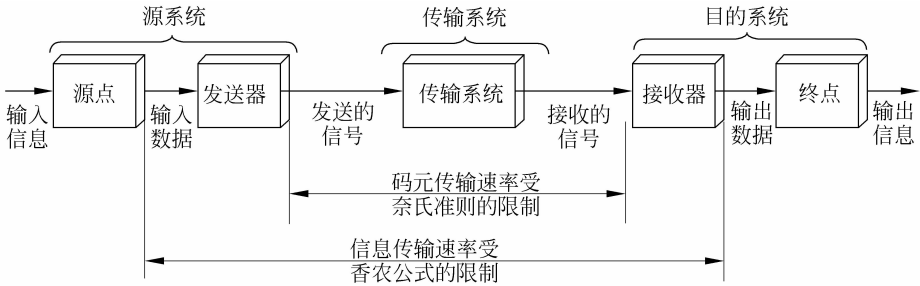


图 1-13 奈奎斯特公式和香农公式在通信系统中的作用范围

(1) 奈奎斯特公式

对有限带宽无噪声信道,信道容量可用以下公式计算:

$$C = 2H \log_2 N$$

式中, C 为最大数据速率(信道容量); H 为信道的带宽; N 为每个脉冲所表示的有效状态数,即调制电平数。

例如,某信道带宽 4kHz,任何时刻信号可取 0、1、2 和 3 这 4 种电平之一,则信道容量

$$C = 2H \log_2 N = 2 \times 4 \times \log_2 4 = 16 (\text{kb/s})。$$

奈奎斯特公式表明,对某一有限带宽无噪声信道,带宽固定,则调制速率也固定。通过提高信号能表示的不同的状态数,可以提高信道的容量。

(2) 香农公式

对有限带宽随机噪声信道,信道容量可用以下公式计算:

$$C = H \log_2 (1 + S/N)$$

式中, H 为信道带宽; S 为信道内信号功率; N 为信道内服从高斯分布的噪声功率; S/N 为信噪比,通常用 $10\lg(S/N)$ 表示,单位 dB(分贝)。

例如, S/N 为 30dB、带宽 4kHz 的信道,最大容量 $C = 4\ln(1+1000) \approx 40 (\text{kb/s})$ 。表示无论采用何种调制技术, S/N 为 30dB、带宽 4kHz 的信道,最大传输速率约 40kb/s。

3) 误码率

误码率用于衡量信道传输的可靠性。由于数字信息由离散的二进制数字序列表示,传输过程中无论经历何种变换,产生什么样的失真,只要在到达接收端时能正确地恢复出原始发送的二进制数字序列,即可达到传输目的。因此,衡量数字通信系统可靠性的主要指标有误码率 P_e 、误比特率 P_b 。

(1) 误码率 P_e

误码率又称码元差错率,指传输的码元总数中错误接收的码元数所占比例,用 P_e 表示(多进制系统)。可用公式表示为

$$P_e = N_e / N$$

式中, P_e 为误码率; N_e 为传输出错的码元数; N 为传输的总码元数。

需指出的是, P_e 作为某一段时间的平均误码率,即使同一信道,如果测量时间不同, P_e 也不一样。

(2) 误比特率 P_b

误比特率指信息传输过程中,错误的比特数占总传输的比特数的概率(二进制系统)。可用公式表示为

$$P_b = \text{传输出错的比特数} / \text{传输的总比特数}$$

1.3 通信传输介质

1.3.1 有线传输介质

1. 传输介质概述

1) 传输介质的分类及特点

传输介质是通信系统中信息传输的物理通路,分有线介质、无线介质两大类:前者指传输信息的媒质为看得见、摸得着的架空明线、电缆、光缆和波导等,特点是信号沿导线传输,能量相对集中,传输效率较高;后者指传输信息的媒质为自由空间,如微波、卫星、红外和激光等,发送方使用高频发射机和定向天线发射信号,接收方通过接收天线和接收机接收信号,特点是信号相对分散,传输效率较低,安全性较差,按波长的不同分为长波、中波、短波、超短波和微波等多种。

常用传输介质类型与特点如表 1-4 所示。

表 1-4 常用传输介质类型与特点

介 质	类 型	特 点	应 用
金属导体	双绞线	成本低、易受外部高频电磁波干扰、误码率较高、传输距离有限	固定电话本地回路、计算机局域网
金属导体	同轴电缆	传输特性和屏蔽特性良好,可作为传输干线长距离传输载波信号,但成本较高	固定电话中继线路、有线电视接入
光导纤维	光 缆	传输损耗小、通信距离长、容量大、屏蔽性好、不易被窃听。缺点是精确连接两根光纤较困难	电话、电视等通信系统的远程干线,计算机网络的干线
无线传输	无线电波/微波/卫星/红外/激光	建设费用低、抗灾能力强、容量大、无线接入使得通信更加方便,但易被窃听、易受干扰	广播、电视、移动通信、计算机无线局域网

2) 传输介质主要特性

传输介质的特性对通信质量影响很大,这些特性主要包括:物理特性,说明传输介质的特征;传输特性,包括信号形式、调制技术、传输速率及频带宽度等;连通性,通信系统“点一点”连接还是多点连接;地理范围,通信系统各点间最大距离;抗干扰性,防止噪声、电磁干扰对数据传输影响的能力等。

下面分别介绍常用有线传输介质如双绞线、同轴电缆的构成及特性。光导纤维相关内容在 2.2 节“光纤通信技术”中介绍。

2. 双绞线

双绞线由若干对铜线组成,每对由两条相互绝缘的铜线或钢包铜线按一定规则绞合在一起,这种绞合起来的结构能有效减少邻近线对间的电磁干扰。双绞线主要特性如下:

- (1) 物理特性。双绞线芯一般是铜质的,能提供良好的传导率。
- (2) 传输特性。作为最常用的传输介质,双绞线既可传输模拟信号,如电话系统;也可传输数字信号,传输速率可达 1.544Mb/s,采用一定技术手段能达到更高的传输速率。通常,将多对双绞线封装于一个绝缘套中组成双绞线电缆。
- (3) 连通性。双绞线多用于“点一点”连接,也可用于多点连接。作为多点连接介质使用时,价格比同轴电缆低,但性能较差,一般只能支持有限的几个站点。
- (4) 地理范围。双绞线能在 15~20km 范围内可靠地传输信号,局域网(LAN)双绞线多用于几个建筑物间的通信。
- (5) 传输低频时,双绞线的抗干扰性相当于或高于同轴电缆,但超过 10~100kHz 时,同轴电缆比双绞线明显优越。此外,双绞线、同轴电缆和光纤 3 种有线介质中,双绞线价格最便宜。

为进一步提高双绞线抗电磁干扰的能力,可以在双绞线外层加上用金属丝编织成的屏蔽层。根据是否外加屏蔽层,双绞线分两种:非屏蔽双绞线,将一对或多对双绞线线对放入一个绝缘套管,阻抗值 100Ω,此种双绞线价格便宜,安装容易,但抗干扰能力差,传输距离和数据传输速度有一定限制,多用于近距离数据传输;屏蔽双绞线,一对或多对双绞线线对外面加上用金属丝编织成的屏蔽层,然后放入绝缘套管,阻抗 150Ω,此种双绞线容量较大,抗干扰能力强,保密性好,但价格较高,应用较少。

美国电子工业协会远程通信工业分会于 1995 年颁布“商用建筑物电信布线标准”(EIA/TIA-586-A),规定了非屏蔽双绞线标准,如表 1-5 所示。

表 1-5 非屏蔽双绞线传输性能

名 称	结构(UTP)	最高传输速率/(b/s)	适 用 场 合
一类线	两对双绞线	20k	话音
二类线	四对双绞线	4M	话音、数据传输
三类线	四对双绞线	10M	话音、10Base-T 以太网
四类线	四对双绞线	16M	话音、令牌环网
五类线	四对双绞线	100M	话音、吉以太网
超五类线	四对双绞线	155M	光纤分布数据接口(FDDI)、快速以太网和 ATM

最常用的五类线和三类线的主要区别:前者增加了单位长度的绞合次数;后者的线对间绞合度和线对内两根导线绞合度经精心设计,一定程度抵消了干扰,改善了线路的传输特性。目前,结构化布线工程中,多采用 100Ω 的五类或超五类非屏蔽双绞线。

3. 同轴电缆

同轴电缆由一对导体按“同轴”形式构成,如图 1-14 所示,这种结构使其具有高带宽和较好抗干扰特性,可以在共享通信线路上支持更多站点。

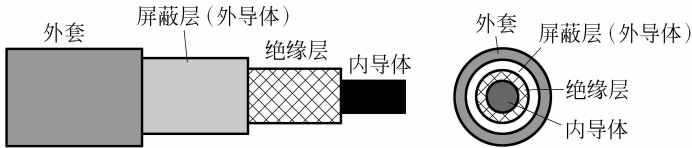


图 1-14 同轴电缆结构

同轴电缆从里向外分为 4 层:内导体,金属导体铜或铝,是同轴电缆的核心,用于传输信号;绝缘层,用于内导体与外导体间的绝缘,防止二者短路;外导体,与内导体构成一对导体,既屏蔽外部的干扰,又防止内部信息泄漏;外部保护层,起保护作用。

同轴电缆主要有宽带同轴电缆和基带同轴电缆两种。分述如下:

(1) 宽带同轴电缆。指 75Ω 同轴电缆,多用于模拟传输系统,是有线电视(CATV)标准传输电缆,频带宽度可达 450MHz。利用 FDMA 技术,可在同轴电缆上传输多路信号。它既能传输数字信号,传输速率可达 50Mb/s,也能传输音频、视频等模拟信号。

(2) 基带同轴电缆。主要指 50Ω 同轴电缆,适合传输数字信号(基带信号),故称基带同轴电缆,分粗缆(RG-11、RG-8)和细缆(RG-58)两种。粗缆抗干扰性能好,传输距离远;细缆价格低,传输距离较近,传输速率约 10Mb/s。

1.3.2 无线传输介质

1. 无线电波波段划分

无线电波按波长不同分为长波(波长>1000m)、中波(波长 100~1000m)、短波(波长

10~100m)、超短波和微波(波长<10m)等,各波段相关参数及应用如表 1-6 所示。

表 1-6 无线电波各波段相关参数及应用

序号	频段	频段范围	传播方式	传播距离	可用带宽	干扰量	应 用
1	甚低频	3~30kHz	波 导	数千千米	极有限	宽扩展	世界范围远距离无线导航
2	低频	30~300kHz	地波、天波	数千千米	很有限	宽扩展	远距离无线民航战略通信
3	中频	300~3000kHz	地波、天波	数千千米	适中	宽扩展	中距离“点一点”广播及水上移动通信
4	高频	3~30MHz	天波	数千千米	宽	有限的	远/短距离“点一点”广播,移动通信
5	甚高频	30~300MHz	空间对流层,散射、绕射	几百千米以内	很宽	有限的	短/中距离“点一点”移动,局域网声音和视频广播,个人通信
6	特高频	300~3000MHz	空间对流层,散射、绕射视距	<100km	很宽	有限的	短/中距离“点一点”通信,声音和视频广播,个人通信,卫星通信
7	超高频	3~30GHz	视距	约 30km	很宽	有限的	短/中距离“点一点”通信,声音和视频广播,移动通信,卫星通信
8	极高频	30~3000GHz	视距	20km	很宽	有限的	短/中距离“点一点”移动通信,个人通信,卫星通信

2. 电磁波频谱分布及应用

电磁波频谱分布及应用如图 1-15 所示。各种电磁波的波长或频率之所以不同,是由于产生电磁波的波源各异。例如,无线电波是由电磁振荡发射的;微波是利用谐振腔及波导管

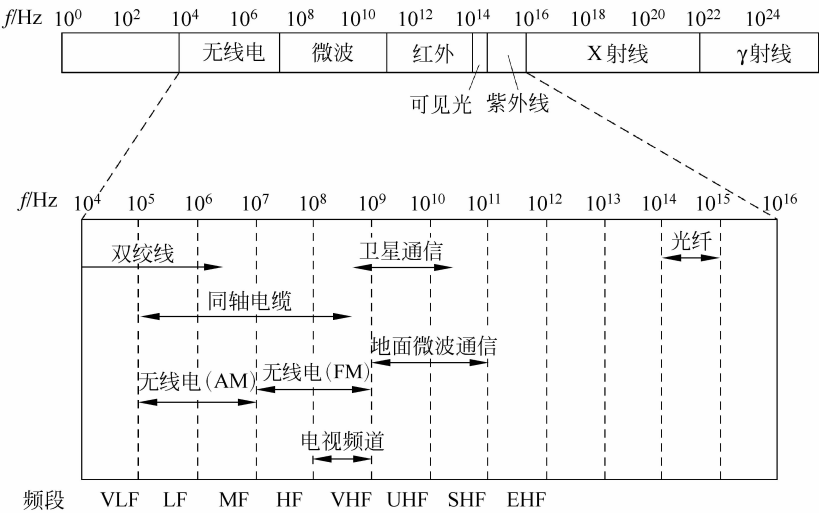


图 1-15 电磁波频谱分布及应用

激励与传输,通过微波天线向空间发射的;红外辐射是由于分子的振动和转动能级跃迁时产生的;可见光与近紫外辐射是由于原子、分子中的外层电子跃迁时产生的;紫外线、X射线和 γ 射线是由于内层电子的跃迁和原子核内状态的变化产生的;宇宙射线来自宇宙空间。

电磁波波长不同,性质差别很大,体现在传播的方向性、穿透性、可见性和颜色等方面。例如,可见光能被人眼直接感觉到,看到物体的颜色;红外线能克服夜障;微波可穿透云、雾、烟、雨等。但它们具有以下共性:各种电磁波传播速度相同($3 \times 10^8 \text{ m/s}$);遵守统一的反射、折射、干涉、衍射及偏振定律。

3. 无线电波传播方式

无线电波传播方式如图 1-16 所示。主要有表面波、自由空间波、天波、散射波和外层空间波 5 种。

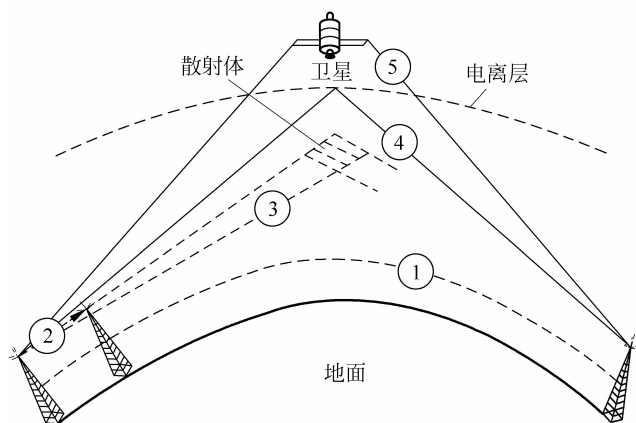


图 1-16 无线电波传播方式

①—表面波；②—空间波；③—天波；④—散射波；⑤—外层空间波

1) 表面波传播

表面波指频率低于 2MHz 的电磁波,沿地球表面传播,又称地波传播,其传播路径如图 1-17 所示。由于电波紧贴地面传播,地面性质、地貌、地物等都影响电波传播特性。

例如,地球表面是半导体,会吸收电波引起表面波的变化;再如,地球表面是球形的,当波长与障碍物高度相当时,表面波发生绕射,能到达视线以外。因此,只有长波、中波及短波的部分波段能产生绕射,绕过地球表面的大部分障碍到达较远的地方。AM 广播通常使用这种传播模式。

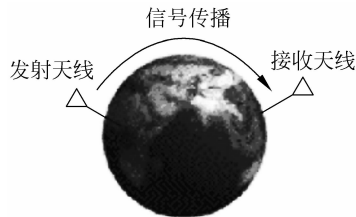


图 1-17 表面波传播路径

2) 空间波传播

频率大于 30MHz 的电磁波主要在大气底层视距传播,传播路径如图 1-18 所示。空间波传播距离受地球曲率影响,只能沿视线传播,否则会被地面阻挡。发射天线须安置在很高的发射塔,以便接收天线能接收信号。通常,视距传播距离 50km。

空间波除受地面影响外,还受对流层的影响。频率在 30MHz 以上的 FM 广播和电视

信号发射都是空间波传播。移动通信中,电波主要以空间波形式传播,类似的还有微波传播。

3) 天波传播

太阳和宇宙射线辐射会引起距地面 $60\sim 600\text{km}$ 的大气层电离,产生大量自由电子、正离子、负离子及未被电离的中性离子等,形成电离层。借此电离层的反射作用,电波可以在地面与电离层间来回反射,传播至较远的地方,这种经电离层反射到地面的电波称天波。电磁波频率 $2\sim 30\text{MHz}$ 时,传播路径即为借助电离层进行的天波传播,传播路径如图 1-19 所示。

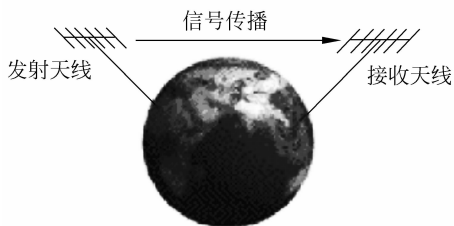


图 1-18 空间波传播路径

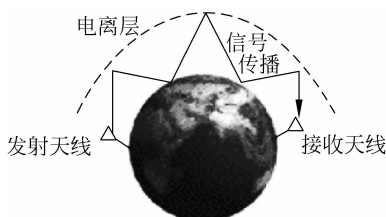


图 1-19 天波传播路径

天波传播时,组成信号的各种频率成分传播速度不同,会产生波形失真,这就是电离层的色散性。同时,由于自由电子受电波电场作用而发生运动,所以电波经过电离层,部分能量会被吸收。此外,从电离层吸收电波的规律看,电波频率越低,电离层吸收作用越强,故天波传播有最低可用频率,低于该频率时会因电离层吸收太大无法工作。中波和短波都能借助电离层反射传播到较远的距离。目前,电离层研究已成为空间物理的重要内容,研究范围和应用频段也日益宽广。

4) 散射传播

离地面 10km 的范围称对流层。对流层中,除有规则的片状或层状气流外,还存在不规则的、类似于水流中漩涡的不均匀体。电波投射到这些不均匀体时会发生散射或反射,只有部分能量到达接收点,这种传播称散射传播。散射波就是利用大气层中对流层和电离层的不均匀性来散射传播的电波,使电波到达视线以外的地方。

该方式通信距离 $300\sim 800\text{km}$,适用于无法进行微波中继的海岛、湖泊、沙漠等。由于散射信号传播损耗很大,故接收点信号非常微弱,需采用大功率发射机、高灵敏度接收机和高增益天线。

5) 外层空间传播

它也称自由空间波传播,是电磁波在对流层和电离层以外的外层空间中的传播方式。该传播方式的电磁波由地面发出或返回,经低空大气层和电离层到达外层空间,如卫星传播、宇宙探测、空间飞行器跟踪及定位等。由于外层空间传播主要在近似真空的宇宙空间进行,故电波传输特性较稳定。此外,外层空间传播还可用于陆地的视距传播。

4. 无线电波传播的特点

无线电波各波段的传播特点如下:

1) 长波传播的特点

由于长波的波长很长,地面的凹凸与其他参数的变化对长波传播的影响可以忽略。通