

通信系统原理

黄庚年 武法正 编 著
李巧云 刘瑞霞

北京邮电学院出版社

通信系统原理

编 著：黄庚年 武法正等
责任编辑：郑 捷 时友芬

北京邮电学院出版社出版
(100088海淀区学院路42号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京邮电学院出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 1/16 印张 35.75 字数 890 千字
1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷
印数：1-3500 册
ISBN7-5635-0065-0/TN·20 定价：9.10 元

前 言

本书是在多年讲授《通信系统原理》课程的基础上,根据通信工程、无线通信、电磁场与微波、信息工程等专业教学计划的要求并结合原有教材而编写的,其主要内容是阐述信号、调制与噪声性能的基本理论。

考虑到我国通信现状:模拟通信与数字通信并存,而数字通信又具有其独特的优点。因此,本书在取材上兼顾了模拟与数字通信两方面的基本理论,又加强了数字通信内容,深入分析数字调制技术,以适应不同专业的需要。

考虑到先修课程中已讲授了有关傅氏变换、卷积等理论,本书以能承上启下的方式,写入这些内容的基本理论和结论,体现本书理论的完整性。为加强学生对计算机的运用,书中写入数值计算的内容和通信系统的计算机仿真,在习题中编入用计算机解题的题目,教师和学生可根据需要选择。

本书力求阐述条理清楚、推导公式完整,在各章节中尽可能加入一些例题,在每章末附以小结和习题。本书可作为通信类有关专业的通信理论教材,也可供从事通信工作的科技人员阅读和参考。

本书第一、二、六章由黄庚年编写,第三、九、十章由武法正编写,第四、八章由李巧云编写,第五、七章由刘瑞霞编写,全书由黄庚年统编定稿。

由于编者水平所限,书中难免有错误和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

作 者

1990.6 于北京

目 录

第一章 绪论

1.1 通信的概念和发展简史	(1)
1.2 通信系统的组成	(2)
1.3 信道	(5)
1.4 通信系统性能的衡量	(7)
本章小结	(9)
习 题	(9)

第二章 确定信号的分析 and 传输

2.1 确定信号的表示法	(10)
2.2 卷积积分	(38)
2.3 信号的能量密度谱与功率密度谱	(46)
2.4 确定信号的相关	(52)
2.5 系统响应与滤波	(60)
2.6 希尔伯特变换	(73)
2.7 解析信号	(78)
2.8 带通信号及带通系统	(80)
本章小结	(86)
习题	(87)

第三章 随机过程

3.1 概率及随机变量	(93)
3.2 随机变量的特性和变换	(97)
3.3 随机过程的概念、特征、平稳性、遍历性	(100)
3.4 平稳随机过程的功率密度谱	(108)
3.5 高斯随机过程	(111)
3.6 平稳随机过程通过线性网络	(115)
3.7 窄带随机过程	(118)
3.8 正余弦波加窄带随机过程	(123)
3.9 平稳随机过程通过乘法器	(125)
本章小结	(129)
习 题	(130)

第四章 信道和噪声

4.1 信道的分类	(137)
4.2 信道对信号传输的影响	(140)
4.3 噪声源的增量模型	(147)

4.4 噪声网络的增量模型和实际模型	(151)
4.5 天线的基本原理	(157)
本章小结	(169)
习 题	(171)
第五章 模拟信号连续调制	
5.1 引 言	(173)
✓5.2 双边带调幅	(173)
✓5.3 单边带调幅	(186)
5.4 残留边带调幅	(194)
5.5 各种幅度调制的噪声性能	(203)
5.6 调频与调相	(212)
5.7 窄带调频	(216)
5.8 宽带调频	(221)
5.9 调频信号的解调	(232)
5.10 调频系统的噪声性能及改善方法	(240)
5.11 调频中的门限效应	(249)
5.12 多路复用	(254)
本章小结	(258)
习 题	(258)
第六章 脉冲调制	
6.1 信号的抽样	(267)
6.2 脉冲幅度调制	(276)
6.3 时分多路复用	(281)
6.4 脉冲宽度调制和脉冲位置调制	(289)
6.5 脉冲调幅、脉冲调宽、脉冲调位信号的抗干扰性能	(299)
6.6 脉冲编码调制	(306)
6.7 模拟信号的量化与量化噪声	(311)
6.8 信号的编码与译码	(325)
6.9 增量调制	(331)
6.10 增量总和调制	(340)
6.11 自适应增量调制	(341)
6.12 差值脉码调制	(343)
本章小结	(345)
习 题	(346)
第七章 数字基带传输	
7.1 数字基带传输系统及信号码型	(353)
7.2 基带信号的功率密度谱	(359)
7.3 无码间干扰的基带传输特性	(367)
7.4 基带系统的抗噪声性能	(374)

7.5 眼图	(379)
7.6 部分响应基带传输系统	(382)
7.7 时域均衡	(389)
本章小结	(398)
习 题	(398)
第八章 数字调制技术	
8.1 二进制幅移键控	(403)
8.2 二进制频移键控	(408)
8.3 二进制相移键控及差分相移键控	(413)
8.4 二进制数字调制系统的性能比较	(418)
8.5 应用匹配滤波器的最佳信号接收	(419)
8.6 多相相移键控	(434)
8.7 连续相位频移键控	(455)
8.8 正交幅移键控	(470)
8.9 同步原理	(481)
8.10 载波同步法	(482)
8.11 位同步法	(490)
本章小结	(506)
习 题	(507)
第九章 信息论引论	
9.1 引言	(510)
9.2 信息变量	(511)
9.3 离散信源的熵	(514)
9.4 连续信源的熵	(520)
9.5 信道容量	(522)
9.6 信源编码	(527)
9.7 信道编码	(532)
本章小结	(539)
习 题	(540)
第十章 通信系统的计算机仿真	
10.1 计算机仿真的基本过程	(542)
10.2 通信系统中主要部件的数学模型	(544)
10.3 通信系统主要性能指标的仿真	(554)
10.4 目标系统	(558)
本章小结	(563)
习 题	(563)
参考资料	(564)

第一章 绪 论

本教材主要阐述信号、调制与噪声性能的基本理论。在学习各章内容之前，有必要先对通信和通信系统有一个概括的了解和整体的概念。

1.1 通信的概念和发展简史

什么是通信？粗浅地说，通信就是传送载有信息的信息，达到人与人之间互通情报、交换信息。

人类的活动离不开信息的传递与交换，人们在日常生活中，大量地传递和交换着信息。例如打手势就是传递信息的一种方式，其目的是使自己的意图让对方明白。通过长期的生产斗争和社会实践，人们逐步地创造和发展了语言和文字，利用语言和文字表达人们的意志、思想和感情，利用语言和文字交流情报，交换信息。这些活动不断频繁地进行，逐渐由低级到高级形成一门独立的学科——通信。随着科学技术的发展，通信方式不断地更新和发展，象其它学科一样，通信这门学科已成为当前国民经济和文化生活中不可缺少的一个分支。

最早的通信方式是比较简单的，例如修建烽火台以通报敌情，打锣鸣号来通知集合等。它们的通信内容都很单一，并且受环境和距离的限制。进一步的通信方式是利用陆路、水运等的交通工具来传递文字，但它们不能进行语声通信，传递的速度又慢。

19世纪30年代发明了电报，这是一个飞跃，利用导线中有无电流区分传号和空号，再根据传号和空号的长短组成点和划，编成电报符号以传递报文。19世纪70年代，人们利用电磁感应原理发明了电话机。这样，通过通信线路便可发电报和传电话。电报和电话是组成通信的最基本内容。

19世纪末期，利用电磁波辐射原理发明了无线电报，它是利用自由空间作为传播电磁波的媒介，并用天线来发射和接收电磁波而实现的无线电通信。

20世纪初，出现了电子管等器件，从而为实现电报电话通信经过长途有线传输或经过长波、中波和短波的无线电传输提供了基础。

本世纪20年代开始，随着科学技术的发展和社会对通信的进一步要求，又相继出现广播、传真，随后发明了电视。这样就大大丰富了通信的内容，传递的消息不仅有符号、文字、语声，而且还包括了音乐、图片和动的图像。不仅是点与点之间的单向或双向的电报电话通信，而且扩展到点对面的通信。通信的内容也扩展到文化生活、宣传和教育等方面。

在通信理论方面，从通信的有效性与可靠性出发，以调制理论为基础，提出多种调制技术，使信道利用率不断提高，复用路数增多而又具有良好的抗干扰性能。其它理论诸如“仙农信息论”、“纠错编码理论”、“信源统计特性理论”、“信号与噪声理论”、“信号检测理论”等等，都不同程度地促进了通信技术的发展。值得一提的是晶体管的出现以及集成电路、大规模集成电路的问世，不仅使通信设备小型化、价格降低、性能可靠，而且也大大地促进了一些通信学科理论的实现和通信方式的大步跃进，完善了脉码通信、实现了微波通

信、卫星通信、光通信和计算机通信，在通信的对象上，突破了人与人之间进行通信的范畴，实现了人与机器或机器与机器之间的对话。

近十年来，数字技术、交换技术和数据传输相继发展，各种通信趋于更加完善，并且形成了各种通信网，如计算机通信网、数据通信网、模拟通信网、用户电报网等。目前，人们正在在世界范围内建立综合业务数字网而努力。

大约只有近一百年的时间，通信已从对电磁波传播的粗浅了解发展到现代的卫星通信、宇宙飞船与星际间的通信，建立了现代的通信网。通信这门年轻的学科，其发展神速可谓令人瞠目。展望未来，可以相信，通信学科将会有更大的发展，以适应人类社会进一步繁荣昌盛的需要。

1.2 通信系统的组成

一、通信系统的基本模型

现代通信主要是指“电通信”而言，它包括电报、电话、广播、传真、电视、雷达、遥控、遥测，甚至人工智能等都属于通信的范畴。通信系统形式繁多，但不外乎是把一个地方的消息传送到另一个地方。通信系统的基本模型可以如图 1.2.1 所示，概括为五部分：

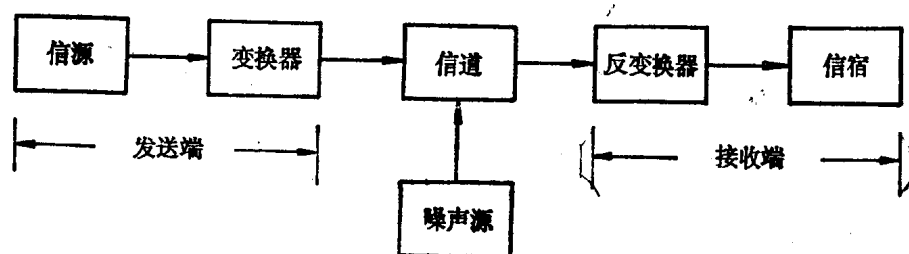


图 1.2.1 通信系统的基本模型

信源 指产生含有信息的信息的来源。例如讲话人发出语声，讲话人就是信源。语声是消息，是要传送的对象。图像、数据等都是消息，都是传送的对象。

信宿 指语声、图像、数据等消息的归宿，是指消息的接收者。例如语声为人耳所接收，听话人就是信宿。信宿也可以是机器、仪表，例如用机器、仪表接收数据识别状态，这时机器、仪表就是信宿。

变换器 因语声、图像等原始的消息不能以电磁波来传送，所以需要通过变换器将原始的非电消息变换成电信号，并再对这种电信号进一步转换，使其变成适合某种具体信道传输的电信号。这些电信号同样载有原有的信息。例如电话机的送话器，就是将语声变换成幅度连续变化的电话信号，再进一步转换后送到信道上去。

反变换器 作用和变换器相反，将对方传送来的电信号恢复成原始的消息。

信道 是传输的媒介。它可以是明线、电缆、光缆的线对，或是利用空间辐射传播的各种波段的电磁波，如中波、短波等传输的自由空间，信道的选择根据设备情况和需要而定。信道传输性能的好坏，直接影响着通信质量。

通信系统概括为这五个部分外，还存在噪声，这是在实际通信中客观存在的一种不可避

免的干扰。这种干扰会在消息产生的周围环境里或在信宿的周围环境里混入，也会在发送途径的变换器中或在接收途径的反变换器中产生，但在信道中受各种电磁影响所存在的干扰则是主要的。为了分析方便，常把发送途径、接收途径、信道这三方面所存在的干扰都折合到信道中，如图 1.2.1 用一个总的噪声源表示。

二、模拟通信系统

有待通信系统传输的消息是多种多样的，可以是符号、文字、语声、图像、数据等，归纳起来，可分为两大类：一类是在时间特性上状态连续变化的消息，一类是在时间特性上状态离散的可数的消息。如语声，它的强弱变化是连续的；再如图像，它的亮度变化也是连续的。这种在时间特性上状态连续变化的消息称为模拟消息。将模拟消息变换成电信号，电信号的强弱相应地变化，也是连续的。传输这种连续电信号的通信称为模拟通信。以传输语声为例，模拟通信系统的模型如图 1.2.2 所示。

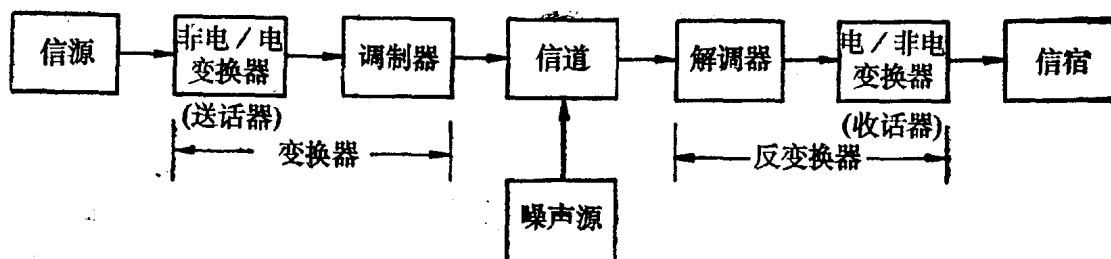


图 1.2.2 模拟通信系统模型

在该系统中，信源发出的消息是语声，经过非电/电变换器（送话器），变换为电信号。为了适应具体信道的传输，通常还要经过第二次变换，称作调制。然后再经过滤波、放大、发射等，将电信号送到信道上去。为了突出通信系统中的主要部分，没有把滤波、放大等部件在框图中画出。

这里强调一下调制的作用。由信源发出并经过非电/电变换的电信号通常称为基带信号，它的特点是频谱由零频附近开始。基带信号可以直接在信道中传输，称为基带传输系统，如直流电报、实线电话和有线广播等，是最简单的通信系统。显然，这种通信系统对信道的利用率不高，作为传输媒介的有线线对又很昂贵，所以这种通信应用场合很有限。经过调制以后，就可将基带信号变换为适合于在不同信道内传输的信号，实现多路复用。尤其是在无线通信系统内要想有效地发挥天线的辐射能力，要求天线的有效长度必须不小于 $1/4$ 波长，而要想保持天线尺寸在可能实现的范围内就必须减小工作波长，提高发射频率。亦即必须将基带信号经过调制，将其频率搬高后才能送入无线信道去传输。

调制后的电信号称为已调信号，它仍然是一种连续信号，经过信道传输到接收端的解调器和电/非电变换器（即收话器），与发送端的调制器和送话器一一对应，起着反变换的功能，把已调信号恢复成原来的在时间特性上连续的消息。

模拟通信在信道中传输的信号频谱比较窄，因此通过多路复用使信道的利用率提高，折算到每路的成本较低。但它的缺点是：（1）传输的信号是连续的，混入噪声干扰后不易消除，即抗干扰能力较差；（2）不易保密通信；（3）设备不易大规模集成；（4）不适应

飞速发展的计算机通信的要求。

对模拟通信所应研究的问题是：（1）发收两端的非电/电变换过程及基带信号的特性；（2）调制与解调原理；（3）信道与噪声的特性及在噪声条件下系统的传输性能。

三、数字通信系统

有些消息例如电报符号和数据，在时间特性上状态是离散的。经过非电/电变换后的电信号，其状态并不随着时间连续变化，变化的状态数有限，可以用二进制或多进制的数字表示，因此这些离散的消息称作数字消息。对于时间上连续变化的消息，如语声，也可以通过量化变成离散的状态编码成数字进行传输，到接收端再还原成连续变化的消息。这种以数字方式传送消息的通信系统称为数字通信系统，其模型如图 1.2.3 所示。

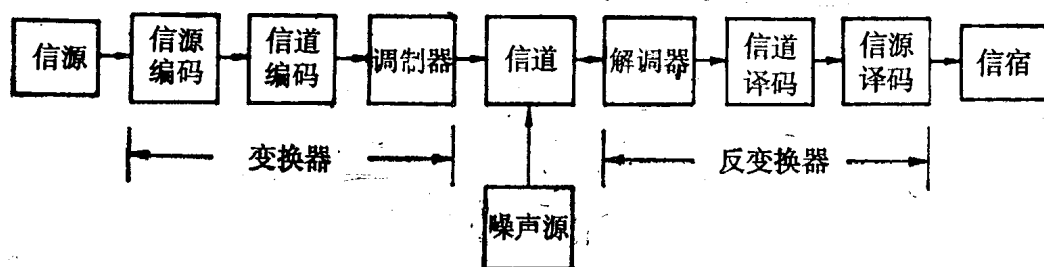


图 1.2.3 数字通信系统模型

系统中信源编码的任务是将原来不适于在数字通信系统中传输的信号变换为比较理想和有效的数字信号，例如将模拟的语声进行量化编码成数字信号，又如信源是并行输出的计算机，其输出数据通过并串变换形成串行数据。此外，如数据扰乱、数字电话信号加密、编码比特压缩等信号处理功能都是在信源编码器内完成的，使处理后的信号更适于在数字通信系统内传输。

信道编码是指在原来的数字信号序列中引进某些作为误差控制用的数码，以实现自动检错和纠错的目的。通过信道编码器后的数码序列要加长，亦即提高数字信号传输可靠性是用降低信息传输速率的办法来实现的。这种传输信号中的有效性和可靠性的矛盾，将会反复提到。

调制器的目的是使信号能较好地通过信道到达接收端。在接收端中进行解调及信道译码和信源译码，其功能正好与发送端的相反。

需要说明一下，图中的信源编码和信道编码并不是每个数字通信系统所必需的，而是根据实际需要确定，或者两个都要，或者只要一个，甚至两者都不要，直接将数字信号进行调制。数字调制与解调的方式也与模拟调制与解调的方式不同，这在调制的章节中将详加阐述。

和模拟通信系统相比较，数字通信系统有如下几个优点：（1）抗干扰能力强。因信号是以数码形式进行传输，被噪声干扰后若数码没有被恶化到一定的程度，可用再生的方法使数码恢复成原来的样子，即使由于信道的噪声干扰而使数码出现一些差错时，也可以应用差错控制编码技术加以消除。（2）设备易于集成化、微型化。由于设备多属数字电路，易于使用大规模集成电路，实现微型化。（3）保密性强。可用各种规律的密码进行加密，使通

信具有较高的保密性。(4) 便于构成数字通信网。随着计算机的大量使用, 数字与数据业务飞速增长, 使用数字系统, 便于构成各种范围的数字通信网。

但是, 数字通信也有它的不足之处, 它比模拟通信占据的频带要宽, 频带的利用率较低, 数字通信的许多优点正是以牺牲系统频带为代价而获得的。同时, 由于数字通信传输的是一个接一个按节拍传送的数字信号, 在接收端必须有一个与发送端相同的节拍, 而且在发送端按一组组规律编码, 在接收译码时也必须一致, 所以须有使码元同步、码组同步的同步设备。相对地, 在模拟通信系统中, 可以不要同步, 即采用非同步方式工作。或者即使是采用同步方式工作, 对同步系统的要求也不如数字通信系统那样严格。所以数字通信系统的组成比模拟通信系统的复杂一些。

对数字通信系统所要研究的问题是: (1) 模拟信号数字化及数字基带信号的特性; (2) 数字调制与解调原理; (3) 信道与噪声的特性及其对信号传输的影响; (4) 差错控制编码; (5) 保密通信; (6) 发与收的码元同步码组同步。

本教材限于篇幅, 着重阐述前四个内容的基本理论。

1.3 信道

各种电信号都要通过信道才能从甲地传送到乙地。根据传输媒介的不同, 可以将信道分为两大类。

一类是有线信道, 分为明线、对称电缆、同轴电缆、波导管、光导纤维等多种。这种依靠导线来传输信号的通信称为有线通信。

对有线信道应考虑传输特性有: 使用频率范围即从最低到最高的传输频率, 衰减频率特性, 相移频率特性, 线路传输的稳定性等等。使用频率范围直接关系到信号复用路数的多少和所采用的调制频率调制方式。明线的使用频率一般是从低频到 150kHz。在短距离传输时, 还可使用到 300kHz 甚至 300kHz 以上。因为明线暴露在空间中, 宛如天线一样, 过高的传输频率会与无线传播的长波相冲突, 需要避免。由于对称电缆在低频时相位变化太大, 除语音信号直接在电缆线对中传输外, 进行复用一般是在 12kHz 到 600kHz 的频段。同轴电缆则使用 60kHz 到 65MHz 的频段。波导管和光导纤维的使用频率范围更高更宽, 光导纤维的使用频率可高达 300GHz 以上。一对单模光纤心线, 按理论推算, 可传输电话上亿路。

另一类是无线信道, 通过电磁波在宇宙空间传播。依靠电磁波在空间传播的通信称为无线通信。

电磁波由发射天线到达接收天线的传播途径基本上可分为三种: 一是靠近地面来传播的, 称为地面波; 二是在空间两点间传播的, 称为空间波; 三是依靠距离地面 100 公里以外的电离层的反射来完成传播作用的, 称为天波。地面波、空间波和天波各有不同的传播特点, 因此和它们相对应的使用频段也不相同。例如, 地面波是沿地表面传播的, 在地面会产生感应电流, 地面并非良导体, 故在传播中会带来能量损耗, 而且频率愈高, 能量损耗愈大。所以, 地面波只适用于频率较低的长波传播, 对于频率较高的电磁波传播应该利用天波。

天波的传播是利用电离层的反射作用, 传播距离比地面波远, 并且与天波的入射角有关。所谓入射角是指入射波与地面垂线的夹角。入射角越大, 传播距离越远。天波在传播过

程中也会带来能量损耗，损耗的大小与电离层的电离程度有关，电离程度越大，对电磁波的吸收能力越强，损耗也就越大。由于电离层的电离程度与太阳的辐射强度有关，使损耗随辐射强度而变化，例如，白天和夏天就要比夜间和冬天的电离程度大，损耗也就大。但这个变化较为缓慢。天波传播时存在多径效应，从发射点到接收点可以经过多个途径到达，如可以经过一次反射到达，也可以经过二次反射到达，或由于电离层的不均匀造成电波的散射经过不同的反射途径到达。信号中的不同频率分量经过多个途径后其相位不同，使合成信号某些频率因相位相同而加大，某些频率因相位相反而抵消变弱，这种幅度与相位的变化又是随机的，使收到的信号强度呈起伏性变化，形成快速变化的衰落，这是一个很大的弱点。另外，当地面波已经损耗殆尽，而天波又不能返回到地面，这样的区域称为寂静区，该区内将收不到信号，所以在选择工作频率和设计天波入射角时就应该考虑到这点。电磁波的波长越短，电离层对它的损耗越小。但如果波长太短，电离层将难于产生反射作用，电磁波将穿透电离层，不再返回地面。因此频率太高、波长太短的电磁波是不能利用天波传播的，而应该使用空间波。

空间波的传播象光波一样是直线传播的，依靠绕射作用，也能越过某些障碍物而适当传播过去。但是，由于地表面是弯曲的，依靠空间波传播的距离不能太远，通常是限于视线范围之内，提高天线高度可以适当增加传输距离。由于空间波是在大气层中传播，大气层的变化，例如雨、雪等自然现象会对它的传播特性有很大的影响。

为了说明无线通信中所使用的频率，可将无线信道划分为若干频段。有一种方法是对频段排队，指定一个数目，如第 N 个频段所占用频带为 $0.3(10^N)\text{Hz} \sim 3(10^N)\text{Hz}$ 。结合频率 f 与波长的关系，由下式表示

$$\lambda = c/f \quad (1.3.1)$$

式中， $c \approx 3(10^8)\text{m/s}$ ，为光速；

f 为频率，以 Hz 为单位；

λ 为波长，以 m 为单位。

于是写出各频段的频率范围及名称如表 1.3.1。

表 1.3.1 无线通信使用的频段

频段	频率范围	波长	名称
1	3—30Hz	10^8 — 10^4km	极低频 ELF
2	30—300Hz	10^4 — 10^3km	音频 VF
3	300—3000Hz	10^3 — 10^2km	甚低频 VLF (甚长波 VLW)
4	3—30kHz	10^2 — 10km	低频 LF (长波 LW)
5	30—300kHz	10—1km	中频 MF (中波 MW)
6	300—3000kHz	10^3 — 10^2m	高频 HF (短波 SW)
7	3—30MHz	10^2 — 10m	甚高频 VHF (甚短波 VSW)
8	30—300MHz	10—1m	超高频 UHF (超短波 USW)
9	300—3000MHz	10—1dm	特高频 SHF (特短波 SSW)
10	3—30GHz	10—1cm	极高频 EHF (极短波 ESW)
11	30—300GHz	10—1mm	远红外线区
12	300—3000GHz	1—0.1mm	

例如,音频频带在1~4频段,电视频率在1~7频段,中波广播使用535~1605kHz,所用载波位于6频段,雷达频率在8~11频段,微波频率在9~11频段,而12频段以上为红外线区。

需要指出,表1.3.1所示的频段划分还是比较粗糙的,更进一步的频率分配工作由相应的部门如国家无线电管理委员会来规定,而国际上的协调工作则由国际电信联盟来完成。

1.4 通信系统性能的衡量

衡量通信系统的性能有很多方面,例如电气性能、工艺结构、操作维修等等,但最重要的反映通信系统的传输质量是宏观指标——有效性与可靠性。所谓有效性,是表征通信系统能够传输消息的数量指标。我们总希望一个系统能够传送的信息量越大越好,也就是一个系统能够同时传递消息的路数越多越好,一个系统传递的路数越多,表明该系统效率越高,每路的成本也可以相应降低。所谓可靠性,是表征通信系统传输消息的质量指标,表明接收到的消息有无失真、失真多少、收到的消息错误多大。对收信者来说,不希望收到的消息有错误的信息,如果有错误,也希望越少越好。这就是要求系统的传输是可靠的。然而有效性和可靠性这两者是相互矛盾的,不可能同时都是很高的指标,只能根据具体情况折衷统一得到相对的满足。例如,在满足一定可靠性指标下,尽量提高传输信息的效率,增多同时传输消息的路数;或者,在维持一定有效性指标下,使传输消息的可靠性尽可能地提高。

模拟通信系统的有效性指标用所传信号的有效传输带宽来表征。所传信号的带宽是一定的,若系统传输每路信号所需的有效带宽越窄,则在信道中可复用的路数越多,亦即可同时传输更多路的信号,系统传输的信息量大,说明此系统的效率高。反之,传输每路信号所需的带宽越宽,则复用路数越少,系统的效率也就越低。所以所传信号的有效传输带宽可以说说明系统传输效率的高低。信号的有效传输带宽与系统所采用的调制方式有关,本教材的调制部分将分析到调幅系统每路所占带宽远小于调频或调相系统每路所占的带宽。有效性还与系统所采用的信道的种类有关。例如,信道是明线,复用的路数相对地要少,若信道是同轴电缆,则复用的路数相对地要多得多,折合到每路成本就可降低,传输的效率将提高。

模拟通信系统的可靠性指标用系统的输出端即收信者接收信号处的信噪比来衡量。信噪比是在该点的信号平均功率 S 与噪声的平均功率 N 之比。信噪比越高,说明噪声对信号的影响越小。噪声对信号的影响,不是以噪声大小的绝对值来衡量。这是因为,在某点噪声电平虽然很低,但若信号电平也很低,就有可能使信号淹没在噪声之中,根本无法区分它们。所以必须用两者的相对大小来衡量噪声影响的大小。对电话通信,如果信噪比达到40dB以上,则可听清95%以上的通话内容。对电视节目,如果信噪比达到40~60dB,则可将画面细节看清楚。模拟通信系统输出的信噪比与采用信道媒介的类型有关,如架空明线系统的干扰远大于电缆系统。同时系统输出的信噪比又与所采用的调制方式有关,如调幅系统的信噪比就低于调频或调相系统的信噪比。这也说明了调幅系统传输有效性的提高是靠降低可靠性来换取的。

数字通信系统的有效性指标用传输速率来表征。传输速率有两种,一是码元传输速率,另一是信息传输速率。

码元传输速率又称码元速率,或叫传码率。它表明每秒钟传递码元的数目,单位为波

特 (Baud)，以简写字“B”表示。例如某系统每秒传送 4800 个码元，则该系统的传码率为 4800 波特。若每个码元的时长相等，都为 T 秒，则此时的传码率为 $R_B = 1/T$ 波特。又例如，55 型电传机的五单位电码码元时长 $T = 20$ 毫秒，故该电传机的传码率为 $R_B = 1/T = 50$ 波特。需要注意的是，码元速率仅仅表征单位时间内传送码元的数目，并没有限定这时的码元是何种进制码元。考虑到同一系统的不同点上可能采用不同的进制，为明确起见，在给出传码率时应说明码元的进制，如二进制传码率用 R_{B2} 表示， N 进制传码率用 R_{BN} 表示。当 $N = 2^k (k = 1, 2, 3, \dots)$ 时， R_{B2} 与 R_{BN} 有如下转换关系：

$$R_{B2} = R_{BN} \cdot \log_2 N \text{ 波特} \quad (1.4.1)$$

用信息传输速率表征数字通信系统的有效性是说明该系统在传递消息时究竟传递了多少信息。信息传输速率又称信息速率，或叫传信率。在信息论中是用“信息量”来衡量信息的多少，单位为比特 (bit)，每个二进制码元含有 1 比特的信息量。所以系统的传信率 R_b 用每秒钟传送的信息量即每秒钟所传送的二进制码元数表示，单位为比特/秒，或写成 b/s。例如某路每秒钟传送 4800 个二进制脉冲，则该路的传信率 $R_b = 4800$ 比特/秒。由此可见，在二进制时，传码率与传信率在数值上相等，只是单位不同，一为波特，一为比特/秒。在 N 进制时，传信率与传码率的关系为

$$R_b = R_{BN} \cdot \log_2 N \text{ 比特/秒} \quad (1.4.2)$$

或

$$R_{BN} = \frac{R_b}{\log_2 N} \text{ 波特} \quad (1.4.3)$$

严格地讲，通信系统的传输效率不能只用信息传输速率来衡量，因为传输速率高，往往传输时所要求的频带也宽，所以应该用单位带宽内的信息传输速率来衡量，即每秒每赫的比特数表征才是最合理的。

数字通信系统的可靠性指标用差错率来衡量，差错率越小，可靠性越大。差错率也有两种表示方法，一为误码率，另一是误信率。

误码率是指收方接收到的错误码元数在发方发出总码元数中所占的比例，即在传输中出现错误码元的概率，记为 P_e 。

$$P_e = \frac{\text{接收的错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.4.4)$$

误信率也叫误比特率，是指收方接收到的错误信息量在传输信息总量中所占的比例，即在传输中出现错误信息的概率，记为 P_b 。

$$P_b = \frac{\text{接收的错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.4.5)$$

误码率（或误信率）的大小与信道的噪声等干扰的大小及噪声、干扰的形式有关，一般是考虑在高斯型噪声情况下的误码率。在信噪比较高的系统，其误码率也低。如在有线信道中传输，误码率可小于 10^{-6} ，而在无线短波信道中传输，由于存在衰落和多径效应，误码率就高，对这种信道通常要求误码率在 10^{-3} 以下。

本章小结

本章扼要地介绍了通信的概念、历史及通信系统的组成及质量要求,是最基本的知识。

通信系统的作用是将消息从一地传送到另一地,一般由五部分组成,即信源、变换器、信道、反变换器和信宿。信道是传输的媒介。变换器是将非电消息变换为电信号并经转换成适于具体信道中传输的信号。反变换器则进行相反的作用,使之恢复为非电消息。

根据电信号性质的不同,通信系统一般分为模拟的与数字的两大类。在模拟通信系统中,调制器和反调制器对系统的性能起着决定性的作用。在数字通信系统中,除数字调制和解调外,起重要作用的还有编码器和译码器。

根据传输媒介的不同,可将信道划分为有线信道与无线信道两类。信号在有线信道中传输,“白”噪声是重要的干扰来源,如明线也能接收天电等脉冲噪声干扰。信号在无线信道中传输,除接收“白”噪声和脉冲噪声干扰外,还存在衰落和多径效应,影响信号的传输。噪声是一种加性干扰,即使没有信号,它也加到信道上。而衰落和多径效应,其干扰是随时间变化并随信号的存在而存在,称为乘性干扰。

通信系统的质量要求主要体现在有效性和可靠性这两个方面,这两个指标又是相互矛盾的。在实际中往往根据情况折衷处理。在模拟通信系统中,有效性体现在每路所占带宽或信道的复用路数多少,而可靠性则体现在输出端的信噪比上。对于数字通信系统,有效性体现在传输速率上,而可靠性体现在差错率上。

习 题

1-1 对一个模拟信号在均匀间隔时刻上抽取一系列的样值,问此已被抽样的信号是否已转换成了数字信号?如果一个时间上连续的信号但其幅度变化只有几种可能值,试问这是一个连续信号还是离散信号?

1-2 已知 535~1605kHz 为 AM 广播电台专用,若每台需占用 10kHz 有效频带,问最多能同时收听多少电台的节目?

1-3 已知 88~108MHz 为 FM 广播电台专用,若每台需占用 180kHz 有效频带,问最多能同时收听多少电台的节目?

1-4 已知 54~72MHz、76~88MHz 和 174~216MHz 频段(VHF)以及 470~806MHz 频段(UHF)为电视广播专用,若每个节目需要占用 6MHz 的有效频带,问在每个频段内最多能容纳多少个电视节目?

1-5 若用 100kHz 频率发送导航信号,收发相距 100km,问收到的信号与发端信号相比较,其相位差多少?

1-6 已知二进制数字信号的传输速率为 9600 比特/秒,若变换成 4 进制,问传输速率为多少波特?

1-7 已知 8 进制数字信号的传码率为 2400 波特,问变换成二进制信号时的传信率为多少比特/秒?

第二章 确定信号的分析 and 传输

通信系统发送和接收的是载荷着消息的电信号，它是以电压或电流形式表示的电量。电信号有随机的和非随机的。非随机信号亦称确定信号，因为它可以用确定的数学式表示，而随机信号则只能用随机过程的方式表达，用统计的观点写出它的一些特征。本章是分析确定信号的表示方法、性质以及经过线性网络传输的响应。

2.1 确定信号的表示法

一、信号的分类

由语音、图像、数码等形成的电信号，其形式可以是多种多样的，但根据其本身的特点，可作下列分类：

1. 数字信号与模拟信号

或称离散信号与连续信号。例如电传打字机输出的电信号、电子计算机输出的脉冲是离散信号，电话机输出的语音信号是连续信号。语言是有拍节的消息，就整个来说，语言也是离散的，但就一个拍节或几个连续拍节的语音来说，则是连续的信号。

2. 周期信号与非周期信号

周期信号是每隔固定的时间（称此时间为周期）精确地重现它本身的信号，而非周期信号则无此固定时间长度的周期。如通信系统中测试用的正弦波、雷达中的矩形脉冲系列都是周期信号，语言波形、开关启闭所造成的瞬态则是非周期信号。

介于周期信号与非周期信号之间的是概周期信号，它是一个由二个或多个周期信号合成的信号，这些周期信号的周期相互间不能成整数的相比关系。例如由下式表示的

$$f(t) = \sin t + \sin \sqrt{2} t \quad (2.1.1)$$

是一个概周期信号，我们找不出一个周期 T 以使 $f(t)$ 确切地重复它自己。但如果将 $\sqrt{2}$ 以 1.414 近似，立即可以找出重复它自己的周期 T ，因此， $\sin t + \sin 1.414t$ 就是一个周期信号了。

3. 随机信号与非随机信号

一个信号在发生以前无法确切地知道它的波形，这样的信号称为随机信号，否则就是非随机信号。例如通信设备中的噪声就是随机的。非随机信号则可以写出其明确的数学表达式，所以也称确定信号。

4. 能量信号与功率信号

能量信号是一个脉冲式信号，它通常只存在于有限的时间间隔内，或者信号虽然存在于无限的时间间隔内，但能量的主要部分是集中在有限的时间间隔内。能量信号的例子如图 2.1.1 所示。

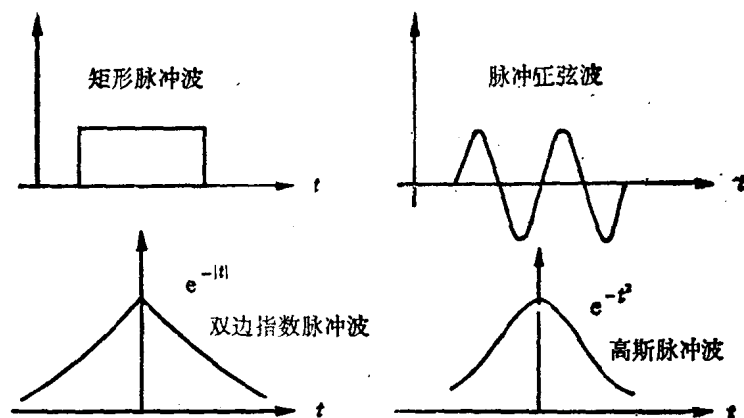


图 2.1.1 某些能量信号

这些能量信号在 $t_1 \sim t_2$ 时间内在 1 欧姆电阻上所消耗的能量是

$$E = \int_{t_1}^{t_2} |f(t)|^2 dt \text{ 焦耳} \quad (2.1.2)$$

消耗的能量是有限的。即使积分间隔是无限时，能量信号在 1 欧姆电阻上所消耗的能量仍然是有限的，以式表示，即为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty \quad (2.1.3)$$

至于功率信号，当时间间隔趋于无限时，其在 1 欧姆电阻上所消耗的能量也趋于无穷大，但在 1 欧姆电阻上消耗的平均功率则是大于零的有限值，以式表示，则为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \text{ 瓦} > 0 \quad (2.1.4)$$

上面三个式子表示的是 1 欧姆电阻上所消耗的能量或功率，因而， $f(t)$ 无论代表电压或代表电流都是合适的

前面提到的周期信号，虽然能量随着时间的增加可以趋于无限，但功率是有限值，因此周期信号是功率信号。因每个周期的能量相同，平均功率也相同，所以，周期信号的平均功率值，只须求一个周期的就行了。

二、周期信号的三角傅里叶级数表示

任何一个周期为 T (即 $T = \frac{2\pi}{\omega_0}$) 的周期信号 $f(t)$ ，若满足下列狄里赫利条件：

- (1) 在一个周期内只有有限个不连续点；
- (2) 在一个周期内只有有限个极大值和极小值；

- (3) 积分 $\int_{t_0}^{t_0+T} |f(t)| dt$ 存在

则该周期信号可以展开为如下的傅里叶级数：