

# 通信原理

(上)

周炯槃 庞沁华 续大我 吴伟陵 编著

北京邮电大学出版社

北京·Beijing

## 内 容 简 介

本书系统、深入地介绍了通信系统及通信网的基本原理及基本分析方法,是通信及信息专业的专业基础课教材。

全书共十一章,内容包括通信系统及通信网的基本概念、确定信号及随机过程、模拟通信系统、数字基带传输、数字频带传输、信源和信源编码、信道和信道容量、信道差错控制编码、正交编码与伪随机序列及其应用、通信网的基本原理。

本书概念清楚,取材新颖,书中除列举了大量例题,还附有习题及部分习题答案。

本书可作为高等学校通信工程、信息工程、电子工程和其他相近专业本科生的教材,也可供通信工程技术人员和科研人员作为参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

通信原理(上)/周炯槃,庞沁华等编著.—北京:北京邮电大学出版社,2002

ISBN 7 5635 0525 3

通... .周... 庞... .通信理论 .TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 047823 号

---

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号)

邮 编:100876 (发行部)电 话:62282185 传 真:62283578

电 子 信 箱:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京皇家印刷厂

印 数:11001—14000 册

开 本:787 mm × 1092 mm 1/16

印 张:19.75

字 数:464 千字

版 次:2002 年 8 月第一版 2004 年 6 月第 4 次印刷

---

ISBN 7 5635 0525 3/ TN·236

定 价:32.00 元

如有质量问题请与北京邮电大学出版社发行部联系

# 序

通信乃是互通信息。

20世纪80年代以来,通信技术与计算机技术及微电子技术相互促进、迅猛发展。通信产业已成为当今世界生产力的重要领头产业。它极大地推动了各国经济的发展,使人类步入了信息社会。

通信技术日新月异的发展,使更多的人们期望掌握通信的基本原理。本书的宗旨是系统、深入地阐述通信系统和通信网的基本理论。

本书系四位作者多年来从事通信与信息学科本科生和研究生的教学与科研实践的总结。按认识论规律由概念的建立给出定量分析,且注重理论联系实际。在介绍基本理论的基础上,力求体现近年来国内外通信技术的发展。

为帮助读者掌握通信的基本原理及分析方法,提高运算能力,书中列举了许多例题,并附有大量习题及部分习题答案。习题中包含历年来学生作业、本科试题及考研试题的精选。

全书共十一章,第一章绪论,从通信发展简史及展望引导出通信的基本概念与通信系统及通信网的基本构成。第二章确定信号分析,第三章随机过程,这两章是分析通信系统的数学工具,如果读者已有先修基础,可将其作为复习内容。第四章模拟通信系统,阐述目前正在应用的各种模拟调制方式的基本原理及其性能分析。第五章至第十章阐述数字通信系统的基本理论。第五章数字信号的基带传输,第六章数字信号的频带传输,这两章是数字通信传输系统的基本理论。第七章信源和信源编码,第八章信道和信道容量,第九章信道差错控制编码,这三章是仙农信息论的基本理论。第十章阐述正交编码与伪随机序列的基本原理及其应用。第十一章介绍通信网的基本原理,阐述交换的基本原理及信令和协议的基本概念。全书分为上、下两册,一至六章为上册,七至十一章为下册。

本书可用作高等学校本科生通信工程专业、电子与信息专业以及其他相近专业的专业基础课的教科书。全书可在大学三年级分两学期授课。

本书也可作为通信工程技术人员的参考书。读者欲仅限于掌握模拟通信,则只需阅读前四章;若仅限于掌握数字通信,不必阅读第四章。

全书由周炯 院士主编并编写第一、十一章,由续大我教授编写第二、三、八、十章,由庞沁华教授编写四、五、六章,由吴伟陵教授编写第七、九章,最后全书由周炯 、庞沁华统编定稿。

鉴于首次正式出版,难免有不妥之处,敬请指正。

周炯

2002年8月于北京邮电大学

# 目 录

---

## 第一章 绪论

1.1 引言.....	1
1.2 通信发展简史和展望 .....	2
1.3 通信系统和通信网的构成 .....	5
1.3.1 概 述.....	5
1.3.2 信源、信宿和信号.....	6
1.3.3 信源编译码设备 .....	6
1.3.4 信道及信道编译码设备 .....	7
1.3.5 交换设备 .....	7
1.4 本书的总体结构 .....	8

## 第二章 确定信号分析

2.1 引言.....	9
2.2 确定信号的分类 .....	9
2.3 周期信号的傅利叶级数分析.....	10
2.4 傅利叶变换.....	11
2.5 傅利叶变换的运算特性(附录 A).....	12
2.6 单位冲激函数的傅利叶变换.....	12
2.7 功率信号的傅利叶变换.....	14
2.8 能量谱密度和功率谱密度.....	16
2.9 确定信号的相关函数.....	18
2.10 卷 积.....	21
2.11 确定信号通过线性系统 .....	23
2.12 希尔伯特变换 .....	27
2.13 解析信号 .....	29
2.14 频带信号与带通系统 .....	31

## 第三章 随机过程

3.1 引言 .....	37
3.2 随机过程的统计(概率)特性.....	37
3.3 平稳随机过程.....	39
3.4 高斯随机过程(正态).....	43

3.5 平稳随机过程通过线性系统.....	47
3.6 窄带平稳随机过程.....	50
3.7 余弦波加窄带平稳高斯随机过程.....	57
3.8 匹配滤波器.....	58
3.9 循环平稳随机过程.....	61
习题.....	62

## 第四章 模拟通信系统

4.1 引言 .....	65
4.2 幅度调制.....	66
4.2.1 双边带抑制载波调幅(DSB SC AM) .....	66
4.2.2 具有离散大载波的双边带幅度调制(AM) .....	72
4.2.3 单边带调幅(SSB AM) .....	75
4.2.4 残留边带调幅(VSB AM) .....	80
4.3 角度调制.....	82
4.3.1 调频及调相信号.....	83
4.3.2 角度调制信号的频谱特性.....	84
4.3.3 角度调制器与解调器.....	87
4.4 线性调制系统的抗噪声性能.....	93
4.4.1 双边带抑制载波调幅系统的抗噪声性能.....	94
4.4.2 单边带调幅系统的抗噪声性能.....	95
4.4.3 具有离散大载波的双边带调幅系统的抗噪声性能.....	96
4.5 角度调制系统的抗噪声性能 .....	100
4.5.1 角度调制系统的抗噪声性能 .....	100
4.5.2 角度调制的门限效应 .....	105
4.5.3 预加重与去加重滤波 .....	106
4.6 频分复用及其应用实例 .....	108
4.7 超外差接收机 .....	112
4.8 接收机的噪声系数与等效噪声温度 .....	113
4.8.1 热噪声的特性 .....	114
4.8.2 线性双端口网络的等效噪声带宽及噪声系数 .....	115
4.8.3 线性双端口网络的等效噪声温度 .....	120
习题 .....	121

## 第五章 数字信号的基带传输

5.1 引言.....	126
5.1.1 数字基带信号及数字基带传输 .....	126
5.1.2 信息量单位、信息速率及码元速率、误比特率及误符率、频带利用率.....	127

5.2	数字基带信号波形及其功率谱密度 .....	128
5.2.1	数字脉冲幅度调制(PAM) .....	128
5.2.2	常用的数字 PAM 信号波形(码型) .....	129
5.2.3	数字 PAM 信号的功率谱密度计算 .....	134
5.2.4	常用线路码型 .....	140
5.3	通过加性白高斯噪声信道传输的数字基带信号的接收 .....	146
5.3.1	利用低通滤波的解调及其误比特率 .....	147
5.3.2	利用匹配滤波器的最佳接收 .....	152
5.4	数字 PAM 信号通过限带基带信道的传输 .....	156
5.4.1	数字 PAM 基带传输及码间干扰 .....	157
5.4.2	无码间干扰基带传输的奈奎斯特准则 .....	158
5.5	在理想限带及加性白高斯噪声干扰信道条件下数字 PAM 信号 的最佳基带传输 .....	162
5.6	眼图 .....	164
5.7	信道均衡 .....	165
5.8	部分响应系统 .....	173
5.9	符号同步 .....	180
	习题 .....	184

## 第六章 数字信号的频带传输

6.1	引言 .....	190
6.2	二进制数字信号正弦型载波调制 .....	191
6.2.1	二进制启闭键控(OOK) .....	191
6.2.2	二进制移频键控(2FSK) .....	202
6.2.3	二进制移相键控(2PSK 或 BPSK) .....	209
6.2.4	2PSK 的载波同步 .....	212
6.2.5	差分移相键控(DPSK) .....	214
6.3	四相移相键控 .....	217
6.3.1	四相移相键控(QPSK) .....	217
6.3.2	差分四相移相键控(DQPSK) .....	222
6.3.3	偏移四相移相键控(OQPSK) .....	226
6.4	$M$ 进制数字调制 .....	228
6.4.1	数字调制信号的矢量表示 .....	229
6.4.2	统计判决理论 .....	235
6.4.3	加性白高斯噪声干扰下 $M$ 进制确定信号的最佳接收 .....	238
6.4.4	$M$ 进制振幅键控(MASK) .....	242
6.4.5	$M$ 进制移相键控(MPSK) .....	248
6.4.6	正交幅度调制(QAM) .....	254

6.4.7	$M$ 进制移频键控 (MFSK)	260
6.5	恒包络连续相位调制	266
6.5.1	最小移频键控 (MSK)	266
6.5.2	高斯滤波最小移频键控 (GMSK)	273
	习题	282
附录 A	傅利叶变换的运算特性	288
附录 B	常用信号的傅利叶变换表	289
附录 C	随机变量函数的概率密度	294
附录 D	随机变量函数的数字特征	296
附录 E	希尔伯特变换对	297
附录 F	Q 函数、误差函数、互补误差函数及常用函数	298
附录 G	常用三角公式	299
	部分习题答案	300
	参考文献	305

# 第一章 绪 论

---

## 1.1 引 言

通信技术和通信产业是 20 世纪 80 年代以来发展最快的领域之一。这不论在国际上还是在国内都是如此,只是在层次上和内涵上由于发展水平而有所不同。这是人类进入信息社会的重要标志之一。农业社会以生产物质为主,包括生存所必须的生活资料和生产所必须的生产工具。到了工业社会,为了扩展人的体能而引入的能量生产,形成这一时代的特色。这从蒸汽的热能转化成机械能开始,而后用发电机转化为电能。电能是一种便于使用的能源,它可高效地转化成各种能量供不同的需要,因而极大地促进了物质生产和生活质量,使人类社会发生了一次飞跃;以致列宁曾说:“共产主义就是电气化加苏维埃。”另一次飞跃就是引入扩展人的智能的信息技术,使人类进入一般所说的信息社会。信息是一个古老的概念,到 20 世纪中叶,仙农(C.Shannon)在概率论的基础上定义了信息熵,才有了定量的意义。以后由此建立了信息论这一新学科,对于信息技术的发展起到奠基作用。但是这种信息的定义是有特定限制条件的,所以一般称为窄义信息或语法信息。要能用于通常意义下的信息或广义信息,迄今尚无确切的科学定义。一般地说,它是从不知到确知的过程中的内涵实体,也可认为信息就是一种知识。信息是一种资源,它不同于物质资源和能量资源,是可以共享和重复使用的,而且可不受空间和时间的限制而广泛地传播。所以它对物质生产和能量生产可起极大的促进作用。电信技术是克服空间限制的主要手段,几乎可以瞬间地把大量信息传送到遥远的各处。计算机技术可以把大量信息存储起来并加以处理,从而克服时间限制,使共享和重复使用成为可能。遥控、遥测和遥感等技术又使信息的提取和利用扩展到更大的范围和更深的层次。这些技术的发展,实际上就是人的智力得到极大的扩展,从而不但使传统产业得到改造而进一步发展,新产业又不断形成,如探索宇宙奥秘的航天产业、丰富人的精神生活和物质生活的家电产业等。其实这些技术都与通信和通信网有关,因此通信技术的发展加快信息社会的形成,而后者又加速通信产业的发展。通信原理因而备受重视,几乎成为所有电子专业的必修课程。本书的编写力求满足这类需要,也就是着重基础理论方面的问题,而在专业知识方面则适当阐述,以待专业课去详细讨论。

## 1.2 通信发展简史和展望

通信就是互通信息。从这个意义上说,通信在远古时代就已存在。人之间的对话是通信,用手势表达情绪也可算通信。以后用烽火传递战事情况是通信,快马与驿站传送文件当然也是通信。现代的通信一般是指电信,国际上称为远程通信(telecommunication)。1837年,莫尔斯(S. Morse)完善了电报系统,此系统于1844年在华盛顿和巴尔迪摩尔之间试运行。这可认为是电信或远程通信,也是数字通信的开始。1875年,贝尔发明电话,成为模拟通信的先驱。不久在1892年,美国史端乔(A. B. Strowger)又引入步进开关,使电话实现自动化,这些通信方式当时是用电线相互连接来传送信号的,所以距离还不能太远。1864年,马克斯威尔(J. C. Maxwell)建立电磁场理论。1887年,赫兹(H. Hertz)实验证明电磁波的存在。1901年,马可尼(G. Marconi)实现了从英国到纽芬兰的跨大西洋无线电信号的接收。这是一次超过2700 km的通信,进一步显示电信的巨大潜力。1905年,费山登(R. Fessenden)还试通了无线传送语声与音乐。这些实验系统虽然很简陋,但它所具有的诱人前景,促使了技术和理论的发展,如可产生和放大高频信号的电子管、调频和外差系统等,陆续相继出现。电报和电话成为电信的主流,以致认为电信就是电报电话,如国际电联有电报电话咨询委员会(CCITT),美国有美国电报电话公司(AT&T)等。这就是20世纪前一段时期的情况。电信虽已在社会和经济发展中起着重要作用,但还处于辅助地位,也就是还未进入信息时代。1948年对电信来说是重要的一年。仙农发表著名的论文《通信的数学理论》,提出通信系统的一般模型,它适用于任何形式的电报电话通信,也适用于任何其他通信,包括声音和电视广播,遥控遥测系统等。在深入分析模型后提出信息熵、信道容量等概念,从而定量地揭示了通信的实质问题,引起许多学者的重视。以后仙农又发表率失真理论和密码理论等论文,经其他学者的努力,逐步完善了一系列编码定理,到20世纪60年代形成信息论这一新学科,可以认为它是通信系统或更一般地说是信息系统的基本理论;更具体地说,就是关于信息、信息传输和信息处理的基本理论。所以对通信技术的扩展和发展起了很大的作用。另一方面,1948年勃拉登(W. H. Brattain)等发明了晶体管。以后又发展成集成电路到超大规模集成电路,使在这期间刚出现的数字计算机得到迅猛发展,并很快与通信技术相结合,也就是通信设备日益计算机化,而计算机日益借助通信来网络化。这是从技术和器件上促进通信的发展,并降低费用而使各种通信被广泛地使用。在这两方面的影响下,电信技术和电信产业沿数字化、远程与大容量化、网络与综合化、移动与个人化等方向发展。

数字化可从脉码调制(PCM)说起。1937年里夫提出用脉码调制对语声信号编码;这种方法有许多优点,例如易于加密,不像模拟传输那样有噪声积累等。但在当时代价太大,无法实用化;在第二次世界大战期间,美军曾开发并使用过24路PCM系统,取得优良的保密效果。但在商业上应用还要等到20世纪70年代,才逐渐取代当时普遍采用的载波系统。我国是在70年代初期决定采用30路的一次群标准,80年代逐步引入商用,并开始了通信数字化的方向。数字化的另一个动力是计算机通信的发展。随着计算机的能力的扩大,并日益被利用,计算机之间的信息共享成为进一步扩大其效能的必需。60

年代对此进行了许多研究工作,其成果表现在 1971 年投入使用的阿巴网(APPANET)。这是美国国防部资助建立的,采用了分组交换方式,这又促进了数据通信。于是计算机之间的通信从局域网向广域网发展,以至互联网。90 年代因特网的用户飞跃增加,业务不断扩大,甚至传统的电话业务也能以低价在因特网上传送。在这期间还有移动通信领域中的 GSM 系统的引入。它是一种时分多址接入的数字通信系统,正在逐步替代原来广泛使用的模拟调频方式。由此可见,通信系统中的信息传输已基本数字化。在广播系统中当前还是以模拟方式为主,但数字化的趋向也已明显,为了改进质量,数字声频广播和数字电视广播都已提到日程上来,预计 21 世纪初会逐步替代现有的模拟系统。尤为甚者,设备的数字化,更是日新月异。近年来提出的软件无线电技术,试图在射频进行模数变换(A/D),把调制解调和锁相等模拟运算全部数字化,这将使设备超小型化并具有多种功能。所以数字化的进程还在发展。

远程和大容量化是另一个发展趋向。最早的电报通信的信息量很小,曾用单线回路。电话出现后,采用双线以增大容量和改进质量,传输距离也可远些。这种明线持续了一段时间,技术上不断有所改进,例如用交叉、平衡、频分复用等技术来改进传输质量和扩大传输容量。但随着通信需求的增加,尚需更大容量的传输信道。1941 年美国建成第一条同轴电缆,最初开通 480 路电话,以后的同轴电缆电路陆续增加到 13 200 路。我国在 1976 年敷设京沪杭 1 800 路同轴电缆并投入使用。这些电路仍采用频分复用的载波技术。到 1966 年,英籍华人高锟(C.Kao)提出用玻璃光纤传送信号,损耗可低于 20 dB/km。这种方式具有大容量的前景,而且可解除铜资源不足的困难,所以吸引许多学者去研究,光纤通信就此迅猛发展,从多模到单模,从单波到波分复用;每条光纤已可传送 10 Gbit/s 以上,损耗低于 1 dB/km,为超远程和大容量通信创造条件,也进一步促进了通信的数字化。据统计至 1991 年底全球已敷设光缆 563 万公里。最近又在规划从美国西海岸横跨太平洋、经地中海再横跨大西洋到美国东海岸的全球海底光缆。在无线通信方面,原来寄希望于短波来达到远程通信,但在这类频段上,容量不可能大,而且通信质量也不好,甚至不能保证 24 小时通信不中断。第二次世界大战以后,发展重点转到微波通信。微波是指波长在 1 m 到 100  $\mu\text{m}$  之间的电磁波。这类电磁波的频率很高,可用来传送大量信息;但已不能从电离层反射,可传输的距离较近,为了能进行远距离传送,可采用接力的方式。这就是每隔 50 km 左右设一中继站,把前一站来的信号放大并变频,再向下一站传去。一连串中继站就构成了地面微波接力通信系统。这种系统从 20 世纪 60 年代起得到广泛的应用和很大的发展,因为它与同轴电缆相比,建设费用较低而建设时间较短,其通信容量从 300 路发展到 6 000 路,从模拟系统发展到数字系统。但它不宜用于跨大洋作业,通过人造卫星的微波通信就应运而生。1945 年克拉克(A.C.Clarke)发表“地球外的中继”一文提出卫星通信的设想,以后经许多实验系统,包括无源的“回声一号”、低轨道的“中继一号”、准静止的“同步二号”等,1965 年美国发射静止卫星“晨鸟”,用于欧美间的商业通信,卫星通信开始进入实用阶段。卫星通信的远程性是显著的,而且静止卫星所中转的信号是稳定的,通信质量良好,其技术的发展目标主要是增大通信容量和降低成本。1965 年所发射的第一代国际通信卫星(INTELSAT)的容量只有 240 双向话路,设计寿命只有 1.5 年;到 1992 年发射的第五代 型国际通信卫星的容量已达到 18 000 路外加 3 路电视节

目,寿命为 15 年。这是通过增多转发器、扩展频段、采用成形天线和极化分离等手段来达到增容的。增容使卫星通信的费用不断下降,在 2 000 km 以上的通信线路中,一般情况下,静止卫星线路的费用是最低的,所以它在 80 年代发展很快。许多国土较大的国家的国内通信也采用它。当前赤道上空的位置,差不多已被占用殆尽,必须开辟更高的频段,或用中低轨道的非静止卫星,后者往往用于移动通信,这将在以后讨论。

最早的通信都是点对点的通信,也就是每一对用户之间建立一条线路。随着用户数的增加,而且要两两之间都能相互通信,就须引入转接机制或交换功能,以节省线路费用。最初是用塞绳进行人工转接,1892 年美国史端乔(A. B. Strowger)发明了步进制自动电话交换机,开始了自动拨号的进程。1919 年瑞典帕尔姆伦(N. Palmgren)和贝塔兰德(G. A. Betolander)提出纵横接线制,并于 1926 年开通使用。随着半导体技术的发展,出现过半电子电话交换机和准电子交换机,到 1965 年,美国研制生产 ESS1 程控空分交换机,1970 年法国开通了 E 10 程控数字交换机,把计算机技术引入交换设备,从此开始了高性能、高可靠的交换技术,形成公用交换电话网(PSTN),其规模日益扩大,逐步成为最大的世界性通信网。同时,根据业务的性质,还形成各类业务网,如电报网、传真网、电视转播网等。这些通信网都采用电路转接方式,也就是用户间一旦接通,这电路就被占用,直到通信完毕。另一种转接方式是信息转接,或称存储前发,适用于非实时的数据信息。当计算机数量增多时,就需能互通信息以达到资源共享,提高计算机的功能。这样就出现了信息转接的分组交换网,其重要标志是前面已提出的阿巴网。以后又发展到世界性的因特网。这些网在传输信道上虽可共用一条电缆或光缆,但从端到端的接通和运作方面各有自己的规范,因此其网络资源不能互通有无,终端设备是各自独立的。所以在 1980 年日本电报电话公司(NTT)提出综合业务数字网(ISDN)的结构,试图用现有的用户线同时传送数据和话音。这种技术在研制和开发取得成功后,在欧洲有较大发展。综合业务数字网虽有诱人的前景,但由于市场等原因,未能如预期那样发展。到 90 年代初又提出宽带综合业务数字网(B-ISDN)和异步转送模式(ATM)以适应不断增长的宽带业务。这形成当前网络和综合化的进程。在终端技术方面,以多媒体技术为代表,也是这进程的一部分。

现在来简述移动和个人化的发展简史。最早的移动通信可追溯到 19 世纪末船舶上用短波进行电报通信。从 20 世纪 20 年代起,船舶上可通无线电话,在陆地上的警车中也装有无线电台作调度通信。到 40 年代,美欧各国开始建立公用汽车电话网,使通信的移动化进入一个新阶段,以后发展成可大范围漫游的蜂窝移动电话系统。70 年代美国开始使用无绳电话系统。80 年代发展成数字无绳电话系统,如英国的 CT2、北美的 CT2+,瑞典的 CT3 等,有的已可提供越区切换。蜂窝移动电话系统也实现数字化以提高无线频谱利用率,从而可扩大用户数。90 年代初,西欧各国相继开通采用时分多址(TDMA)的 GSM 系统,美国还开发了码分多址(CDMA)的 IS-95 系统。最近又在酝酿宽带多媒体的第三代移动通信的标准。所用手机也越做越小,充分发挥了移动性的优点,因此有些系统被称为个人通信系统。其实个人通信一般理解为任何人在任何时间任何地点可与任何对象(人或计算机)互通任何信息。这五个任何在英文中都以 W 为第一字母,所以个人通信也可称为 5W 通信。当前的技术条件还做不到这样的通信,所以个人通信只是通信发展的目标,尚有许多理论问题和技术问题有待解决。解决方法之一是利用人造卫星。1976

年发射的海事卫星(MARISAT)使海上移动通信从短波转向高质量的微波通信,以后成立国际海事卫星组织,开通了全球卫星系统,陆地站也有可移动的车载终端。90年代陆续提出以个人通信为目标的中低轨道的卫星通信系统。如铱星、全球星方案等。前者已发射了40多个卫星,1999年进行试运行。这些都说明通信的个人化是当前发展趋势之一。

当然还可提出其他趋势,如设备的小型化和廉价化等。以上只是展望了通信的主要发展趋势以供读者参考,或许能提高学习兴趣和明确学习目的。

## 1.3 通信系统和通信网的构成

### 1.3.1 概述

从上节所阐述的通信的发展趋势可看出,通信产业是一个庞大而飞速发展的产业。新业务和新技术日新月异,要全面描述这些技术的基本原理几乎是不可能的。但从总体上看,通信技术实际上就是通信系统和通信网的技术。通信系统是指点对点通信所需的全部设施,而通信网是由许多通信系统组成的多点之间能相互通信的全部设施。研究通信系统可用图1.1所示的仙农模型。

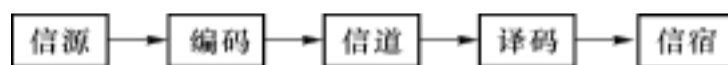


图 1.1 通信系统模型

信源是发出待传送信息的主体,信宿是该信息的接受者,信源和信宿决定了通信系统的业务性质。例如电话系统传送语音信息,电报或数据通信系统传送代表某些信息的符号,电视系统传送活动图像的信息等。信道是传送信息的通道,如电缆信道、光缆信道、无线信道等;其容量决定该系统能传送多少信息。编码是泛指把信源输出变换成适合信道传送的信号所需的设备;而译码就是编码的反变换所需的设备。从这个意义上说,编码和译码实际上包含除信道外的所有的通信设备。当给定信源和信宿并选定信道后,这些设备决定通信系统的性能。例如适当的压缩编码可降低码率以提高通信系统的有效性,亦即同样的信道可传送更多的信源信息;又如适当的调制方式可降低误码率以提高通信系统的可靠性等。图1.1中所示的系统是单向通信系统。信息只从信源送到信宿。许多系统是双向的。这时可由两个单向通信系统构成。两边都有信源和信宿,编码和译码合在一起成为终端设备,而信道应是双向的。所以点对点的通信系统可由信道和终端构成,而当许多终端要相互通信时,就需用转接点把这些通信系统连接成通信网,如图1.2所示。

图中虚线范围内是一个通信网。粗线代表信道,两线的交点是具有转接设备的交换局。各终端T接到一个交换局就可与联网的任何一个终端相互通信。由此可见,通信网中除了通信系统的所有设备外,尚需转接设备。而在自动化的通信网中,信令或协议也是必须的。这样就可在满足各终端之间能互通信息的要求下,提高信道利用率。以下将对通信系统和通信网的各组成部分分别作一些简述。

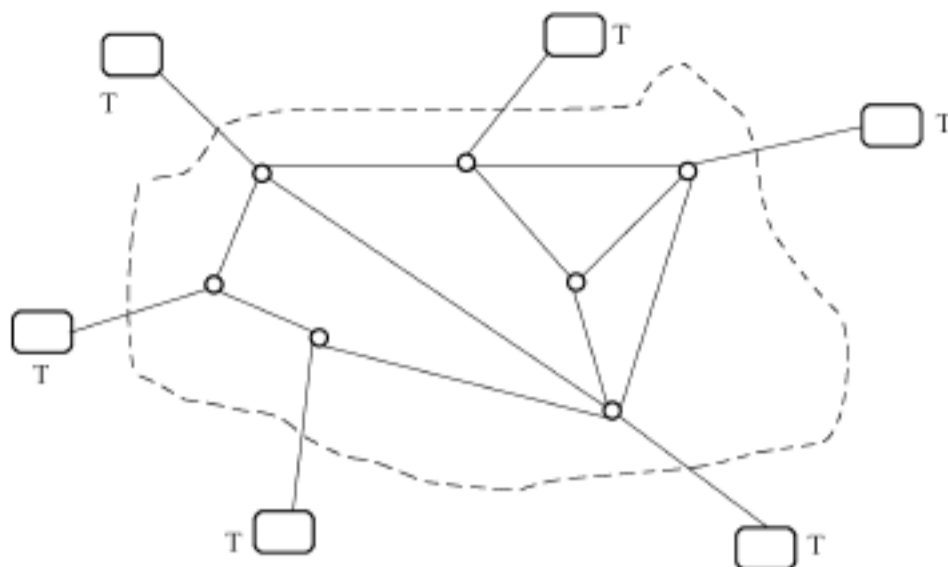


图 1.2 通信网模型

### 1.3.2 信源、信宿和信号

信源和信宿是通信系统的服务对象。信源的信息以消息的形式送给信宿。各种信源的消息可有不同的形式,如声音、图像、文字等。通过传感器把这些消息转换成信号(一般是电信号),后者需经过变换、处理和传送,最后又用传感器转换成消息供信宿利用。由此可见,信号是通信系统中的主要构成部分,要设计优良的通信系统,必须对信号有深入的认识。除了载荷信源信息的信号外,尚有网内的控制信号和干扰信号,如外界噪声、设备内部噪声、邻路干扰和电路失真所引起的符号间干扰等。这些信号对通信系统的影响也需仔细研究。

### 1.3.3 信源编译码设备

图 1.1 中的编码和译码方块包含从信源到信道和信道到信宿的信号变换,其中主要可分为两大部分,即信源编译码设备和信道编译码设备。后者是把信号变换成适合信道传输的信号,这将在下一节讨论。前者包括将信源消息转换成电信号和反变换的传感器以及进一步变换电信号的设备。变换的目的一般是提高系统的有效性,也就是同样的信道可传送更多的信息。模拟信号的主要参数之一是频带宽度  $B$ ,它决定信号所占用的信道资源;所以在模拟通信系统中,信源编码的任务就是压缩频带。例如考虑人耳特性和对话声的要求,可用把语声信号的频带限制在  $300 \sim 2700 \text{ Hz}$  之内的滤波器。又如彩色电视信号的编码器虽有各种制式,但基本原理都是利用人眼对色彩分辨率较低的特性,将亮度信号与彩色信号分离,分别限频再合并的技术。至于在数字通信系统中,压缩信源输出的码率成为信源编码的目标。对于离散信源可用无失真的熵编码技术,如赫夫曼编码等;对于连续信源,就需采样量化等限失真编码技术,如脉码调制等。当大容量通信网取得发展后,曾认为信源编码可能得不偿失,即其代价可能大于信道扩容的费用。但近年来移动通信和多媒体技术都要求低比特率,又使信源编码技术成为必要,因而新的编码方法不断有所引入。

### 1.3.4 信道及信道编译码设备

通信系统中的信道可分为两大类:一类是用自由空间的电磁波来传播信息的无线信道;这种信道的特点是只能传送高频的带通信号,因此必须有由调制解调器、高频振荡器、变频和天线等组成的收发信机,才能利用这类信道。这些设备把信源编码输出的信号变换成适于信道传送的信号可称为信道编码设备,但也可认为是信道的构成部分。调制信号是模拟信号就构成模拟信道,是数字信号就构成数字信道。微波接力通信中的中继站只是对信号进行变频,那就更应作为信道的一部分了。

另一类信道是由沿导线的电磁波来传播信息的有线信道,包括明线、对称电缆、同轴电缆和光缆等。除了光缆外,其他信道均能传送基带信号,即从很低频率到高频的信号,所以不一定需有调制解调电路。光缆信道与无线信道一样只能传送带通信号,差别只是把电信号对激光进行调制。为了减少噪声积累,每隔一段距离需加中继设备,如模拟通信系统中的中继放大器和数字通信系统中的再生器。这些也可认为是信道的一部分。

信道容量通常远大于单个用户所需的信息率。为了充分利用信道就需采用复用和多址接入技术。复用就是多个信源输出变换成相互正交的信号后叠加起来再进行调制或直接送入信道。在接收端可利用正交性将各路分开。复用方式可分为频分复用(FDM)、时分复用(TDM)和码分复用(CDM)。模拟通信系统中常用频分复用,如多路载波系统;数字通信系统中常用时分复用,如2.048 Mbit/s的E1系统。码分复用已有商业实用系统。多址接入是适应无线通信的另一种复用技术,它不要求各个信源的信号集中在一起,而是经变换后直接接入信道。也有频分复用多址(FDMA)、时分复用多址(TDMA)和码分复用多址(CDMA),分别用于模拟信号的移动通信系统和数字信号的移动通信系统。

以上设备从仙农模型而论应属于信道编译码的范围。通常把信道编译码的目标定在提高系统的可靠性,这样的编译码器在数字通信中就是纠错和检错编码设备。在模拟通信系统中的宽带调频和各种扩频系统也属于这一类。用这些方法来提高信道的可靠性所付出的代价是占用更宽的信道频带。

### 1.3.5 交换设备

以上列述了通信系统的构成部件。再用交换设备把许多通信系统连接起来就组成了通信网。以交换方式来分,现有的通信网有两大类:电路交换网和信息交换网。

前者用呼叫等信令将两个用户间的电路接通后,该电路就归他们使用,直到通信完毕。这种方式适用于有实时性要求、占时较长的信息传输。现有的电话网均为这种交换机。以前的模拟通信常采用开关阵的空分交换机,数字通信中则采用时分和空分相结合的程控交换机。另一种是以信息包进行交换的信息交换。这就是先把待传送的消息组成信息包,将信息包从一个节点送到另一个节点,在此节点存储下来,如未发现差错且前向信道有空,就按信息包中的地址送到另一个节点,如发现差错则要求前一节点重发,这样下去,直至到达目的地。这种方式适用于实时性要求不高的突发性信息。现有的计算机数据通信网都采用这种存储转发方式。由于这里信息是分成一个包为一组进行转接,所以也可称为分组交换网。这两种类型的网平行发展而不能互通,所以提出综合业务数字

网(ISDN)。开始时只在终端综合,在交换时仍分配到两种网;以后又提出异步传送模式(ATM),试图通过它达到两网互通。ATM是一种快速分组交换,但每组等长,节点间不采取检错重发而以虚电路连接两个终端。另一种尝试是用高速互连网传送语音、图像等多媒体业务,也就是用路由器和协议进行交换。

现代通信网的交换设备中,信令和协议是其主要构成部分,它们使用户间能自动接通,并处理各种意外事件。在有些情况下,它们就是交换设备本身,如多址接入系统中的信道分配、计算机网中的差错控制等。

## 1.4 本书的总体结构

通信原理是研究通信系统和通信网各构成部分的基本理论和基本分析方法。根据上一节的内容,本书将作下述安排:

首先在第二和第三章中讨论信号的性质、数学表示式和通过电路系统,主要是线性系统的分析方法。非线性系统对通信也很重要,但它比较复杂,尚无一般性的分析方法,只能个别处理。第二章是关于确定信号。而第三章是关于随机信号(包括噪声)。这些都是分析通信系统的基础,因为通信从本质上说就是信号在各种电路中流通的结果。

接着在第四到六章中阐述各种信道的构成技术和它们的性能分析。要利用具有带通特性的无线等信道,必须把携带信息的基带信号转换成频带信号。这就需要调制技术。第四章将讨论各种模拟调制方式,并分析它们的性能,包括所占带宽和信噪比等。数字通信是当前发展的主要方向,第五章讨论数字基带信号的特性和在传输中所遇到的一些问题,如码间干扰、抗噪性等。第六章介绍各种数字调制方式及其性能,如带宽和误码率等。

以下就转入通信的基本理论问题,也就是仙农信息论的主要内容。第七章是关于信源和信源编码。说明信源输出的信息含量,信息熵和无失真信源编码定理,率失真理论和量化技术,降低相关性的预测编码和变换编码等。第八章是介绍信道和信道容量,信道编码定理和信道复用等问题。第九章是信道中的差错控制编码,介绍分组码和卷积码等的基本概念。第十章介绍正交编码与伪随机序列的基本概念及其应用。

以上内容都是关于点对点通信系统的,但通信常需在多点之间进行,这就必须借助于通信网,而通信网也是近代通信技术发展的重点,因为这关系到通信设备的高效运行和高质量地为大众服务。最后也就是第十一章将讨论通信网的基本原理。以前已说过,通信网就是通信系统与交换设备包括信令和协议的结合,所以第十一章将阐述交换的基本原理,多址接入的交换方式以及协议和信令的基本知识。

## 第二章 确定信号分析

---

### 2.1 引言

通信系统中利用信号来传送信息。一般信号是时间的函数。确定信号是指可以用确定的时间函数表示的信号。而实际载荷信息的信号往往不能用一个确定性的时间函数来描述,但具有一定的统计规律性,这种信号称作随机信号,将在第三章研究。本章研究确定信号的性质及其通过线性系统的分析。

### 2.2 确定信号的分类

确定信号的分类方法很多,例如,可分为周期信号和非周期信号,能量信号与功率信号,模拟信号与数字信号,基带信号与频带信号等。本章主要用第一和第二种分类法。

#### 1. 周期信号

定义:若  $f(t) = f(t + T)$  对于任何  $t$  值成立,其中  $T$  为满足此关系式的最小值,则称  $f(t)$  为周期信号,  $T$  为其周期。

性质:

(1) 若  $T$  是  $f(t)$  的周期,则  $nT$  也是  $f(t)$  的周期。其中  $n$  为任意整数,即

$$f(t) = f(t + nT)$$

(2)  $s(t) = f(at)$  的周期等于  $T/a$

(3)  $\int_c^{c+T} f(t) dt = \int_0^T f(t) dt$  其中:  $c$  为任意常数

(4) 同周期信号的和、差、积也是周期信号,且具有同一周期。

例如:  $e^{jx} = \cos x + j\sin x$  的周期为  $2$

#### 2. 能量信号与功率信号

若  $f(t)$  表示在一欧姆电阻上的电压(V),则电流  $i(t) = f(t)$  (A),在电阻上消耗的能量为

$$E_f = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt$$

若  $E_f < \infty$ , 则称  $f(t)$  为能量信号。一般限时信号的能量有限, 为能量信号。非限时信号也有能量有限的, 例如:  $e^{-|t|}$ ,  $e^{-t^2}$  等, 因而也是能量信号。

周期信号的能量无限大, 因此不是能量信号。

若  $f(t)$  的平均功率  $\lim_{T_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{T_1} \int_{-T_1/2}^{T_1/2} f^2(t) dt > 0$ , 但  $< \infty$ , 则称  $f(t)$  为功率信号。

不难看出, 周期信号是功率信号。非周期不限时信号也可能是功率信号。

## 2.3 周期信号的傅利叶级数分析

### 1. 三角形式的傅利叶级数

令  $f(t)$  为周期信号, 周期为  $T$ , 且满足狄里赫利条件\* (一般实际信号均满足), 则  $f(t)$  可展开为以下级数:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos n \omega_0 t + b_n \sin n \omega_0 t] \quad (2.3.1)$$

式中:  $a_0 = \frac{1}{T} \int_c^{c+T} f(t) dt$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_c^{c+T} f(t) \cos n \omega_0 t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_c^{c+T} f(t) \sin n \omega_0 t dt$$

其中:  $c$  为常数, 其值可任选。通常选  $c = -\frac{T}{2}$ , 则有

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos n \omega_0 t dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin n \omega_0 t dt$$

(\* 狄里赫利条件为: 在一个周期内  $f(t)$  只有有限个第一类不连续点, 且可将  $T$  分为有限个子区间, 在每一个子区间内  $f(t)$  为单调函数。)

令  $a_n \cos n \omega_0 t + b_n \sin n \omega_0 t = c_n \cos(n \omega_0 t + \phi_n); c_0 = a_0, \phi_0 = 0$

则有 
$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} c_n \cos(n \omega_0 t + \phi_n) \quad (2.3.2)$$

由式(2.3.2)可见, 周期信号展开为许多不同幅度、频率和相位的正弦信号之和。这些信号称作  $f(t)$  的谐波。其中:  $c_0$  为直流分量,  $c_1 \cos(\omega_0 t + \phi_1)$  称为  $f(t)$  的一次谐波(又称基波),  $c_n \cos(n \omega_0 t + \phi_n)$  称作  $f(t)$  的  $n$  次谐波。  $c_n$  与  $\omega_n$  的关系称作  $f(t)$  的幅度频率特性, 简称幅频特性, 它表示不同谐波幅度大小与频率的关系。  $\phi_n$  与  $\omega_n$  的关系称作  $f(t)$  的相位频率特性, 简称相频特性, 它表示不同谐波相位与频率的关系。不难看出  $c_n$ 、 $\phi_n$  仅在  $\omega = n \omega_0$  处有值 ( $n = 1, 2, 3, \dots$ )。因此,  $c_n$ 、 $\phi_n$  与  $\omega$  的关系是离散的, 因此称作离散频谱(也称线频谱)。

谱线间隔为  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  愈大,  $\omega_0$  愈小, 即谱线愈密。

### 2. 指数形式的傅利叶级数

利用欧拉公式 
$$\cos x = \frac{1}{2} (e^{jx} + e^{-jx}) \quad (2.3.3)$$