

# 现代通信原理

曹志刚 钱亚生

清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书以现代通信系统为背景,系统地介绍现代通信技术的基本原理,并以数字通信原理为主。

全书共十二章,内容包括通信系统基本概念、信息论初步、模拟调制、语音编码、多路复用、数字基带传输、数字调制和差错控制编码等。

本书内容丰富、概念清楚、取材新颖、理论联系实际,充分反映了近年来的先进通信技术和新理论。书中列举了许多例题,每章后附有大量习题。

本书可作为高等学校工科无线电技术、通信与电子系统等专业的高年级本科生教材或研究生参考书,也可供通信工程技术人员和科研人员作为继续教育的参考书。

**(京)新登字 158 号**

现 代 通 信 原 理

曹志刚 钱亚生

清华大学出版社出版

北京 清华园

北京密云胶印厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

开本: 787×1092 1/16 印张: 27.5 字数: 649 千字

1992年8月第1版 1994年8月第3次印刷

印数: 11001 - 14000

ISBN 7-302-01002-1/ TN·31

定价: 13.50 元

# 前 言

通信技术的发展日新月异,学习通信专业知识的学生和科技人员不但需要掌握扎实的基础理论,而且需要学习与了解更多的现代通信技术和理论,特别是数字通信方面的知识。本书的宗旨是系统深入地阐述现代通信系统的基本原理,其中包括模拟通信和数字通信,并以数字通信为主。

本书以当前广泛应用的通信系统和代表发展趋势的通信新技术为背景,在介绍传统技术基本原理的基础上,刻意于取材的新颖和先进,力求充分反映近年来国内外通信技术的发展。本书是作者近十年来从事本科生和研究生教学实践的总结,并特别注意吸收了清华大学电子工程系通信教研组和作者在数字调制解调、纠错编译码、语音编码、数字复接和基带传输等方面的科研成果。

通信系统的核心是信号设计。本书在强调信号的数学表达和推导的同时,以通信技术的发展、演变为线索,由浅入深,力求把基本概念阐述透彻,旨在使读者把握通信信号设计的发展脉络和指导思想。书中特别注重理论联系实际,每章在阐述基本原理后,均有通信系统应用实例。为帮助读者掌握基本分析方法,书中列举许多例题,各章后还附有大量习题。

全书共十二章,除第一、二章以外,内容分为四个部分:模拟调制(第三、四章)、语音编码与数字复接(第五至八章)、数字传输(第九、十章)和差错控制编码(第十一、十二章)。

第一章绪论在讲述通信系统的组成和分类之后,全面概述了通信技术的发展历史、现状和趋势。为了使读者从信息论的高度来观察通信系统的本质,第二章从信息的度量到香农的信道容量公式,介绍了信息论的基础知识。

第三、四章从时域和频域的角度阐述了各种模拟调制的原理和调制解调方法,详细论述了抗噪声性能的基本分析方法和线性调制的一般模型,并以应用实例说明频分多路原理。

第五、六、七章叙述脉冲编码调制、自适应差分脉冲编码调制和增量调制等目前广泛使用和即将推广使用的语音编码原理。以量化噪声的分析和推导为主线,论述了为减小量化噪声而采取的各种措施和方法。书中还详细介绍了国际电话电报咨询委员会(CCITT)有关建议的内容和实用的单片集成编译码器。第八章结合CCITT建议,讨论同步和准同步的时分多路复用原理,并分析了帧同步的性能。

数字信号传输是第九、十章的内容。第九章从理论到实际全面阐述了基带信号传输原理,介绍在数字通信中实际应用的各种传输码型、波形无失真传输条件、部分响应基带信号、伪随机序列的产生和扰码以及时域均衡原理等,此外还对功率谱的计算方法和传输差错率进行了理论分析。第十章介绍二进制数字信号载波传输的各种调制方法和最佳接收原理,并以很大篇幅讨论近年来应用日趋广泛的多相调制(MPSK)、多电平正交幅度调制(MQAM)等多进制数字调制和恒包络调制原理。最后,对载波调制信号的等效基带模

型和计算机模拟方法作了论述。

第十一、十二章讨论差错控制编码原理。其中第十一章讲述差错控制编码和线性分组码的基本概念,阐述在各种通信系统中得到实际应用的循环码、BCH 码和用于对付突发错误的分组码的编译码方法,以及线性分组码的纠错性能。另一类具有很强纠错能力的纠错码是卷积码,这是第十二章的主要内容。该章在讨论卷积码的各种描述方法和距离特性之后,着重论述卷积码的各种译码方法:维特比译码、序贯译码和门限译码。最后一节讲述近年来发展起来的网格编码调制,它是调制解调与卷积码有机组合的产物,能最佳地利用信号空间。

本书自成系统,便于自学。可以用作高等学校工科无线电技术、通信与电子系统专业高年级本科生与研究生的教科书,也可作为通信工程技术人员的参考书。考虑到读者在背景知识方面的广度和深度不同,本书在若干难度大、取材新的章节目录前标以 \* 号,供读者在使用本书时视具体情况掌握。

本书由曹志刚编写第一、二、三、四、九、十、十一、十二章和附录,钱亚生编写第五、六、七、八章。全书由曹志刚修改定稿。

鉴于作者水平,难免有不妥之处,欢迎读者指正。

**曹志刚**

1991 年 11 月

# 目 录

第一章 绪论 .....	1	相移法形成.....	36
§ 1.1 现代通信与信息社会.....	1	3.2.3 单边带信号的维弗法 形成.....	40
§ 1.2 通信系统的组成.....	2	3.2.4 单边带信号的解调.....	43
§ 1.3 通信系统的分类.....	4	§ 3.3 残留边带调制(VSB) .....	43
§ 1.4 通信技术发展概况.....	6	3.3.1 残留边带信号的产生.....	43
1.4.1 通信发展简史 .....	6	3.3.2 残留边带信号的解调.....	44
1.4.2 主要传输手段的发展 现状和趋势 .....	7	§ 3.4 线性调制的一般模型 .....	45
§ 1.5 通信系统的性能度量.....	9	3.4.1 线性调制信号产生的一般 模型.....	45
第二章 信息论初步.....	11	3.4.2 相干解调的一般模型.....	47
§ 2.1 信息的度量 .....	11	3.4.3 插入载波包络检波.....	48
2.1.1 消息的统计特性.....	11	§ 3.5 线性调制系统的抗噪声性能 .....	49
2.1.2 离散信源的信息量.....	12	3.5.1 通信系统抗噪声性能的 分析模型.....	49
2.1.3 离散信源的平均 信息量.....	14	3.5.2 线性调制相干解调的 抗噪声性能.....	50
2.1.4 连续信源的信息度量.....	17	* 3.5.3 常规调幅包络检波的抗 噪声性能.....	53
§ 2.2 信道容量和香农公式 .....	20	§ 3.6 频分多路复用及线性调制 应用举例 .....	58
2.2.1 有扰离散信道的 信息传输.....	20	3.6.1 频分多路复用原理.....	58
2.2.2 有扰连续信道的 信息传输.....	22	3.6.2 载波电话系统.....	59
参考资料.....	24	3.6.3 广播电视.....	59
习题.....	25	3.6.4 立体声广播.....	61
第三章 模拟线性调制.....	27	参考资料.....	64
§ 3.1 双边带调幅 .....	27	习题.....	64
3.1.1 常规双边带调幅(AM) .....	27	第四章 模拟角调制.....	67
3.1.2 抑制载波双边带调幅 (DSB-SC) .....	31	§ 4.1 角调制基本概念 .....	67
3.1.3 常规双边带调幅和抑制 载波双边带调幅的调制 与解调.....	32	§ 4.2 窄带角调制 .....	69
§ 3.2 单边带调制(SSB) .....	34	4.2.1 窄带调频.....	69
3.2.1 单边带信号的频域表达及 滤波法形成.....	34	4.2.2 窄带调相.....	70
3.2.2 单边带信号的时域表达及		§ 4.3 正弦信号调制时的宽带调频 .....	71
		4.3.1 单频调制时宽带调频信号 的频域表达.....	71
		4.3.2 单频调制时的频带	

宽度 .....	74	5.2.3 带通抽样定理 .....	108
4.3.3 单频调制时的功率		§ 5.3 实际抽样 .....	110
分配 .....	75	5.3.1 自然抽样 .....	110
4.3.4 双频及多频调制 .....	75	5.3.2 平顶抽样 .....	110
§ 4.4 任意信号调制时调频信号		§ 5.4 标量量化与矢量量化 .....	112
的频谱 .....	77	5.4.1 标量量化 .....	112
* 4.4.1 周期性信号调频 .....	77	* 5.4.2 矢量量化 .....	114
* 4.4.2 随机信号调频 .....	79	§ 5.5 最佳量化器 .....	115
* 4.4.3 任意限带信号调制时的		§ 5.6 均匀量化 .....	118
频带宽度 .....	80	§ 5.7 最佳非均匀量化 .....	121
§ 4.5 宽带调相 .....	81	§ 5.8 对数量化及其折线近似 .....	124
4.5.1 单频宽带调相 .....	81	5.8.1 理想对数量化 .....	124
4.5.2 任意信号的宽带调相 .....	82	5.8.2 A 律对数压缩特性 .....	124
§ 4.6 调频信号的产生与解调 .....	82	5.8.3 $\mu$ 律对数压缩特性 .....	126
4.6.1 调频信号的产生 .....	82	5.8.4 对数压缩特性的	
4.6.2 调频信号的解调 .....	83	折线近似 .....	126
§ 4.7 调频系统的抗噪声性能 .....	85	§ 5.9 PCM 编码原理 .....	129
4.7.1 非相干解调的抗噪声		5.9.1 折叠二进制码(FBC) ...	130
性能 .....	85	5.9.2 信道误码对信噪比的	
4.7.2 门限效应 .....	90	影响 .....	130
4.7.3 相干解调的抗噪声		5.9.3 CCITT 标准的 PCM	
性能 .....	91	编码规则 .....	131
§ 4.8 采用预加重/去加重改善		§ 5.10 对数 PCM 与线性 PCM	
信噪比 .....	93	码之间的变换 .....	133
§ 4.9 改善门限效应的解调方法 .....	95	* § 5.11 单片 PCM 编解码器 .....	135
4.9.1 反馈解调器 .....	95	参考资料 .....	137
4.9.2 锁相环解调器 .....	97	习题 .....	137
§ 4.10 调频应用举例 .....	98	第六章 自适应差分脉码调制 .....	140
4.10.1 调频广播 .....	99	§ 6.1 概述 .....	140
4.10.2 广播电视伴音 .....	99	§ 6.2 DPCM 的基本原理 .....	141
4.10.3 卫星广播电视 .....	99	§ 6.3 自适应预测 .....	145
4.10.4 通信卫星中的频分		§ 6.4 自适应量化 .....	145
多址 .....	100	* § 6.5 32kb/s ADPCM 编解码系统 .....	147
参考资料 .....	101	参考资料 .....	152
习题 .....	101	习题 .....	152
第五章 脉冲编码调制 .....	105	第七章 增量调制 .....	154
§ 5.1 脉冲编码调制(PCM)		§ 7.1 简单增量调制原理 .....	154
基本原理 .....	105	§ 7.2 数字压扩自适应增量调制 .....	157
§ 5.2 低通与带通抽样定理 .....	106	§ 7.3 增量总和调制 .....	159
5.2.1 低通抽样定理 .....	106	§ 7.4 信道误码对增量调制的影响 .....	161
5.2.2 内插公式 .....	107	§ 7.5 集成化数字压扩增量调制器 .....	163

* 7.5.1 增量调制集成电路的 工作原理 .....	163	不变 .....	221
* 7.5.2 单积分增量调制电路 ...	166	§ 9.4 部分响应基带传输系统 .....	222
参考资料 .....	169	9.4.1 部分响应波形 .....	222
习题 .....	170	9.4.2 部分响应基带传输系统 的相关编码与预编码 ...	224
第八章 时分复用 .....	172	§ 9.5 数字信号基带传输的差错率 .....	228
§ 8.1 时分复用 TDM 原理 .....	172	9.5.1 二元码的误比特率 .....	228
§ 8.2 PCM 基群帧结构 .....	174	9.5.2 三元码和多元码的 差错率 .....	231
§ 8.3 增量调制复用终端的帧结构 .....	175	9.5.3 部分响应基带信号的 差错率 .....	233
§ 8.4 60 路 PCM-ADPCM 变换编码 终端的帧结构 .....	176	§ 9.6 扰码和解扰 .....	234
§ 8.5 数字复接终端 .....	177	9.6.1 $m$ 序列的产生和性质 .....	234
8.5.1 数字复接原理 .....	178	.....	234
8.5.2 正码速调整复接器 .....	178	9.6.2 扰码和解扰原理 .....	239
§ 8.6 帧同步 .....	181	§ 9.7 眼图 .....	241
8.6.1 逐码移位同步法 .....	182	§ 9.8 均衡 .....	243
8.6.2 捕捉态的工作逻辑 .....	183	9.8.1 时域均衡原理 .....	243
8.6.3 置位同步法 .....	184	* 9.8.2 均衡算法及实现 .....	245
* 8.6.4 帧同步系统分析 .....	187	参考资料 .....	248
参考资料 .....	190	习题 .....	249
习题 .....	190	第十章 数字信号的载波传输 .....	252
第九章 数字信号的基带传输 .....	191	§ 10.1 二进制数字调制 .....	252
§ 9.1 数字基带信号的码型 .....	191	10.1.1 二进制幅度键控 (2ASK) .....	252
9.1.1 数字基带信号的码型 设计原则 .....	191	10.1.2 二进制频移键控 (2FSK) .....	254
9.1.2 二元码 .....	193	10.1.3 二进制相移键控(2PSK 或 BPSK) .....	257
9.1.3 三元码 .....	198	10.1.4 二进制差分相移 键控(2DPSK) .....	260
9.1.4 多元码 .....	206	§ 10.2 数字信号的最佳接收 .....	262
§ 9.2 数字基带信号的功率谱计算 .....	207	10.2.1 匹配滤波器 .....	262
9.2.1 相同波形随机序列的 功率谱 .....	207	10.2.2 数字信号接收的 统计模型 .....	265
* 9.2.2 一般情况下的随机序列 功率谱 .....	210	10.2.3 最小错误概率最佳 接收机 .....	267
§ 9.3 波形传输的无失真条件 .....	213	§ 10.3 二进制数字调制的误比特率 ...	271
9.3.1 奈奎斯特第一准则: 抽样值无失真 .....	215	10.3.1 二进制最佳接收机的 误比特率 .....	271
9.3.2 奈奎斯特第二准则: 转换点无失真 .....	219	10.3.2 二进制调制非相干	
9.3.3 奈奎斯特第三准则: 脉冲波形面积保持			

解调时的误比特率 ...	276	§ 11 2 线性分组码 .....	331
10 3 3 信噪比、 $E_b/n_0$ 和		11 2 1 基本概念 .....	331
带宽 .....	280	11 2 2 监督矩阵 .....	332
§ 10 4 多进制数字调制 .....	281	11 2 3 生成矩阵 .....	333
10 4 1 多进制幅度键控		11 2 4 校正子 .....	334
(MASK) .....	281	11 2 5 汉明码 .....	334
10 4 2 多进制相移键控		* 11 2 6 线性码的最小码	
(MPSK) .....	283	距界限 .....	337
10 4 3 多进制频移键控		§ 11 3 循环码 .....	339
(MFSK) .....	292	11 3 1 循环码的特点 .....	339
10 4 4 幅度与相位相结合的多进制调制		11 3 2 生成多项式 .....	340
(MQAM, MQPR) .....	295	11 3 3 循环码的生成矩阵和	
§ 10 5 恒包络调制 .....	299	监督矩阵 .....	341
10 5 1 偏移四相相移键控		11 3 4 循环码的编码器 .....	344
(OQPSK) .....	300	11 3 5 循环码的译码器 .....	348
10 5 2 最小频移键控		§ 11 4 BCH 码 .....	351
(MSK) .....	301	11 4 1 本原循环码 .....	351
* 10 5 3 其它恒包络调制 .....	306	11 4 2 BCH 码的生成多	
§ 10 6 各种数字调制的比较 .....	309	项式 .....	354
§ 10 7 带通传输系统的复函数表示和		* 11 4 3 BCH 码的译码 .....	356
计算机模拟 .....	313	§ 11 5 纠正和检测突发错误的	
* 10 7 1 带通信号的复函数		分组码 .....	359
表示 .....	313	11 5 1 交织码 .....	359
* 10 7 2 带通传输系统的复		11 5 2 Fire 码 .....	361
函数表示 .....	314	11 5 3 捕错译码 .....	362
* 10 7 3 带通传输系统的计算		* 11 5 4 RS 码 .....	364
机模拟 .....	316	11 5 5 CRC 码 .....	365
参考资料 .....	317	§ 11 6 纠错码的误码性能 .....	366
习题 .....	317	参考资料 .....	368
第十一章 差错控制编码和线性分组码 .....	322	习题 .....	369
§ 11 1 差错控制编码的基本概念 .....	322	第十二章 卷积码 .....	371
11 1 1 差错控制方式 .....	322	§ 12 1 卷积码的结构和描述 .....	371
11 1 2 差错控制编码分类 ...	324	12 1 1 卷积码的图解表示 ...	372
11 1 3 有扰离散信道的		12 1 2 卷积码的解析表示 ...	374
编码定理 .....	325	* § 12 2 卷积码的距离特性 .....	379
11 1 4 检错和纠错的		§ 12 3 卷积码的维特比译码 .....	382
基本原理 .....	325	12 3 1 卷积码的最大似	
11 1 5 几种实用的简		然译码 .....	382
单检错码 .....	327	12 3 2 维特比译码 .....	383
		* 12 3 3 维特比译码性能的	

联合界和最佳码 .....	389	§ 12.7 网格编码调制 .....	407
12.3.4 维特比译码器的		* 12.7.1 TCM 的集分割原理 .....	
实现 .....	391	.....	408
§ 12.4 序贯译码(序列译码) .....	393	* 12.7.2 TCM 码网格图的	
12.4.1 序贯译码的基本		构造原则 .....	410
原理 .....	393	* 12.7.3 TCM 码的卷积码	
* 12.4.2 费诺算法 .....	395	表示 .....	412
* 12.4.3 堆栈算法 .....	395	* 12.7.4 网格编码 8PSK 系统	
§ 12.5 门限译码 .....	397	的渐近误码性能 .....	416
12.5.1 门限译码的基本		参考资料 .....	418
原理 .....	397	习题 .....	418
12.5.2 试探码 .....	399	附录一 常用三角公式 .....	421
* 12.5.3 自正交码 .....	401	附录二 Q 函数和误差函数 .....	422
§ 12.6 卷积码的应用 .....	403	附录三 第一类贝塞尔函数 .....	425
		附录四 傅氏变换 .....	427

# 第一章 绪 论

本章首先讨论通信系统的组成和分类,以使读者对通信的基本概念、术语以及本课程所要研究的主要对象有一个初步的了解。然后介绍通信发展简史和主要通信技术的发展概况,使读者了解通信发展的脉络和趋势。

## § 1.1 现代通信与信息社会

克服距离上的障碍,迅速而准确地传递信息,是通信的任务。

人类社会建立在信息交流的基础上,通信是推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。按照人类通信交流方式与技术的不同,可以把历史划分为五个阶段。第一阶段的通信方式是语言,人们通过人力、马力以及烽火台等原始通信手段传递信息。第二阶段从发明文字以及邮政通信开始。第三阶段以发明印刷术为标志。第四阶段从电报、电话和广播的发明开始,从此人们进入了电气通信的时代,通信技术得到了迅速的发展。第五阶段为信息时代,随着现代科学技术和现代经济的发展,社会对信息传递、储存和处理的要求愈来愈高,信源的种类愈来愈多,不仅有语言,还包括数据、图象和文本等。在这第五阶段,通信和计算机已经而且必将更加有机地结合起来。

现代通信系统是信息时代的生命线。现代通信网已不再是单一的电话网或电报文字通信网,而是一个综合性的为多种信息服务的通信网。为适应世界性的政治与经济活动的需要,人类已经迅速建立起世界性的全球通信网。目前,这个现代通信网连接有6亿部以上的电话,还提供了大量的用户电报以及数据通信业务,现代通信已成为最重要的信息技术服务。目前,许多发达国家的通信收入已超过铁路交通部门。当前,能源、汽车、钢铁、通信与农业是世界五大行业。到本世纪末,包括通信在内的信息技术服务行业将超过汽车、能源,成为世界上最大的行业。

现代通信与经济的发展密切相关,通信网已经成为支撑现代经济的最重要的基础结构之一。可以说,没有现代通信就没有经济的高速发展。宏观经济研究认为,通信与生产效率和经济增长之间呈正比关系。一些经济高速发展国家和地区的统计数字表明,通信建设的增长必须赶上甚至超出国民经济总产值的增长,才有经济的高速发展。改革开放以来,我国的通信建设有了迅速的发展,但与一些发达国家相比还很落后。电话普及率(每百人平均拥有的电话机数目)是一个国家通信发展水平的标志,世界上一些先进的工业国,电话普及率均在50台/100人以上,瑞典居首位,高达85.6台/100人,而我国仅为1台/100人。由此可见,现代通信系统的建设与发展是实现四化的一项十分重要而又艰巨的任务。

## § 1.2 通信系统的组成

传递信息所需的一切技术设备的总和称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

通信系统由以下几部分组成:

### 1. 信息源和受信者

根据信息源输出信号的性质不同可分为模拟信源和离散信源。模拟信源(如电话机、电视摄象机)输出连续幅度的信号;离散信源(如电传机、计算机)输出离散的符号序列或文字。模拟信源

图 1-1 通信系统的一般模型

可通过抽样和量化变换为离散信源。随着计算机和数字通信技术的发展,离散信源的种类和数量愈来愈多。

随着信息源和接收者不同,信息速率在很大范围内变化。图 1-2 中列出一些常用信号的比特率,同时也列出某些实际信道所能传送的比特率。例如,电传打字机有 26 个英文字母和其它符号,它总共能产生 32 种离散符号,因此需要有 5 位二进制数字来表示( $2^5 = 32$ )。假设电传打字机产生符号的速率为 10 个符号/秒,则作为一个离散信源来说,它每秒

图 1-2 常用离散信源的比特率

能传送的二进制信息速率为 50b/s(比特/秒)(比特的定义见§ 1.5,§ 2.1)。由图可知,人类作为一种复杂的信息源和接收者,不同器官发送和接收信息的能力不同。人脑的长期信息存储和处理能力更是目前电子技术所无法模拟的,据估计人脑能长期存储  $10^{13}$ - $10^{14}$ 比特的信息。

由于信息源产生信息的种类和速率不同,因而对传输系统的要求也各不相同。

## 2. 发送设备

发送设备的基本功能是将信源和传输媒介匹配起来,即将信源产生的消息信号变换为便于传送的信号形式,送往传输媒介。变换方式是多种多样的。在需要频谱搬移的场合,调制是最常见的变换方式。

对于数字通信系统来说,发送设备常常又可分为信道编码与信源编码两部分,如图 1-3 所示。信源编码是把连续消息变换为数字信号;而信道编码则是使数字信号与传输媒介匹配,提高传输的可靠性或有效性。

发送设备还包括为达到某些特殊要求所进行的各种处理,如多路复用、保密处理、纠错编码处理等。

图 1-3 数字通信系统的组成

## 3. 传输媒介

从发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介,可以是无线的,也可以是有线的(包括光纤)。有线和无线均有多种传输媒介。传输过程中必然引入干扰,如热噪声、脉冲干扰、衰落等。媒介的固有特性和干扰特性直接关系到变换方式的选取。

## 4. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换,即进行解调、译码、解密等。它的任务是从带有干扰的信号中正确恢复出原始消息来,对于多路复用信号,还包括解除多路复用,实现正确分路。

以上所述是单向通信系统,但在大多数场合下,信源兼为受信者,通信的双方需要随时交流信息,因而要求双向通信,电话就是一个最好的例子。这时,通信双方都要有发送设备和接收设备。如果两个方向有各自的传输媒介,则双方都可独立进行发送和接收;但若共用一个传输媒介,则必须用频率或时间分割的办法来共享。

此外,通信系统除了完成信息传递之外,还必须进行信息的交换,传输系统和交换系统共同组成一个完整的通信系统,乃至通信网络。

现代交换系统都使用自动交换机,能自动接续电话呼叫或数据呼叫。电话机数量的增多,以及全国自动电话网的建设,对交换系统功能与容量的要求愈来愈高。当前程控数字交换机正在迅速发展之中。

## § 1.3 通信系统的分类

通信系统的分类方法很多,这里仅讨论由通信系统模型所引出的分类。

### 1. 按消息的物理特征分类

根据消息的物理特征的不同,有电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图象通信系统等各种通信系统。这些通信系统可以是专用的,但通常是兼容的或并存的。由于电话通信最为发达,因而其它通信常常借助于公共的电话通信系统进行。例如,电报通信通常是从电话话路中划分出一部分频带传送,或者是用一个话路传送多路电报。又如,随着电子计算机发展而迅速增长起来的数据通信,近距离时多用专线传送,而远距离时则常常借助电话通信信道传送。未来的综合数字通信网中,各种类型的消息都能在一个统一的通信网中传输、交换和处理。

### 2. 按调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和调制传输。

基带传输是将未经调制的信号直接传送,如音频市内电话、数字信号基带传输等。

调制传输是对各种信号变换方式后传输的总称。调制的目的有以下三个方面:

将消息变换为便于传送的形式。如无线传输时必须将消息载在高频上才能在自由空间发射出去。又如在数字电话中将连续信号变换为脉冲编码调制信号,以便于在数字信道中传输。

提高性能,特别是抗干扰能力。

有效地利用频带。

各种调制方式正是为了达到这些目的而发展起来的。

调制方式很多,表 1-1 给出一些常见的调制方式,我们将陆续详细讲述它们的原理。

应当指出,在实际使用时常常采用复合的调制方式,即用不同调制方式进行多级调制。

### 3. 按传输信号的特征分类

变换后的信号与消息之间必须建立单一的对应关系,否则在收端就无法恢复出原来的消息。调制时消息携带在正弦波或脉冲序列的某个参量或几个参量上,按参量的取值方式可将信号分为模拟信号和数字信号。模拟信号中参量的取值范围是连续的,因此可有无限多个取值。数字信号中携带消息的参量仅可取有限个数值。

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,可以相应地把通信系统分成两类,即模拟通信系统和数字通信系统。

数字通信在近 20 年来得到了迅速发展,其原因是:

抗干扰能力强。

便于进行各种数字信号处理。

易于实现集成化。

经济效益正赶上或超过模拟(载波)通信。

传输与变换可结合起来,传输电话与传输数据也可结合起来,成为一个统一体,有

利于实现综合业务通信网。

便于多路复用。

表 1-1 常用调制方式及用途

调制方式		用途	
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 VSB	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 FSK	数据传输
		相位键控 PSK, DPSK, QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM, MSK 等	(提高频带利用率) 数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PDM(PWM)	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	市话、卫星、空间通信
		增量调制 DM, CVSD, DVSD 等	军用、民用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图象编码
		其他语音编码方式 ADPCM, APC, LPC 等	中、低速数字电话

表 1-2 常用传输媒介

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3Hz- 30kHz	$10^8$ - $10^4$ m	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30kHz- 300kHz	$10^4$ - $10^3$ m	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300kHz- 3MHz	$10^3$ - $10^2$ m	中频 MF	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3MHz- 30MHz	$10^2$ - 10m	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
30MHz- 300MHz	10- 1m	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航

续表

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
300MHz- 3GHz	100- 10cm	特高频 UHF	波导 分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3GHz- 30GHz	10- 1cm	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30GHz- 300GHz	10- 1mm	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5$ - $10^7$ GHz	$3 \times 10^{-4}$ - $3 \times 10^{-6}$ cm	紫外、可见 光、红外	光纤 激光空间传播	光通信

#### 4. 按传送信号的复用方式分类

传送多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用、码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围;时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用则是用一组正交的脉冲序列分别携带不同信号。

传统的模拟通信中都采用频分复用。随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用愈来愈广泛。码分复用主要用于空间通信的扩频通信系统中。

#### 5. 按传输媒介分类

按传输媒介,通信系统可分为有线(包括光纤)和无线两类。表 1-2 中列出常用的传输媒介及其主要用途。

## § 1.4 通信技术发展概况

### 1.4.1 通信发展简史

19 世纪开始发展电通信以来,通信技术的发展速度很快,特别是本世纪 50 年代以后发展更为迅速,通信发展简史介绍如下:

- 1838 年 摩尔斯发明有线电报
- 1864 年 马克斯韦尔提出电磁辐射方程
- 1876 年 贝尔发明电话
- 1896 年 马可尼发明无线电报
- 1906 年 发明真空管
- 1918 年 调幅无线电广播、超外差接收机问世
- 1925 年 开始采用三路明线载波电话、多路通信
- 1936 年 调频无线电广播开播
- 1937 年 发明脉冲编码调制原理
- 1938 年 电视广播开播
- 1940- 1945 年 二次大战刺激了雷达和微波通信系统的发展
- 1948 年 发明晶体管;香农提出了信息论,通信统计理论开始建立
- 1950 年 时分多路通信应用于电话
- 1956 年 敷设了越洋电缆
- 1957 年 发射第一颗人造卫星

1958年	发射第一颗通信卫星
1960年	发明激光
1961年	发明集成电路
1962年	发射第一颗同步通信卫星;脉冲编码调制进入实用阶段
1960- 1970年	彩色电视问世;阿波罗宇宙飞船登月;数字传输的理论和技術得到了迅速发展;出现高速数字电子计算机
1970- 1980年	大规模集成电路、商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统、微处理机等迅速发展
1980以后	超大规模集成电路、长波长光纤通信系统广泛应用;综合业务数字网崛起

由此可看出通信技术由模拟到数字的发展过程。最早出现的电报是一种最简单的数字通信,随着真空管的出现,模拟通信得到了发展。此后由于脉冲编码原理和信息论的提出以及晶体管和集成电路的发明,数字通信进入全盛时期。虽然目前各国通信网仍以模拟为主,但无疑数字通信是目前和今后通信技术的发展方向。

#### 1.4.2 主要传输手段的发展现状和趋势

##### 1. 电缆通信

电缆通信是最早发展起来的通信手段,用于长途通信已有 60 余年历史,在通信中占有突出地位。在光纤通信和移动通信发展之前,电话、传真、电报等各用户终端与交换机的连接全靠市话电缆。电缆还曾是长途通信和国际通信的主要手段,大西洋、太平洋均有大容量的越洋电缆。据 1982 年统计,我国公用网长途线路总长为 18 万余公里,其中 90% 为明线。目前,同轴电缆所占的比例已上升到三分之一左右。电缆通信中主要采用模拟单边带调制和频分多路复用(SSB/FDM)。国际上同轴电缆每芯最高容量高达 13200 路(或 6 路广播电视),我国沪-杭、京-汉-广同轴电缆干线可通 1800 路载波电话。自从数字电话问世以来,各国大力发展脉冲编码调制时分多路信号在同轴电缆中的基带传输技术,数字电话容量可达 4032 路。近年来,由于光纤通信的发展,同轴电缆有逐渐被光纤电缆取代的趋势。

##### 2. 微波中继通信

微波通信是本世纪 60 年代开始发展的,它弥补了电缆通信的缺点,可到达电缆无法敷设的地区,且容易架设,建设周期短,投资也低于同轴电缆。微波通信是美、苏、日等国国内长途电话和电视节目的主要传输手段。美国现有数十万公里微波中继线路,苏联最长的一条微波中继通信线路长达 1 万多公里,直通东欧。目前模拟电话微波通信容量每频道可达 6000 路,主要采用 SSB/FM/FDM 调制方式。

随着数字通信的发展,数字微波成为微波中继通信的主要发展方向。早期的数字微波大都采用 BPSK、QPSK 调制,为了提高频谱利用率,增加容量,现已向多电平调制技术发展,采用了 16QAM 和 64QAM 调制,并已出现 256QAM、1024QAM 等超多电平调制的数字微波。采用多电平调制,在 40MHz 的标准频道间隔内可传送 1920—7680 路脉冲编码调制数字电话,赶上并超过模拟微波通信容量。

我国现有 5 万多公里微波中继通信线路,其中 3/5 用于通信,2/5 用于广播电视节目传送。预计 2000 年前还将新建 10 余万公里微波中继线路。尽管微波通信面临光纤通信

的严重挑战,但仍将是长途通信的一个重要传输手段。

### 3. 光纤通信

光纤通信具有容量大、成本低的优点,而且不怕电磁干扰,与同轴电缆相比可以大量节约有色金属和能源。因此,自1977年世界上第一个光纤通信系统在芝加哥投入运行以来,光纤通信发展极为迅速,新器件、新工艺、新技术不断涌现,性能日臻完善。世界各国广泛采用光纤通信,大西洋、太平洋的海底光缆通信系统已经开通使用,其容量超出原有的海底电缆通信系统。由于长波长激光器和单模光纤的出现,每芯光纤通话路数可望达到百万路,中继距离将超过100公里,市话中继光纤通信系统的成本也将大幅度下降。目前,某些工业发达国家长途及市话中继系统光纤通信网的建设已基本完成,今后将集中发展用户光纤通信网。

至今我国光纤通信系统累计光缆长度已达九千公里。目前除了扩充改造原有同轴电缆载波线路,以充分发挥其作用外,已不再敷设同轴电缆,全部采用光纤通信新技术。预计未来十年内光缆将增加到10万公里。

光纤通信的主要发展方向是单模长波长光纤通信、大容量数字传输技术和相干光通信。

### 4. 卫星通信

卫星通信的特点是通信距离远,覆盖面积大,不受地形条件限制,传输容量大,建设周期短,可靠性高。自1965年第一颗国际通信卫星投入商用以来,卫星通信得到迅速发展,现在第六代国际通信卫星即将投入使用。目前,卫星通信的使用范围已遍及全球,仅国际卫星通信组织就拥有数十万条话路,80%的洲际通信业务和100%的远距离电视传输业务均采用卫星通信,卫星通信已成为国际通信的主要传输手段。同时,卫星通信已进入国内通信领域,许多发达国家和发展中国家拥有国内通信卫星系统。

我国自70年代起,开始将卫星通信用于国际通信,从1985年起开始发展国内卫星通信。至今已发射5颗同步通信卫星,连同相借的国际卫星的转发器,已拥有22个转发器。与182个国家和地区开通了国际通信业务,并初步组织了国内公用卫星通信网及若干专用网。

卫星通信中目前大量使用的是模拟调制及频分多路和频分多址。如同其它通信方式一样,其发展方向也是数字调制、时分多路和时分多址。卫星通信正向更高频段发展,采用多波束卫星和星上处理等新技术,地面系统的主要发展趋势是小型化。近年来蓬勃发展的VSAT(甚小口径终端)小站技术集中反映了调制/解调、纠错编码/译码、数字信号处理、通信专用超大规模集成电路、固态功放和低噪声接收、小口径低旁瓣天线等多项新技术的进步。

### 5. 移动通信

移动通信是现代通信中发展最为迅速的一种通信手段,它是随着汽车、飞机、轮船、火车等交通工具的发展而同步发展起来的。近十年来,在微电子技术和计算机技术的推动