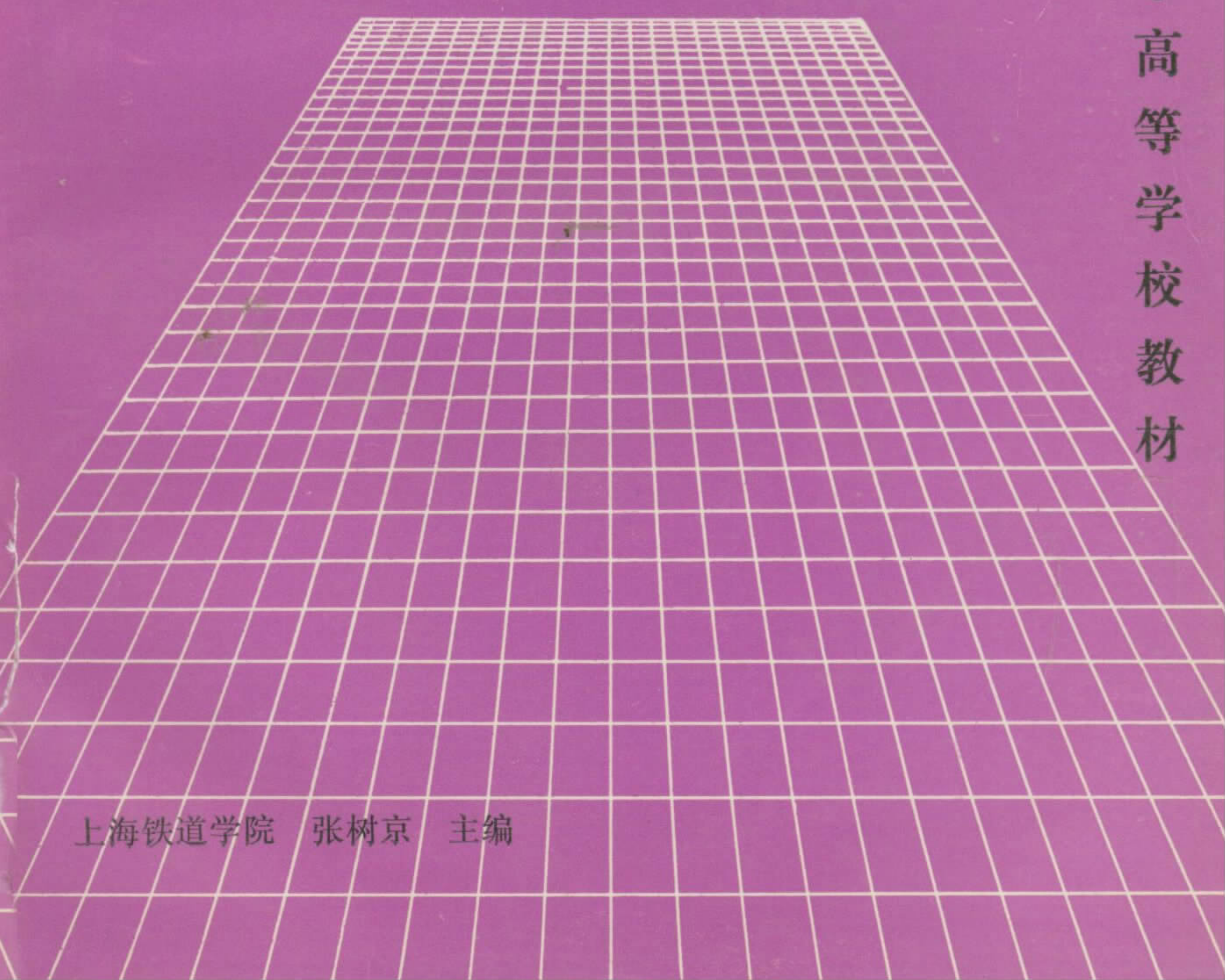


通信系统原理

● 高等学校教材



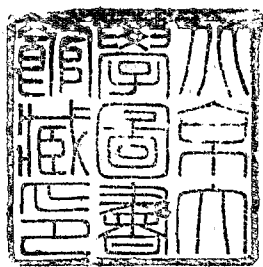
上海铁道学院 张树京 主编

高等学校教材

通信系统原理

上海铁道学院 张树京 主编

上海铁道学院 周大纲 主审



中国铁道出版社

1992年·北京

(京)新登字063号

内 容 简 介

通信系统原理是根据通信专业教学大纲要求,在1980年出版的试用教材基础上编写的。本书共分十二章,包括绪论、信号分析与变换、随机信号分析、线性调制系统、角度调制系统、数字信号的基带调制、数字信号的基带传输、数字信号的频带调制、信道复用原理、差错控制编码、最佳接收原理和信息论的基本知识。为了配合教学需要,通信系统原理习题集将与本书配套出版发行。

本书为通信专业的教材,也可供从事通信工作的科研人员及其它自学的读者学习使用。

高 等 学 校 教 材

通信系统原理

上海铁道学院 张树京 主编

*

中国铁道出版社出版、发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 武亚雯 封面设计 王毓平

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本· 787×1092毫米1/16 印张: 20.25 字数: 503 千

1992年5月 第1版 第1次印刷

印数: 1—2500册

ISBN7-113-01070-9/TN·46 定价: 5.60元

前 言

《通信系统原理》作为高等学校通信专业本科的试用教材出版发行近十年了。在试用教材的使用过程中得到了各校广大师生的大力支持和爱护，提出了许多宝贵的意见和建议，同时也得到了国家教委和铁道部有关单位的热情鼓励和指导，曾先后被评为铁道部优秀教材二等奖和全国高等学校优秀教材奖。根据铁道部高等学校通信信号专业教学指导委员会的意见，结合多年来的教学经验和心得，对通信系统原理试用教材进行修订，希望能够得到广大读者的帮助和支持。

在近十年内通信技术得到了飞速发展，特别是在我国已将它作为先进技术列入重点发展的领域。通信技术的成就可以归纳为几个方面：一是传输手段的现代化，例如采用卫星通信和光纤通信等；二是通信业务的多样化，即改变以报话为主的单一通信业务，出现了数据传输、图像通信等多种非话业务；三是通信设备的数字化，除了它的抗干扰性能要比模拟通信好之外，还便于与计算机技术（包括硬件和软件）、信号处理技术等相结合，提高通信系统的有效性和可靠性；四是通信元器件的集成化，并将数字和模拟电路集成后构成功能块，形成积木式结构。这一系列可喜的变化，使通信科学技术水平跃居新的阶层，它以崭新的面貌迎接21世纪的到来。

通信技术的发展与各方面因素有关，其中最主要的是数字通信制式的推广应用、微电子器件和计算机技术的发展，以及信号处理技术（包括自适应技术）与通信技术的有机结合。这说明当代通信技术已经引进了许多新的概念、新的理论和新的方法，吸取了其它相关学科的研究成果，成为一门综合性学科。另外，由于通信技术有力地促进了生产力的发展，为社会生产和人民生活带来了效益，因此通信已经成为一门实用科学技术，应用的领域相当广泛。

基于以上情况，我们认为修订通信系统原理试用教材的必要性就十分清楚了，不仅通信专业的学生能够从中得到有关通信技术的各方面知识和技能，对于从事通信工作的广大科技人员也可以汲取到必要的营养和受到有用的启发。

根据通信系统原理课程的教学大纲要求，本教材应着重阐明通信系统的基本组成，以及评价各种通信系统的性能指标。为了突出重点内容，我们仍遵循编写试用教材时的指导思想，以分析各种调制技术作为贯穿全书的主线，通过系统性能的比较可以抓住通信系统的核心问题，为研究设计新的通信系统、掌握通信系统的发展方向奠定必要的基础。因此在编写本教材时紧密围绕着通信系统的有效性和可靠性这对矛盾，进行深入分析和反复比较，使读者加深印象，并有所启示。

目前在通信系统中所采用的调制技术大致可以分为两大类，即模拟调制技术和数字调制技术。属于模拟调制的有幅度调制、单边带调制和残留边带调制等，它们又可统称为线性调制系统。另一类模拟调制就是角度调制，它包括调频和调相，属于非线性调制系统。虽然目前对模拟调制方式已不能认为是通信系统的发展方向，但从通信发展历史来看，模拟调制在通信学科发展中的作用和贡献不容忽视，故在新教材中仍作保留。

属于数字调制方式的也有两大类，其中一类是基带数字调制，它包括脉冲编码调制和增量调制在内；另一类则是频带数字调制，它有幅移键控、频移键控、相移键控等。值得指出的是目前出现了许多新的数字调制技术，例如自适应脉码调制，子带编码调制，最小相移键控等，我们在有关章节内都有所介绍，用来与传统的数字调制技术作比较。另外，在实际中还广泛应用多元数字调制技术，例如多元频率调制，多相调制等，在有关章节内也有介绍。

在信道编码方面考虑到应用较广的是线性分组码，因此对它的生成原理、译码方法和检纠错能力作为主要内容未介绍，而关于卷积码的内容由于篇幅有限，涉及不多。

为了适应数字通信技术的发展形势，在教材中加强了数字调制部分内容的比重，例如将数字信号的基带传输单独辟为一章，并增加了自适应脉码调制等内容。有关脉冲模拟调制的内容已经在教材中删除，只保留线性模拟调制和角度调制这两章，它们可看作调制技术的基础，对初学者来说是必须掌握的。为了配合数字通信的发展，在教材中增加一章差错控制（信道编码）方法可以提高数字信号传输的可靠性。另外，其它章节的内容亦相应地作了调整，在不超过教学时数要求的篇幅内力求做到少而精，既能重点保证必修的内容，又能反映近代先进科学水平，这两者相结合就形成了本教材的特色。

目前已经出版的国内外同类教材已有不少，尽管书名相近，但编写的内容却出入很大，它们也都从不同的观点出发来选取合适的内容和篇幅。在编写通信系统原理教材时我们考虑到通信专业教学计划的安排，对于后续专业课的内容，例如在数字通信和数据传输课程内将会详细介绍信道特性均衡、相干通信系统中的同步、以及信源编码技术等问题，为了做到既不重复、又不遗漏，我们在本教材中仅提出要求和介绍基本原理，其具体电路细节则在各门专业课内解决。对于先修课程，在教材中只保留信号分析与变换这一章，并将重点放在信号相关、卷积、以及功率谱和能量谱方面，而这些内容在信号与线性系统课程内不会作为重点。随机信号分析这一章的重点是分析随机信号的统计特性，特别是关于一阶矩和二阶矩的统计特征分析，这与教学中的随机过程内容有所不同。

本教材按照教学时数80至100学时编写，因各校教学计划有所不同，任课教师对教材内容可以有所调整，进行舍选。另外，为了便于学生自学和教师备课需要，还编写了通信系统原理习题集，与本教材配套发行，供广大师生学习使用。

本教材的第一、四、五章由上海铁道学院张树京编写，第二、六、七、九、十二章由北方交通大学齐立心编写，第三、八、十、十一章由北方交通大学冯玉珉编写，全书由张树京负责主编。上海铁道学院周大纲主审。在审稿中还听取了北京邮电学院、天津大学、华东师范大学、石油部管道学院、以及北方交通大学、上海铁道学院和兰州铁道学院等任课老师的经验和建议，在此向上述各单位和有关同志表示最衷心的感谢。

编者

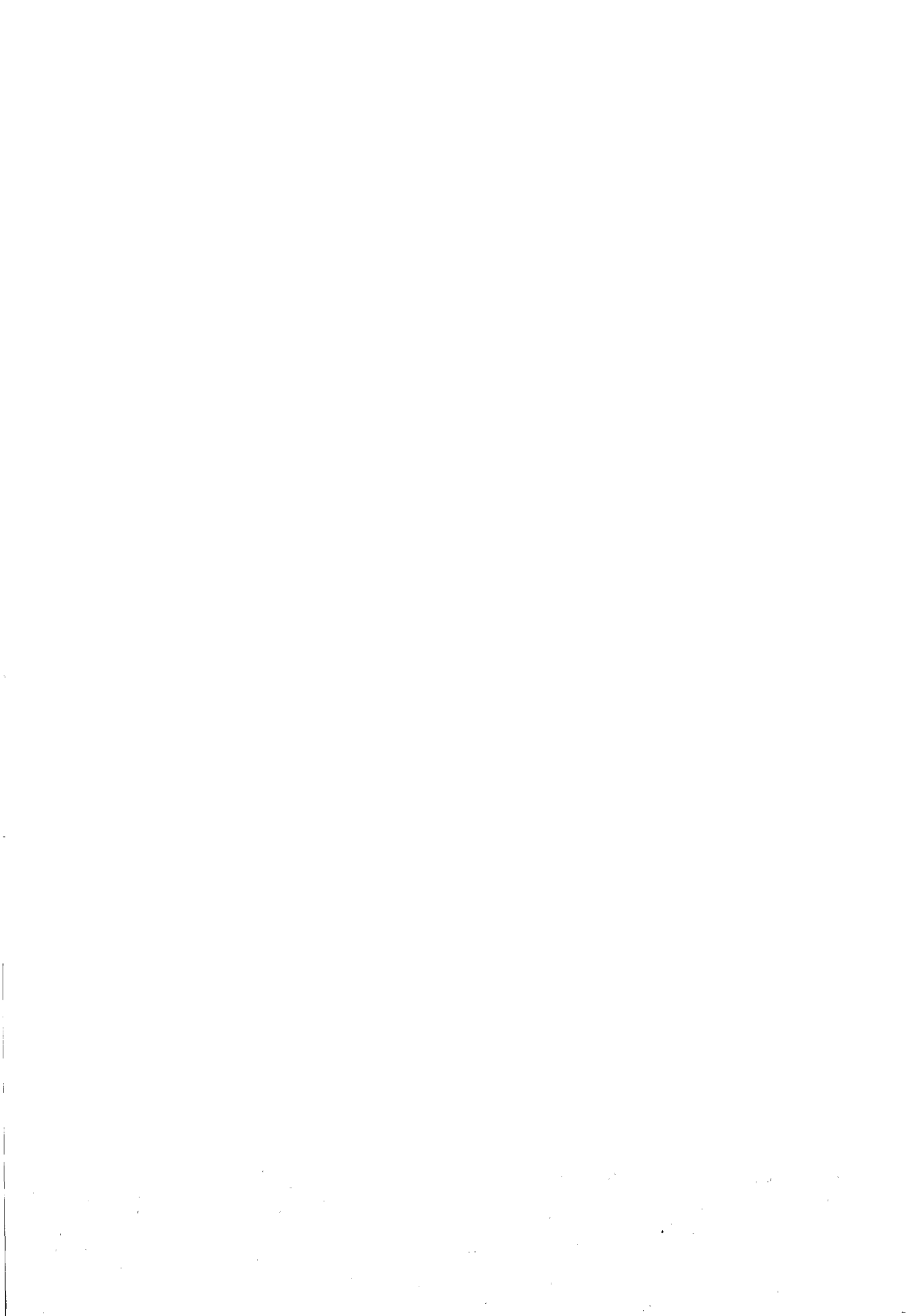
一九九〇年七月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 通信发展简史	1
第二节 通信系统	2
第三节 通信使用的频段	5
第四节 通信发展方向	7
第二章 信号分析与变换	9
第一节 常用的信号函数	9
第二节 傅里叶变换	13
第三节 卷积和相关	16
第四节 信号的能量谱和功率谱	24
第五节 离散傅氏变换	27
第六节 希尔伯特变换	31
第七节 信号通过线性系统	34
第三章 随机信号分析	38
第一节 随机信号的数学描述	38
第二节 随机信号的统计特征	46
第三节 高斯型随机信号分析	54
第四节 随机信号通过线性系统	62
第五节 随机信号通过乘法器	64
附 录	66
第四章 线性调制系统	69
第一节 调制的功能和分类	69
第二节 幅度调制 (AM)	71
第三节 双边带调制 (DSB)	74
第四节 单边带调制 (SSB)	75
第五节 残留边带调制 (VSB)	80
第六节 线性调制的一般模型	85
第七节 相干解调	87
第八节 非相干解调	96
第九节 与基带传输系统的比较	101

第五章 角度调制系统	103
第一节 角度调制的分类	103
第二节 窄带调频 (NBFM)	107
第三节 宽带调频 (WBFM)	110
第四节 调相波的特点	118
第五节 相干解调	121
第六节 非相干解调	125
第七节 门限效应	129
第八节 与线性调制系统的比较	134
附 录	137
第六章 数字信号的基带调制	138
第一节 脉冲编码调制原理	138
第二节 量化特性	144
第三节 PCM系统中的噪声	155
第四节 差分脉码调制	159
第五节 增量调制	164
第七章 数字信号的基带传输	170
第一节 基带数字信号的码型	170
第二节 基带数字信号的功率谱	171
第三节 数字信号的基带传输系统	175
第四节 基带传输系统的误码特性	184
第五节 信道均衡	189
第六节 部分响应系统	191
第八章 数字信号的频带调制	196
第一节 幅移键控 (ASK)	196
第二节 频移键控 (FSK)	201
第三节 连续相位的频移键控 (CPFSK)	205
第四节 相移键控 (PSK)	211
第五节 多元数字频带调制	216
第六节 多电平调幅 (MASK)	218
第七节 多元调频 (MFSK)	221
第八节 多元调相 (MPSK)	224
第九章 信道复用原理	229
第一节 信号的正交性	229
第二节 正交调制复用	233

第三节	频率复用 (FDM)	235
第四节	时间复用 (TDM)	237
第五节	复合调制系统	239
第六节	频率复用与时间复用变换	241
第七节	多址通信方式	242
第十章	差错控制编码	246
第一节	差错控制概述	246
第二节	线性分组码	248
第三节	循环码	257
第四节	BCH码	262
第五节	卷积码	264
第十一章	最佳接收原理	271
第一节	最佳接收准则	271
第二节	匹配滤波法接收	272
第三节	相关法接收	279
第四节	理想接收机	283
第五节	最佳接收机的抗干扰性能	287
第十二章	信息论的基本知识	292
第一节	消息、信号和信息	292
第二节	平均信息量	292
第三节	信道的统计特征	296
第四节	仙农 (Shannon) 公式	300
第五节	仙农公式的应用举例	302
第六节	信源编码的基本原理	304
第七节	信道编码的基本原理	312
参考文献		314



第一章 绪 论

第一节 通信发展简史

人类在长期的劳动和社会实践中创造和丰富了语言和文字，并利用它们来表达人们的意志和感情，交流思想，传递消息。这些活动不断频繁地进行，再经过广大科技工作者的提炼加工，逐步完善，终于由低级到高级形成了一门独立的学科，这就是通信。从本质上讲，通信就是完成信息传递功能的一门科学技术，它要将大量有用的信息无失真、高效率地进行传输，同时还要在传输过程中将无用的信息（例如噪声）和有害的信息（例如各种干扰）抑制掉。当今的通信不仅要准确地传递信息，而且还有存储、处理、采集以及显示等功能，成为信息科学技术的一个重要成员，在一定程度上可以反映社会现代化的水平。

古代的通信方式比较简单，通信的内容也很单一，例如人们使用信物、绳结、旗语、烽火、象形文字等都可作为通信工具，简单地传递数字或文字信息。真正的通信技术是从19世纪30年代开始的，在这个世纪内最伟大的发明有莫尔斯（Morse）的有线电报、麦克斯韦尔（Maxwell）的电磁场理论、贝尔（Bell）的电话机、波波夫（Попов）和马可尼（Marconi）几乎同时发明的无线电报试验等。这些发明创造为20世纪通信技术的大发展奠定了坚实的基础。

20世纪是通信发展的新纪元。首先是电子器件经过了五代大规模的更新，由最初的电子管于40年代末期更新为晶体管，继而后于60年代中期更新为集成电路，并很快于70年代中期发展大规模集成电路与超大规模集成电路，在80年代的超大规模集成电路芯片上可以集成30万个元件以上。这为通信设备的小型化和提高通信设备的可靠性起到了决定性作用。

20世纪通信的发展还表现为传输线路的现代化。最初的传输线路是架空明线和对称电缆，它们的复用率较低，而且外界干扰严重，难以满足高质量、多路传输的要求。到30年代中期就出现了同轴电缆，它的复用率可以达到成千上万路信号同时传输，开始了万路载波机的时代，并且传输质量是可以保证的。70年代光纤通信进入实用化阶段，使传输线路的现代化水平又引向新的高度。

在无线通信领域内信号传输是依靠天线和电波传播，它的发展表现在使用频段的日益扩展，由最初使用的长波（地面波）和短波（天波）向高端扩展为超短波（空间波）和微波，低端则向超长波段扩展。60年代后期卫星通信进入实用化阶段，它代替了大量地面微波通信线路，可以说是无线通信现代化的标志，真正实现了全球通信的目标。超短波频段为移动通信创造了条件，它在交通、公安、军事、消防等各类指挥系统中发挥着越来越大的作用。

20世纪调制技术的改革为通信的发展虎上添翼。模拟调制有调幅、单边带调制和调频等几种方式，它们各有优缺点。但是提高通信质量的关键技术是采用数字调制，它是从30年代提出的脉码调制后开始的。采用脉码调制（PCM）或增量调制（ ΔM ）是使传输信号数字化，

能有效地防止噪声和干扰，并可以通过编码技术实现数据压缩、加密、纠错等在模拟调制中难以做到的功能，因此数字调制已经成为长距离、高质量通信系统中的主要调制方式。特别是从70年代兴起的综合业务数字网（ISDN）已经成为各国发展通信的研究方向，它就是以数字调制为基础的。

20世纪通信中最引人注目的是通信业务多样化，以满足各类用户的需求。最早使用也是最广泛普及的通信业务是电报和电话，但是随着现代化水平提高，出现了名目繁多的通信新业务，例如电传（用户电报）、传真、可视电话、会议电视、电子邮函等。对人民生活影响最大的莫过于广播和电视，它可视为点对面的通信业务，并且是全方位、全天候服务，深受大家的欢迎。值得一提的是数据通信的崛起成为通信领域内的一个新成员，它推动了计算机和通信的结合，实现了人机对话和计算机通信，使通信的功能延伸得更深更广。

最后还必须提到20世纪内通信理论的发展，它和通信技术一样为通信学科的建立和逐步成熟作出了巨大贡献。例如在20年代奈奎斯特（Nyquist）提出了传信率与信道带宽的关系，为数字通信的发展奠定了理论根据；哈特莱（Hartley）首先给出信息量的定义和计算方法，为建立信息论准备了基础；30年代卡尔逊（Carson）提出调频波的有效带宽计算公式，得到通信工程师的广泛采用。在通信理论发展中最有影响的学者要数维纳和仙农两人。仙农（Shannon）在1948年前后率先提出了通信的数学理论，建立了比较完整的通信科学理论体系。他提出的信源和信道编码定理、信道容量计算公式以及率失真理论等至今仍是重要的研究课题。几乎与此同时，维纳（Wiener）将数理统计理论引入通信学科，开始建立起统计通信的概念，他提出的线性最佳滤波理论已经成为对统计信号进行处理的基本工具。围绕着信息论和统计通信理论的发展各国科学家提出了大量学术论文，探索通信科学中的各类奥秘，并在先进的通信技术中逐步得到采用。

总之，如果把19世纪可以看作近代通信的萌芽阶段，那末20世纪就应该算作近代通信的振兴年代。从器件到设备、从制式到系统、从传输线路到通信网络、从极低频到极高频、从语言文字到音乐、图像，从科学理论到工程实践无不是在更新变革之中，所有这些发明创造都倾注着广大通信科技工作者的辛勤劳动和聪明才智，为今后通信学科的健康成长奠定了坚实的基础。

第二节 通信系统

前面提到的任何一种通信业务要实现它的功能就必然要构成一个完整的系统。通信系统与其它系统一样具有系统的目标、边界、结构、变量以及评价指标体系等，这里仅作概要性介绍。

一、通信系统的性能指标

从本质上讲，通信的目的就是为了传递信息和交换信息。由于信息的形式不同，反映通信业务亦各异，例如电话是交流语音信息，电报则是传递文字信息，图像信息可用传真或电视来传送，而反映不同内容的数据信息可用数据通信或计算机通信来交换。为了使得被传递或交换的信息准确可靠，因此对通信系统要提出可靠性方面的要求，这是一个方面。同时，为了使传递或交换信息的功能及时有效，又要对通信系统提出有效性方面的要求。这两方面的要求往往是矛盾的，但作为通信系统的目标要做到全面兼顾，进行优化，获得整体最佳的功能。

能。因此通信系统的目标可以概括为及时准确地完成传递和交换信息的任务，相应的评价指标为通信的有效性和通信的可靠性。

所谓通信的有效性是指在给定的信道内能够容纳多少信息量，显然它应该越多越好。属于模拟通信系统的有效性指标通常可用有效传输频带来衡量，例如话音信号的频带是从300 Hz到3kHz，电视信号频带则几乎从零到4.5MHz（各国电视制式不同，频带范围略有差异），因此一路电视信道可以容纳上千个话路，它说明传输电视信号要比传输话音信号的有效性低很多，但是这里没有考虑电视信号所包含的信息量与话音信号中的信息量有什么不同，所以上述的比较方法是不科学的。尽管如此，目前还是常用话路数目来代替通信的有效性指标，它是指在给定信道的允许传输频带宽度后被一路话音信号的有效带宽来除，因此可以得到该信道最大允许容纳的话路数目。例如在小同轴电缆信道内可以传输300个话路，在大同轴电缆信道内则可以传输10,000路以上，在微波或卫星信道内可以容纳的话路数更多，就说明它们的通信有效性很高。如果是传输电视信号，则也可以采取类似的方法，用最大允许传输电视信号的路数来衡量。如果一个通信系统内既传输话音信号，又传输电视信号，则该通信系统的有效性可以分别用话路数和电视通路数来表示，它们的数量越多，说明通信系统的通信容量越大，通信有效性就越高。

但是在数字通信系统内衡量通信有效性的指标不用有效传输频带或话路数目，而是统一采用信息传输速率（或简称传信率），单位为每秒多少比特（bit/s），这里比特（bit）是一种计算信息量的基本单位。有时也可用每秒多少波特（Baud）来衡量传信率，这里波特是计算多进制数字信息的单位，它与计算二进制数字信息的单位（即比特）有固定的转换关系。由此可见，在数字通信系统内不管什么通信业务均可统一用数字信息的传输速率来衡量通信的有效性，显然要比模拟通信系统的有效性指标更为科学和合理。传信率越高的通信系统说明通信有效性越好，例如在一个话音信道内通常只传送9600bit/s数字信息，但在光纤通信或卫星通信信道内可以传送 10^{10} bit/s数字信息，可见它们的通信容量是巨大的。

现在再来介绍通信系统的可靠性指标，它是指在给定的信道内接收到信息的可靠程度，对于模拟通信系统和数字通信系统来说通信可靠性的衡量方法也是不同的。属于模拟通信系统的可靠性指标通常用输出信噪比来衡量，它是代表在通信系统输出端信号平均功率与噪声平均功率之比，是反映通信质量好坏的明显指标。例如商用电话通信的输出信噪比要求保持在40dB（分贝）以上，此时话音清晰度可以达到95%，对一般的公务电话则可以降低到30dB以下；又如电视机的输出信噪比要求在60dB以上，人们才能看清画面的细节（当然还与显像管的分辨率有关），这说明视觉效果要比听觉更敏锐。有时也可用输出信号波形失真度来衡量通信系统的可靠性，但实际上模拟信号的波形失真对传输信息的可靠性影响并不大，故目前已很少采用。

在数字通信系统内通信可靠性指标通常是用误码率来衡量，它反映接收到信息发生错误的比例，其中包括漏报错误和虚报错误在内。误码率的定义是错误比特数与总比特数之比，它越小就说明通信可靠性越高。例如在有线信道内通常要求误码率小于 10^{-5} ，但对于无线信道就不能做到这样高的指标，因为它的传输性能不大理想，误码率只能达到 10^{-3} 左右。显然，通信系统的误码率与输出信噪比有密切关系，因此无论是模拟通信还是数字通信均要求传输信道的特性良好，噪声尽量少，以提高通信系统的可靠性。

前面已经提到在一个通信系统内通信的有效性和可靠性往往难以兼顾，实际上总是满足一个主要指标而降低另一个比较次要的指标，这就是通信系统设计师的任务，目前通常采用

各种先进的编码和调制技术来解决这对矛盾。

二、通信系统的组成

一般地讲，通信系统的组成可以包括发送端、传输信道和接收端三大部分，如图 1-1 所示。

由图 1-1 可见，发送端的主要功能是发射信号，它要将原始的信息转换成相应的信号，然后进行调制、放大、变频、滤波等一系列加工处理，使发射的信号在频率和功率上能够适用于信道内传输。接收端的功能正好完成与发送端相反的变换，它也要经过滤波、放大、变频、解调等一系列加工处理，将原来传送的信息准确无误地恢复出来。但由于接收到的信号已经通过传输信道，不可避免地带来了信号失真和各种噪声干扰，因此在接收端的信号变换和处理是比较复杂的。

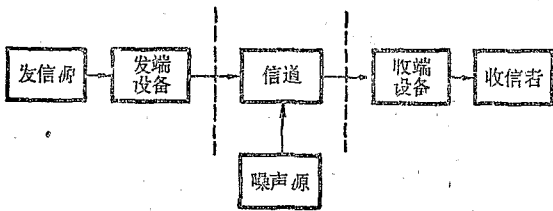


图 1-1 通信系统的组成

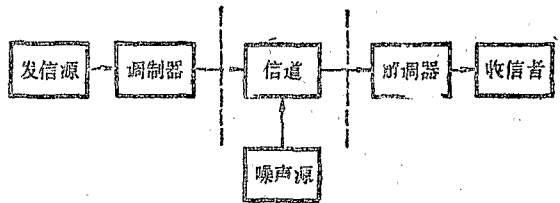


图 1-2 模拟通信系统的组成

信道是组成通信系统不可分割的一部分，按照狭义的解释，它就是传输信号的媒介，即传输线路，例如有线信道包括明线、电缆、光导纤维等，无线信道则包括天线、馈线、自由空间及电离层等。但目前都是采用广义的信道，它包括发送端除调制器以前和接收端除解调器以后的全部传输过程，由于所传输的是已调制信号，故可称为调制信道，它是组成模拟通信系统的基础，如图 1-2 所示。

由图 1-2 可见，在模拟通信系统中调制的功能非常重要，因为由信源发出的信号通常不能直接在信道内传输，它必须通过调制以后才能与信道的传输特性相匹配。因此调制器的功能就是将原始的基带信号变换成适合在不同信道内传输的已调波信号，同时可实现多路复用。选择不同的调制方式往往能决定整个通信系统的性能，特别是在兼顾通信的有效性和可靠性方面它起到核心作用。

在数字通信系统中除了调制的功能外还有编码的功能也很重要，它应包括信源编码和信道编码两者在内。信源编码的功能是将原来不适合在数字通信系统内传输的信号变换为有效的数字信号，或者它还可以完成特定的任务。例如将语音信号数字化，数据加密，数据压缩等都是信源编码的内容。另外，信道编码也很重要，它是用来实现数字信号的差错控制功能。如果说信源编码主要是删除原始信号中的冗余量，那末信道编码却是增加数码来提高数字信号的抗干扰能力，可见它们的功能是完全不同的。

为了突出编码在数字通信系统中的作用，我们也可以将发送端除编码器以前和接收端除译码器以后的全部传输过程统称为编码信道，其中主要传输编码后的信号，因此编码信道成为组成数字通信系统的基础，如图 1-3 所示。

在图 1-2 和图 1-3 内都有一个噪声源加在信道上，这意味着信道内传输的信号始终伴随着噪声。产生噪声的来源很多，而且分布在不同的部位，例如在各种电子器件内都有噪声存在，在导线内也会产生热噪声，至于在空间或电离层的噪声就更多了，它们都可以包括

在信道噪声之内。按性质来区分，信道噪声又可分为起伏噪声和脉冲噪声两大类，后者包括工业干扰，电磁干扰等，它们都具有随机性质。由此可见，在信道内噪声是不可避免的，它往往叠加在传输信号上面，我们接收到的就是被信道噪声所污染的信号，这给接收端的信号加工处理过程增加了难度。

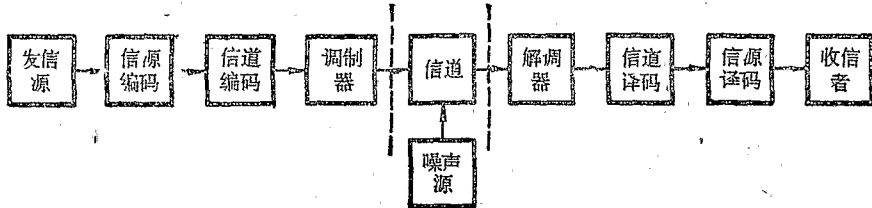


图 1-3 数字通信系统的组成

第三节 通信使用的频段

前面已经阐明了近代通信的内容非常丰富，使用的领域也极为广泛，它们的实现基础都是依靠不同频率的电流（或电磁波）的传输。根据传输媒介不同可以分为两大类，即依靠导线（包括架空明线和电缆）来传输信号的称为有线通信；依靠自由空间来传播电磁波的则称为无线通信。既然它们都是利用不同频率的电流（电磁波）来达到通信的目的，这里就存在着一个如何合理地选择工作频段的问题，使得通信的有效性和可靠性都能满足要求。

在选择使用频段时应该考虑各个方面的因素，例如在有线通信中应该考虑通信线路的传输特性，它的最低和最高截止频率，衰耗频率特性，相移频率特性，线路参数的稳定性等；在无线通信中应该考虑各种不同波长的传播特点，以及天线尺寸的合理使用问题。这里先对空间电磁波的传播特点作些简要介绍。

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；三是依靠距离地面一百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，因此在地面将会产生感应电流。由于地面并非良导体，故在传播过程中就会带来能量损耗。并且频率越高，由于地面的趋肤效应越显著，带来的损耗就越大。因此，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。

天波的传播特点与地面波完全不同，它是利用电离层的反射作用，因此传播距离要比地面波远，并且它与天线入射角有关。所谓入射角是指入射波与地面垂线的夹角，入射角越大，传播距离就越远。另外，天波在传播过程中也会带来能量损耗，其损耗大小与电离层的电离程度有关。显然，电离层的电离程度越大，它对电磁波的吸收能力就越强，故损耗也就越大。由于电离层的电离程度与太阳的辐射强度有关，因此它的变化是很大的。例如，白天和夏天就要比夜间和冬天的电离程度大，因此损耗也大。在无线通信中将这种现象称为衰落，它是天波传播的一个特点，也是一个缺点，因此它使收到的信号电平处于强弱变化的不稳定状态之中。虽然，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，电离层就难于产生反射作用，它将穿透电离层，不再返回地面，因此频率太高，波长太短的电磁

波也是不能利用天波传播的，在这种情况下应该使用空间波。

空间波的传播象光波一样也是直线传播的。依靠电磁波的绕射作用，它能越过某些障碍物。但是，由于地表面是弯曲的，因此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，并依靠提高天线高度来增长传播距离。另外，由于空间波是在大气层中传播，因此大气层的变化（尤其是雨、雪等自然现象）对它的传播特性影响很大。

综合上述，频率较低的电磁波宜于采用地面波传播，发射这类电磁波的天线尺寸自然比较大，传播距离也不能太远*。频率较高的电磁波宜于采用天波传播，它的传播距离最远。但由于它存在衰落现象，因此通信质量不够稳定。另外，在地面波已经损耗殆尽，而天波尚没有返回地面的地带通常称为寂静区。在寂静区内收不到任何信号，会影响通信的可靠性。因此，在选择工作频率和设计天线入射角时应该考虑到。频率更高的电磁波宜于采用空间波传播。它只能在视距范围内进行通信，但可以采用中继接力的方法延长通信距离。另外也适合于移动通信。

为了比较全面地对通信中所使用的频段有所了解，下面列表 1—1 作为参考。但根据具体情况和科学技术的不断发展也可以灵活运用。表中对频率和波长的转换关系可应用熟知的公式

$$\lambda = v / f \quad (1-1)$$

式中 λ ——波长；

f ——频率；

v ——在自由空间中电磁波的传播速度，它接近于光速 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 。

通信使用的频段

表 1—1

频段	符号	名称	波长	主要用途
30~300Hz	ELF	特低频	$10^4 \sim 10^3 \text{km}$	海底通信，电报
0.3~3kHz	VF	音频	$10^3 \sim 10^2 \text{km}$	数据终端，实线电话
3~30kHz	VLF	甚低频	$10^2 \sim 10 \text{km}$	导航，电报电话，频率标准
30~300kHz	LF	低频	$10 \sim 1 \text{km}$	导航，电力通信
0.3~3MHz	MF	中一频	$10^3 \sim 10^2 \text{m}$	广播，业余无线电通信，移动通信
3~30MHz	HF	高频	$10^2 \sim 10 \text{m}$	国际定点通信，军用通信，广播
30~300 MHz	VHF	甚高频	$10 \sim 1 \text{m}$	电视，调频广播，移动通信
0.3~3kMHz	UHF	超高频	$10^2 \sim 10 \text{cm}$	电视，雷达，遥控遥测
3~30kMHz	SHF	极高频	$10 \sim 1 \text{cm}$	卫星和空间通信，微波接力
30~300 KMHz	EHF	特高频	$10 \sim 1 \text{mm}$	射电天文，科学研究

这里简要作些说明。民用广播占两个频段，即MF和HF频段，它们都是采用调幅制。如果是采用调频广播，因为它的频带宽，故占用VHF频段。电视也是占用两个频段，即VHF和UHF频段，目前VHF有12个频道，UHF可有70个频道，伴音都采用调频。长距离无线通信（尤其是国际定点通信）过去占用HF频段，但它的通信质量不高，近代都改用微波接力或卫星通信，因此它们占用SHF频段。移动通信过去采用调幅制，占用MF频段，近代改为调频制，占用VHF频段，它要求的通信距离不长。海底通信使用的频率最低(ELF频段)，它是利用电磁波在水中传播的有利条件，虽然频率低，也能远距离传输。

在有线通信方面，直流电报的使用频段最低，其次是实线电话。它们都不经过任何调

* 如果沿海面传播，由于海水的导电率较好，它也可能传播较远。

制，因此属于基带信号传输。在开展数据传输业务的情况下，可以利用一个话音频带来传送300~9600Bd的数据信号。当采用频分制多路复用时随着载波机复用能力的提高，它所输出的复用信号频谱范围可以从VLF扩展到VHF频段。近代采用时分制脉冲编码多路复用系统，它的信号频谱甚至扩展到UHF频段。

由于甚低频（VLF）信号的频率稳定度很高，适合于作导航或频率标准用。雷达需要方向性好，可采用UHF频段。在这个频段内容易做到方向性好而且尺寸合适的天线。光通信所用的频段已经超出EHF频段的范围。

最后还要指出，表1-1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在国际上有专门的组织，即国际电信联盟（ITU）来完成；在国内也有相应的部门，即国家无线电管理委员会，它们来协调各种用途的频率分配。

第四节 通信发展方向

回顾历史，展望未来。通信既是一项传统技术，又是一门新兴学科，面临着信息时代的到来，通信领域正在逐步更新和开拓，需要研究解决的新课题不断提出，这里列举一些发展趋势，供广大读者参考。

（一）面临着信息社会的到来，各种通信业务越来越繁忙，通信需求量越来越大，因此提供超大容量的通信系统已经势在必行。目前已经进入实用化的卫星通信和光纤通信是比较理想的大容量通信系统，其中卫星通信具有覆盖区域宽广、通信能力可以按需分配、建设周期短、投资回收快等优点，因此更容易在近期内推广应用。但光纤通信的容量更大、抗干扰性能更好、传输损耗小、工作稳定可靠，它在组织长距离、大容量通信系统中已经成为骨干。

（二）以数字通信为基础的综合业务数字网是电信网的发展方向，它可以组织各种通信业务的信息流，并通过以专用计算机为核心的程控交换技术进行信息交换，这在数据通信和计算机通信日益繁忙的情况下更为迫切。

（三）通信业务进一步多样化以适应现代化社会的要求。除了语言、文字、数据等通信业务外最活跃的是图像通信，它包括静止的和活动的图像传输。最近新推出的一系列新的通信业务，例如电子邮函、可视数据电话、电子新闻、电子储蓄以及信用卡业务等，它们的通信功能已经将数据和图像传输结合起来，推向国民经济的各个部门。

（四）开拓新的频率资源是长期的任务。由于通信业务名目繁多，适合于它们传输的频段需要不断开发。同时由于通信能力不断扩大，原有的频段已经拥挤不堪，急需寻求新的频率资源。为了有效地管理频率资源的开发和使用，国际电信联盟（ITU）下设国际无线电咨询委员会（CCIR）负责无线电通信业务，和国际电报电话咨询委员会（CCITT）专门研究电报和电话业务，其中包括频率的分配和使用等。各国都设有无线电管理委员会，对空中各类电波进行协调和管制，以免相互干扰。

（五）通信专用的大规模集成电路芯片将不断问世。目前生产和销售的大规模集成电路主要用于计算机的存储和运算功能，通信专用的芯片必须依靠电路设计师和工艺专家密切配合开发才能完成。随着生产批量和成本下降，完成不同功能的通信用大规模集成电路将会不断涌现。

（六）通信系统优化是通信工程师长期以来追求的目标，它要求通信工作者和系统工程

师密切结合。目前已在局部优化方面取得了不少可喜的成果，例如将编码与调制功能的一体化考虑，设计自适应均衡与回波抵耗的联合估计等均已收到良好效果。在组织电信网方面的工作也有很多，要达到整个网络优化的目标。

(七) 新的通信理论还将不断推进，通信学科的研究工作将不断深入。目前的通信理论基本上还属于仙农信息论的范畴，信息传输速率尚未达到理论上界。但随着信息科学的研究和应用，信息的定义将有所突破，仙农信息论的基础也会受到影响，这就预示着通信理论将会有重大创新。目前在信号处理、电路系统、传输理论等方面均有不少创见，例如非线性理论、自适应技术、多维信号处理、最佳滤波理论等研究成果对提高通信质量都会起到重要作用。

(八) 通信与雷达、声纳、生物医学工程、空间技术、以及社会、经济等相关学科领域的渗透与结合将会形成新的交叉学科，同时也推动通信学科本身的发展。

以上仅仅列举了某些通信学科的发展趋向，随着时代的前进，新的课题还会不断地提到通信科技工作者面前，需要我们共同来研究解决。