





通信原理与数据通信



陈岩 乔继红 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书以现代通信系统为背景,在简要介绍模拟通信原理的基础上,以数字通信原理为重点;全面、系统地介绍了通信系统的组成、工作原理、性能分析和性能指标及数据通信技术的基本内容。

全书共12章,内容包括通信系统的基本概念、信息论初步、模拟调制、信源编码、数字基带传输、数字调制和差错控制编码、数据通信技术与通信网等。

本书内容丰富、概念清楚、取材新颖。书中列举了许多例题,并附有习题及部分习题答案。

本书可作通信行业的有关工程技术人员的参考书,也可作为普通高等学校工科电子类专业高年级本科生教学用书或作为自学教材。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理与数据通信/陈岩,乔继红编. —北京:
机械工业出版社, 2006. 10
ISBN 7-111-19954-5

I. 通... II. ①陈... ②乔... III. ①通信理论②数
据通信 IV. ①TN911②TN919 .

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第113699号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
责任编辑:王 玫 版式设计:霍永明 责任校对:刘志文
封面设计:马精明 责任印制:李 妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2007年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·21.25印张·524千字
0001—4000册
定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来,通信理论和技术的发展十分迅猛,随着数字通信技术和计算机技术的快速发展以及通信网与计算机网络的相互融合,庞大的现代通信网已经成为国家的重要基础设施之一,信息科学技术已成为21世纪国际社会的新的强大推动力,学习和掌握现代通信理论和技术不再仅限于通信工作者,而成为信息社会每一位成员的迫切需求。

目前有关通信原理的教材大都是针对通信专业的,对于非通信专业的学习者来说,有关通信的基础知识的介绍过少,数学内容过多、过深。面对这种情况,我们编写了这本内容精练、重点突出、面向通信行业的有关工程技术人员的参考书及非通信专业的大学本科通信原理教材,本书的重点在于培养学习者对通信技术的整体把握和相关知识的学习与了解。

本书以现代通信技术和现代通信系统为背景,全面、系统地论述了通信的基本理论和基本技术,大量地压缩了模拟通信的内容,着重介绍了数字通信的基本知识及数据通信技术,尽可能多地反映通信领域的新技术和新发展。

本书共分12章:第1章主要介绍通信的基本概念、通信系统模型、通信系统的性能指标;信息的基本概念;信道的性能与信道容量的概念;信号与噪声的分析。第2章主要介绍各种模拟通信系统的调制、解调方法,及各种模拟系统的抗噪声性能。第3章详细讨论了模拟信号的抽样、量化和编码方法。第4章主要介绍数字基带传输系统,概述了数字基带信号、数字基带传输系统、无码间干扰传输条件;分析了数字基带传输系统的抗噪声性能;介绍了眼图、时域均衡和部分响应技术。第5章主要介绍数字通信的频带传输、最佳接收、现代数字调制技术以及上述各种传输系统的性能分析。第6章着重分析了载波同步、位同步、帧同步、网同步的概念与实现方法。第7章介绍了差错控制编码的原理及线性分组码、循环码、卷积码等差错控制编码的实现方法。第8章~第12章主要介绍数据通信技术的基本概念,内容包括数据交换、数据链路控制、通信设备及数据通信网等。

本书由陈岩编写第1章~第7章的内容,乔继红编写第8章~第12章的内容。全书由陈岩统编定稿,北京理工大学的罗伟雄教授主审。

在本书的编写过程中,得到了北京工商大学各级领导的支持和帮助。在此表示衷心的感谢。

限于作者的水平,书中错误疏漏在所难免,恳请读者批评指正。

对本书引用的参考文献的各位译、作者,在此表示衷心的感谢和崇高的敬意。

编著者

2006年于北京工商大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 通信与通信系统	1
1.1.1 通信的基本概念	1
1.1.2 通信系统的组成及其分类	1
1.2 信息及其度量	3
1.3 信道	5
1.3.1 信道的定义与分类	5
1.3.2 信道的特性	6
1.3.3 信道的容量	9
1.4 信号与噪声	11
1.4.1 信号的定义与分类	11
1.4.2 确知信号的分析	12
1.4.3 随机信号的分析	14
1.4.4 噪声的定义与分类	23
1.5 通信系统的主要性能指标	26
1.5.1 模拟通信系统的性能指标	26
1.5.2 数字通信系统的性能指标	27
习题	27
第 2 章 模拟调制	29
2.1 调制的概念	29
2.2 调幅系统	30
2.2.1 标准调幅	30
2.2.2 抑制载波双边带调制	32
2.2.3 单边带调制	34
2.2.4 残留边带调制	36
2.2.5 幅度调制的抗噪声性能	38
2.3 非线性调制系统	44
2.3.1 角度调制的基本概念	44
2.3.2 窄带角度调制	47
2.3.3 宽带角度调制	50
2.3.4 非线性调制的抗噪声性能	54
习题	57
第 3 章 模拟信号的数字化	60
3.1 模拟信号的抽样	60
3.1.1 抽样定理	60
3.1.2 实际抽样	63
3.2 抽样信号的量化	67
3.2.1 均匀量化	68
3.2.2 非均匀量化	70
3.3 PCM 编码原理	75
3.3.1 脉冲编码调制原理	75
3.3.2 PCM 系统的抗噪声性能	81
3.3.3 PCM 编码器芯片	83
3.4 自适应差分脉冲编码调制	84
3.4.1 差分脉冲编码	84
3.4.2 自适应差分脉冲编码	85
3.5 增量调制	86
3.5.1 简单增量调制	86
3.5.2 简单增量调制的过载特性	88
3.5.3 增量调制的抗噪声性能	89
3.5.4 改进型的增量调制	91
3.6 语音和图像的压缩编码	92
3.6.1 语音压缩编码	92
3.6.2 图像压缩编码	95
习题	97
第 4 章 数字信号的基带传输	100
4.1 数字基带信号的常用码型	101
4.1.1 数字基带信号码型的设计原则	101
4.1.2 二元气码	101
4.1.3 三元码	103
4.2 数字基带信号的频域特性	104
4.2.1 数字随机序列功率密度的一般分析	105
4.2.2 几种常用随机序列的功率谱密度	108
4.3 数字基带信号的传输	110
4.3.1 基带信号的传输过程	110

4.3.2	无码间串扰的基带传输特性	112	6.1.1	直接提取载波法	194
4.3.3	部分响应系统	116	6.1.2	插入导频法	196
4.4	无码间串扰基带系统的抗噪声性能	121	6.1.3	载波同步系统的性能	198
4.5	眼图与均衡	124	6.2	位同步	199
4.5.1	眼图	124	6.2.1	插入导频法	200
4.5.2	均衡	126	6.2.2	直接法	201
习题		131	6.2.3	位同步系统的性能	204
第5章	数字信号的载波传输	134	6.3	群同步	206
5.1	二进制数字调制	134	6.3.1	起止式同步法	206
5.1.1	二进制振幅键控	134	6.3.2	连贯式插入法	207
5.1.2	二进制频移键控	137	6.3.3	间隔式插入法	208
5.1.3	二进制相移键控	141	6.3.4	帧同步系统的性能	209
5.1.4	二进制差分相位键控	143	6.4	网同步	210
5.2	数字信号的最佳接收	146	6.4.1	全网同步系统	211
5.2.1	最佳接收概念及最佳接收准则	146	6.4.2	准同步系统	212
5.2.2	匹配滤波器	150	习题		214
5.2.3	二进制确知信号最佳接收机的设计	154	第7章	差错控制编码	216
5.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能	156	7.1	纠错编码的基本概念	216
5.3.1	二进制振幅键控系统的抗噪声性能	157	7.1.1	有扰离散信道编码定理	216
5.3.2	二进制移频键控系统的抗噪声性能	163	7.1.2	检错和纠错编码的基本原理	217
5.3.3	2PSK和2DPSK系统的抗噪声性能	167	7.1.3	码距、编码效率和编码增益	218
5.3.4	二进制最佳接收机的误bit率	171	7.1.4	差错控制方式	219
5.3.5	二进制数字调制系统的性能比较	175	7.1.5	纠错码分类	221
5.4	多进制数字调制系统	176	7.2	几种常用的检错码	221
5.4.1	多进制数字振幅调制系统	177	7.2.1	奇偶监督码	221
5.4.2	多进制数字频率调制系统	179	7.2.2	行列监督码	222
5.4.3	多进制数字相位调制系统	180	7.2.3	恒比码	222
5.5	改进的数字调制方式	186	7.2.4	正反码	222
5.5.1	正交幅度调制	186	7.3	线性分组码	223
5.5.2	偏移四相相移键控	187	7.3.1	基本概念	223
5.5.3	最小频移键控	188	7.3.2	线性分组码编码	224
习题		191	7.3.3	汉明码	230
第6章	同步原理	194	7.4	循环码	232
6.1	载波同步	194	7.4.1	循环码的基本原理	232
			7.4.2	生成矩阵和生成多项式	233
			7.4.3	循环码的编码和译码	235
			7.5	卷积码	238
			7.5.1	卷积码的编码原理	238
			7.5.2	卷积码的解析描述	240

7.5.3 卷积码的图解描述	242	第 10 章 数据链路控制	275
7.5.4 卷积码的译码	244	10.1 数据链路的功能	275
习题	247	10.1.1 线路控制	275
第 8 章 数据通信概述	249	10.1.2 流量控制	276
8.1 数据通信的概念	249	10.1.3 差错控制	277
8.2 数据通信系统的组成	249	10.2 基本型传输控制规程	279
8.3 数据通信系统的性能指标	250	10.2.1 数据帧	280
8.4 数据通信网	250	10.2.2 控制帧	281
8.4.1 数据通信网介绍	250	10.3 高级数据链路控制规程	282
8.4.2 数据通信网的拓朴结构	252	10.3.1 HDLC 的帧结构	283
8.5 网络协议与协议体系结构	253	10.3.2 控制字段	284
8.5.1 协议的概念与协议体系结构	253	10.3.3 HDLC 操作	288
8.5.2 OSI 参考模型	253	习题	290
8.5.3 OSI 结构的数据传输过程	255	第 11 章 数据通信设备与通信接口	291
习题	256	11.1 通信终端设备	291
第 9 章 数据交换	257	11.1.1 通信终端设备的功能和组成	291
9.1 概述	257	11.1.2 常用的通信终端类型	291
9.1.1 数据交换的必要性	257	11.2 数字终端设备	291
9.1.2 利用公用电话网进行数据交换	257	11.3 V.24/EIA-232 接口	294
9.1.3 利用公用数据交换网进行 数据交换	258	11.3.1 机械特性	294
9.2 电路交换	258	11.3.2 电气特性	294
9.2.1 空分交换	258	11.3.3 功能特性	295
9.2.2 时分交换	258	11.3.4 规程特性	296
9.2.3 电路交换的特点	259	11.3.5 实例	297
9.3 报文交换	259	11.3.6 空调制解调器	298
9.4 分组交换	260	11.4 复用器和集中器	299
9.4.1 分组交换的原理	260	11.5 协议转换器	299
9.4.2 分组交换的特点	263	11.6 网络连接设备	300
9.4.3 分组的传输	263	11.6.1 网内连接设备	300
9.5 三种交换方式的比较	265	11.6.2 网间连接设备	301
9.6 帧中继	266	习题	302
9.6.1 帧中继的协议	267	第 12 章 数据通信网	303
9.6.2 帧中继的交换操作	269	12.1 数字数据网	303
9.6.3 帧中继的拥塞控制	270	12.1.1 什么是数字数据网	303
9.7 异步传输模式	270	12.1.2 DDN 的结构组成	303
9.7.1 ATM 的信元结构	271	12.1.3 DDN 的业务功能	305
9.7.2 ATM 交换	272	12.1.4 DDN 的应用	306
习题	274	12.2 X.25 建议	306
		12.2.1 X.25 建议的层次	307

12.2.2	X.25 建议的物理层	308	12.4.2	帧中继网的用户接入	319
12.2.3	X.25 建议的数据链路层	308	习题	321
12.2.4	X.25 的分组层	309	附录	322
12.3	分组交换数据网	314	附录 A	常用三角函数	322
12.3.1	分组交换数据网的构成	314	附录 B	常用傅里叶变换	323
12.3.2	分组交换网的路由选择	315	附录 C	Q 函数、误差函数、互补 误差函数	324
12.3.3	拥塞控制	316	部分习题答案	325
12.3.4	网间互联	317	参考文献	331
12.4	帧中继网	318			
12.4.1	帧中继网的组成	318			

第 1 章 绪 论

1.1 通信与通信系统

1.1.1 通信的基本概念

何谓通信？通信就是信息的传递与交流。古代的烽火报警，现代的书信、电报、电话、传真、电子信箱、可视图文等，都是人们用来实现信息传递的方式。从信息传递的形式上分，通信方式主要有两类：一类称之为运动通信，如借助于火车、飞机完成的邮政业务；另一类称之为电通信，即利用电信号为载体传递信息。

电通信的历史并不长，距今大约有 160 年的时间。电通信的标志是 1838 年有线电报的发明与使用，最初的电通信距离只有 70km。1876 年有线电话的发明被视为现代电通信的开端。1896 年实现的无线电报，开创了无线电通信发展的道路。1906 年电子管的发明则迅速提高了无线通信及有线通信的水平。

伴随着通信技术的发展，通信科学先后形成了脉冲编码原理、信息论、通信统计理论等重要理论体系。20 世纪 50 年代以后，晶体管和集成电路的问世，使通信获得了高速发展。在通信种类上，相继出现了微波通信、卫星通信、光纤通信、计算机通信等。计算机和通信技术的密切结合，使通信的对象得到了扩展，实现了人与机器或机器与机器之间的通信。

随着计算机技术和计算机网络技术的飞速发展，数据通信也进入了人们的生活。网络通信极大地拓宽了通信技术的应用领域，使通信渗入到人们物质与精神生活的各个角落，有关通信方面的知识与技术也成为当代人需要了解和掌握的热门知识之一。

现代通信所研究的主要问题是把大量信息准确地、有效地、经济地、安全地从信源通过传输介质传送到信宿。“通信原理”就是介绍支撑各种通信技术的通信基本概念和数学理论基础。

1.1.2 通信系统的组成及其分类

通信是从一地向另一地传递和交换信息。实现信息传递所需的一切技术、设备和传输媒体的总和称为通信系统。基于点到点之间的通信系统模型如图 1-1 所示。

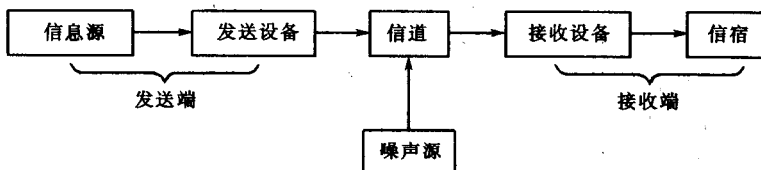


图 1-1 通信系统的一般模型

信息源是消息的产生来源，它的作用是把各种消息转换成原始电信号，称之为消息信号或基带信号。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。模拟信源消息的状态是连续变化的；离散信源消息的状态是离散的，如图 1-2 所示。模拟信源可以通过抽样、量化变换为离散信源。

发送设备的作用是将信息源产生的消息信号转换成适合在信道中传输的信号，使信息源与信道匹配起来。它所要完成的功能主要包括调制、放大、滤波、发射等。在数字通信系统中还要包括编码和加密。由发信源发出的基带信号的特点是频谱从零频附近开始延伸到几兆赫的有限值。基带信号可以直接在信道中传输，称其为基带传输。基带传输系统是最简单的通信系统，但应用场合有限，并且对信道的利用率不高。通常，大多数通信系统需要通过调制将基带信号变换为更适合在信道中传输的形式，即频带传输。调制过程可以将信号频谱搬移到任何需要的频率范围内。通过调制还可以实现信道的多路复用和提高系统的抗干扰能力。

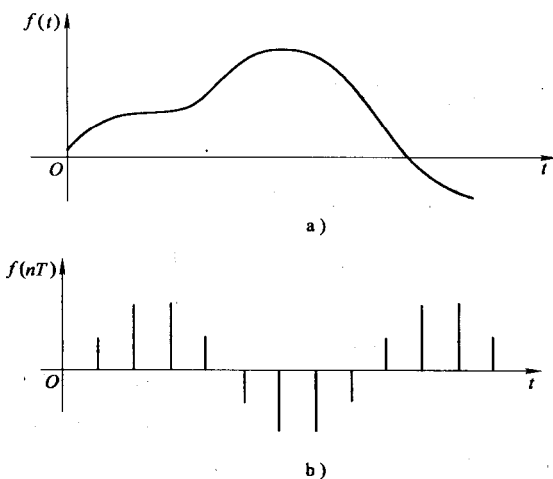


图 1-2 信息源的波形
a) 模拟信源 b) 离散信源

信道是指传输信号的物理媒质。在无线信道中，信道可以是大气(自由空间)，在有线信道中，信道可以是明线、电缆或光纤。有线和无线信道均有多种物理媒质。根据研究对象的不同，需要对实际的物理媒质建立不同的数学模型，以反映传输媒质对信号的影响。信道的传输性能直接影响到通信的质量。

在通信过程中，通信系统会受到系统内外各种噪声和干扰的影响。噪声的来源多种多样，可分为内部噪声和外部噪声，内部噪声是通信系统中各种设备以及信道中所固有的；外部噪声通常是从信道引入的。为了分析方便，图 1-1 中的噪声源是将各种噪声和干扰集中在一起由信道引入。

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换。它的任务是对带有干扰的接收信号进行一系列处理，以便正确恢复出相应的原始基带信号来。对于多路复用信号，还包括解除多路复用，实现正确分路。

信宿是传输信息的归宿点，其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。

图 1-1 所示的模型是各种通信系统的简化概括，反映的是通信系统的共性。根据研究对象的不同，会有不同形式的具体的通信系统模型。模拟通信系统的模型如图 1-3 所示。模拟通信是指通信系统内所传输的信号是模拟信号。在模拟通信系统中的调制、解调过程起着非常重要的作用，是保证通信质量的关键。因此将模拟通信系统中的发送设备简化为调制器，接收设备简化为解调器，而将放大、滤波、变频等其他过程合并到信道中去。

模拟通信系统信道传输的是模拟信号，其占用频带一般都比较窄，比如语音信号频谱范围是 300 ~ 3400Hz，图像信号的频谱范围是 0 ~ 6MHz。

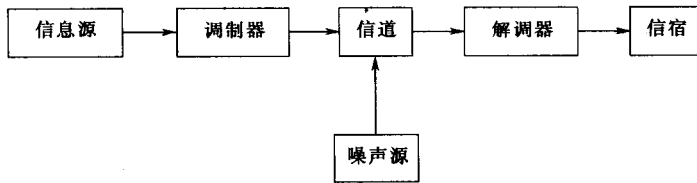


图 1-3 模拟通信系统模型

模拟通信频带利用率较高，缺点是抗干扰能力差，不易保密，设备不易大规模集成，不能适应飞速发展的数据通信的要求。

数字通信系统的模型如图 1-4 所示。数字通信系统传输的是数字信号。由图中可以看到，数字通信系统在调制之前先要进行信源编码和信道编码。相应地，接收端在解调之后要进行信道译码和信源译码。

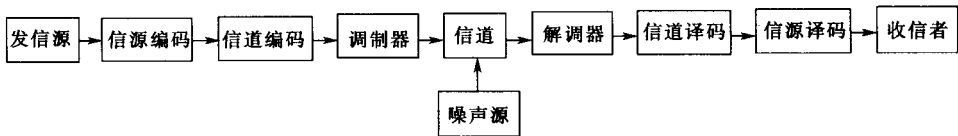


图 1-4 数字通信系统模型

信源编码的作用之一是设法减少码元数目和降低码元速率，即通常所说的数据压缩；信源编码作用之二是当信息源给出的是模拟信号时，信源编码器将其转换成数字信号，以实现模拟信号的数字化传输。模拟信号数字化传输常用的两种方式是脉冲编码调制（PCM）和增量调制（ ΔM ）。接收端信源译码是信源编码的逆过程。

信道编码的任务是提高数字信号传输的可靠性。为了减少差错，信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分（监督元），组成所谓“抗干扰编码”。在需要实现保密通信的场合，为了保证所传信息的安全，人为将被传输的数字序列扰乱，这种处理过程叫加密。接收端的信道译码是其相反的过程。

实际的通信系统不是必须包含图中所示的所有环节，比如基带传输系统就不包括调制与解调环节。具体采用哪些环节取决于设计要求和实际条件。此外，在数字通信系统中的同步系统也是一个非常重要的环节。同步是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的不可缺少的前提条件。同步的方式有很多种，主要包括载波同步、位同步、帧同步（群同步）、网同步等。采取的同步方式不同，同步系统在整个通信系统中的位置也不同，所以图中没有标出。

1.2 信息及其度量

在通信系统中，传输的具体对象是消息，但通信的最终目的在于传递信息。所以，在研究通信系统之前有必要首先明确信息的含义。

在日常生活当中，人们通常把文字、语言、数据、图像等等都看成是“消息”，因此可以说消息是通信系统的传输对象，它是事物状态描述的一种具体形式。信息的含义与消息很相似，但它比消息更广泛、更抽象。信息可以被理解为消息中包含的有意义的內容。消息可

以是各种各样的，但其中有意义的内容的含量可统一用信息量去描述。换句话说，当人们得到消息之前，对它的内容有一种“不确定性”，信息就是对这种不确定性的定量描述。当一些消息的集合具有一定的统计特性或概率特性时，“信息”就是对消息的统计特性的一种定量描述。

当人们得到消息之后，如果事前认为消息中所描述的事件发生的可能性越小，会认为这个消息带给他的信息量越大。所以，消息中所含信息量的多少必然与消息所代表的事件的随机性或者事件发生的概率有关。如果消息所描述的事件发生是必然的，其发生概率就是 1，那么这个消息的信息量将等于 0。如果事件的发生是不可能的，其发生的概率就是 0，则消息将含有无限的信息量。消息所描述事件发生的概率越小，该事件含有的信息量就越大。如果接收到的消息是由若干个独立事件构成的，那么该消息所包含的信息量应该是这些独立事件的信息量的总和。

在信息论中，把消息 x 所含的信息量 I 用消息所代表的事件出现的概率 $P(x)$ 来表示，定义为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-1)$$

式中，若对数底 $a=2$ 时，信息量的单位为 bit；若 $a=e$ 时，信息量的单位为奈特(nat)；若 $a=10$ 时，信息量的单位为哈特莱(harleyt)。

上述三种信息度量单位中应用最为广泛的单位是 bit。它代表出现概率为 $1/2$ 的事件所含有的信息量。在二进制数字通信系统中，所传送的消息是两个等概的消息之一，其中任一消息所含的信息量是 1bit。在实际应用场合，常把 1 位二进制数字称为 1bit，而不用特意说明这两个符号的出现是否等概。

当所发生的事件是由若干个出现概率分别是 $P(x_1)$ 、 $P(x_2)$ 、 $P(x_3)$ 、 \dots 、 $P(x_n)$ 的独立事件组成时，则该事件所包含的信息量等于传输各个独立事件时的信息量的总和，即

$$I[P(x_1)P(x_2)\dots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \dots + I[P(x_n)] \quad (1-2)$$

可以证明每一消息的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1-3)$$

式(1-3)与统计热力学中熵的定义式相类似，所以，在信息论中， H 通常称为信源的熵，单位是 bit。

当需要传送 M 个独立等概的离散消息时，每一个消息可以采用一个 M 进制波形之一来传送。当 $M=2$ 时，每一个码元的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} \text{bit} = \log_2 2 \text{bit} = 1 \text{bit} \quad (1-4)$$

1bit 是信息量的度量单位，是一位二进制数不经压缩所含的信息量。当 $M>2$ 时，假设每条信息是等概出现的，则每条消息的概率应为 $P(x) = 1/M$ ，以 2 为底时，每一个码元的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} \text{bit} = \log_2 M \text{bit} \quad (1-5)$$

当 $M=2^k$ ($k=1, 2, 3, \dots$) 时

$$I = \log_2 2^k \text{bit} = k \text{bit} \quad (1-6)$$

如果用“0”和“1”表示二进制代码，用“±1”和“±3”表示四进制代码，则其时域波形如图 1-5 所示。

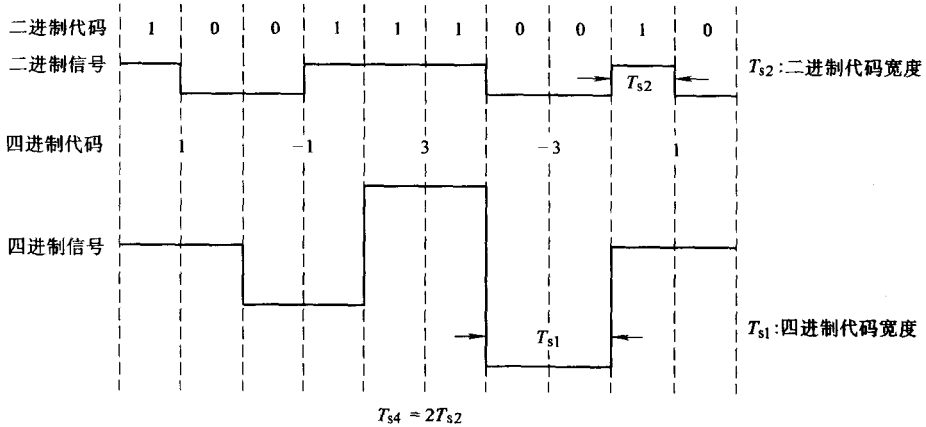


图 1-5 二进制代码与四进制代码的时域波形

1.3 信道

1.3.1 信道的定义与分类

信道，顾名思义就是信号传输过程中经过的物理媒质。根据通信的概念，信号必须依靠传输介质进行传输。这些传输介质包括架空明线、对称电缆或同轴电缆、光缆、自由空间、电离层、对流层等。这样的信道仅涉及传输介质，通常称为狭义信道。

另一方面，信号还必须经过发送机、接收机、调制器、解调器、放大器等设备进行各种处理，这些设备也是信号经过的路径。在通信系统的研究中，为了简化系统的模型和突出重点，常常根据所研究的问题，把信道范围适当扩大，除了传输媒介外，信道还包括有关的部件和电路，如天线与馈线、功率放大器、滤波器、混频器、调制器与解调器等。这种范围扩大的信道称为广义信道。

广义信道有各种范围，一种常用的广义信道称为调制信道。调制信道的范围是从调制器的输出端至解调器的输入端，如图 1-6 所示。因为从调制和解调的角度来看，调制作用是产生已调信号，解调器作用是由已调信号恢复到原来的调制信号，对于调制器输出端到解调器输入端之间的一切，不管它内部包括了什么部件和媒质，只是起到对已调信号进行传输的作用，所以调制信道可看作传送信号的一个整体。另一种常用的广义信道称为编码信道。编码信道的范围是从编码器的输出端至译码器的输入端，图 1-6 为这两种广义信道的模型框图。

由此可以看出，狭义信道是广义信道的核心，广义信道的性能在很大程度上取决于狭义信道，所以在研究信道的一般特性时，传输媒质的特性将是讨论的重点。由于本书主要研究通信的基本原理，所提到的信道除非特意说明，均指广义信道。

通过对调制信道的大量观察发现，调制信道通常具有以下一些共同的特性：1) 有一对(或多对)输入端和一对(或多对)输出端；2) 绝大多数的信道都是线性的，即满足线性叠加

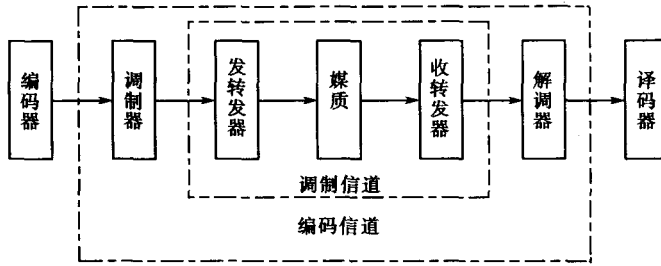


图 1-6 广义信道模型

原理；3)信号通过信道具有固定的或时变的延迟时间；4)信号通过信道会受到固定的或时变的损耗；5)没有信号输入时，在信道的输出端仍可能有一定的输出(噪声)。据此，可以用一个线性时变网络来表示调制信道，如图 1-7 所示。

该线性网络的输入、输出之间的关系可以表示为

$$e_0(t) = f[e_i(t)] + n(t) \quad (1-7)$$

式中， $e_i(t)$ 是输入的已调信号； $e_0(t)$ 是信道的输出； $n(t)$ 为加性噪声。

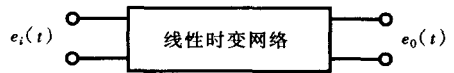


图 1-7 调制信道模型

1.3.2 信道的特性

$f[e_i(t)]$ 反映的是信号通过网络时，输出信号与输入信号之间的某种关系，具体的函数关系取决于网络的特性。根据函数关系的不同，信道可以分为恒参信道和变参信道。

1.3.2.1 恒参信道的特性及其对信号传输的影响

恒参信道，顾名思义就是参数不随时间变化的信道。恒参信道的数学描述为

$$e_0(t) = e_i(t) * h(t) + n(t) \quad (1-8)$$

$$E_0(\omega) = E_i(\omega)H(\omega) + N(\omega) \quad (1-9)$$

式中， $h(t)$ 是信道特性的时域描述； $H(\omega)$ 是信道频率响应，式(1-9)是式(1-8)对应的频域表达式。

如果信道具有如式(1-10)所示的频谱特性，这样的信道称为理想恒参信道。

$$H(\omega) = |H(\omega)|e^{j\varphi(\omega)} \begin{cases} |H(\omega)| = K_0 \\ \tau(\omega) = \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = t_d \end{cases} \quad (1-10)$$

式中， $\tau(\omega)$ 是信道的群延迟特性。

理想的恒参信道可实现信号的无失真传输。恒参信道的频谱如图 1-8 所示。但是理想的恒参信道在实际当中是不存在的。因为任何实际信道都不可能具有无限宽的传输频带，实际的传输频带取决于信道的最高截止频率和最低截止频率。此外，即使是在有效的传输频带中，同一信道对信号中不同频率成分的衰减(或增益)通常也不可能完全相同。典型的音频信道的幅频特性曲线如图 1-9 所示。

实际信道的这种不均匀性将使信道中传输信号的频率成分受到不同程度的衰减，引起传

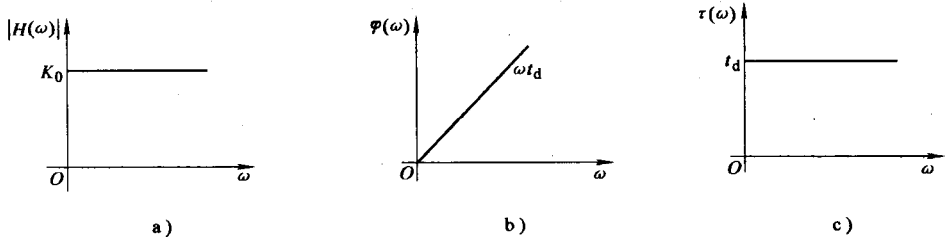


图 1-8 恒参信道的频谱

a) 恒参信道的幅频特性 b) 恒参信道的相频特性 c) 恒参信道的群延迟特性

输信号的失真。为了消除这种失真，可以在信道中加入一个补偿网络，以使信道中总的幅频特性趋于平坦，这种做法称为信道的幅度均衡。幅度均衡可以在时域实现，也可以在频域实现。时域均衡是利用均衡器产生的时间波形去直接校正已畸变的波形。频域均衡是从校正系统的频率特性出发，使包括均衡器在内的基带系统的总特性满足无失真传输条件。

信号的无失真传输，除了要满足幅频特性为常数外，还要求信道的相频特性具有线性关系

$$\varphi(\omega) = -\omega t_d \quad (1-11)$$

式中， t_d 是信道的延迟时间，是一个由信道决定的常数。

实际信道的相频特性并不是线性的，信道相频特性的这种非线性，会使通过信道的信号产生相位失真。相位失真对模拟信号的影响不太明显，但对数字信号将会产生很大的影响。当数据传输速率较高时，会产生严重的码间串扰，对通信质量造成严重影响。

信道的相频特性常用群延迟特性来表示。群延迟特性是相频特性的导数。理想的群延迟特性是一条水平的直线。而在实际的信道中，群延迟特性不是一条水平直线。当信号通过群延迟特性是非线性的信道时，信号中不同的频率成分会有不同的时延，从而造成信号的失真。实际的群时延特性曲线如图 1-10 所示。

群时延引起的失真和幅频失真一样，是一种线性失真，也可以通过均衡加以补偿。

恒参信道主要包括由架空明线、电缆、光纤、中长波地波传播、超短波及微波视距传播、卫星中继等传播媒介构成的信道。

1.3.2.2 变参信道的特性及其对信号传输的影响

对应于恒参信道，变参信道就是一种信道参数随时间随机变化的信道，所以变参信道的特性一定比恒参信道的特性复杂，对传输信号的影响也较为严重。

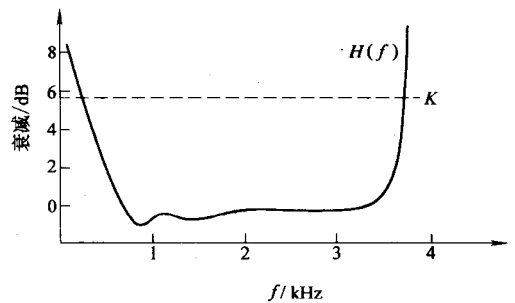


图 1-9 音频信道的幅频特性

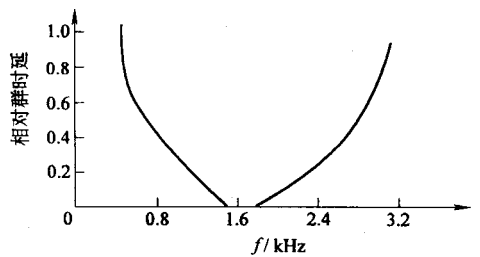


图 1-10 实际的群时延特性曲线

变参信道主要包括短波电离层反射、超短波流星余迹散射、超短波及微波对流层散射、超短波电离层散射、超短波超视距绕射等传输媒介所构成的信道。短波是指波长为 $100 \sim 10\text{m}$ (相应的频率为 $3 \sim 30\text{MHz}$) 的无线电波。沿地表面传播的短波,称为地波传播;电离层反射传播的短波,称为天波传播。离地面高 $60 \sim 600\text{km}$ 的大气层称为电离层。电离层是由分子、原子、离子及自由电子组成的。离地面 $10 \sim 12\text{km}$ 以下的大气层称为对流层。

变参信道的传输媒质主要有以下几个特点: 1) 对信号的衰耗随时间随机变化; 2) 信号传输的时延随时间随机变化; 3) 多径传播。

多径传播主要形式包括: 1) 电波从电离层的一次反射和多次反射; 2) 电离层反射区高度所形成的细多径; 3) 地球磁场引起的寻常波和非寻常波; 4) 电离层不均匀性引起的漫射现象。多径传播的示意图如图 1-11 所示。

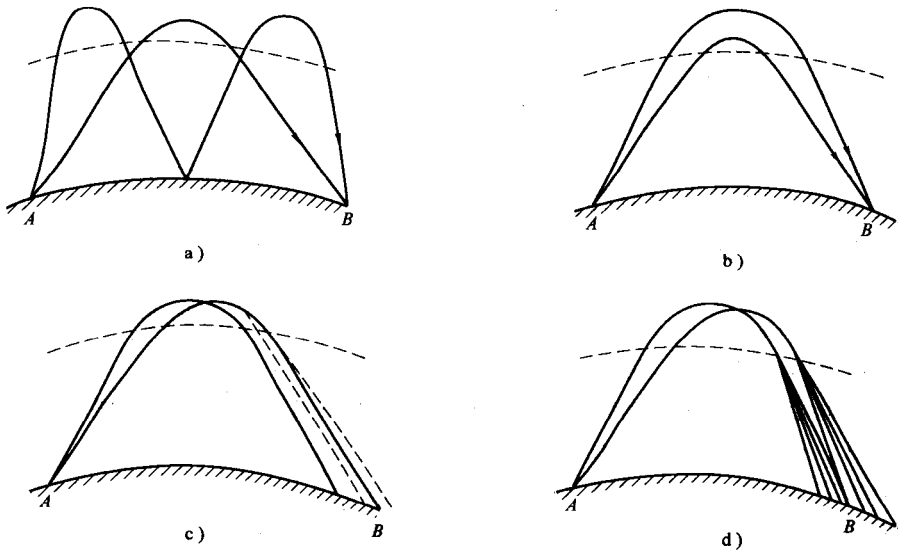


图 1-11 多径传播示意图

a) 一次反射和两次反射 b) 反射区高度不同 c) 寻常波与非寻常波 d) 漫射现象

在变参信道中,传输媒介的参数随气象条件的改变而随机变化,比如电离层对电波的吸收特性随年份、季节、昼夜交替始终在不断地变化,由此造成信道对传输信号的衰减也在不断地发生变化,这种变化在通信理论中称为衰落。由于气象条件造成的信道参数的改变相对而言比较缓慢,所以将这种衰落称为慢衰落。慢衰落对传输信号的影响可以通过调节设备的增益来补偿。

在变参信道中,多径传播会使发端发出的电波经多条路径到达收端,由于各条路径对信号的衰减和时延都在随时间而改变,因此接收端合成信号的强弱也会随之改变,将这种现象称为多径效应。由多径效应引起的信号变化比由气象条件改变带来的信号变化要快得多,所以将由多径效应引起的衰落称为快衰落。

假设发送信号为单一频率正弦波: $s(t) = A\cos\omega_0 t$, 则变参信道中经 n 条路径传播后的接收信号为

$$R(t) = \sum_{i=1}^n \mu_i(t) \cos \omega_c [t - \tau_i(t)] \quad (1-12)$$

式中， $\mu_i(t)$ 是第*i*条路径接收信号的幅度； $\tau_i(t)$ 是第*i*条路径的传输时延。这两个参数都是时间的函数。

变参信道的输入、输出信号波形与频谱示意图如图 1-12 所示。

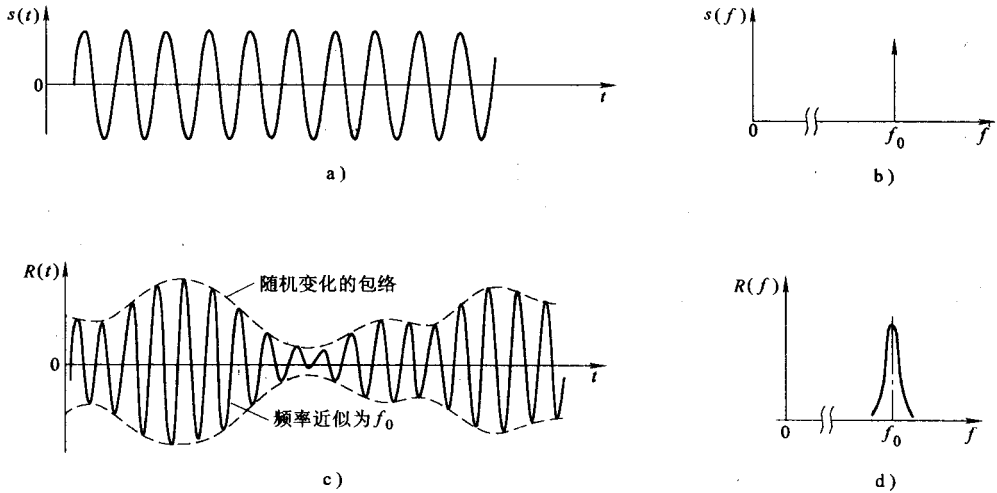


图 1-12 变参信道输入、输出信号波形与频谱示意图

a) 信道输入信号波形 b) 输入信号频谱 c) 信道输出信号波形 d) 输出信号频谱

由此可以看出，多径传播使单一频率的正弦信号变成了包络和相位受调制的窄带信号，这种信号称为衰落信号；从频谱上看，多径传播使单一谱线变成了窄带频谱，即多径传播引起了频率弥散。

变参信道的衰落，将会严重影响通信系统的性能，实际应用中要采取各种的措施抗此衰落。常用的抗衰落技术包括：调制解调技术、扩频技术、功率控制技术、与交织结合的差错控制技术、分集接收技术等，其中比较有效且常用的抗衰落技术为分集接收技术。

分集接收是指接收端按照某种方式，使收到的带同一信息的多个信号衰落特性相互独立，并对多个信号进行特定的处理，以降低合成信号的电平起伏，减小各种衰落对接收信号的影响。分集接收包含两重含义，一是分散接收，即使接收端能得到多个携带同一信息的、统计独立的衰落信号；二是集中处理，即接收端把收到的多个统计独立的衰落信号进行适当的合并，从而降低衰落的影响，改善系统性能。

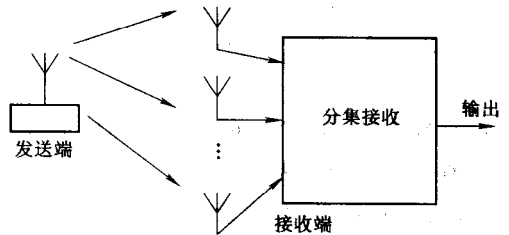


图 1-13 空间分集示意图

主要分集方式有空间分集、频率分集、极化分集、时间分集等。空间分集示意图如图1-13所示。

1.3.3 信道的容量

信号必须经过信道才能传输，如果信道受到噪声的干扰，传输信号的功率和带宽也都将

受到限制。那么，这时信道可以无失真地传输信号的能力如何呢？对于这个问题香农(shannon)在信息论中已经给出了答案。

根据香农信息论，对于连续信道，如果信道带宽为 B ，并且受到加性高斯白噪声的干扰，则其信道容量的理论公式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-13)$$

式中， N 是白噪声的平均功率； S 是信号的平均功率； S/N 为信噪比；信道容量 C 是指信道中信息无差错传输的最大速率，其单位是 bit/s。

香农公式的严格证明比较复杂，有兴趣的读者可以查阅相关文献，本书只给出公式。

根据香农的信道容量公式可以得出以下重要结论：

(1) 任何一个信道都有信道容量 C 。如果信源的信息速率 R 小于或等于信道容量 C ，那么在理论上存在一种方法，使信源的输出能以任意小的差错率通过信道传输；如果信源的信息速率 R 大于信道容量 C ，则无差错传输在理论上是不可能的。

(2) 给定的信道容量 C 可以用不同的带宽和信噪比的组合来实现。信道有效带宽越宽，对信噪比的要求越低。调制和编码的过程实际就是通过带宽与信噪比之间的互换，来尽可能达到信道的容量。

(3) 若噪声为高斯白噪声，则在信道带宽 B 内的噪声功率 $N = n_0 B$ 。香农公式的另一形式为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \quad (1-14)$$

式中， n_0 是单位频带内的噪声功率。

带宽 B 趋于无穷时，信道的容量 C 为

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \approx 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1-15)$$

由此可知，当 S 和 n_0 一定时，信道容量 C 是随带宽 B 的增大而增大的，但是当 $B \rightarrow \infty$ 时， C 并不会也趋于无穷大，而是趋于常数 $1.44S/n_0$ 。

调制信道是一种连续信道，可以用连续信道的信道容量来表征；编码信道是一种离散信道，可以用离散信道的信道容量来表征。

[例 1-1] 已知彩色电视图像由 5×10^5 个像素组成。设每个像素有 64 种彩色度，每种彩色度有 16 个亮度等级。如果所有彩色度和亮度等级的组合机会均等，并统计独立，1) 试计算每秒传送 100 个画面所需要的信道容量；2) 如果接收机信噪比为 30dB，为了传送彩色图像所需信道带宽为多少？

解：1) 信息/每像素 = $\log_2(64 \times 16)$ bit = 10bit

信息/每幅图像 = $10 \times 5 \times 10^5$ bit = 5×10^6 bit

信息速率 $R = 100$ 个/s $\times 5 \times 10^6$ bit = 5×10^8 bit/s

信道容量 $C \quad C \geq R = 5 \times 10^8$ bit/s

$$2) B_{\min} = \frac{C}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)} = \frac{C}{3.32 \lg \left(1 + \frac{S}{N} \right)} = \frac{5 \times 10^8}{3.32 \lg(1 + 1000)} \text{ Hz} \approx 50 \text{ MHz}$$