



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



通信原理

韩声栋 蒋铃鸽 刘伟 编著



机械工业出版社
China Machine Press



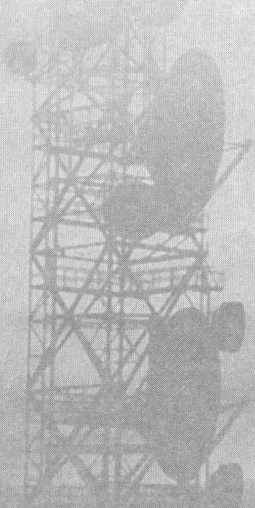
普通高等教育“十一五”

TN911/120

2008

通信原理

韩声栋 蒋铃鸽 刘伟 编著



机械工业出版社
China Machine Press

林慧敏 张翠霞 国“五一十” 百姓等高亟普

本书通过讲述和分析模拟和数字通信系统的工作原理和性能,阐述通信基本理论。内容包括:随机信号和噪声分析、模拟调制方法、模拟信号数字化、数字基带传输、自适应均衡、数字调制技术、纠错编码和最佳接收方案。

全书叙述严谨,物理概念清楚,数学分析翔实,每章均有必要的例题和适量的习题,便于教学使用。

本书是通信工程、电子工程和信息工程等专业教科书,也可作为IT领域研发人员的参考书。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/韩声栋等编著. —北京:机械工业出版社,2008.6

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-111-24103-4

I. 通… II. 韩… III. 通信理论 IV. TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第070207号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘立卿

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2008年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·21.75印张

标准书号:ISBN 978-7-111-24103-4

定价:36.00元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换

本社购书热线:(010)68326294

前 言

通信原理是通信工程专业(包括信息工程、电子工程和无线电技术等专业)的一门主干专业课。这门课程偏重理论研究,主要讲述通信系统如何传输信息,以及如何传输得更好。课程内容覆盖信息传输必需的共性问题,而把各种通信系统具体的个性问题留给后续专业课。通信原理是进入专业学习的一门重要课程。

本教材在上海交通大学电子信息和电气工程学院通信原理课程使用多年的教材讲义基础上编写而成,适用72教学时,适当删节也适用于54学时。本书每章备有适量习题,可供练习使用。学习本课程必要的先修课程包括信号与线性系统、通信电子线路,以及工程数学概率和随机变量。本书也可供IT领域相关的研发人员参考。

全书共分10章,主要内容是:第1章简述通信系统模型,刻画通信系统概貌,介绍通信理论的重要概念。第2章讲述平稳随机过程理论,这是随机信号分析的数学方法。第3章讲解模拟调制系统,并分析其抗噪声性能。第4章叙述模拟信号数字化的方法,重点是分析PCM的取样、量化和编码过程,并把自适应引入DPCM中。第5章阐述数字基带传输的基本原理,包括码间干扰问题、奈奎斯特准则、部分响应信号和自适应时域均衡。第6章和第7章合起来论述最佳接收原理,内容涉及匹配滤波器、信号检测原理和相关接收机等。第8章介绍数字调制的带通传输方法,重点讲解几种典型的数字调制技术。第9章集中解决通信中接收端本地同步信号获取的问题,包括本地载波的提取、数字位同步产生和帧同步方法。第10章介绍信道编码,讲述纠错编码的基本方法,包括线性分组码和卷积码。

本书第1、3、4章在王维一教授主编的《现代通信理论》基础上修订而成,其余章节重新编写。其中第2、5、6、7章和第8章的8.1~8.6节由韩声栋编写,第8章的8.7节和第9章由刘伟编写,第10章由蒋铃鸽编写。全书由韩声栋统稿和审定。

本书的编写得到我校电子工程系的支持和帮助。王维一教授对本书的出版给予鼓励和关心,袁焱老师帮助改写4.4.5节,电子版书稿由担任兼职助教的多位研究生完成。编者在此深表谢意。

限于水平,不妥之处敬请批评指正。

编 者

2008年5月于上海交通大学

目 录

前言	1	2.6 离散时间随机信号	40
第1章 通信系统概论	1	2.6.1 相关函数和协方差函数	41
1.1 通信系统的模型	1	2.6.2 相关函数(序列)的 Z 变换以及功率谱	43
1.1.1 通信系统的组成	1	2.6.3 随机序列通过线性系统	44
1.1.2 模拟通信、数字通信和数据通信	2	2.7 窄带随机过程	45
1.2 通信系统的质量指标	3	2.7.1 平稳窄带过程的正交表示	45
1.2.1 模拟通信系统的质量指标	3	2.7.2 窄带高斯过程的包络和相位表示	49
1.2.2 数字通信系统的质量指标	3	2.8 正弦信号加窄带噪声的包络和相位	51
1.3 传输信道	4	2.8.1 包络 $A(t)$ 的分布	52
1.3.1 无记忆信道	5	2.8.2 相位 $\psi(t)$ 的分布	53
1.3.2 恒参信道	6	习题	55
1.3.3 变参信道	8	第3章 模拟调制系统	62
1.4 信息的度量与信道容量	10	3.1 幅度调制	62
1.4.1 信息的度量	10	3.1.1 双边带调制	62
1.4.2 信道容量	12	3.1.2 振幅调制	65
习题	14	3.1.3 单边带调制	67
第2章 随机信号和噪声	16	3.1.4 残留边带调制	70
2.1 随机过程基本概念	16	3.2 幅度调制系统的抗噪声性能	72
2.1.1 随机过程的定义	16	3.2.1 基带系统	72
2.1.2 随机过程的概率分布函数和概率密度函数	17	3.2.2 DSB系统噪声	73
2.1.3 相关函数和协方差函数	18	3.2.3 SSB系统噪声	74
2.1.4 随机过程分类	21	3.2.4 AM系统噪声	75
2.2 广义平稳过程及各态遍历性	22	3.3 角度调制	78
2.2.1 广义平稳过程相关函数的性质	23	3.3.1 角度调制的一般概念	79
2.2.2 时间平均及各态遍历性	25	3.3.2 频率调制	80
2.3 随机过程的功率谱密度	27	3.3.3 FM信号的产生和解调	84
2.3.1 功率谱密度的定义	27	3.3.4 相位调制	87
2.3.2 功率谱与自相关函数的关系	29	3.4 角度调制系统的噪声	87
2.3.3 功率谱密度性质	30	3.4.1 角度调制系统的输出信噪比	88
2.3.4 互功率谱密度及其性质	31	3.4.2 角度调制系统的门限效应	92
2.4 线性系统对随机信号的响应	31	3.5 加重技术	94
2.4.1 输出过程统计特性	32	3.6 频分多路复用	96
2.4.2 输出输入过程相互关系	33	习题	98
2.4.3 线性组合网络	33	第4章 模拟信号的数字传输	102
2.5 高斯过程和白噪声过程	34	4.1 模拟信号的取样	102
2.5.1 高斯过程	34		
2.5.2 白噪声过程	37		

4.1.1	取样定理	102	5.5.1	时域均衡原理	156
4.1.2	带通信号的取样	103	5.5.2	两种最佳准则	158
4.2	模拟信号的量化	104	5.6	横向均衡器的结构	159
4.2.1	量化原理	105	5.6.1	前向均衡器	160
4.2.2	均匀量化	105	5.6.2	反馈均衡器	160
4.2.3	非均匀量化	107	5.6.3	前向和反馈组合均衡器	160
4.3	编码	111	5.6.4	判决反馈均衡器	161
4.3.1	A87.6/13 折线压缩律	112	5.6.5	前向与判决反馈结合的均衡器	162
4.3.2	码元的排列	114	5.7	最小均方误差均衡器	163
4.4	PCM 通信系统	115	5.7.1	公式解	163
4.4.1	系统的组成	115	5.7.2	递推(迭代)解——最陡下降法	166
4.4.2	PCM 信号带宽要求	116	5.7.3	实用解——LMS 算法	170
4.4.3	PCM 系统的噪声	116	5.7.4	自适应均衡	171
4.4.4	PCM 时分复用	118	习题		173
4.4.5	单片 PCM 编解码/滤波器	120	第 6 章	匹配滤波器	175
4.5	增量调制	121	6.1	最大信噪比准则——匹配滤波器	175
4.5.1	DM 原理	122	6.1.1	信噪比表达	176
4.5.2	DM 的量化噪声	124	6.1.2	MF 的导出	176
4.5.3	改进型 DM	125	6.2	匹配滤波器的性质	177
4.5.4	单片 DM 编解码器	127	6.3	时间相关函数	180
4.6	差值脉冲编码调制	128	6.3.1	MF 等效于相关器	180
4.6.1	DPCM 编码原理	128	6.3.2	相关积分的定义及性质	181
4.6.2	预测器	130	6.3.3	几种相关函数的关系	182
4.6.3	自适应量化	132	6.3.4	相关系数	183
4.6.4	自适应差值脉码调制	134	6.4	匹配滤波器计算	184
习题		134	6.5	有色噪声化为白噪声的处理方法	188
第 5 章	数字基带传输和时域均衡	137	6.6	匹配滤波器的实现	189
5.1	基带传输码型	137	6.6.1	动态滤波器	190
5.1.1	基本码型	137	6.6.2	用横向滤波器实现	193
5.1.2	基带码流的功率谱	138	6.6.3	MF 的近似实现	194
5.1.3	基带码型变换	140	习题		196
5.2	数字基带传输系统及符号间干扰	143	第 7 章	最佳接收	198
5.2.1	数字基带传输系统组成	143	7.1	判决理论	198
5.2.2	符号间干扰分析	143	7.1.1	最大后验概率准则与最小差错 概率准则	198
5.3	无 ISI 的带限信号设计——奈奎 斯特第一准则	144	7.1.2	似然比检验	199
5.3.1	最小带宽 $B_T = 1/2T$	146	7.1.3	单次观测信号检测	199
5.3.2	升余弦频谱	146	7.1.4	多次观测	201
5.4	部分响应信号	148	7.1.5	多元信号检测	202
5.4.1	双二进制信号系统	148	7.2	二元已知信号检测	203
5.4.2	修正双二进制信号系统	151	7.2.1	二元已知信号最佳接收——相关 接收机模型	204
5.4.3	部分响应系统	153	7.2.2	数字通信接收机的性能	206
5.5	时域均衡及其最佳准则	155			

7.2.3	相关接收的实现	208	9.2	载波同步	275
7.2.4	关于本地信号的讨论	209	9.2.1	插入导频法	275
7.3	随机相位信号检测	212	9.2.2	抑制载波双边带信号的载波提取	277
7.3.1	随相信号检测——正交接收机	212	9.2.3	多进制信号的载波提取	279
7.3.2	正交接收机的等效实现	214	9.2.4	基带数字处理的载波跟踪环	281
7.4	准最佳接收	215	9.2.5	QAM 信号的载波提取	282
	习题	219	9.3	载波同步系统的性能	283
第 8 章	数字信号带通传输	222	9.3.1	稳态相差	283
8.1	二进制幅度键控	222	9.3.2	随机相差	284
8.1.1	2ASK 信号的产生及其功谱	223	9.3.3	同步建立和保持时间	286
8.1.2	2ASK 信号解调	224	9.4	位同步	288
8.2	二进制移频键控	229	9.4.1	非线性变换法	288
8.2.1	2FSK 信号的产生及其功谱	229	9.4.2	数字锁相环法	289
8.2.2	2FSK 信号解调	232	9.4.3	超前-滞后期法	291
8.3	二进制移相键控	235	9.4.4	最小均方误差法	292
8.3.1	2PSK 信号的产生和功谱	235	9.5	位同步系统的性能	295
8.3.2	2PSK 信号解调	236	9.5.1	相位误差	295
8.3.3	二进制差分移相键控	237	9.5.2	同步建立时间	295
8.3.4	二进制数字调制系统的比较	241	9.5.3	同步保持时间	295
8.4	四相移相键控	242	9.5.4	同步带宽	296
8.4.1	QPSK 信号时域表示和频谱	243	9.6	群同步	297
8.4.2	绝对移相 QPSK	244	9.6.1	起止式群同步	297
8.4.3	四相相对移相键控 QDPSK	245	9.6.2	采用特殊字符建立群同步	298
8.4.4	QPSK 的误码性能	250	9.7	群同步系统的性能	301
8.5	正交幅度调制	251	9.7.1	集中插入同步法的性能指标	301
8.5.1	QAM 信号时域表示和功谱	251	9.7.2	帧同步的保护	302
8.5.2	16QAM 的调制与解调	254		习题	304
8.5.3	相位模糊与差分编码	256	第 10 章	差错控制编码	305
8.5.4	比特差错性能	257	10.1	基本概念	305
8.5.5	部分响应正交幅度调制	257	10.1.1	差错控制方式和纠错码分类	305
8.6	最小移频键控	259	10.1.2	差错控制编码的基本原理	306
8.6.1	三个特点的分析	259	10.2	常用检错码	308
8.6.2	MSK 信号的正交表示及产生	262	10.2.1	奇偶校验码	308
8.6.3	MSK 信号解调	263	10.2.2	行列校验码	308
8.6.4	MSK 信号功谱	264	10.2.3	恒比码	309
8.7	OFDM 技术	266	10.3	线性分组码	310
8.7.1	OFDM 系统的工作原理	266	10.3.1	汉明码	310
8.7.2	OFDM 系统的主要特点	269	10.3.2	监督矩阵 H	312
	习题	269	10.3.3	生成矩阵 G	313
第 9 章	同步	271	10.3.4	伴随式译码	314
9.1	锁相环的基本知识	271	10.4	循环码	315
9.1.1	模拟锁相环	272	10.4.1	基本概念与原理	315
9.1.2	数字锁相环	274			

10.4.2 循环码的编码器	320	习题	333
10.4.3 循环码的译码器	322	附录	335
10.5 卷积码	324	附录 A 误差函数	335
10.5.1 卷积码基本概念与结构	325	附录 B 英汉名称对照表	337
10.5.2 卷积码的描述方法及编码	326	参考文献	338
10.5.3 卷积码的维特比译码	330		

第 1 章 通信系统概论

本章目的是介绍通信系统的基础和简要叙述信息论的基本概念，其内容为各种通信系统的组成及特点；评估通信系统的性能指标；讨论各种类型信道的共同特性，以及造成传输信号失真的原因。最后，扼要介绍信息的度量和信道容量等基本知识。

1.1 通信系统的模型

通信是指消息的传递和交换，即互通信息。在现代通信中，要传送的消息有语言、文字、图像、符号、数据等各种类型。利用“电”来传递消息的途径有有线通信、短波超短波通信、微波通信、卫星通信、光纤通信和计算机通信等各种方式。尽管通信的对象和类型有各种形式，然而，我们将按照通信的目的及传输信号的性质，对典型通信系统的各个组成部分进行分析。

1.1.1 通信系统的组成

图 1-1 表示一个高度概括的通信系统模型。下面介绍图中各个方框的意义。



图 1-1 通信系统模型

信息源(含输入变换器)：简称信源，它是产生传送消息的源。例如，人类活动的语言、电视图像、电传报文或计算机数据等。信源发出消息的形式，可以是连续的，也可以是离散的。如果信源输出的消息是非电的，必须通过输入变换器把它转变为电信号。例如，电话通话时，话机就是变换器。由变换器输出的信号称为消息信号或者基带信号。话机输出的基带信号的频率通常限制在 300 ~ 3400Hz，电视图像信号的频率在 0 ~ 6MHz 内。信号所占的频率范围，称为信号带宽。

发送设备：它的功能是把消息信号经过处理变换后送入信道。有时也可以由输入变换器把信号直接送入信道传输，这种传输称为基带传输。基带信号的处理变换包括信号的放大、滤波和调制，其中最重要的是调制。所谓调制，就是把基带信号的频谱搬移到一个较高的频谱范围内，以适应信号在信道内有效地传输。

信道：是传输各种电磁波的媒质。最常见的有有线电缆、无线电传播的自由空间。对于光纤通信和卫星通信系统，光缆和人造卫星与地面站之间的空间也是传输信息的信道。尽管随通信模式不同有各种类型的信道，但它们都有共同特点：信号经过信道传输后，其波形将发生失真，并受到干扰噪声的污染。

接收设备：它的功能是从接收信号中提取所需消息信号，并把它变换到适合于输出变换器所要求的信号形式。同样，其中解调(调制的逆变换)是最重要的。

输出变换器：能把基带信号转变为用户能接受的信号形式。扬声器、电传打字机和电视机等是该变换器的实例。

1.1.2 模拟通信、数字通信和数据通信

通信所传输的消息是多种多样的。然而，表示各种消息的传输信号，按其特点可以分为两类：一类是模拟信号，即可以表达为时间连续函数的波形。模拟的含义是指用电参量(如电压、电流)的变化来模拟信源发出的信号。另一类是数字信号，其特征是在时间上和幅度上的取值都是离散型的。

1. 模拟通信

以模拟信号来传送消息的通信方式，称为模拟通信。模拟通信系统的组成与图 1-1 所示相仿，其中发送设备主要是模拟调制器，而接收设备是相应的解调器。有关模拟调制和解调原理的内容在第 3 章中详细讨论。

2. 数字通信与数据通信

数字通信和数据通信都是用数字信号来传送消息的。由于数字通信相对于模拟通信有下列优点：

1) 数字信号便于产生、存储、交换，也便于与计算机联用；

2) 在干扰情况下，数字信号易于检测，且可在中继站再生信号，消除传输中波形误差的累积；

3) 便于实现抗干扰和保密编码，以提高通信的可靠性和保密性；

4) 便于电路集成化，也易于利用现代固体器件和计算技术的研究成果。

因此，从模拟通信过渡到数字通信是现代通信的目标之一。

图 1-2 表示一个数字通信系统模型。它与图 1-1 的区别是增加了信源编码、信源译码、信道编码及信道译码，并且调制器和解调器都是采用数字调制和数字解调技术。

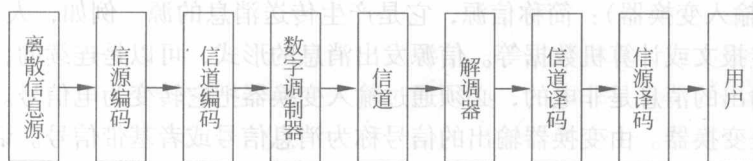


图 1-2 数字通信系统模型

信源编码的作用是降低信息的多余度，其目的是减少码元数目，降低码元速率。信息码流经过信源编码后，可以减少不必要的码元，而在信源译码时，仍能恢复和辨认。另一方面，如果信源输出的是模拟信号，信源编码将其取样、量化和编码后，转换成数字信号，称为模/数转换(A/D 转换)。

信道编码又称纠错编码(或称抗干扰编码)，其作用是在信源编码输出的码流中(数字信号)，人为地按一定规则加入多余码元，以便在接收端信道译码时，发现错码或者纠正错码，从而提高通信的可靠性。

对于一个具体的数字通信系统，信道编、译码视需要而用，并不是所有数字通信系统都设

置。当然,有些通信系统还需要附加保密,这时,在系统的发送端和接收端,应分别增设加密器和解密器装置。此外,在任何数字通信系统中,同步系统是必不可少的,图1-2中并未画出。

习惯上,数字通信与数据通信的区分方法是:将模拟信息经数字化处理后,用数字信号的形式来传送的通信方式,称为数字通信;而把信源本身发出的数字形式的消息(如电子计算机或其他数字终端作为信源发出的数据、指令等),不管用何种形式的信号来传输这类消息的通信方式,均称为数据通信。

数据通信是电子计算机与通信相结合的一种通信方式,它利用快速传输数据的通信技术和数据处理、存储的计算机技术,给用户及时、准确的信息。数据通信的发展使计算机的用户可以远距离使用计算机,计算机也可以远距离进行实时数据收集和对系统进行实时控制。这就使计算机的作用超越地理位置的限制,大大地扩大了计算机的应用范围。上世纪60年代末,有名的美国 ARPA 计算机网诞生,初次实现了位于不同地点、不同种类的计算机与计算机的通信和资源共享(计算机资源包括硬件、软件和数据),从而使计算机与通信的结合更加紧密,形成了计算机通信网络。现在,计算机通信已得到飞速发展,其应用遍布社会生产和生活的各个方面。

1.2 通信系统的质量指标

通信系统的质量指标通常包括电气性能、工艺结构和使用维修等方面。但从传输信号角度看,其质量指标主要为有效性和可靠性。通信的有效性是指传输信息的速率,也即在给定的频带内能够以什么速率传输信息。而通信的可靠性则表示准确通信的程度。然而,在设计中有效性和可靠性这两个要求往往互相矛盾。通常只能在满足一定可靠性的指标下,尽可能提高通信系统的有效性。

1.2.1 模拟通信系统的质量指标

1. 有效性

对模拟通信来说,信号传输的有效性通常可用有效传输频带来衡量,即在指定信道带宽内允许同时传输的最多通路数。每一路信号的有效带宽与模拟调制方式有关。在相同条件下,每路所占频带越窄,则允许同时传输的通路数越多。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性通常采用接收端的输出信号平均功率和噪声平均功率之比来衡量,称功率信噪比,记作 S/N 。在相同条件下,系统的输出信噪比越高,通信质量就越好,互通信息就越准确。例如,一般民用电话通信的 $S/N = 40\text{dB}$ 时,能听清 95% 以上。

1.2.2 数字通信系统的质量指标

1. 有效性

数字通信系统的有效性可用码元速率或符号速率来衡量。在数字信号中,每个二进制信号的取值为“1”或“0”,每个“1”或“0”称为一个码元。各码元都占有相等的时间间隔,这个间隔称为码元长度。

(1) 码元速率 R_B

每秒钟传送码元的数目称为码元速率。当码元长度为 T ,则码元速率

$$R_B = \frac{1}{T}$$

码元速率又称符号速率或信号速率。单位为波特(Baud)，可简写为 Bd。

(2) 信息速率 R_b

信息速率是每秒钟传送的信息量，记作 R_b ，单位为比特/秒，或写为 bit/s。

(3) 频带利用率

数字通信有效性指标除了用码元速率和信息速率外，还可以用频带利用率来衡量。频带利用率是指单位频带内能够传送码元的速率，即每赫兹波特数。则频带利用率

$$\eta = \frac{\text{码元速率}}{\text{频带宽度}} \quad (\text{Bd/Hz}) \quad (1-1a)$$

码元(或符号)除了二进制外，还有多进制。当两个进制相同的通信系统比较有效性时， η 大者，有效性好。而当两个传输进制不同的系统比较时，可采用折算后信息速率 R_{bN} 来定义，这时

$$\eta = \frac{R_{bN}}{\text{频带宽度}} \quad \left(\frac{\text{b/s}}{\text{Hz}} \right) \quad (1-1b)$$

折算公式见后式(1-20)。

2. 可靠性

数字通信系统的可靠性由差错率指标来衡量，通常有两种表示方法，即误码率 P_e 和误信率(误比特率) P_b 。

(1) 误码率

$$P_e = \frac{\text{差错码元数}}{\text{传输的码元总数}} \quad (1-2a)$$

例如，经过长时间统计，平均传输 10 000 个码元中差错一个码元，则误码率 $P_e = 10^{-4}$ 。

(2) 误信率

$$P_b = \frac{\text{错误消息的比特数}}{\text{传输消息的总比特数}} \quad (1-2b)$$

二进制时， $P_b = P_e$ 。

误码率 P_e 越小，通信的可靠性越高。对 P_e 的要求与所传输的消息有关，一般通数字电话时要求 $P_e \leq 10^{-3}$ ，而传输数据时要求 $P_e \leq 10^{-5} \sim 10^{-6}$ ，甚至有更高的要求。

1.3 传输信道

信道是通信系统的一个组成部分，它是连接发送设备和接收设备之间的传输媒质，组成传输信号的通路。按照传输媒质，可以分为有线信道(包括架空明线、对称和同轴电缆、光缆)和无线信道(如利用收发天线和自由空间作为媒质)两大类。

通常把传输媒质的信道称为狭义信道，而把发送端调制器输出和接收端解调器的输入端之间的放大、天线电路和传输媒质组成的信道称为广义信道。由于后者传送已调信号，又称调制信道。如果把发送端的调制器和接收端的解调器也包括在内，则称为编码信道。它们之间的关系如图 1-3 所示。

由于信道特性的不完善，信号经信道传输后，往往发生振幅失真和相位失真(或群时延失真)，从而造成波形失真。信道除了使信号波形失真外，还存在着各种干扰和噪声，损害

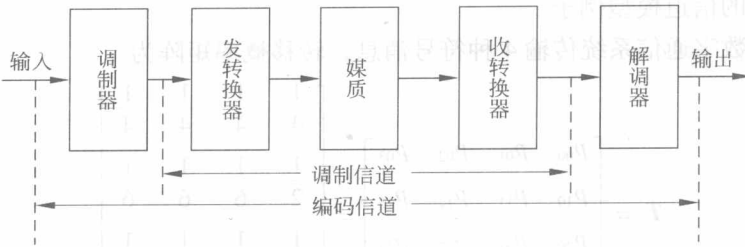


图 1-3 调制信道与编码信道

传输信号。不管是狭义信道还是广义信道，总可以用一个具有输入端和输出端的网络表示，如图 1-4 所示。

1.3.1 无记忆信道

无记忆信道是指信道内只存在起伏噪声，它的输出数字序列码元仅依赖于输入数字序列的相应码元和信道特性，而与前后码元的差错无关。

编码信道是传输编码后的数字序列码元，大多数的编码信道是属于无记忆的。无记忆编码信道用转移概率来表示，二进制信道模型如图 1-5 所示。

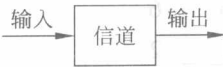


图 1-4 信道网络

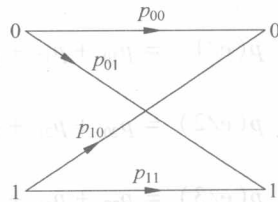


图 1-5 二进制信道模型

对于二进制信号来说，信道传输的是 1 码或 0 码。信道特性可用四个条件概率表示，这里称为信道转移概率，它们的关系是

$$\begin{aligned} p(0/0) + p(1/0) &= 1 \\ p(0/1) + p(1/1) &= 1 \end{aligned}$$

式中， $p(0/0)$ ——表示发送 0 码、接收为 0 码的概率，简称为 p_{00} ；

$p(1/1)$ ——表示发送 1 码、接收为 1 码的概率，简称为 p_{11} ；

$p(1/0)$ ——表示发送 0 码、接收为 1 码的概率，简称为 p_{01} ；

$p(0/1)$ ——表示发送 1 码、接收为 0 码的概率，简称为 p_{10} 。

p_{00} 、 p_{11} 为正确转移概率， p_{01} 、 p_{10} 为错误转移概率。转移概率矩阵为

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

如果信道不存在噪声和不使信号失真，则转移概率矩阵 \mathbf{T} 是单位矩阵，即当 $i=j$ 时 (i, j 为 0 或 1)， $p_{ij}=1$ ；当 $i \neq j$ 时， $p_{ij}=0$ 。并且根据转移概率性质， \mathbf{T} 矩阵每一行元素之和为 1。

由无记忆二进制的编码信道模型，容易推论到无记忆的任意多进制的情况中去，下面是

传送四进制信号的信道模型例子。

【例 1-1】 数字通信系统传输 4 种符号消息，转移概率矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & p_{02} & p_{03} \\ p_{10} & p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{20} & p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{30} & p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{2} & \frac{1}{6} & \frac{1}{6} \\ \frac{1}{6} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix}$$

若信源发送 4 种符号的概率相等，试求：

1) 在传送符号过程中，发生错误的概率；

2) 正确传送符号的概率；

3) 若 4 种符号表示为 A 、 B 、 C 、 D ，发送符号序列为 $BADCAB$ 。求收到的符号序列为 $DADDAB$ 的概率。

解 (1) 错误概率

$$p(e/0) = p_{01} + p_{02} + p_{03} = \frac{1}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{3}{4}$$

$$p(e/1) = p_{10} + p_{12} + p_{13} = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{5}{6}$$

$$p(e/2) = p_{20} + p_{21} + p_{23} = \frac{1}{6} + \frac{1}{2} + \frac{1}{6} = \frac{5}{6}$$

$$p(e/3) = p_{30} + p_{31} + p_{32} = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3} = \frac{2}{3}$$

$$\text{则 } P_e = \sum_i p(e/i)p(i) = \frac{1}{4} \times \left(\frac{3}{4} + \frac{5}{6} + \frac{5}{6} + \frac{2}{3} \right) = \frac{37}{48}$$

(2) 正确概率

$$P_c = p_{00}p(0) + p_{11}p(1) + p_{22}p(2) + p_{33}p(3)$$

$$= \frac{1}{4} \times \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{3} \right) = \frac{11}{48}$$

$$P_c + P_e = 1$$

(3) 序列为 $DADDAB$ 的概率

由于发送符号之间相互独立，则

$$P\{DADDAB\} = p_{13}p_{00}p_{33}p_{23}p_{00}p_{11} = \frac{1}{6} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{6} \times \frac{1}{4} \times \frac{1}{6} = \frac{1}{10368}$$

1.3.2 恒参信道

调制信道是传输已调制信号，它可以用四端网络表示，如图 1-6 所示。

图中 $H(\omega, t)$ 为网络的传递函数，即信道参数，它是角频率 ω 及时间 t 的函数； $X(\omega, t)$ 和 $Y(\omega, t)$ 分别为输入信号和输出

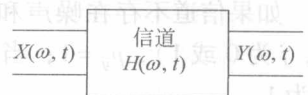


图 1-6 信道等效四端网络

信号。

如果信道参数 $H(\omega, t)$ 不随时间变化, 或者说, 在相当长的时间中 $H(\omega, t)$ 基本不变, 这种信道称为恒参信道, 又称时不变信道, 这时 $H(\omega, t)$ 应写成 $H(\omega)$ 。信道参数 $H(\omega, t)$ 随时间而变化的信道, 称为变参信道, 又称时变信道。

恒参信道的性能有幅度频率特性、相位(或时延)频率特性、频率漂移和相位抖动、电平波动等。但是最重要的性能是幅度频率特性和相位频率特性。由此, 信道特性表示为

$$H(\omega) = A(\omega)e^{-j\theta(\omega)} \tag{1-4}$$

式中, $A(\omega)$ ——幅度频率特性;

$\theta(\omega)$ ——相位频率特性。

如果

$$\left. \begin{aligned} A(\omega) &= A \\ \theta(\omega) &= \omega t_0 \end{aligned} \right\} \tag{1-5}$$

即幅频特性与频率无关, 相频特性是一条通过原点的直线, 则信号通过传输信道不发生失真。

1. 幅度失真

幅度失真是指信号通过信道时, 信号的不同频率分量分别受到不同的衰减或放大, 造成输出信号波形的失真。为此, 式(1-4)可表示为

$$H(\omega) = A(\omega)e^{-j\omega t_0} \tag{1-6}$$

式中, t_0 ——信道延迟常数。

分析幅度失真的方法, 通常将 $A(\omega)$ 展开为傅里叶级数形式。作为例子, 如图 1-7 所示信道模型具有余弦滤波器特性, 可表示为

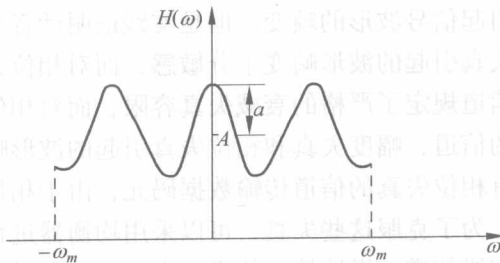


图 1-7 余弦滤波器特性(周期数 $N=3$)

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \left(A + a \cos \frac{N\pi}{\omega_m} \omega \right) e^{-j\omega t_0} \\ &= A e^{-j\omega t_0} + \frac{a}{2} \left\{ \exp \left[j\omega \left(\frac{N\pi}{\omega_m} - t_0 \right) \right] + \exp \left[-j\omega \left(\frac{N\pi}{\omega_m} + t_0 \right) \right] \right\} \end{aligned}$$

当输入带限信号 $x(t)$ 时, 则信道输出为

$$y(t) = Ax(t - t_0) + \frac{a}{2} x \left(t + \frac{N\pi}{\omega_m} - t_0 \right) + \frac{a}{2} x \left(t - \frac{N\pi}{\omega_m} - t_0 \right)$$

上式说明, 输出信号由经过时延 t_0 的 $Ax(t) + \frac{a}{2} x \left(t + \frac{N\pi}{\omega_m} \right) + \frac{a}{2} x \left(t - \frac{N\pi}{\omega_m} \right)$ 所组成。如果

图 1-8a 为输入信号波形, 则图 1-8b 为输出信号波形实线 4, 它由倍乘因子为 A 的 $x(t)$ 虚线

1 和位移为 $\pm \frac{N\pi}{\omega_m}$ 且倍乘因子为 $\frac{a}{2}$ 的回波虚线 2、3 叠加组成，由此造成输出波形失真。

2. 相位失真

相位失真是指信道的相位-频率特性呈非线性关系，致使传输信号发生畸变。图 1-9 表示信道的相位-频率特性关系，图中通过原点的直线(虚线)表示理想信道的相频特性，即 $\theta(\omega) = \omega t_0$ ，这时信号通过信道后不发生畸变。图上实线表示实际信道的相频特性。

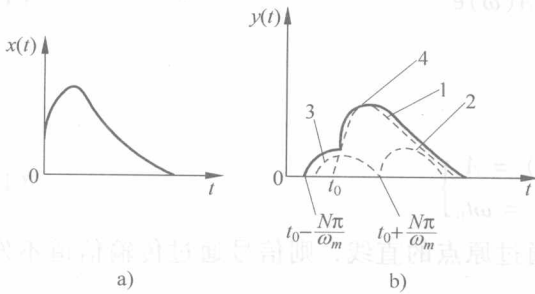


图 1-8 信道输入与输出信号波形的比较

a) 输入信号波形；b) 输出信号波形

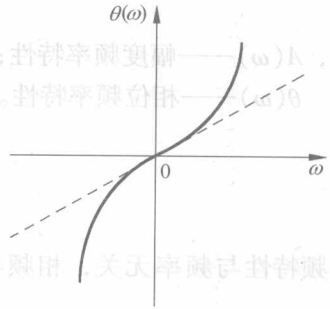


图 1-9 相位-频率特性

相位失真可以用时延来衡量。相位时延定义为相位 $\theta(\omega)$ 与角频率 ω 之比，用 t_{ph} 表示

$$t_{ph} = \theta(\omega) / \omega \tag{1-7}$$

由于相位是一个多值函数，相位时延也是一个多值函数，因而工程上习惯采用群时延表征相频特性，它是由相位对角频率的微分来确定的，因而是一个单值函数，表示为

$$t_{gr}(\omega) = d\theta(\omega) / d\omega \tag{1-8}$$

幅度和相位失真都能引起信号波形的畸变。但是实践证明话音和音乐一类的消息，由于人耳听觉的特点，对幅度失真引起的波形畸变十分敏感，而对相位失真引起的波形畸变几乎感觉不出来。所以，电话信道规定了严格的衰减失真容限，而对相位失真通常不考虑。但是对于传输数据或图像信号的信道，幅度失真和相位失真引起的波形畸变都会对传输质量造成损害。例如，使用一个带有相位失真的信道传输数据码元，由于相位失真引起码元信道波形展宽，从而产生码间串扰。为了克服这些失真，可以采用均衡器进行校正补偿。

典型的恒参信道有：有线信道、微波接力信道、人造卫星信道等。

1.3.3 变参信道

变参信道的传输函数 $H(\omega, t)$ 随时间 t 而变。短波电离层反射、超短波及微波对流层散射等信道属于变参信道。

变参信道的一个共同特点是多途径传输，就是同一发射信号可以通过不同的传输路径以不同的传输时间达到同一接收点。图 1-10 示出电离层反射引起多径传输的模型。图中由发射天线发出的电波，经过电离层反射后可能有多条路径到达接收天线。其中包括返回地面后第二次再经电离层反射的电波，称为双跳；直接经电离层

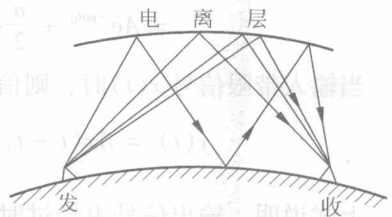


图 1-10 多径传输模型

一次反射到达接收天线的电波，称为单跳。

所以，接收天线收到的电波，将是各条传输路径到达接收点的信号矢量和。经过不同路径到达接收点的电波会相互干扰，有可能同相相加，也有可能反相相减，并且变参信道特性的变化是无法预知的，这样就造成了接收点信号强度随机地变化，使信号强度减弱，这种现象称为衰落。

下面简单介绍由两条路径到达接收点的多径传输特点。假设图 1-10 上只有两条路径到达接收点，且信号强度相等，那么图 1-10 可用图 1-11a 的延时线模型来等效。

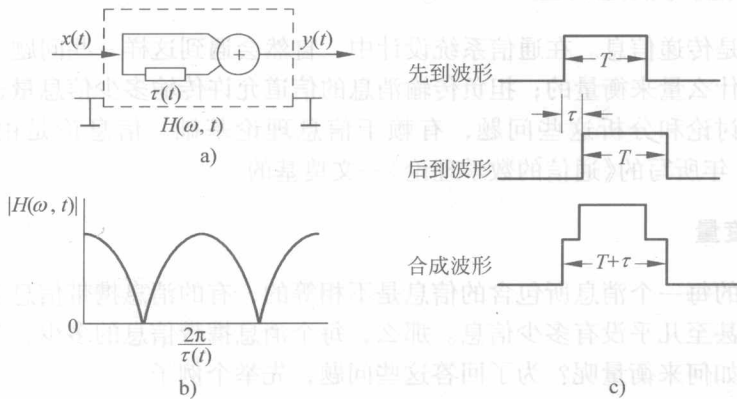


图 1-11 两条路径的多径效应

a) 延时线模型；b) 信道传输函数曲线；c) 数字波形展宽示意

设输入信号为 $x(t)$ ，相对延时差为 $\tau(t)$ ，延时信号可表示为 $x[t - \tau(t)]$ 。输出信号 $y(t)$ 为两者之和，即

$$y(t) = x(t) + x[t - \tau(t)] \quad (1-9)$$

于是信道传输函数为

$$H(\omega, t) = 1 + e^{-j\omega\tau(t)} \quad (1-10)$$

它的模值为

$$\begin{aligned} |H(\omega, t)| &= |1 + \cos\omega\tau(t) - j\sin\omega\tau(t)| \\ &= \left| 2\cos^2 \frac{\omega\tau(t)}{2} - 2j\sin \frac{\omega\tau(t)}{2} \cos \frac{\omega\tau(t)}{2} \right| \\ &= 2 \left| \cos \frac{\omega\tau(t)}{2} \right| \end{aligned} \quad (1-11)$$

图 1-11b 为上式的图解。可以看出，对不同的频率，信道衰减是不同的。两个极端的情况是：在 $\omega = \frac{2n\pi}{\tau(t)}$ 处 (n 为整数)，两路径到达接收点的信号同相相加，出现传输极点；在 $\omega = \frac{2(n \pm 1)\pi}{\tau(t)}$ 处，两路径到达接收点的信号反相抵消，出现传输零点。由于相对延时差 $\tau(t)$ 是随时间而变的量，所以图 1-11b 中各传输零点与极点在频率轴上的位置也随时间而变。可见，信道衰减随着频率和时间不断变化。如果传输路径数目增多，那么信道传输函数更加复杂。上述分析的信道衰减随频率而不同的现象，称为频率选择性衰落。

图 1-11c 是多径传输造成数字波形展宽的示意图。由图可见，由于各路径到达接收点的