



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

通信原理

陈启兴 主编



免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

通信原理

主 编 陈启兴

参 编 柳红英 詹 明



机械工业出版社

本书的主要内容包括随机信号分析、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、正弦载波数字调制系统、模拟信号的数字传输、数字信号的最佳接收、差错控制编码、正交编码与伪随机序列和同步原理等。

本书内容丰富，讲述由浅入深，简明透彻，概念清楚，重点较为突出，既便于教学，也利于自学。

本书适用于通信工程、电子信息工程、移动通信、生物医学、计算机通信等电子信息类专业的通信原理课程教学，也可作为从事通信及有关工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

通信原理/陈启兴主编. —北京: 机械工业出版社, 2011. 1
普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-33089-9

I. ①通… II. ①陈… III. ①通信理论 - 高等学校 - 教材
IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 008092 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 闫晓宇 责任编辑: 闫晓宇 王保家 王 荣

版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 15 印张 · 368 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-33089-9

定价: 29.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是由成都信息工程学院、西南交通大学和西南大学的教师联合编写的教材，是三所高校老师多年教学和实践的结晶，吸收了许多国内外著名的同类教材的精华，同时也把编者自己的一些见解融入其中。

为了适应当前通信技术的发展要求和高等院校的教学需求，我们力求简单明了地阐述基本概念、基本理论和基本原理，力求数学公式推导的简洁和严谨，并密切联系新兴的通信技术。在内容上突出基础性、系统性、实用性和先进性，注重理论与实践结合和知识运用能力及创新意识的培养。借助 CDIO 理念，进行了一些改革尝试，设计了一定数量的三级项目。

本书共有 11 章，主要包括随机信号分析、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、正弦载波数字调制系统、模拟信号的数字传输、数字信号的最佳接收、差错控制编码、正交编码与伪随机序列和同步原理等内容。选用该教材的高校，可以根据各自的教学大纲进行选择。

本书的第 1、3、5、6、7 章和第 9 章由柳红英老师编写，第 11 章由詹明老师编写，第 2、4、8 章和第 10 章由陈启兴老师编写。全书最后由陈启兴统编定稿。

编者还将为本书配备电子课件，欢迎采用本书授课的教师登录出版社教材服务网站 www.cmpedu.com 注册后免费下载。本书还将配套出版《通信原理学习指导与习题详解》，给出了书中思考题与习题的详细解答内容，供任课教师和同学参考。

由于编者的水平有限，书中难免有不妥甚至错误的地方，请广大读者不吝指教。需要与编者联系沟通可以写信至如下 E-mail: chenqx_686996@126.com

编 者

目 录

前言		
第1章 绪论	1	
1.1 引言	1	
1.2 通信系统的组成	1	
1.2.1 通信系统的一般模型	2	
1.2.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型	3	
1.2.3 数字通信的特点	5	
1.3 通信系统的分类及通信方式	5	
1.3.1 通信系统的分类	5	
1.3.2 通信方式	7	
1.4 信息及其度量	8	
1.5 通信系统的主要性能指标	10	
1.5.1 模拟通信系统的质量指标	10	
1.5.2 数字通信系统的质量指标	10	
1.6 小结	12	
思考题与习题	12	
第2章 随机过程分析	13	
2.1 引言	13	
2.2 随机过程	13	
2.2.1 随机过程的分布函数	13	
2.2.2 随机过程的数字特征	14	
2.3 平稳随机过程	15	
2.3.1 平稳随机过程的定义	15	
2.3.2 各态历经性	16	
2.3.3 平稳随机过程的自相关函数	17	
2.3.4 平稳过程的功率谱密度	18	
2.4 高斯随机过程	19	
2.5 窄带随机过程	21	
2.5.1 $\xi_c(t)$ 和 $\xi_s(t)$ 的统计特性	22	
2.5.2 $a_\xi(t)$ 和 $\varphi_\xi(t)$ 的统计特性	23	
2.6 高斯白噪声和带限白噪声	24	
2.6.1 白噪声	24	
2.6.2 低通白噪声	24	
2.6.3 带通白噪声	25	
2.7 小结	26	
思考题与习题	26	
第3章 信道	28	
3.1 引言	28	
3.2 信道定义	28	
3.3 信道数学模型	29	
3.4 恒参信道举例	30	
3.4.1 双绞线	30	
3.4.2 同轴电缆	31	
3.4.3 光纤	31	
3.4.4 无线恒参信道	32	
3.5 恒参信道特性及其对信号传输的影响	33	
3.6 随参信道举例	35	
3.7 随参信道特性及其对信号传输的影响	37	
3.8 随参信道特性的改善——分集接收	40	
3.8.1 分集方式	41	
3.8.2 分集合并方式	41	
3.9 信道的加性噪声	42	
3.10 信道容量	44	
3.10.1 离散无记忆信道的容量	44	
3.10.2 连续信道容量	46	
3.11 小结	48	
思考题与习题	48	
第4章 模拟调制系统	50	
4.1 引言	50	
4.2 幅度调制的原理	51	
4.2.1 调幅	51	
4.2.2 双边带调制	53	
4.2.3 单边带调制	53	
4.2.4 残留边带调制	56	
4.3 线性调制的抗噪声性能	57	
4.3.1 抗噪声性能分析模型	57	
4.3.2 DSB 调制系统的抗噪声性能	58	
4.3.3 SSB 调制系统的抗噪声性能	59	
4.3.4 AM 调制系统的抗噪声性能	61	
4.4 非线性调制的原理及抗噪声性能	63	
4.4.1 角度调制的基本概念	63	

4.4.2 窄带调频	65	6.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能	121
4.4.3 宽带调频	66	6.3.1 2ASK 系统的抗噪声性能	121
4.4.4 调频信号的产生与解调	68	6.3.2 2FSK 系统的抗噪声性能	124
4.4.5 调频系统的抗噪声性能	69	6.3.3 2PSK 和 2DPSK 系统的抗噪声性能	125
4.4.6 预加重和去加重技术	72	6.4 二进制数字调制系统的误码率比较	126
4.5 各种模拟调制系统的比较	73	6.5 多进制数字调制方式	127
4.6 频分复用	73	6.5.1 多进制振幅键控	128
4.7 小结	74	6.5.2 多进制频移键控	130
思考题与习题	75	6.5.3 多进制相移键控	132
第 5 章 数字基带传输系统	77	6.5.4 多进制差分相移键控	135
5.1 引言	77	6.6 小结	138
5.2 数字基带信号及其频谱特性	77	思考题与习题	138
5.2.1 数字基带信号	77	第 7 章 模拟信号的数字传输	140
5.2.2 数字基带信号的频谱特性	79	7.1 引言	140
5.3 数字基带传输的常用码型	85	7.2 模拟信号的抽样	140
5.4 基带脉冲传输与系统中的码间串扰	88	7.2.1 低通模拟信号的抽样定理	140
5.5 无码间串扰的数字基带传输特性	89	7.2.2 实际抽样	142
5.5.1 无码间串扰传输与 Nyquist 准则	89	7.2.3 模拟脉冲调制	143
5.5.2 带限信道的无码间串扰传输	91	7.2.4 带通信号的抽样	143
5.5.3 升余弦滚降滤波器	92	7.3 抽样信号的量化	145
5.6 基带传输系统的抗噪声性能	93	7.3.1 量化原理	145
5.6.1 二进制双极性基带系统的抗噪声性能	94	7.3.2 均匀量化	146
5.6.2 二进制单极性基带系统的抗噪声性能	96	7.3.3 非均匀量化	148
5.7 眼图	96	7.4 脉冲编码调制	152
5.8 部分响应技术	97	7.4.1 脉冲编码调制的基本原理	152
5.8.1 第一类部分响应系统	98	7.4.2 自然二进制码、反射二进制码和折叠二进制码	153
5.8.2 部分响应系统的一般形式	101	7.4.3 电话信号的编码规则	154
5.9 信道均衡	103	7.4.4 PCM 传输系统的抗噪声性能	155
5.9.1 均衡原理	103	7.5 其他信源编码的基本原理	155
5.9.2 数字均衡器	104	7.5.1 语音压缩编码	156
5.9.3 基本均衡算法	104	7.5.2 差分脉冲编码调制	156
5.9.4 自适应均衡算法	106	7.5.3 增量调制	158
5.10 小结	107	7.6 时分复用	160
思考题与习题	107	7.6.1 时分复用的基本原理	160
第 6 章 正弦载波数字调制系统	111	7.6.2 准同步与同步数字体系	161
6.1 引言	111	7.7 小结	165
6.2 二进制数字调制原理	111	思考题与习题	165
6.2.1 二进制振幅键控 (2ASK)	111	第 8 章 数字信号的最佳接收	167
6.2.2 二进制频移键控 (2FSK)	114	8.1 引言	167
6.2.3 二进制相移键控 (2PSK)	116	8.2 数字信号的统计特性	167
6.2.4 二进制差分相移键控 (2DPSK)	118	8.3 数字信号的最佳接收原理	168

8.4 确知数字信号的最佳接收机	169	交编码	205
8.5 确知数字信号的最佳接收机的误码率 ...	171	10.1.1 正交编码的基本概念	205
8.6 数字通信系统的匹配滤波接收法	174	10.1.2 常见的正交编码	206
8.7 小结	176	10.2 伪随机序列	209
思考题与习题	176	10.2.1 m 序列的产生	209
第 9 章 差错控制编码	178	10.2.2 m 序列的性质	214
9.1 引言	178	10.3 扩频通信	216
9.2 差错控制编码的基本概念	179	10.4 小结	217
9.3 线性分组码	181	思考题与习题	218
9.4 循环码	186	第 11 章 同步原理	219
9.4.1 循环码原理	186	11.1 引言	219
9.4.2 循环码的编解码方法	189	11.2 载波同步	219
9.4.3 BCH 码	191	11.2.1 载波同步的插入导频法	219
9.5 卷积码	193	11.2.2 载波同步的直接法	220
9.5.1 卷积码的基本原理	193	11.3 载波同步的性能	223
9.5.2 卷积码的代数描述	193	11.4 码元同步	225
9.5.3 卷积码的解码	197	11.4.1 码元外同步法	225
9.6 网格编码调制	201	11.4.2 码元自同步法	225
9.6.1 网格编码调制的基本概念	201	11.5 群同步	227
9.6.2 TCM 信号的产生	202	11.5.1 连贯输入法	227
9.6.3 TCM 信号的解调	203	11.5.2 间歇式输入法	229
9.7 小结	203	11.5.3 起止同步法	230
思考题与习题	204	11.6 小结	231
第 10 章 正交编码与伪随机序列	205	思考题与习题	231
10.1 正交编码的基本概念和常见的正		参考文献	232

第 1 章 绪 论

1.1 引言

在日常的工作和生活中，人们每天都要接触和使用各种各样的现代通信系统与通信媒介，其中最常见的是电话、电视和互联网。通过这些媒介，就可以与全球各地的人们随时进行通信、处理日常事务、了解天下大事并把握世界发展的形势。而电子邮件和传真已经使得文字信息的远距离快速传递成为现实。现代通信系统是用电信号来传递消息的，因而称之为电通信，即电信。

电通信的历史并不长，至今只有 170 多年的时间。一般把 1838 年塞缪尔·莫尔斯 (Samuel Morse) 研究出有线电报作为开始使用电通信的标志，那时的通信距离只有 70km。1876 年，亚历山大·格雷厄姆·贝尔 (Alexander Graham Bell) 发明有线电话被称为是现代电信的开端。1878 年，世界上的第一个人工交换局只有 21 个用户。发送无线电报于 1896 年实现，它开创了无线电通信发展的道路。1906 年电子管的发明迅速提高了无线通信及有线通信的水平。

伴随着相关技术的发展，通信科学从 20 世纪 30 年代起获得了突破性的进展，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 年代以来通信发展更是引人注目，所取得的重大成就包括沃尔特·布拉顿 (Walter Brattain)、约翰·巴丁 (John Bardeen) 和威廉·肖克利 (William Shockley) 于 1947 年发明的晶体管，杰克·基尔比 (Jack Kilby) 于 1958 年发明的集成电路，以及汤斯 (Townes) 和肖洛 (Schawlow) 于 1958 年发明的激光。这些发明使得用于构建卫星通信系统、宽度微波通信系统及光缆光波通信系统的小尺寸、低功率、低重量的高速电路的发展成为可能。

目前，绝大多数的有线通信系统正在被光缆所取代，光缆能够提供极高的带宽并能进行包括语音、数据和视频信号在内的多种信源的传输。蜂窝无线电已经在为在轿车、公交车和火车上旅行的人们提供电话服务，高速通信网络则将全世界的计算机和各种外围设备真正连接在一起。

人们现在正亲眼目睹一项重大的进展，这就是包括语音、数据和视频传输的个人通信业务的出现和应用，而卫星和光纤网络正在为全世界提供高速通信业务。的确，人们已经看到了现代电信新纪元的曙光。

1.2 通信系统的组成

通信是一个快速发展的领域，它涉及的内容非常广泛。

在通信系统中，接收端（接收者）在没有收到信号之前是不知道信号波形的，否则就没有必要进行通信了。也就是说，信息的传输意味着预先未知消息的交流。

噪声限制了通信系统的通信能力。如果没有噪声，就可以以极小的功率将信号传至无穷

远。在无线通信的早期，人们明显意识到了这一点。但是关于噪声及噪声对信息传输系统影响的理论直到 20 世纪 40 年代才由诺思、赖斯、香农及维纳等人分别于 1943 年、1944 年、1948 年及 1949 年提出。

通信系统用来传输携带信息的波形给接收者。可以选择不同的波形来携带信息。例如，选择什么样的波形来表示打印出来的字母 A 呢？这取决于许多因素，包括波形的带宽（频带宽度）和波形的中心频率、波形的功率或能量、噪声对波形携带的信息的影响以及发射端产生波形和接收端检测波形的成本等。

1.2.1 通信系统的一般模型

通信系统的作用是将消息或信息从产生消息的信源发送到一个或多个目的地，通常可以用如图 1-1 所示的功能框图来表示。

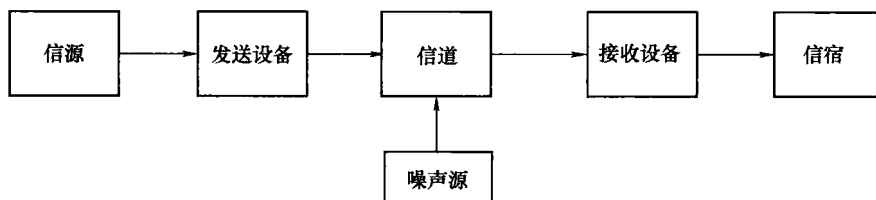


图 1-1 通信系统的功能框图

(1) 信源 信源所产生的信息可以是声音、图像或文本。信源一般包含变换器，将信源的输出变换成电信号。例如，用做变换器的话筒，可以将语音信号变换成电信号，而摄像机则将图像信号变换成电信号。这些设备输出的信号一般称为基带信号。

(2) 发送设备 发送设备将原始基带电信号变换成适合物理信道或其他传输介质传输的形式。例如，在无线电和电视广播中，通信部门规定了各发射台的频率范围，因此，发射机必须将待发送的信息信号转换到适合的频率范围来发送，以便与分配给此发射机的频率相匹配。这样，由多个无线电台发送的信号就不会彼此干扰。又如，信道是由光纤组成的，那么发送设备就要将处理好的基带信号转换成光波信号再发送。因此，发送设备涵盖的内容很多，可能包含变换、放大、滤波、编码调制等过程。对于多路传输系统，发送设备中还包括多路复用器。

(3) 信道 信道用于将来自发送设备的信号发送到接收端的物理介质。信道可以分为两大类：无线信道和有线信道。在无线信道中，信道可以是大气、自由空间和海水等。有线信道有双绞线、同轴电缆及光纤等。信道对不同种类的信号有不同的传输特性，但都会对在信道中传输的信号产生衰减，信道中的噪声和由不理想接收机引入的噪声会引起接收信号的失真。

(4) 接收设备 接收设备的功能是恢复接收信号中所包含的消息信号。使用和发送端相似的变换器将接收到电信号变换成适合用户的形式，如声音信号、图像等。由于噪声的影响，接收到的信号出现某种程度的恶化，除了完成信号解调这一功能外，接收机还有完成包括信号滤波和噪声抑制等在内的其他一系列外围功能。在后面章节的分析中将会看到，接收消息信号的保真度与调制类型和加性噪声强度密切相关。

(5) 信宿 信宿即消息的目的地，信宿里包含的输出变换器（如扬声器和显示器等）

将接收到的原始电信号变换成适合用户的形式，如声音信号、图像等。

人们的目标是在允许的发射功率、信号带宽及成本的条件下，设计出以尽可能小的失真量将信息传输到接收端的通信系统。

1.2.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型

人们知道信息由波形来携带，也就是说必须借助于一定形式的信号才能传送和进行各种处理。因而信号是信息的表现形式，是通信的客观对象。按信号参量的取值方式不同可以分为两类：模拟信号和数字信号。如果信号的参量取值连续（不可数、无穷多），则称之为模拟信号。产生这种信号的相应信源称为模拟信源（Analog Source）。例如话筒送出的输出电压包含有语音信息，并在一定的取值范围内连续变化。模拟信号也称连续信号，这里连续的含义是指信号的某一参量连续变化，或者说在某一取值范围内可以取无穷多个值，而不一定在时间上也连续，如图 1-2b 中所示的抽样信号。如果电信号的参量仅可能取有限个值，则称之为数字信号，如电报信号、计算机输入/输出信号等。数字信号有时也称离散信号，这个离散是指信号的某一参量是离散变化的，而不一定在时间上也离散，如图 1-3b 所示的二进制数字调相（2PSK）信号。产生数字信号的信源称为数字（离散）信源（Digital (Discrete) Source）。

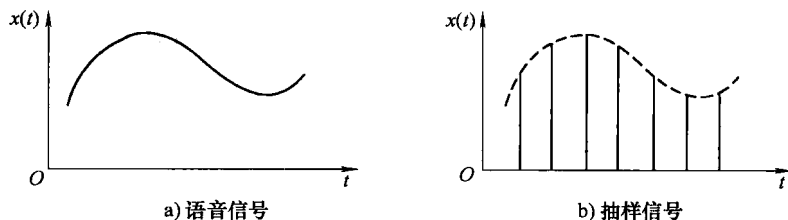


图 1-2 模拟信号

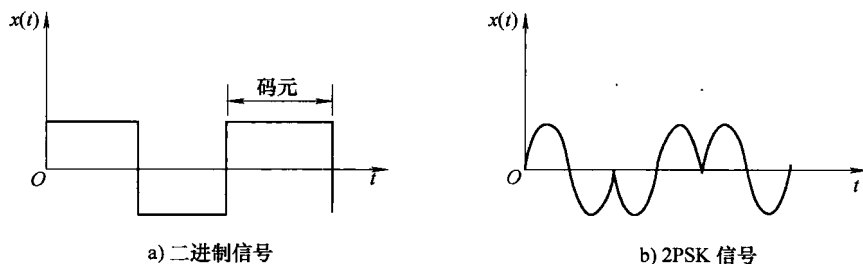


图 1-3 数字信号

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1. 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统，其模型如图 1-4 所示，其中包含两种重要变换。第一种变换是，在发送端把连续消息变换成原始电信号，在接收端进行相反的变换，这种变换由信源和信宿来完成。这里所说的原始电信号通常称为基带信号，基带的含义是指信号的频谱从零频附近开始，如语音信号的频率范围为 300 ~ 3400Hz，图像信号的频率范围为 0 ~ 6MHz。有些信道可以直接传输基带信号，而以自由空间作为信道的无线电

传输却无法直接传输这些信号。因此，模拟通信系统中常常需要进行第二种变换：把基带信号变换成适合在信道中传输的信号，并在接收端进行反变换。完成这种变换和反变换的通常是调制器和解调器。经过调制以后的信号称为已调信号，它应有两个基本特征：一是携带有信息；二是适合在信道中传输。由于已调信号的频谱通常具有带通形式，因而已调信号又称带通信号（也称为频带信号）。

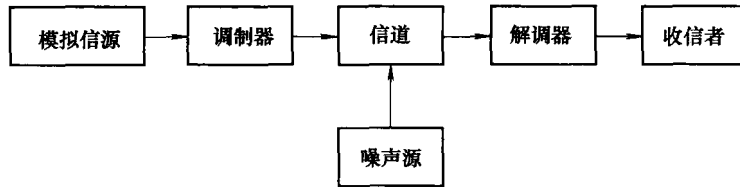


图 1-4 模拟通信系统模型

需要指出的是，除了上述的两种变换，实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射等过程。由于上述两种变换起主要作用，而其他过程不会使信号发生质的变化，只是对信号进行放大和改善信号特性等，在通信系统模型中一般被认为是理想的而不予讨论。因此关于模拟通信系统研究的重点是调制与解调原理以及噪声对信号传输的影响。

2. 数字通信系统模型

数字通信系统（Digital Communication System, DCS）是利用数字信号来传递信息的通信系统，其模型如图 1-5 所示。

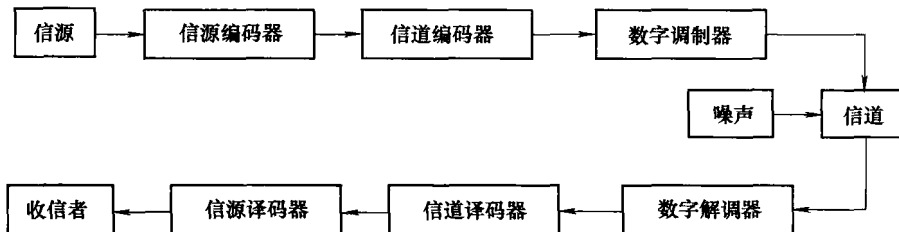


图 1-5 数字通信系统模型

(1) 信源输入变换器及输出变换器 信源输出既可以是模拟信号，如音频或视频信号；也可以是数字信号，如计算机的输出，这种输出在时间上是离散的，且输出字符数也是有限的。因此在数字通信系统中，发射机和接收机完成的功能还应该包括：发送端信息信号的数字化，以及接收端信息信号的合成。

(2) 信源编码/译码器 将模拟或数字信源的输出高效地变换成二进制序列的过程称为信源编码（Source Encoding）或数据压缩（Data Compression）。信源译码是信源编码的逆过程。

(3) 信道编码/译码器 信道编码的目的是增强数字信号的抗干扰能力。数字信号在信道中传输时受到噪声等影响后将会引起差错。为了减小差错，信道编码器以受控的方式引入一定的冗余码元（监督元），组成所谓的“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按相应的逆规则进行解码，从中发现错误或纠正错误，提高通信系统的可靠性。

(4) 数字调制/解调器 在实际应用中，不同的通信信道能够传送不同的电信号（波形），因此数字调制器的目的是将二进制信息序列映射成适合特定信道传输的信号波形。数

字解调器 (Digital Demodulator) 对信道损伤的发射波形进行处理, 并将每个波形还原成表示所发送数据码元 (二进制或 M 进制) 的估计数字。例如, 采用二进制调制时, 解调器对所接收波形进行处理, 以判定发送的位是 1 还是 0, 这种情况称之为二元判决或硬判决 (Hard Decision)。当需要保密时, 可以有效地对基带信号进行人为扰乱, 即加密, 在接收端就需要进行解密。

评价解调器与译码器性能好坏的测度, 是译码序列中出现错误的概率。更准确地说, 在译码器输出端出现位错误的平均概率是评价解调器—译码器组合性能的依据。一般情况下, 错误概率与码特性、信道中进行信息发送的波形类型、发射机功率、信道特性及解调和译码方法等有关。

1.2.3 数字通信的特点

由于不断增长的对数据通信的需求, 还由于数字传输能够提供模拟传输无法达到的数据处理种类及灵活性, 数字通信系统正受到越来越广泛的重视。与模拟通信相比, 数字通信具有以下一些优点:

1) 抗干扰能力强, 且噪声不积累。数字通信系统中传输的是离散取值的数字波形, 接收端的目标不是精确地还原被传输的波形, 而是从受到噪声干扰的信号中判决出发送端所发送的是哪一个波形。以二进制为例, 信号的取值只有两个, 这时要求在接收端能正确判决发送的是两个状态中的哪一个即可。在远距离传输时, 如微波中继通信, 各中继站可利用数字通信特有的抽样判决再生的接收方式, 使数字信号再生且噪声不积累。而模拟通信系统中传输的是连续变化的模拟信号, 它要求接收机能够高度保真地重现原信号波形, 一旦信号叠加上噪声后, 即使噪声很小, 也很难消除它。

2) 传输差错可控。在数字通信系统中, 可通过信道编码技术进行检错与纠错, 降低误码率, 提高传输质量。

3) 易于与各种数字终端接口, 用现代数字信号处理技术对数字信息进行处理、变换、存储。这种数字处理的灵活性表现为可以将来自不同信源的信号综合到一起传输。

4) 易于集成, 使通信设备微型化, 重量轻。

5) 易于加密处理, 且保密性好。

不过, 数字通信系统也有以下不足:

1) 一般地说, 数字通信系统比模拟通信系统要求更宽的带宽。

2) 需要同步。

但是, 数字通信系统的优点比其缺点多。因此, 数字通信系统的应用越来越广泛。

1.3 通信系统的分类及通信方式

1.3.1 通信系统的分类

1. 按通信业务分类

根据通信业务的类型不同, 通信系统可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。由于电话通信网最为发达普及, 因而其他一些业务也通过公用电话

通信网传输，如电报通信和远距离数据通信都可以通过电话信道传输。综合业务数字通信网适用于各种类型业务的消息传输。

2. 按调制方式分类

根据信道中传输的信号是否经过调制，可将通信系统分为基带传输系统和带通（频带或调制）传输系统。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如市内电话、有线广播；带通传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多，表 1-1 列出了一些常见的调制方式及应用。

表 1-1 常见调制方式及用途

调制方式		典型应用	
连续波调制	模拟调制	标准调幅	广播
		双边带调幅	立体声广播
		单边带调幅	无线电台、数据传输
		残留边带调幅	电视广播、数据传输和传真
		频率调制	微波中继、卫星通信和广播
		相位调制	中间调制
	数字调制	振幅键控	数据传输
		频移键控	数据传输
		相移键控	数据传输、数字微波和空间通信
脉冲波调制	模拟调制	脉幅调制	中间调制和遥测
		脉宽调制	自动控制
		脉位调制	遥测和光纤传输
	数字调制	脉码调制	市话、卫星通信和空间通信
		增量调制	数字电话
		差分脉码调制	电视、电话和图像编码
		自适应脉码调制	数字电话

3. 按信号特征分类

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

4. 按传输媒质分类

按传输媒质分类，通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信系统是用导线（如架空明线、同轴电缆、光导纤维及波导等）作为传输媒质完成的通信，如市内电话、有线电视及海底光缆通信等。无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息的目的，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

5. 按工作波段分类

由于不同频率的电磁波具有不同的传输特性，为了便于充分利用和管理通信资源，可按通信设备的工作频率不同分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信、远红外线通信等。表 1-2 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-2 通信波段与常用传输媒质

频率范围	波 长	符 号	传输媒质	用 途
3 ~ 30kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	VLF (甚低频)	有线、长波无线电	音频、电话、数据终端长距离导航、时标
30 ~ 300kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	LF (低频)	有线、长波无线电	导航、信标、电力线通信
0.3 ~ 3MHz	$10^2 \sim 10^3$ m	MF (中频)	同轴电缆、短波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3 ~ 30MHz	$10 \sim 10^2$ m	HF (高频)	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
30 ~ 300MHz	1 ~ 10m	VHF (甚高频)	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
0.3 ~ 3GHz	10 ~ 100cm	UHF (特高频)	波导、分米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
3 ~ 30GHz	1 ~ 10cm	SHF (超高频)	波导、厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30 ~ 300GHz	1 ~ 100mm	EHF (极高频)	波导、毫米波无线电	微波接力、射电天文学、雷达

工作波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中, λ 为工作波长, 单位为 m; f 为工作频率, 单位为 Hz; c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s。

6. 按信号复用方式分类

传输多路信号有三种复用方式, 即频分复用、时分复用和码分复用。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, 码分复用是用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, 码分复用主要用于移动通信和空间通信的扩频通信中。

1.3.2 通信方式

通信方式是指通信双方之间的工作方式或信号传输方式。

1. 单工、半双工及双工通信

对于点与点之间的通信, 按信息传递的方向与时间的关系, 通信方式可分为单工、半双工及双工通信三种。

单工通信是指信息只能单方向传输的工作方式, 因此只占用一个信道, 如图 1-6a 所示。广播、遥测、遥控、无线电寻呼等就是单工通信方式的例子。

半双工通信是指通信双方都能收发信息, 但不能同时进行收和发的工作方式, 如图 1-6b 所示。例如, 使用同一载频的普通对讲机, 问询及检索等都是半双工通信方式。

全双工通信是指通信双方可同时进行收发信息的工作方式。一般情况全双工通信的信道必须是双向的信道, 如图 1-6c 所示。电话是全双工通信一个常见的例子, 通话的双方可同时进行说和听。计算机之间的高速数据通信也是这种方式。

2. 按数字信号排列顺序分

在数字通信中，按数字信号代码排列的顺序可分为并行传输和串行传输。

并行传输是将代表信息的数字序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输，如图 1-7a 所示。并行传输的优点是节省传输时间，但需要传输信道多、设备复杂、成本高，故较少采用，一般适用于计算机和其他高速数字系统，特别适用于数字设备之间的近距离通信。

串行传输是数字序列以串行方式一个接一个地在一条信道上传输，如图 1-7b 所示。通常远距离数字通信都采用这种传输方式。

此外，还可以按通信的网络形式划分。

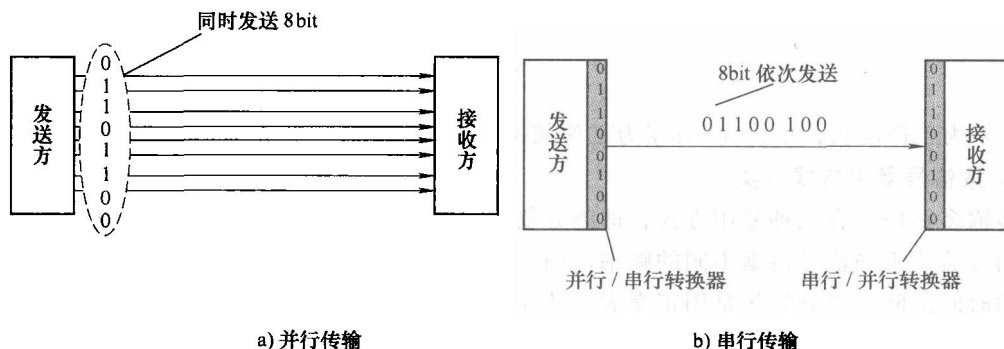


图 1-7 并行传输和串行传输示意图

1.4 信息及其度量

正如人们看到的那样，通信系统的目的是将信息由信源传输到受信者，信源发出的消息常常是随机的，所以在没有收到消息前，受信者不能确定信源发出的是什么消息。为了对通信系统的传输能力进行定量的分析和衡量，就必须对信息进行定量的描述。不同的消息含有不同数量的信息，同一个消息对不同的接收对象来说，信息量的多少也不同，所以对信息的度量应当是客观的。

如果信源中某一消息发生的不确定性越大，一旦它发生，并为受信者收到，获得的信息量也就越大。根据概率论知识，事件的不确定性可以用事件出现的概率来描述，可能性越小，概率越小；可能性越大，概率越大。因此，消息中包含的信息量与事件发生的概率密切相关。例如，“海洋受到了核爆炸的破坏”这条消息比“今天下雨”这条消息包含更多的信息量，即事件出现的概率越小，事件中包含的信息量越大。

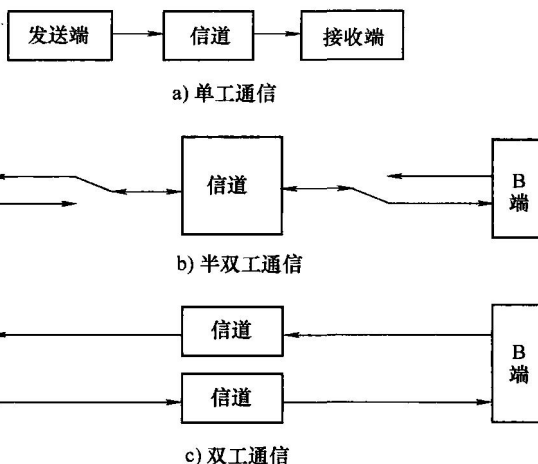


图 1-6 单工、半双工及双工通信原理示意图

通常远距离数字通信都采用这种传输方式。

基于以上的认识,对信息量作如下定义:若一个消息 x_i 出现的概率为 $P(x_i)$,则这一消息所含的信息量为

$$I(x_i) = \log_a \left[\frac{1}{P(x_i)} \right] = -\log_a P(x_i) \quad (1-1)$$

信息量 $I(x_i)$ 的单位与对数底数 a 有关。对数以 2 为底时,信息量的单位为比特 (bit);对数以 e 为底时,信息量的单位为奈特;对数以 10 为底时,信息量的单位为哈特莱 (Hartley)。目前应用最广泛的单位是位。

M 个离散消息需要用 M 个符号表示,也就是说,传送 M 个消息之一和传送 M 个符号之一是等价的,所以消息所含的信息量就是符号所含的信息量。

式 (1-1) 是单一符号出现时的信息量。对于由一串符号构成的消息,假设各符号的出现是相互独立的,根据信息量相加的概念,整个消息的信息量为

$$I = - \sum_{i=1}^N n_i \log_2 P(x_i) \quad (1-2)$$

式中, n_i 为第 i 种符号出现的次数; $P(x_i)$ 为第 i 种符号出现的概率; N 为信源的符号种类。

当消息很长时,用符号出现概率和次数来计算消息的信息量是比较麻烦的,此时可用平均信息量的概念来计算。平均信息量是指每个符号所含信息量的统计平均值, N 种符号的平均信息量为

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

由于平均信息量 H 同热力学中的熵形式一样,故通常又称它为信息源的熵,其单位为 bit/符号。

有了平均信息量 $H(x)$ 和符号的总个数 N ,可求出总信息量为

$$I = H(x)N \quad (1-4)$$

可以证明,当信源中每种符号出现的概率相等,而且各符号的出现为统计独立时,该信源的平均信息量最大,有

$$H_{\max} = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N \quad (1-5)$$

例 1-1 一离散信源由“0”“1”“2”“3”四个符号组成,它们出现的概率分别为 $3/8$ 、 $1/4$ 、 $1/4$ 、 $1/8$,且每个符号的出现都是独立的。试求某消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解 此消息中,“0”出现 23 次,“1”出现 14 次,“2”出现 13 次,“3”出现 7 次,共有 57 个符号,故该消息的信息量 (单位为 bit)

$$I = 23 \log_2 8/3 + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108$$

每个符号的算术平均信息量 (单位为 bit/符号) 为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{108}{57} = 1.89$$

若用熵的概念来计算,则每个符号的算术平均信息量 (单位为 bit/符号) 为

$$H = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906$$

则该消息的信息量 (单位为 bit)

$$I = 57 \times 1.906 = 108.64$$

以上两种结果略有差别的原因在于它们平均处理方法不同。前一种按算数平均的方法,结果可能存在误差。这种误差将随着消息序列中符号数的增加而减小。当消息序列较长时,用熵的概念计算更为方便。

以上介绍了离散信号所含信息量的度量方法。对于连续信号,信息论中有一个重要结论,就是任何形式的待传信息都可用二进制形式表示而不失主要内容。由抽样定理可知:一个频带受限的连续信号,可以用每秒一定数目的抽样值代替。而每个抽样值可以用若干个二进制脉冲来表示。因此,信息量的定义和计算同样适用于连续信号。

1.5 通信系统的主要性能指标

为了衡量通信系统的质量优劣,必须使用通信系统的性能指标,即质量指标。这些指标是对整个系统进行综合评估而规定的。通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题,涉及通信的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等。但是从研究信息的传输来说,通信的有效性和可靠性是最重要的指标。有效性指的是传输一定的信息量所消耗的信道资源(带宽或时间),而可靠性指的是接收信息的准确程度。这两项指标体现了对通信系统最基本的要求。

有效性和可靠性这两个要求通常是矛盾的,因此只能根据需及技术发展水平尽可能取得适当的统一。例如,在一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速度;或者在维持一定有效性条件下,使信息传输质量尽可能地提高。

1.5.1 模拟通信系统的质量指标

1. 有效性

模拟通信系统的有效性用有效传输带宽来度量。同样的消息采用不同的调制方式,则需要不同的频带宽度。频带宽度越窄,则有效性越好。如传输一路模拟电话,单边带信号只需要4kHz带宽,而常规调幅或双边带信号则需要8kHz带宽,因此,在一定频带内,用单边带信号传输的路数比常规调幅信号多一倍,也就是可以传输更多的消息,显然,单边带系统的有效性比常规调幅要好。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性用接收端最终的输出信噪比来度量。信噪比越大,通信质量越高。如普通电话要求信噪比在20dB以上,电视图像则要求信噪比在40dB以上。信噪比是由信号功率和传输中引入的噪声功率决定的。不同的调制方式在同样信道条件下所得到的输出信噪比是不同的。例如,调频信号的抗干扰性能比调幅信号好,但调频信号所需的传输带宽却宽于调幅信号。

1.5.2 数字通信系统的质量指标

数字通信系统的有效性用传输速率来衡量,可靠性用差错率来衡量。

1. 传输速率

码元传输速率 R_b 。定义为每秒传送码元的数目,单位为波特(Baud)。码元传输速率又