

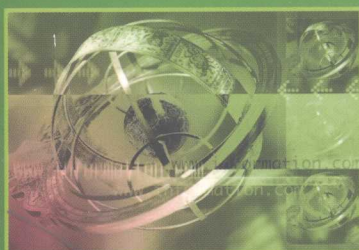


本书赠送电子教案

❖ 普通高等教育电子信息类规划教材 ❖

通信原理基础教程

BASIC COURSE IN COMMUNICATION PRINCIPLES



黄葆华 沈忠良 张宝富 编著
谢佑兴 主审



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TN911/117

2008

普通高等教育电子信息类规划教材

通信原理基础教程

黄葆华 沈忠良 张宝富 编著
谢佑兴 主审

机械工业出版社

本书以各种现代通信系统模型为主线,以数字通信原理与技术为重点,系统地阐述了通信系统的基本组成、基本原理和基本的实现方法。

全书共9章,内容包括基础知识(确知信号和随机信号的分析)、信道、模拟调制解调技术、数字基带传输系统、数字调制解调技术、模拟信号的数字传输系统、同步系统和信道编译码技术等。

本书既可以作为通信工程、电子工程、信息工程、计算机通信工程等相关专业本科生和大专生的教材,也可作为相关科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理基础教程/黄葆华等编著. —北京:机械工业出版社,2008.5

普通高等教育电子信息类规划教材

ISBN 978-7-111-24005-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第057560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:李馨馨 版式设计:冉晓华 责任校对:吴美英

封面设计:鞠杨 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008年7月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·24.25印张·602千字

0 001—5 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24005-1

定价:39.00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) 88379739

封面无防伪标均为盗版

前 言

随着我国高等教育的空前发展,招生规模也迅速扩大。为了满足社会对“大专业、宽口径”人才的需求,越来越多的院校开设了“通信原理”课程。由于不同专业开设的先修课程不同,使得在学习通信原理这一课程时学生的基础知识差别很大。本书专为数学基础、通信专业基础相对薄弱一些的学生编写。在编写过程中,既保证了知识的完整性和系统性,又力求难度适中、通俗易懂。除此之外,与其他同类教材相比,本书还具有如下特点:

1. 在具体内容的阐述中,力求深入浅出、条理清晰、物理概念清楚,避免过深过难的数学推导,注重结论的物理意义及实际应用。

2. 在内容的安排上,将最佳接收部分的内容融入到“数字基带传输”和“数字调制技术”这两章中,这两章涉及的数字接收机都使用了最佳接收机的结构。这样做的好处是:既确保了知识的完整性和系统性,又使本书的知识结构更为紧凑;与国外经典教材接轨。目前的国外教材及文献资料通常使用最佳接收机结构,接收机的误码性能公式中也通常使用 E_b/n_0 ;将最佳接收理论与具体的接收机结合起来,也便于教师讲授和学生的理解,同时还可以节省学时。

3. 书中配有典型例题解析,书后附有较为详细的课后习题参考答案,便于自学和对原理、概念的更好理解。

4. 每一章都有基于 SystemView 的仿真实例。在当前课堂教学占主体、实践环节还不够完善的情况下,将计算机仿真技术引入通信原理课程的教学,通过计算机仿真,不仅使复杂的理论变得易于理解,使抽象的概念变得形象、生动,还可以激发学生的学习兴趣,使学生积极主动地融入教学过程,充分发挥学生在学习中的主观能动性,实现“教学相长”,提高教学效果。

5. 考虑到使用本书的部分学生在此之前没有学过“信号与系统”等涉及确知信号分析的内容,在本书的第2章中增加了确知信号分析这部分内容。

全书共9章。第1章为通信系统概述,主要介绍了通信系统的概念、组成和主要的性能指标,概述了通信技术的现状和发展趋势。第2章为信号与噪声,主要介绍了确知信号和随机信号的分析方法。这部分内容是学习通信原理课程的基础知识。第3章为信道,概述了调制信道和编码信道,分析了恒参信道和随参信道的特性及其对信号传输所产生的影响,介绍了分集技术及信道容量的概念。第4章为模拟调制,主要介绍了各种模拟调制及解调技术的实现原理和方法,分析了各种调制解调技术的抗噪声性能,最后介绍了频分复用技术。第5章为数字信号的基带传输,概述了数字基带系统的组成及各部分的作用,讨论了无码间干扰系统的传输特性,分析了数字基带传输系统的抗噪声性能,介绍了眼图和均衡技术。第6章为数字调制技术,概述了数字调制解调的基本原理,重点讨论了二进制数字调制解调的原理、实现方法和抗噪声性能,同时介绍了多进制数字调制解调的原理和实现方法。第7章为模拟信号的数字传输,阐述了低通信号的取样定理,讨论了均匀量化和非均匀量化的原理及实现方法,重点介绍了脉冲编码调制(PCM)系统和增量调制(ΔM)系统的组成、工作原

理及抗噪声性能,最后介绍了时分复用技术。第8章为同步原理,重点讨论了载波同步、位同步和群同步的作用、实现原理及有关性能。第9章为信道编码,介绍了信道编码的基本概念,重点讨论了线性分组码的编码和译码方法及纠错性能,最后介绍了 m 序列及其性质。

本书由黄葆华、沈忠良编写。沈忠良编写了第1~4章的原理部分及各章中的典型例题解析;黄葆华编写了第5~9章的原理部分及各章中的仿真实例;张宝富参与了目录的编排工作。黄葆华负责全书的统编和定稿工作。

全书计划为80学时。也可根据需要对内容作适当删减,用于较少学时的教学。

在本书的编写过程中,解放军理工大学通信工程学院无线通信系由晓民主任、潘焱副教授、教保科许晔峰科长以及无线教研室各位同事,特别是通信原理教学组各位同事给予了很大的支持和帮助;谢佑兴教授非常认真地审阅了全书并提出了修改参考意见;卫星重点实验室的吕晶教授帮助解决了数学推导、仿真实现等方面遇到的许多问题;刘波女士也对本书的编写工作给予了极大的支持,在此表示深深的谢意。最后,还要特别感谢移动通信教研室蔡跃明教授在本书出版过程中给予的帮助。

本书配套资源有电子教案、全部习题的详细解答、SystemView 的仿真实例,读者可在机械工业出版社网站 (www.cmpedu.com) 上下载。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处难免,敬请读者不吝赐教,提出宝贵意见和建议。

编者

2007年12月于南京

目 录

前言

第1章 通信系统概述	1
1.1 通信系统模型	1
1.1.1 一般模型	1
1.1.2 模拟与数字通信系统模型	2
1.2 通信系统分类	4
1.3 信息及其度量	6
1.4 通信系统性能指标	7
1.4.1 模拟通信系统的性能指标	8
1.4.2 数字通信系统的性能指标	8
1.5 通信发展介绍	10
1.5.1 通信发展简史	10
1.5.2 通信技术的现状和发展趋势	11
1.6 典型例题解析	12
1.7 数字信号的中继通信原理仿真	14
1.7.1 数字信号的中继通信	14
1.7.2 仿真模型	14
1.7.3 仿真演示	15
1.8 习题	18
第2章 信号与噪声	19
2.1 确知信号分析	19
2.1.1 周期信号的傅里叶级数	19
2.1.2 周期矩形脉冲信号的频谱分析	21
2.1.3 非周期信号的频谱函数——傅里叶变换	23
2.1.4 卷积特性的应用	30
2.1.5 功率谱密度和能量谱密度	32
2.1.6 信号带宽	34
2.1.7 波形的相关	35
2.1.8 相关函数与谱密度 $G(f)$ 和 $P(f)$ 的关系	39
2.2 概率论初步	40
2.2.1 随机事件与概率	40
2.2.2 随机变量与概率分布	41

2.2.3 随机变量的数字特征	44
2.3 随机过程	46
2.3.1 随机过程的定义	46
2.3.2 随机过程的统计特性	47
2.3.3 随机过程的数字特征	47
2.3.4 平稳随机过程及其各态历经性	49
2.3.5 平稳随机过程的频谱特性	51
2.3.6 周期平稳随机过程	54
2.4 高斯随机过程	54
2.5 随机过程通过线性系统	58
2.6 几种典型噪声模型	61
2.6.1 白噪声	61
2.6.2 理想低通白噪声	62
2.6.3 理想带通白噪声	63
2.6.4 窄带高斯噪声	63
2.6.5 正弦波加窄带高斯噪声	65
2.7 匹配滤波器	65
2.8 典型例题解析	70
2.9 信号分析仿真实例	74
2.9.1 矩形信号的幅度谱仿真	74
2.9.2 周期信号分析的仿真	75
2.10 习题	79
第3章 信道	82
3.1 信道的定义、分类和模型	82
3.1.1 信道的定义	82
3.1.2 信道的分类	82
3.1.3 信道的模型	83
3.2 恒参信道及其传输特性	84
3.2.1 有线信道	85
3.2.2 无线视距中继	87
3.2.3 卫星中继信道	88
3.2.4 恒参信道传输特性	89
3.3 随参信道及其传输特性	91
3.3.1 短波电离层反射信道	91

3.3.2	对流层散射信道	94	5.3	数字基带信号的传输及码间 干扰	160
3.3.3	陆地移动信道	95	5.3.1	数字基带信号的传输	160
3.4	随参信道特性及其对信号传输 的影响	97	5.3.2	码间干扰	161
3.5	随参信道特性的改善—分集 接收	100	5.4	基带系统的无码间干扰传输特性	162
3.6	信道容量的概念	102	5.4.1	无码间干扰的条件与奈奎斯 特准则	162
3.6.1	离散信道的信道容量	102	5.4.2	无码间干扰传输特性实例 介绍	164
3.6.2	连续信道的信道容量	104	5.5	无码间干扰时噪声对传输性能的 影响	169
3.7	典型例题解析	106	5.5.1	接收机的作用与组成	169
3.8	信道仿真	109	5.5.2	接收机的误码率计算	170
3.8.1	恒参信道幅频、相频失真 仿真	109	5.6	多进制数字基带信号的传输	174
3.8.2	多径传播仿真	112	5.6.1	多进制数字基带传输系统	174
3.9	习题	114	5.6.2	多进制数字基带信号的功 率谱和带宽	176
第4章	模拟调制	116	5.6.3	多进制数字基带传输系统 的误码率	177
4.1	幅度调制	117	5.7	眼图	180
4.1.1	完全调幅	117	5.8	均衡	182
4.1.2	抑制载波双边带调制	122	5.8.1	时域均衡原理	182
4.1.3	单边带调制	125	5.8.2	均衡器抽头系数的确定	184
4.1.4	残留边带调制	129	5.9	典型例题解析	185
4.2	角度调制	130	5.10	数字基带传输仿真	190
4.2.1	角调制的基本概念	131	5.10.1	AMI 码和 HDB3 码的功率谱 仿真	190
4.2.2	窄带调频与宽带调频	132	5.10.2	眼图仿真	192
4.2.3	调频信号的产生	136	5.11	习题	194
4.2.4	调频信号的解调及抗噪声 性能	137	第6章	数字调制技术	196
4.3	频分复用	140	6.1	二进制振幅调制	197
4.4	典型例题解析	141	6.1.1	2ASK 信号的产生	197
4.5	模拟调制仿真	142	6.1.2	2ASK 信号的功率谱和带宽	198
4.5.1	完全调幅/双边带调制调制解调 原理仿真模型	142	6.1.3	2ASK 信号的解调及抗噪声 性能	199
4.5.2	仿真演示	143	6.2	二进制频率调制	204
4.6	习题	146	6.2.1	2FSK 的产生	205
第5章	数字信号的基带传输	148	6.2.2	2FSK 信号的解调及抗噪声 性能	207
5.1	数字基带信号的码型和波形	150	6.3	二进制数字相位调制	210
5.1.1	数字基带信号的码型	150	6.3.1	二进制绝对调相	210
5.1.2	数字基带信号的波形	154	6.3.2	二进制相对相位调制	216
5.2	数字基带信号的功率谱分析	155	6.4	二进制数字调制技术的性能	
5.2.1	二元数字基带信号的功率 谱分析	155			
5.2.2	其他码型的数字基带信号功 率谱分析	158			

比较	222	指标	300
6.5 多进制数字调制技术	223	8.2.4 位定时误差对系统误码性能的影响	302
6.5.1 多进制数字振幅调制	223	8.3 群同步	303
6.5.2 多进制数字频率调制	225	8.3.1 起止式同步法	304
6.5.3 多进制数字相位调制	228	8.3.2 连贯式插入法	304
6.5.4 多进制正交幅度调制	235	8.3.3 间歇式插入法	306
6.6 典型例题解析	239	8.3.4 群同步系统的性能指标	307
6.7 数字调制技术仿真	243	8.3.5 群同步的保护	309
6.7.1 二进制数字调制波形及频谱仿真	243	8.4 典型例题解析	310
6.7.2 四进制数字相位调制 4PSK 的调制与解调仿真	247	8.5 同步原理仿真	313
6.8 习题	251	8.5.1 Costas 环提取同步载波仿真	313
第 7 章 模拟信号的数字传输	254	8.5.2 巴克码识别器仿真	315
7.1 脉冲编码调制	254	8.6 习题	317
7.1.1 取样	255	第 9 章 信道编码	318
7.1.2 取样信号的量化	258	9.1 信道编码的检错、纠错原理及有关概念	319
7.1.3 编码	264	9.1.1 信道编码的检错、纠错原理	319
7.1.4 PCM 系统的误码噪声	268	9.1.2 信道编码使系统误码率降低	320
7.2 增量调制	270	9.1.3 码长、码重、码距和编码效率	321
7.2.1 简单增量调制	270	9.1.4 最小码距 d_0 与码的纠、检错能力之间的关系	321
7.2.2 简单增量调制系统中的量化噪声	271	9.1.5 信道编码的分类	323
7.2.3 自适应增量调制	274	9.1.6 差错控制方式	323
7.2.4 PCM 与 ΔM 系统性能比较	277	9.2 常用检错码	324
7.3 时分复用	278	9.2.1 奇偶监督码	324
7.3.1 时分复用原理	278	9.2.2 行列奇偶监督码	324
7.3.2 时分复用和频分复用的比较	280	9.2.3 恒比码	325
7.3.3 PCM30/32 路系统帧结构	280	9.3 线性分组码	325
7.4 典型例题解析	282	9.3.1 线性分组码的特点	325
7.5 脉冲编码调制系统的仿真	285	9.3.2 线性分组码的编码	327
7.5.1 取样定理仿真	285	9.3.3 线性分组码的译码	332
7.5.2 脉冲编码调制系统仿真	287	9.3.4 汉明码	337
7.6 习题	289	9.3.5 循环码	339
第 8 章 同步原理	292	9.4 其他纠错码介绍	345
8.1 载波同步	292	9.4.1 卷积码	345
8.1.1 直接法	293	9.4.2 交织码	346
8.1.2 插入导频法	295	9.4.3 级联码	347
8.1.3 载波同步系统的性能指标	297	9.5 m 序列	348
8.2 位同步	297	9.5.1 m 序列的产生	348
8.2.1 插入导频法	297		
8.2.2 直接法	299		
8.2.3 位同步系统的主要性能			

9.5.2	m 序列的性质	350
9.6	典型例题解析	352
9.7	信道编译码仿真	355
9.7.1	奇偶校验码编译码仿真	355
9.7.2	(7, 4) 汉明码编码与译码 的仿真	358
9.8	习题	362
附录		364
	附录 A 误差函数及互补误差函数	364
	附录 B 常用的三角公式	365
	附录 C 常用的积分公式及级数	365
	附录 D 2FSK 相干解调中上、下支路取 样值的均值和方差推导	365
	附录 E 各章习题参考答案	367
	附录 F 通信原理实验箱简介	378
	参考文献	380

附录 A	误差函数及互补误差函数	364
附录 B	常用的三角公式	365
附录 C	常用的积分公式及级数	365
附录 D	2FSK 相干解调中上、下支路取 样值的均值和方差推导	365
附录 E	各章习题参考答案	367
附录 F	通信原理实验箱简介	378
参考文献		380

第1章 通信系统概述

当前是信息技术飞速发展的时代，信息交流已成为人们生活的需要。通信与传感技术、计算技术紧密结合，构成现代社会的“神经中枢”。通信技术已成为推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。

通俗地说，通信就是信息的传递，通信学科就是研究如何快速而可靠地将信息从一地传到另一地。从这个意义上说，自从有了人类社会，也就有了通信。如原始的手语，古代的消息树、烽火台、驿站、旗语，及至近现代的信函等，都属于通信的范畴。但是，我们这里要研究的通信是指电通信，也就是以电信号（包括光信号，因为光也是一种电磁波）作为信息载体的通信方式，如电报、电话、传真、雷达、导航、广播电视及网络音视频和图文等。

1.1 通信系统模型

完成信息传递所需的通信设备和传输媒介组成了一个通信系统。实际的通信系统在表现形式上千差万别，但都具有一些共性，我们将这些共性抽象概括为通信系统模型。

1.1.1 一般模型

基于点与点之间的通信系统，可用图 1-1 所示的一般模型来描述。



图 1-1 通信系统的一般模型

1. 信源和输入转换器

信源是信息的来源，如语音、文字、图像、数据等。输入转换器的作用是将信源输出的非电信号转换为随时间变化的电信号，如传声器完成声/电转换，摄像头完成光/电转换，传真机扫描装置将图文转换为电信号。这种直接由信源转换得到的电信号称为基带信号，它的特点是其频谱由零频附近开始延伸到某个通常小于几兆赫兹的有限值。

2. 发送设备

发送设备对基带信号进行处理，使之适合信道传输，如滤波、调制、放大等，对于数字信号，还有编码、加密等环节。滤波是为了滤除带外噪声，同时防止信号向带外辐射。放大是将弱信号变成强信号。调制就是用基带信号来控制未调载波的参量（如幅度、频率、相位等），从而使已调载波携带基带信息的过程。这种携带基带信息的已调信号称为频带信号。

3. 信道和噪声

信道是信号传输的通路，它是将电信号从一地传送到另一地的传输媒介，如双绞线、同轴电缆、光缆等有线信道和中长波、短波、微波中继及卫星中继等无线信道。

噪声来源于三个方面：一是通信设备内部由于电子作不规则运动而产生的热噪声；二是来自外部的噪声，如雷电干扰、宇宙辐射、邻近通信系统的干扰、各种电器开关通断时产生的短促脉冲等；三是由于信道特性（幅频和相频特性）不理想，使得传输的信号变形失真而产生的干扰。上述前面两种噪声与信号存在与否无关，是以叠加的形式对信号形成干扰的，称之为“加性噪声”。最后一种干扰只有信号出现时才表现出来，称为“乘性干扰”。一般来说，噪声主要来自于信道，为了分析方便，将上述三种噪声抽象为一个噪声源并集中在信道上加入。

4. 接收设备

接收设备的主要任务是从接收到的含噪信号中提取出有用信号。若是基带传输，则要经过放大、滤波等处理。对于频带传输，则还要对信号进行解调，将频带信号还原为基带信号。

5. 输出转换器和信宿

信宿是信息的接收者，而输出转换器的作用是将电信号变成受信者能够识别的信号，如扬声器进行电/声变换，显示屏完成电/光变换等。

1.1.2 模拟与数字通信系统模型

1. 模拟信号与数字信号

信息通常寄托在电信号的某一个或几个参量上（如连续波的幅度、频率或相位；脉冲波的幅度、宽度或位置等）。按信号参量的取值方式不同可把信号分为模拟信号和数字信号。

凡携带信息的信号参量的取值是连续的，且直接与信息相对应的信号，称为模拟信号。如电话机送出的语音信号，其幅度表示音量的大小，频率表示音调的高低，这两个参量都是连续取值的，所以是模拟信号。

凡携带信息的信号参量只能取有限个值，并且常常不直接与信息相对应的信号，称为数字信号，如电传机送出的脉冲，只取0（V）、A（V）两个值，靠取值变化的排列表示信息，其幅度间接与信息对应，所以是数字信号。

由此可知，时间离散信号不一定是数字信号，而时间连续信号不一定是模拟信号，关键是看携带信息的参量是连续的还是离散的。

比如图 1-2b 的 $f(nT)$ 是对图 1-2a 的连续信号 $f(t)$ 进行取样而得到的 PAM（脉冲幅度调制）信号， $f(nT)$ 是时间离散信号，但其携带信息的参量（幅度）的取值仍是连续的，所以 $f(nT)$ 仍然是模拟信号。

再比如图 1-3 所示的 PSK（相移键控）信号时间上是连续的，但代表信息的相位只取 0 和 π 二值，是离散的，所以是数字信号。

2. 模拟通信系统模型

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信系统传输的是模拟信号，其抽象模型如图 1-4 所示。

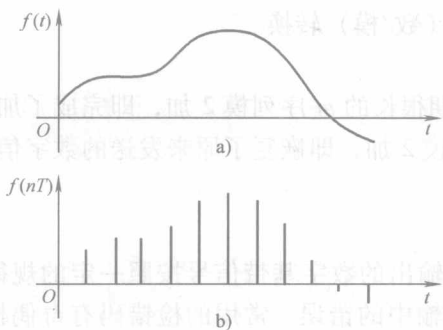


图 1-2 连续信号与 PAM 信号

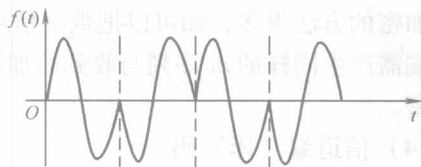


图 1-3 PSK 信号波形



图 1-4 模拟通信系统模型

此时，信息源是模拟的，输出的模拟基带信号需经过调制器变换成适合于信道传输的频带信号后送到信道上，相应地，收端对频带信号进行解调，恢复出原始的基带信号，送给受信者。需要注意的是，发送接收装置还应包括放大、滤波等，这里都简化到了调制解调装置中。

3. 数字通信系统模型

数字通信系统传输的是数字信号，其抽象模型如图 1-5 所示。

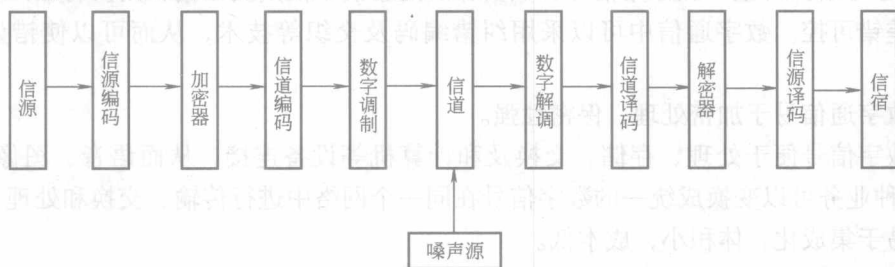


图 1-5 数字通信系统模型

(1) 信源

信源一般指由电传机、计算机等送来的 1010 数字基带信号，也可以是模拟信号。

(2) 信源编（译）码

信源编码的作用有以下两个：

①若信源是模拟的，则信源编码包括取样、量化、编码即 A/D（模/数）转换，如后面要学习的 PCM（脉冲编码调制）编码， ΔM （增量调制）编码等。

②降低信源的冗余度即压缩编码，如哈夫曼编码、LZW（Lempel Ziv Welch）压缩编码、声码器技术等。

信源译码完成编码的逆过程，即解压缩和 D/A（数/模）转换。

(3) 加（解）密

加密的方法很多，如可以把数字信号和一个周期很长的 m 序列模 2 加，即完成了加密；接收端需产生同样的 m 序列与收到的加密信号进行模 2 加，即恢复了原来发送的数字信号，即解密。

(4) 信道编（译）码

一般称为纠错编（译）码。它是将信源编码器输出的数字基带信号按照一定的规律加入冗余码元，以便在接收端译码器中发现或纠正传输中的错误。常用的检错码有奇偶校验码、CRC（循环冗余校验）及校验和等，常用的纠错码有汉明码、BCH 码、RS（Reed-Solomon）码、卷积码及 TURBO 码等。

(5) 数字调制（解调）器

数字调制器将数字基带信号变换为适合于信道传输的频带信号，基本的数字调制方式有 ASK（幅移键控）、FSK（频移键控）、PSK（相移键控）等。

解调器则将收到的频带信号还原为数字基带信号。

4. 数字通信的优缺点

与模拟通信相比，数字通信主要有如下优点：

1) 抗噪声性能好。数字信号携带信息的参量只取有限个值，如单极性二进制信号“1”码对应 A V，“0”码对应 0 V，经过信道传输后叠加上噪声从而产生波形失真，只要在判决时刻噪声不超过判决门限（这里为 $A/2$ ），则可正确恢复“1”、“0”码的波形。模拟信号由于携带信息的参量连续取值，所以噪声的影响无法消除。

2) 接力通信时无噪声积累。模拟信号经中继站时，每一站噪声积累使通信质量下降，而数字信号每站都再生一次原始信号，只要噪声的影响不使判决出错，则没有噪声积累。

3) 差错可控。数字通信中可以采用纠错编码及交织等技术，从而可以使错误概率降低。

4) 数字通信易于加密处理，保密性强。

5) 数字信号便于处理、存储、交换及和计算机等设备连接，从而语音、图像、文字、数据等多种业务可以变换成统一的数字信号在同一个网络中进行传输、交换和处理。

6) 易于集成化，体积小，成本低。

数字通信的缺点是占用的频带比较宽。如 PSTN（公众业务电话网）中采用的是 PCM 编码，每路话音编码为 64kb/s ，相应的传输带宽约 64kHz ，而模拟通信使用 $3\sim 4\text{kHz}$ 带宽即可传输一路话音。但随着压缩编码技术及光纤等宽带信道技术的发展，这方面的问题在某种程度上已得到解决。

数字通信的另一个缺点是存在通信门限，即 S/N （信噪比）低于一定程度时，不能进行有效的通信。如短波通信系统中仍采用模拟而非数字语音的通信方式就是这个原因。

1.2 通信系统分类

根据不同的目的及不同的角度，通信系统有许多不同的分类方法，下面介绍几种常见的通信系统分类体系。

1. 按信号特征分类

按照通信系统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。

2. 按通信业务分类

根据通信业务的不同，通信系统可以分为电话通信、电报通信、图像通信及传真通信、数据通信、广播电视等。

3. 按调制方式分类

根据是否采用调制，通信系统可分为基带传输和频带传输，而频带传输又可分为模拟调制和数字调制。基本的模拟调制方式如 AM（调幅）、FM（调频）和 PM（调相）等，数字调制方式如 ASK（幅移键控）、FSK（频移键控）和 PSK（相移键控）等。

4. 按传输媒介分类

按传输信号的媒介不同，可分为有线通信和无线通信两大类。有线通信是用导线作为媒介来完成通信的，如架空明线、双绞线、同轴电缆、光纤等；无线通信是依靠电磁波在空间传播达到通信的目的，如短波电离层传播、大气对流层散射、微波视距传播、卫星中继等。

5. 按工作波段分类

按照通信设备工作频率不同，可分为中长波通信、短波通信、超短波通信、微波通信、远红外通信等。需要提醒的是，自由空间传播时，无线电波波长和频率的关系为

$$\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / f \quad (1-1)$$

式中， λ 为工作波长 (m)； f 为工作频率 (Hz)； c 为光速 (m/s)。

表 1-1 列出了通信中使用的不同频段及其主要用途。

表 1-1 通信波段与常用传输媒介

频率范围	波 长	符 号	传输媒介	用 途
3Hz ~ 30kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频电话、岸与潜艇通信、超远距离导航
30 ~ 300kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 LF	有线线对 长波无线电	电力线通信、地下岩层通信、远距离导航
300kHz ~ 3MHz	$10^2 \sim 10^3$ m	中频 MF	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、业余无线电、船用通信、中距离导航
3 ~ 30MHz	$10 \sim 10^2$ m	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	短波广播、移动无线电话、军用无线电通信、业余无线电通信
30 ~ 300MHz	1 ~ 10m	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	调频广播、电视、雷达、军用无线电通信
300MHz ~ 3GHz	0.1 ~ 1m	特高频 UHF	波导 分米波无线电	陆地移动通信、电视、超短波电台及对讲机、ISM
3 ~ 30GHz	1 ~ 10cm	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波视距接力、卫星和空间通信、雷达
30 ~ 300GHz	1 ~ 10mm	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	微波视距接力、雷达、射电天文学
$10^5 \sim 10^6$ GHz	$3 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$ m	紫外、可见光、红外	光纤 激光空间传播	光通信

1.3 信息及其度量

1. 信息量定义

前面讲述中，我们都用了“信息”这个词，在日常生活中，“信息”和“消息”往往不加以区分，在科学技术上，它们有什么区别呢？消息一般指对人或事物情况的报道，其表现形式有语言、文字、数据、图像等。信息是指消息中含有的有意义的内容，即接收者原来不知而待知的内容。在有效的通信中，信源发送的信号是不确定的，接收者在收到信号后不确定性减小或消失，则接收者从不知到知，从而获得信息。不同形式的消息可以包含相同的信息，如语音和文字发送的天气预报所含的信息相同。由此可见，通信系统中传输的具体对象是消息，但是通信的最终目的是传递信息。

传输信息的多少用“信息量”来衡量。对于接收者而言，某些消息比另外一些消息传递更多的信息。比如，天气预报部门公布“明年夏天雨水较多”或“明年夏天会有一场大雪”两个消息，显然后者给人们带来更多的信息。因为前一事件很可能发生，不足为奇，后一事件却极难发生，听后会使人惊奇。这表明消息确实有其量值的概念。可以看出，消息中的信息量与消息发生的概率有密切关系，事件可能性越小，越惊奇，给接收者带来的信息量越大。必然事件 ($P=1$) 传递的信息量是 0，概率极低事件 ($P \rightarrow 0$) 的信息量 $\rightarrow \infty$ 。

设信息源是由 q 个离散符号（事件） s_1, s_2, \dots, s_q 组成的集合。每个符号的发生是相互独立的，第 i 个符号 s_i 出现的概率是 $P(s_i)$ ，且 $P(s_i)$ 满足非负、归一性，即 $0 \leq P(s_i) \leq 1$ ，

$\sum_{i=1}^q P(s_i) = 1$ ，则第 i 个符号 s_i 含有的信息量为

$$I(s_i) = \log_2 \frac{1}{P(s_i)} = -\log_2 P(s_i) \quad (1-2)$$

几点说明：

1) 信息量 $I(s_i)$ 可以看做接收端未收到消息前，发送端发送消息 s_i 所具有的不肯定程度。

2) 若干个互相独立事件构成的消息，所含信息量等于各独立事件所含信息量之和，也就是说，信息具有可加性。如两个独立事件 s_i 与 s_j 的概率分别为 $P(s_i)$ 和 $P(s_j)$ ，则 $P(s_i s_j) = P(s_i)P(s_j)$ ，从而由式 (1-2) 可得

$$I(s_i s_j) = \log_2 \frac{1}{P(s_i s_j)} = I(s_i) + I(s_j)$$

3) 信息量的单位与对数的底数有关。底数为 2，信息量的单位为比特 (bit)；底数为自然数 e (≈ 2.7183)，则信息量的单位为奈特 (nit)；底数为 10 时，信息量的单位为哈特 (hart)。通常使用的单位为比特。

4) 对于二进制信源符号，只有 0 和 1，即 s_0 和 s_1 ，假设 0 和 1 等概率出现，则有 $I(s_0) = I(s_1) = -\log_2(1/2) \text{ bit} = 1 \text{ bit}$ ，即等概率二进制信源每一符号的信息量为 1bit。同理，对于四进制，信源符号有 0, 1, 2, 3，假设各信源符号等概率出现，则有 $I(s_i) = -\log_2(1/4) \text{ bit} = 2 \text{ bit}$ ，符号信息量是二进制的 2 倍。以此类推，对于 $M=2^k$ 进制，假设各信源符号等概率出现，有 $I(s_i) = -\log_2(1/2^k) = k \text{ bit}$ ，符号信息量是二进制的 k 倍。

2. 熵的概念

一般地, 信源各符号出现的概率并不相等, 即各符号所含的信息量不同。若各符号的出现统计独立, 即信源是无记忆的, 则平均每符号信息量为

$$H(S) = \sum_{i=1}^q P(s_i) I(s_i) = - \sum_{i=1}^q P(s_i) \log_2 P(s_i) \quad (1-3)$$

由于平均信息量 $H(S)$ 同热力学中的熵形式相似, 因此又称它为信息源的熵 (Entropy)。熵有如下性质:

1) 其物理概念是信源中每个符号的平均信息量, 单位为 bit/sym, sym 为符号。

2) 熵是非负的。

3) 当信源符号等概率发生时, 熵具有最大值, 为

$$H_{\max}(S) = \sum_{i=1}^q P(s_i) I(s_i) = \log_2 q \quad (1-4)$$

4) 信源符号不等概率时, 则有 $H(S) < H_{\max}(S)$, 并称

$$\frac{H_{\max}(S) - H(S)}{H_{\max}(S)} = 1 - \frac{H(S)}{H_{\max}(S)}$$

为信息源冗余, 而通过信源编码 (压缩编码) 可以降低信源的冗余度。

【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 1022, 0102, 0130, 2130, 2120, 3210, 1003, 2101, 0023, 1020, 0201, 0312, 0321, 0012, 0210 的信息量。

解 此消息中, 0 出现 23 次, 1 出现 15 次, 2 出现 15 次, 3 出现 7 次, 共有 60 个符号, 故该消息的信息量为

$$I = \left(23 \log_2 \frac{8}{3} + 15 \log_2 4 + 15 \log_2 4 + 7 \log_2 8 \right) \text{bit} \approx 113.55 \text{bit}$$

若用熵的概念来计算, 由式 (1-3) 得

$$H = \left(-\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \right) \text{bit/sym} \\ \approx 1.906 \text{bit/sym}$$

则该消息的信息量为 $I = 60 \times 1.906 \text{bit} = 114.36 \text{bit}$ 。

可见, 两种算法的结果有一定误差, 但当消息很长时, 用熵的概念来计算比较方便, 而且随着消息序列长度的增加, 两种计算误差将趋于零。

以上我们介绍了离散消息所含信息量的度量方法。对于连续消息, 信息论中有一个重要结论, 就是任何形式的待传信息都可以用二进制形式表示而不失主要内容。取样定理告诉我们: 一个频带受限的连续信号, 可以用每秒一定数目的取样值代替, 而每个取样值可以用若干个二进制脉冲序列来表示。因此, 以上信息量的定义和计算同样适用于连续信号。

1.4 通信系统性能指标

性能指标也称质量指标, 用来衡量系统性能的优劣。通信系统的性能指标涉及其有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及易维护使用性等等。尽管对通信系统可有名目繁多

的实际要求,但是,从研究信息传输的角度来说,有效性与可靠性是通信系统主要的性能指标。其中有效性是指信息传输的“速度”,而可靠性是指信息传输的“质量”。显然,这是两个相互矛盾的问题,这对矛盾通常只能依据实际要求取得相对的统一。例如,在满足一定可靠性指标的前提下,尽量提高信息的传输速度;或者,在维持一定有效性的前提下,使信息传输质量尽可能地提高。

1.4.1 模拟通信系统的性能指标

1. 有效性

有效性指信息传输速度,即给定频带情况下,单位时间传输信息的多少。由于模拟通信系统的信源是连续的,所以对其定量讨论是很复杂的。这里只举一个简单的例子,单边带(SSB)调制和普通调幅(AM)比较,对于每路语音信号,SSB占用的带宽只有AM的一半,因此在一定频带内用SSB信号传输的语音路数比AM多一倍,从而可以传输更多的信息,因此,SSB的有效性比AM好。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性最终用接收端输出的 S/N (信号平均功率与噪声平均功率之比,简称信噪比)来衡量。即相同条件下,某个系统输出的 S/N 高,则称该系统通信质量好,或称系统抗信道噪声(或干扰)的能力强。系统输出 S/N 是由信号功率和信号传输过程中引起的失真和各种干扰、噪声决定的,其中信号功率和信道中加性噪声是最主要的因素。另外一个决定输出 S/N 的因素是调制和解调方式,当信号功率和信道噪声一定,即接收机输入端的 S/N 一定时,不同的解调方法其输出端的 S/N 是不同的。因此在后面的学习中要特别注意比较不同调制方式的抗噪声性能,使用时注意选择抗噪声性能好的调制方式以提高通信系统的可靠性。

1.4.2 数字通信系统的性能指标

1. 有效性

数字通信系统的有效性通常用码元速率 R_s 、信息速率 R_b 及频带利用率 η 来表示。

(1) 码元速率 R_s

码元速率简称传码率,又称符号速率、波形速率等,它表示单位时间内传输码元的数目,单位为波特(baud),用符号“B”表示。例如,若1s内传输2400个码元(或符号),则传码率为2400Baud。实际中也经常用码元/s、符号/s或波形/s作为码元速率的单位。

要注意的是,数字信号有二进制和多进制之分,二进制就是用两个符号(如0和1)来表示数字波形,多进制如 M 进制则相应用 M 个不同符号来表示数字波形。码元速率仅表征单位时间内传输码元的数目,而没有限定这时的码元是何种进制,也就是说,码元速率与进制数无关,只与传输的码元宽度 T_s 有关: $R_s = 1/T_s$ 。

(2) 信息速率 R_b

信息速率简称传信率,又称比特率等。它表示单位时间传输的信息量,单位是比特/秒,记为bit/s。

每个码元或符号通常都有一定比特数的信息量,因此信息速率和码元速率有确定的关系,即