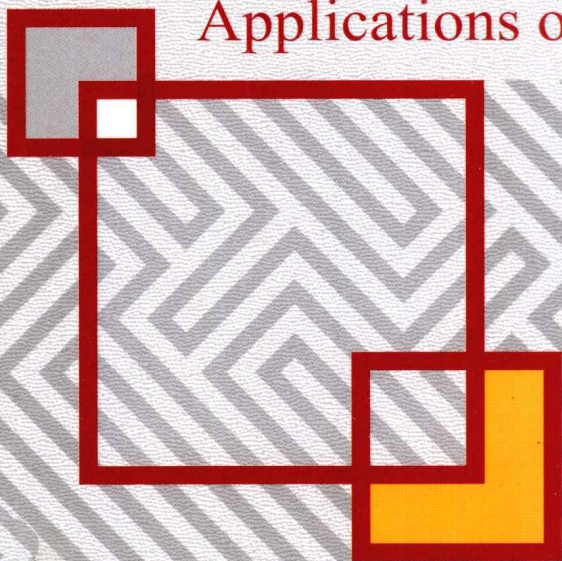


21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

通信原理 与应用

肖萍萍 金振坤 周一等 编著

Principles and
Applications of Communication



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



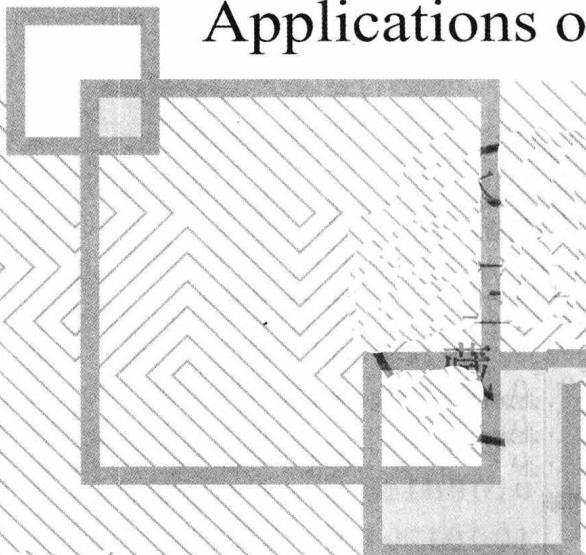
精品系列

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

通信原理 与应用

肖萍萍 金振坤 周一等 编著

Principles and
Applications of Communication



人民邮电出版社
北京



图书在版编目 (C I P) 数据

通信原理与应用 / 肖萍萍等编著. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2011.9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-25508-2

I. ①通… II. ①肖… 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140158号

内 容 提 要

本书以传输技术为主线,将传统的基础理论分析与当前的实际应用相结合,主要介绍信源编码理论、数字基带传输技术、数字调制技术、信道复接技术、同步技术、差错控制编码等。

本书力求体现科学性、系统性、完整性和先进性,在内容的选取上注重理论与实践的结合,注重各种通信技术在实际工作中的应用。书中除了包含必要的数学推导外,突出了基本概念、基本原理的阐述,简化了部分烦琐的理论推导,突出对知识的理解和应用,力求做到通俗易懂、图文并茂、循序渐进,便于读者自学。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程等专业的学科基础课教材,也可供研究生和从事通信工程的技术人员阅读和参考。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信原理与应用

-
- ◆ 编 著 肖萍萍 金振坤 周 一 等
责任编辑 贾 楠
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.25 2011 年 9 月第 1 版
字数: 418 千字 2011 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-25508-2

定价: 35.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

前言

随着现代通信技术的发展,人类已进入信息社会。信息化离不开信息的处理、传输和交换,特别是通信技术与计算机技术的结合,更是加快了光纤通信、移动通信、卫星通信等现代通信技术发展的步伐。通信原理是实现现代通信技术的重要基础。

目前数据业务逐渐成为通信网的主要业务,传统的电路交换网将逐渐向分组网特别是IP网演进。多媒体业务和高质量、高效率的通信技术逐渐替代传统的通信技术,一些新的调制技术和编码技术不断涌现,与之相应的国际标准不断更新。编写此书的目的是跟踪通信技术的发展,将各种调制技术、信源编码技术、多路复接技术、差错控制编码在现代通信技术中的应用介绍给广大读者,有助于读者掌握传统技术的新应用,为通信事业做出贡献。

本书以传输技术为主线,将传统的基础理论分析与当前的实际应用相结合,主要介绍信源编码理论、数字基带传输技术、数字调制技术、信道复接技术、同步技术、差错控制编码等。

作者从多年的教学工作中了解到,学生普遍反映有关通信原理的教材过于重视理论分析,公式推导繁多,学习负担过重;学生认为很难与实际应用相结合,无法做到“学以致用”。为此,我们将多年从事科研项目、教学研究和工程实践的工作笔记和学习笔记整理成书,希望广大读者通过阅读此书能对通信的应用有所认识。

本书遵循科学性、系统性、完整性和先进性的编写原则,在内容的选取上注重理论与实践相结合,注重各种通信技术在实际工作中的应用,既能为学生打下坚实的理论基础,又能适应当前通信技术的高速发展。除了包含必要的数学推导外,突出了基本概念、基本原理的阐述,简化了部分烦琐的理论推导,突出对知识的理解和应用。力求做到通俗易懂、循序渐进、图文并茂,便于读者自学。

本书作者具有多年从事通信原理、SDH原理与设备、DWDM原理与设备等多门课程的教学经验,以及通信设备研发与调测的工作实践,曾经编写过与数字光纤通信传输设备相关的多部教材。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程等相近专业的学科基础课教材,也可供研究生和从事通信工程的技术人员阅读和参考。

本书的第1章、第9章由肖萍萍、王冠编写,第7章由肖萍萍编写,第4章、第5章由金振坤、常莹编写,第8章由金振坤、王娜编写,第2章、第3章、第6章由周一编写。全书由肖萍萍统编定稿。武汉邮电科学研究院张向鹏、廖晓强、陈登超、刘凯、黄勃在本书编写的初期给予了帮助,黄佳雯参与了部分章节的绘图工作,在此深表谢意。

限于作者水平,书中不当或谬误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2011年5月于武汉

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5 窄带随机过程	28
1.1 通信的基本概念	1	2.5.1 同相和正交分量的统计特性	29
1.2 通信系统的组成	1	2.5.2 包络和相位的统计特性	31
1.2.1 通信系统的一般模型	1	2.6 随机过程通过系统的分析	32
1.2.2 模拟通信系统	3	2.7 信道及其容量	34
1.2.3 数字通信系统	4	2.7.1 信道的定义和分类	34
1.3 通信系统的分类与通信方式	5	2.7.2 高斯白噪声	35
1.3.1 通信系统的分类	5	2.7.3 正弦波加窄带高斯噪声	36
1.3.2 通信方式	7	2.7.4 信道容量	37
1.4 信息的度量	9	习题 2	38
1.4.1 信息量的定义	9	第 3 章 模拟调制系统	39
1.4.2 信息量的计算	10	3.1 幅度调制系统的调制与解调	39
1.4.3 平均信息量	11	3.1.1 标准双边带调幅	39
1.5 通信系统的主要性能指标	11	3.1.2 抑制载波双边带调幅	42
1.5.1 有效性	11	3.1.3 单边带调幅	44
1.5.2 可靠性	13	3.1.4 残留边带调幅	47
习题 1	14	3.2 角度调制系统的调制与解调	49
第 2 章 信号分析及信道	15	3.2.1 角度调制的基本概念	49
2.1 信号分析	15	3.2.2 窄带调频	50
2.1.1 确知信号的分析	15	3.2.3 宽带调频	51
2.1.2 信号的能量与功率	18	3.2.4 调频信号的产生与解调	53
2.1.3 能量谱密度与功率谱密度	18	3.3 模拟调制系统的抗噪声性能	55
2.1.4 卷积定义与性质	19	3.3.1 线性调制系统的抗噪声性能	55
2.1.5 波形的互相关与自相关	19	3.3.2 非线性调制系统的抗噪声性能	63
2.2 随机信号分析	20	3.3.3 各种模拟调制系统的比较	65
2.3 平稳随机过程	23	习题 3	66
2.3.1 狭义平稳随机过程	23	第 4 章 信源编码	68
2.3.2 广义平稳随机过程	24	4.1 概述	68
2.3.3 各态历经性	24	4.2 脉冲编码调制	69
2.3.4 自相关函数和功率谱密度	24	4.2.1 抽样	69
2.4 高斯随机过程	26	4.2.2 量化	73
2.4.1 高斯过程的定义	26	4.2.3 编码	78
2.4.2 高斯过程的性质	27	4.3 增量调制	83
2.4.3 高斯随机变量	27		

4.3.1 ΔM 的基本原理	83	6.2.3 二进制相移键控	139
4.3.2 ΔM 系统中的量化噪声	85	6.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能	142
4.4 差分脉码调制	86	6.3.1 2ASK 的抗噪声性能	142
4.4.1 DPCM 的原理	87	6.3.2 2FSK 的抗噪声性能	145
4.4.2 自适应差分脉码调制	88	6.3.3 2PSK 和 2DPSK 的抗噪声性能	147
4.4.3 32kbit/s ADPCM 系统	89	6.3.4 二进制数字调制系统的性能比较	149
4.5 其他编码技术	90	6.4 多进制数字调制系统	151
4.5.1 子带编码	91	6.4.1 多进制幅移键控	151
4.5.2 参量编码	92	6.4.2 多进制频移键控	152
4.5.3 混合编码	95	6.4.3 多进制相移键控	153
4.6 各种编码技术在通信系统中的应用	96	6.5 正交振幅调制	156
4.6.1 GSM 及 IP 电话系统语音编码	96	6.5.1 QAM 信号的调制	156
4.6.2 视频编码	98	6.5.2 QAM 信号的解调	157
习题 4	101	6.6 交错正交相移键控	158
第 5 章 数字基带传输	102	6.6.1 OQPSK 信号的调制	158
5.1 数字基带传输系统的组成	102	6.6.2 OQPSK 信号的解调	158
5.2 传输线路码型	104	6.7 最小频移键控	159
5.2.1 二元码	104	6.7.1 MSK 的基本原理	159
5.2.2 二元分组码	107	6.7.2 MSK 信号的调制	160
5.2.3 三元码	108	6.7.3 MSK 信号的解调	161
5.2.4 各种传输码型在通信系统中的应用	109	6.8 高斯滤波最小频移键控	161
5.3 数字基带信号的功率谱密度	111	6.9 扩频调制技术	162
5.4 波形传输的无失真条件	115	6.9.1 PN 码序列	162
5.5 部分响应基带传输系统	120	6.9.2 直接序列扩频	164
5.6 扰码与解扰码	123	6.9.3 跳频扩频技术	164
5.6.1 m 序列的产生及性质	123	6.10 各种调制技术在通信系统中的应用	165
5.6.2 扰码与解扰码的原理	126	习题 6	166
5.7 眼图	128	第 7 章 复用技术	168
5.8 时域均衡	129	7.1 频分复用	167
5.8.1 时域均衡原理	129	7.2 时分复用	169
5.8.2 时域均衡的实现	131	7.2.1 时分复用的概念	169
习题 5	132	7.2.2 码元速率与带宽	170
第 6 章 数字调制技术	133	7.2.3 PCM30/32 路系统帧结构	172
6.1 概述	133	7.2.4 准同步数字体系	173
6.2 二进制数字调制原理	133	7.2.5 同步数字体系	174
6.2.1 二进制幅移键控	133		
6.2.2 二进制频移键控	136		

7.3 波分复用	175	9.1.3 差错控制编码的基本原理	207
7.4 码分复用	176	9.2 几种常用的简单检错码	209
7.5 多址技术	178	9.2.1 奇偶校验码	209
7.5.1 频分多址	178	9.2.2 行列校验码	210
7.5.2 时分多址	180	9.2.3 恒比码	210
7.5.3 码分多址	181	9.2.4 正反码	210
7.5.4 空分多址	182	9.3 线性分组码	211
7.6 各种复用技术在通信系统中的 应用	183	9.3.1 线性分组码的定义	211
7.6.1 频分复用的应用	183	9.3.2 线性分组码的编码	212
7.6.2 时分复用的应用	185	9.3.3 线性分组码的译码	214
7.6.3 波分复用的应用	185	9.3.4 汉明码	215
7.6.4 多址技术的应用	185	9.4 循环码	215
习题 7	186	9.4.1 循环码的基本原理	216
第 8 章 同步技术	187	9.4.2 CRC 码	221
8.1 概述	187	9.4.3 BCH 码	222
8.2 载波同步	188	9.4.4 RS 码	224
8.2.1 锁相环的工作原理	188	9.4.5 各种循环码在通信系统中的 应用	227
8.2.2 插入导频法	189	9.5 卷积码	232
8.2.3 直接提取载波法	190	9.5.1 卷积码的基本概念	232
8.2.4 载波同步系统的性能指标	191	9.5.2 卷积码的描述	233
8.3 位同步	192	9.5.3 卷积码的译码	237
8.3.1 插入导频法	193	9.5.4 卷积码的应用	239
8.3.2 直接法	194	9.6 网格编码调制	240
8.3.3 位同步系统的性能指标	195	9.6.1 TCM 的基本概念	240
8.4 群同步	195	9.6.2 TCM 编码	242
8.4.1 起止同步法	195	9.6.3 TCM 译码	246
8.4.2 集中插入法	196	9.6.4 TCM 的应用	246
8.4.3 分散插入法	198	9.7 低密度校验码	247
8.4.4 群同步系统的性能指标	199	9.7.1 LDPC 码的基本概念	247
8.5 同步技术在数字通信网中的应用	199	9.7.2 LDPC 码的编码	249
8.5.1 主从同步方式	200	9.7.3 LDPC 码的译码	252
8.5.2 相互同步方式	201	9.7.4 LDPC 码在通信系统中的 应用	254
8.5.3 独立时钟的同步方式	201	习题 9	255
习题 8	202	附录 1 傅里叶变换	259
第 9 章 差错控制编码	203	附录 2 误差函数表	261
9.1 差错控制编码的基本概念	203	附录 3 贝塞尔函数表 $J_n(x)$	262
9.1.1 差错控制方式	204	部分习题解答	263
9.1.2 差错控制编码的分类	206	参考文献	268

通信技术是当代生产力中最为活跃的技术因素，对生产力的发展和人类社会的进步起着直接的推动作用。随着科学技术的发展，计算机技术与通信技术的相互融合促进了数字通信的变革，极大地扩展了通信的功能。

通信原理是一门介绍信息传输基本原理的课程。它研究的对象是通信系统，研究的目的是利用尽可能小的通信资源，获得尽可能高的通信质量。

1.1 通信的基本概念

人类在生产和社会生活中离不开信息交流，而信息交流是通过消息来传递的，传递和交换消息的过程就是通信。换句话说，通信是将消息从一个地方通过传输信道传送到另一个地方或者是多个地方的过程。

通信的目的就是为了克服距离上的障碍，迅速而准确地传递信息。通信从本质上讲就是实现信息传递的一门科学技术。随着科学技术进步与发展，通信所传递的信息形式越来越多，如语音、符号、文字、数据、图片、图像、音乐、视频等。信息是通过载体进行传递的，传递信息的方式很多，古代有烽火台、金鼓、驿站等，现代有书信、电话、电报、传真、广播、电视、电子信箱等。

通常将表示信息的语音、文字、图像和数据等称为消息。消息在许多情况下是不便直接传送和交换的，需要用光、声、电等物理量来运载消息。利用“电信号”来承载消息的通信方式称为电通信（简称通信）。这种通信方式具有极高的准确性和有效性。本教材所介绍的通信属于电通信。

1.2 通信系统的组成

实现信息传递所需的一切硬件设备、软件和传输媒质的总和称为通信系统。需要指出的是，过去对通信系统的定义不包含软件部分，但随着计算机进入通信系统，通信软件也成为组成通信系统的基本要素。

1.2.1 通信系统的一般模型

以点对点通信为例，通信系统的一般模型如图 1.1 所示。通信系统主要由信源、发送设

备、信道、接收设备和信宿 5 个部分组成。图 1.1 中的噪声源可以理解为通信系统的一部分，因为在实际应用中，一个通信系统无法彻底消除各种干扰。

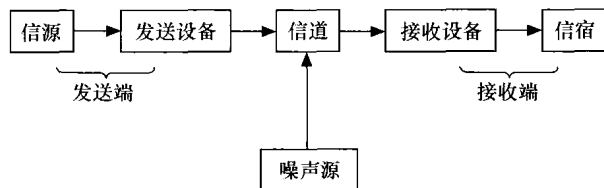


图 1.1 通信系统的一般模型

各部分的工作原理如下。

1. 信源

信源是消息的来源，其作用是各种消息转换成原始电信号，称之为基带信号。根据消息种类的不同，信源可分为模拟信源和数字信源。前者是指连续的模拟信号，如话筒、摄像机等；后者则是离散的数字信号，如电传机、计算机等各种数字终端设备。

2. 发送设备

发送设备的基本功能是将信源和信道进行有效的匹配，即将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号。变换方式是多种多样的，在需要频谱搬移的场合，调制是最常见的变换方式。对数字通信系统来说，发送设备通常还需完成信源编码与信道编码。

3. 信道

信道是指传输信号的物理媒质。信道分有线信道和无线信道两种。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。有线信道和无线信道均有多种物理媒质。媒质的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。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。

4. 噪声源

噪声源不是人为加入的设备，而是通信系统中各种设备固有的以及信道中随机产生的。噪声来源于 3 个方面：①通信设备内部由于电子作不规则运动而产生的热噪声；②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；③由于信道特性不理想，使得传输的信号失真而产生的干扰。前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，称之为“加性噪声”。第 3 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 3 种噪声抽象为一个噪声源一并加在信道上。

5. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的逆变换，即进行解调、译码、解码等。接收设备的基本功能是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始基带信号。

6. 信宿

信宿是传输信息的归宿点，其作用是将复原后的原始信号转换成相应的消息。

综上所述，图 1.1 概括地描述了一个通信系统的组成，它反映了通信系统的共性，因此称之为通信系统的一般模型。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。事实上，本书后续章节就是结合实际应用，围绕着通信系统的模型展开的。

1.2.2 模拟通信系统

模拟通信是指利用正弦波的幅度、频率或相位的变化，或者利用脉冲的幅度、宽度及位置变化模拟原始信号，以达到通信的目的。

1. 模拟通信系统模型

模拟通信系统的模型可由一般通信系统模型略加改变而成，如图 1.2 所示。一般通信系统模型中的发送设备和接收设备分别由调制器和解调器代替。模拟通信系统的主要内容就是研究不同信道条件下不同的调制解调方法。

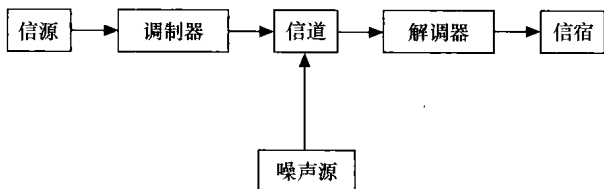


图 1.2 模拟通信系统模型

信源发出的原始电信号是基带信号，其频谱具有低通形式，直流或低频分量丰富，一般不宜直接传输，通常需把基带信号变换成适合在信道中传输的信号，并可在接收端再进行反变换。实现这种变换和反变换功能的部件称为调制器和解调器。经过调制以后的信号称为已调信号或频带信号。频带信号有 3 个基本特征：携带信息，适合在信道中传输，信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频。

信源和信宿实现消息与基带信号之间的变换，调制和解调实现基带信号与频带信号之间的变换。需要指出的是，除了这两种变换外，实际通信系统中还可能有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。由于调制和解调对信号的变化起决定性作用，而其他过程不会引起信号发生质的变化，只是对信号进行了放大或改善了信号特性，因而被认为是理想的而不予讨论。

2. 模拟通信的特点

模拟通信简单，易于实现，而且在信道中传输的信号频谱比较窄，因此可通过多路复用使信道的利用率提高。

模拟信号的缺点如下。

- ① 传输的信号是连续的，叠加噪声干扰后不易消除，即抗干扰能力较差。
- ② 不易实现保密通信。

- ③ 设备不易大规模集成。
- ④ 不适应飞速发展的数字通信的要求。

1.2.3 数字通信系统

数字通信是用数字信号作为载体来传递消息，或者用数字信号对载波进行数字调制后再传递的通信方式。数字通信系统可传递电报、数据等数字信号，也可传递经过数字化处理的语音和图像等模拟信号。

1. 数字通信系统模型

数字通信系统模型如图 1.3 所示。

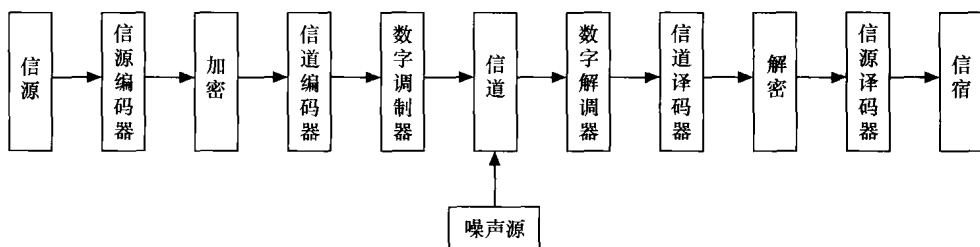


图 1.3 数字通信系统模型

数字通信涉及的技术很多，主要包括信源编码与译码、加密与解密、信道编码与译码、数字调制与解调、数字复接以及同步等。

(1) 信源编码与译码

信源编译码有两个功能：①完成模/数、数/模转换以实现模拟信号的数字化传输；②提高信息传输的有效性，即通过某种压缩技术设法减少码元数目以提高信道的利用率。

(2) 加密与解密

在需要实现保密通信的场合，为了保证所传信息的安全，在传输重要信息时，按照某种加密算法（即密钥），对明文进行加密，使其变成密文后再发送出去。在接收端，利用密钥进行解密，从而恢复原始信息。

(3) 信道编码与译码

信道编码的目的是增强数字信号的抗干扰能力，即提高数字信号传输的可靠性。基本思想是在信息码组中按一定规则加入保护成分（或称监督码元），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，以提高通信系统的可靠性。

(4) 数字调制与解调

数字调制是将数字基带信号的频谱搬移到高频处，形成适合在信道中传输的频带信号，在接收端解调出原来的数字基带信号。

(5) 同步

为了使收发两端的信号在时间上保持步调一致，保证数字通信系统有序、准确、可靠工作，数字通信系统还应有一个非常重要的控制单元，即同步系统（图 1.3 中未画出）。同步系统可以使通信系统的接收端与发送端同步、有序而准确地接收与恢复原始信息。

(6) 数字复接

数字复接就是依据时分复用的基本原理把若干个低速数字信号合并成一个高速的数字信号,以扩大传输容量和提高传输效率。

需要说明的是,图 1.3 所示是数字通信系统的一般化模型,实际的数字通信系统不一定包括图中的所有环节。如在某些有线信道中,若传输距离不太远且通信容量不大时,数字基带信号无需调制,可直接传送,称之为数字信号的基带传输,其模型中不包括调制与解调环节,详见第 5 章。

通常,模拟信号经模/数转换后可以在数字通信系统中传输,数字信号也可以通过传统的电话网来传输,如计算机数据可以通过模拟电话线路传输,但这时必须使用调制解调器(Modem)将数字基带信号进行正弦调制,以适应模拟信道的传输特性。可见,模拟通信与数字通信的区别仅在于信道中传输的信号种类。

2. 数字通信的特点

与模拟通信相比,数字通信的优点如下。

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还原被传输的波形,而是从受噪声干扰的信号中判决出发送端发送的波形。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。

在远距离传输中,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。

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 便于用现代数字信号处理技术对数字信息进行处理、变换、存储。

④ 易于集成,使通信设备微型化。

⑤ 易于加密处理,且保密性好。

数字通信的优点很多,但它是以增加信号带宽为代价的,且对同步要求高,设备较复杂。例如,一路模拟电话信号的带宽为 4kHz,而一路数字电话信号要占 64kHz 的带宽,这说明数字通信的频带利用率低。但是,随着微电子技术、计算机技术的广泛应用以及超大规模集成电路的出现,数字系统的复杂程度大大降低。同时高效的数据压缩技术以及光纤等大容量传输媒质的使用正逐步解决带宽问题。因此,数字通信的应用必将越来越广泛。

1.3 通信系统的分类与通信方式

1.3.1 通信系统的分类

根据不同的目的及不同的角度,通信系统可分成许多类别,下面介绍几种常用的分类。

1. 按通信业务分类

根据通信业务的不同,通信系统可分为电报通信系统、电话通信系统、广播通信系统、

数据通信系统及图像通信系统等。

2. 按传输媒质分类

根据传输媒质的不同，通信系统可分为无线通信系统和有线通信系统。无线通信是依靠电磁波在空间的传播来达到传递信息的目的，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。有线通信是用导线（包括电缆、光缆等）作为媒质的通信系统，如市话系统、有线电视、海底电缆通信等。随着通信技术、计算机技术和网络技术的飞速发展，单纯的有线或无线通信系统越来越少，实际通信系统常常是“无线”中有“有线”，“有线”中有“无线”。

3. 按信号特征分类

根据信道传输的信号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。

4. 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频带传输系统。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如音频室内电话。频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制的方式很多，表 1.1 所示为一些常见的调制方式及主要用途。

表 1.1 常见的调制方式

调 制 方 式		主 要 用 途	
连续波调制	线性调制	标准双边带调幅（AM）	广播
		抑制载波双边带调幅（DSB）	立体声广播
		单边带调幅（SSB）	载波通信、无线电台、数据传输
		残留边带调幅（VSB）	电视广播、数据传输、传真
	非线性调制	频率调制（FM）	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制（PM）	中间调制方式
	数字调制	幅移键控（ASK）	数据传输
		频移键控（FS）	数据传输
		相移键控（PSK、DPSK、QPSK 等）	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制（QAM、MSK 等）	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉冲幅度调制（PAM）	中间调制方式、遥测
		脉冲宽度调制（PDM）	中间调制方式
		脉冲位置调制（PPM）	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉冲编码调制（PCM）	市话、卫星、空间通信
		增量调制（ ΔM ）	军用、民用电话
		差分脉冲编码调制（DPCM）	电视电话、图像编码
		其他编码方式（ADPCM、APC、LPC）	中低速数字电话

5. 按复用方式分类

根据多路信号复用方式的不同，通信系统可分为频分复用系统、时分复用系统和码分复用系统。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。传统的模拟通信中均采用频分复用。随着数字通信的发展，时分复用通信系统的应用越来越广泛。码分复用主要用于空间通信的扩频通信中。

6. 按工作频率分类

根据通信设备工作频率的不同，可分为长波通信、中波通信、短波通信、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、常用传输媒质及主要用途

频率范围	波长	符号	传输媒质	主要用途
3Hz~30kHz	100~10km	甚低频 (VLF)	有线线对 长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航、时标
30~300kHz	$10^3\sim10^4\text{m}$	低频 (LF)	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300kHz~3MHz	$10^2\sim10^3\text{m}$	中频 (MF)	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	$10\sim10^2\text{m}$	高频 (HF)	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	甚高频 (VHF)	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
300MHz~3GHz	10~100cm	特高频 (UHF)	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	超高频 (SHF)	波导 厘米波无线电	微波接力、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	微波接力、雷达、射电天文学
$10^5\sim10^6\text{GHz}$	$3\times10^{-5}\sim3\times10^{-4}\text{cm}$	紫外线可见光、红外线	光纤 激光空间传播	光纤通信

值得注意的是，一种通信系统可分属不同的种类，例如我们熟悉的无线电调幅广播，既是广播通信系统、调制通信系统、模拟通信系统，也是无线通信系统。

1.3.2 通信方式

通信方式指通信双方之间的工作方式或信号传输方式，它是通信各方在通信实施之前首先确定的问题。根据不同的标准，通信方式也有多种分类。

1. 按消息传递的方向与时间关系分类

对于点对点通信,按消息传递的方向与时间关系,通信方式可分为单工、半双工和全双工通信3种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式。通信的双方中,一方只能发送,一方只能接收,如图1.4(a)所示,如广播、电视系统、收音机、遥控、无线寻呼等。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行,如图1.4(b)所示,如无线对讲机、收发报机、问询及检索等。

全双工通信是指通信双方能同时收发消息的工作方式,如图1.4(c)所示,如普通电话、计算机通信网、手机等。

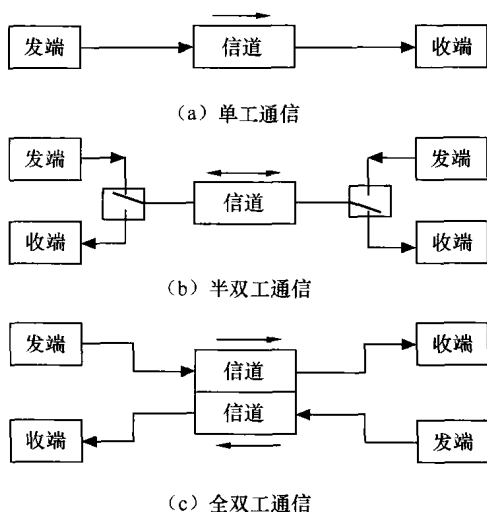


图 1.4 通信方式示意图

2. 按数字信号排列顺序分类

在数字通信中,按数字码元传输的顺序,可将通信方式分为并行传输与串行传输。

并行传输是将代表信息的数字码元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。其优点是节省传输时间,速度快;缺点是需要多条信道,成本高。一般只用于设备之间的近距离通信,如计算机与打印机之间的数据传输。

串行传输是将数字码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输。其优点是只需一条信道;缺点是速度慢,需要外加同步措施以解决收、发双方码组或字符的同步问题。串行传输一般用于远距离传输。

3. 按同步方式分类

按同步方式的不同,可分为同步通信和异步通信。

同步通信是指在约定的通信速率下,发送端和接收端的时钟信号频率始终保持一致。“同步通信”的通信双方必须先建立同步,即双方的时钟要调整到同一个频率。收发双方不停地发送和接收连续的同步比特流。

异步通信是指通信中两个字符之间的时间间隔是不固定的,而在一个字符内各位的时间间隔是固定的。异步通信在发送字符时,所发送的字符之间的时间间隔可以是任意的。发送端可以在任意时刻开始发送字符,因此必须在每一个字符的开始和结束处加上标志,即加上开始位和停止位,以便使接收端能正确地将每一个字符接收下来。异步通信的好处是通信设备简单、价格便宜。但其传输效率较低,因为开始位和停止位的开销所占比例较大。

4. 按网络结构分类

通信系统按照网络结构可分为线形、星形、树形、环形、网孔形等类型。两点之间的通

信称为点对点通信，多点间的通信属于网通信。网通信的基础仍是点对点通信，因此本书仅限于讨论点对点通信。

1.4 信息的度量

1.4.1 信息量的定义

传输信息是通信系统的根本任务。在传输过程中，信息是以各种具体的电信号形式表现出来的。为了对通信系统的性能和质量进行定量的分析、研究与评价，需要对信息进行度量。正如运送货物的多少可以用货运量来描述，传送信息的多少可用信息量来衡量。通常定义能够衡量信息多少的物理量为信息量，并用 I 表示。

下面举例说明信息量的大小与事件发生概率的关系。

例如，“明天太阳从东边出来”绝对没有“明天太阳从西边出来”对信息的接收者更有吸引力。同样，当你听说“有人被狗咬了”并不会感到惊奇，但若有人告诉你“一条狗被人咬了”你一定非常吃惊。这说明信息有量值可言，并且信息所包含的事件越不可能发生，人们就越感兴趣，信息量就越大。

显然，信息量与事件发生的概率有关，事件出现的概率越小，信息量就越大。必然事件的概率为 1，则它传递的信息量就为 0。假设 $p(x)$ 表示消息发生的概率， I 表示消息中所含的信息量，则 $p(x)$ 与 I 的关系应反映如下规律。

- ① 消息中所含信息量是该消息出现的概率的函数，即 $I = I[p(x)]$ 。
- ② $p(x)$ 越小， I 越大；反之， I 越小；且当 $p(x) = 1$ 时， $I = 0$ ； $p(x) = 0$ 时， $I = \infty$ 。
- ③ 若干个相互独立事件构成的消息，所含信息量等于各独立事件信息量之和，也就是说，信息具有相加性，即 $I[p(x_1)p(x_2)\cdots] = I[p(x_1)] + I[p(x_2)] + \cdots$ 。

因此，若 I 与 $p(x)$ 的关系为

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

则可满足上述三项要求。式(1-1)就是消息 x 所含的信息量。

信息量单位的确定取决于式(1-1)中的对数底 a 。如果取对数的底 $a = 2$ ，信息量的单位为比特 (bit)；如果取 e 为对数的底，信息量的单位为奈特 (nat)；若取 10 为底，信息量的单位称为十进制单位，或称哈特莱。上述三种单位的使用场合，应根据计算及使用的方便来决定。在通信系统中广泛使用的单位为比特。

【例 1-1】 设二进制符号 1 出现的概率为 1/4，符号 0 出现的概率为 3/4。求 0 和 1 的信息量。

解：由信息量定义式(1-1)可知

$$I(0) = \log_2 \frac{1}{1/4} = 2 \text{ bit}$$

$$I(1) = \log_2 \frac{1}{3/4} = 0.415 \text{ bit}$$

1.4.2 信息量的计算

下面主要讨论离散消息信息量的计算方法。

1. 等概率出现的离散消息的度量

若要传递的离散消息是在 M 个消息中独立地选择其一，且认为每个消息出现的概率是相同的，则可采用一个 M 进制的波形进行传送，即传送 M 个消息之一与传送 M 进制波形之一是完全等价的。在等概率出现时，每个波形（或每个消息）的出现概率为 $1/M$ ，我们取对数底为 2，则

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \quad (1-2)$$

当 $M=2$ ， $I=1\text{bit}$ ，即每个二进制波形等概率出现时所含信息量是 1bit。因此在工程应用中，通常将一个二进制码元称为 1bit。在数字通信中，通常取 M 为 2 的整数幂，当 $M=2^n$ ，每个波形等概率出现时所含信息量就是 $n\text{bit}$ 。

2. 非等概率出现的离散消息的度量

设离散信息源是一个由 n 个符号组成的集合，称为符号集。符号集中的每一个符号 x_i 在消息中是按一定概率 $p(x_i)$ 独立出现的，即符号概率为

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_n \\ p(x_1) & p(x_2) & \cdots & p(x_n) \end{bmatrix}$$

且有 $\sum_{i=1}^n p(x_i) = 1$ ，则整个消息的信息量为

$$I = -\sum_{i=1}^n n_i \log_2 p(x_i) \quad (1-3)$$

式中， n_i 为符号 x_i 的个数。

【例 1-2】 某离散信源由 0、1、2、3 四种符号组成，每个符号的出现都是独立的，其概

率为 $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ \frac{3}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} \end{bmatrix}$ 。

求消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量及每个符号的算术平均信息量。

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。由式(1-3)可知，此消息的信息量为

$$\begin{aligned} I &= -23 \log_2 \frac{3}{8} - 14 \log_2 \frac{1}{4} - 13 \log_2 \frac{1}{4} - 7 \log_2 \frac{1}{8} \\ &= 32.55 + 28 + 26 + 21 \\ &= 107.55\text{bit} \end{aligned}$$