普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材

通信系统原理

郭宇春 张 星 张立军 编著
李 磊 宋光农
冯玉珉 主审

科学出版社

通信系统原理

郭宇春 张 星 张立军 李 磊 宋光农 编著
冯玉珉 主审

科学出版社
北 京

内 容 简 介

本书系统讲述通信系统的基本原理，内容包括模拟通信和数字通信，侧重数字通信原理，具体包括绪论、信号与噪音、模拟通信系统、模拟信号数字传输、数字信号基带传输、数字信号频带传输、数字信号最佳接收、信道编码、同步系统等。除必要的数学推导外，注重讲述物理概念，各章均设有习题。全书内容丰富，突出侧重物理概念和系统分析方法，可读性强。

本书可用作通信与电子信息类专业的通信原理课程教材，也可供从事通信及相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信系统原理/郭宇春等编著. —北京：科学出版社，2012.3
普通高等教育电子通信类国家级特色专业系列规划教材
ISBN 978-7-03-033528-9

Ⅰ.①通… Ⅱ.①郭… Ⅲ.①通信系统-高等学校-教材 Ⅳ.①TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 021159 号

丛书策划：匡 敏 潘斯斯
责任编辑：刘鹏飞 / 责任校对：陈玉凤
责任印制：张克忠 / 封面设计：迷底书装

科学出版社出版
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717
http://www.sciencep.com

新科印刷有限公司印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2012 年 3 月第 一 版 开本：787×1092 1/16
2012 年 3 月第一次印刷 印张：19
字数：490 000

定价：39.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

前　言

通信技术的迅速发展对知识更新带来巨大促进，研究和创新人才培养的目标也促使教学理念更新，从传授知识转变为激发学生探索精神、鼓励学生自主学习。为了渗透这种新的教学理念，适应技术发展，编者以本课程组冯玉珉教授主编的《通信系统原理》为基础，新编了这本《通信系统原理》教材。本书的编写基于本课程组在通信原理课程建设和教材建设中多年的实践积累，调整完善了课程的知识结构框架，并融入我们在通信和网络方面的研究经验，努力在教材内容的基础性、系统性和技术先进性上达到协调统一。

本书系统讲述通信系统的基本原理、性能和分析方法，以“提出问题、分析问题和解决问题”的思路贯穿每个知识模块，引导读者建立系统化的知识框架，并从更高层面的视角对各知识模块在整个知识框架中的位置和影响进行阐述。编写上力图以阐明物理概念为出发点，由浅入深地导引必要的严谨数理推证。

我们力求为读者提供一本适应性、实用性较强的教材，既强调基础性和可读性，也注意技术前沿的渗透；既讲清通信原理的主要问题，又引入通信系统实际应用方面的内容。本书在知识点组织上划分了难易层次，可适应多专业和不同层次教学对象的教学需求，教师在选用本书时可根据课程设置的具体情况及教学要求的侧重点不同进行选择，灵活掌握。本书也可供通信工程及信息工程、电子工程、计算机、自动化以及其他相关专业的工程技术人员参考。

本书具体内容包括模拟通信和数字通信，侧重数字通信原理。全书共 9 章，分别为：绪论、信号与噪声分析、模拟调制系统、数字信号基带传输、二元数字频带传输、改进的数字调制、最佳接收方式、模拟信号的脉冲调制和信道编码。每章后均设有习题，书后附有傅里叶变换、误差函数、格雷码、常用三角变换等，便于学生自学。

本书特点如下：

(1)指导思想。引导读者建立系统、深入的通信系统基本理论知识框架；从阐明物理概念出发，由浅入深给出严谨的数理推证和定量分析。

(2)结构体系。从通信系统构成的完整性出发，进行知识点章节模块划分；各章节模块相对独立，便于从不同教学层次出发组织教学。

(3)内容范围。以通信系统分析方法和通信系统原理为基础，注意引入通信新技术的发展；以本科层次学生为主要目标读者，强调基础性、系统性和可读性。

(4)写作特点。贯穿“问题引导”的思路，力求不落“灌输知识”的窠臼；突出各知识模块的重点和难点。

(5)立体化配套。各章的配有习题（未来考虑配套习题集）。

本书由郭宇春主持编著，课程组多位老师参与编写。郭宇春编写了第 1、6、7 章，并对全书进行统稿；张星编写第 4、5 章；张立军编写第 8、9 章；李磊编写第 3 章；宋光农编写第 2 章。北京交通大学冯玉珉教授担任本书主审，提出了许多宝贵的建议；此外，本课程的建设和本书的编写一直以来得到很多前辈和同仁的关心支持。在此，我们向冯玉珉教授、张有根教授、张思东教授、谈振辉教授、刘颖教授表示最诚挚的谢意！

本书首次出版，书中内容难免有不妥之处，敬请读者不吝指正。

编　者

2012 年 2 月 20 日

目　录

前言 …… 1
第 1 章　绪论 …… 1
1.1　通信与信息的基本概念 …… 1
1.1.1　通信与信号 …… 1
1.1.2　信息与信息量 …… 1
1.2　通信系统概述 …… 2
1.2.1　通信系统模型 …… 2
1.2.2　通信系统分类 …… 5
1.3　通信系统性能指标 …… 6
1.3.1　有效性指标 …… 6
1.3.2　可靠性指标 …… 7
1.4　信道与干扰 …… 7
1.4.1　有线信道与无线信道 …… 7
1.4.2　信道模型 …… 10
1.4.3　信道干扰 …… 12
1.4.4　信道容量 …… 14
1.5　通信技术发展简介 …… 17
小结 …… 20
第 2 章　信号与噪声分析 …… 21
2.1　引言 …… 21
2.1.1　信号类型 …… 21
2.1.2　系统表示法 …… 23
2.2　确知信号分析 …… 23
2.2.1　傅里叶级数与傅里叶变换 …… 23
2.2.2　卷积与相关 …… 25
2.2.3　能量谱与功率谱 …… 27
2.2.4　确知信号通过线性时不变系统 …… 28
2.2.5　希尔伯特(Hilbert)变换 …… 30
2.3　概率与随机变量概述 …… 32
2.3.1　随机事件的概率及随机变量的定义 …… 32
2.3.2　一维随机变量及其统计特征 …… 34
2.3.3　二维随机变量及其统计特征 …… 39
2.3.4　随机变量的函数 …… 41

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

2.3.5 随机变量的关系 …… 42
2.4 随机过程的基本概念 …… 43
2.4.1 随机过程的定义 …… 43
2.4.2 随机过程的一维和二维统计特性 …… 44
2.5 平稳随机过程 …… 46
2.5.1 平稳随机过程的定义 …… 46
2.5.2 平稳随机过程的传输特性 …… 49
2.5.3 遍历性 …… 50
2.6 高斯随机过程与高斯白噪声 …… 51
2.6.1 高斯随机过程 …… 51
2.6.2 高斯白噪声 …… 52
2.6.3 限带高斯噪声 …… 53
2.6.4 窄带高斯噪声 …… 55
2.7 平稳随机过程传输特性 …… 60
2.7.1 平稳过程通过线性系统 …… 60
2.7.2 平稳过程通过非线性系统 …… 62
小结 …… 63
习题 …… 63
第3章 模拟调制系统 …… 67
3.1 调制的功能和分类 …… 67
3.1.1 基带信号和载波 …… 67
3.1.2 调制的功能 …… 67
3.1.3 调制的分类 …… 68
3.2 线性调制 …… 69
3.2.1 常规调幅(AM) …… 69
3.2.2 双边带调幅(DSB) …… 72
3.2.3 单边带调幅(SSB) …… 74
3.2.4 残留边带调幅(VSB) …… 77
3.2.5 线性调制系统的通用模型 …… 79
3.2.6 线性调制系统的噪声性能分析 …… 80
3.3 非线性调制(角度调制) …… 83
3.3.1 角度调制的基本概念 …… 83
3.3.2 单音调角 …… 85
3.3.3 窄带调角 …… 86
3.3.4 宽带单音调角 …… 87
3.3.5 调角波的解调及抗噪声性能 …… 90
3.4 频分复用 …… 96
3.4.1 频分复用原理 …… 96
3.4.2 复合调制 …… 97
小结 …… 98

习题 …… 99
第 4 章 数字信号基带传输 …… 105
4.1 引言 …… 105
4.2 数字基带信号及其频谱特性 …… 105
4.2.1 数字基带信号常用电信号表示 …… 105
4.2.2 数字基带信号频谱特性 …… 106
4.3 数字基带传输的常用码型 …… 108
4.3.1 码型选择原则 …… 108
4.3.2 常用的传输码型 …… 109
4.4 数字基带传输系统的波形形成 …… 111
4.4.1 符号间干扰和无码间干扰条件 …… 111
4.4.2 无码间干扰的波形形成及奈奎斯特第一准则 …… 112
4.4.3 部分响应波形形成系统及奈奎斯特第二准则 …… 116
4.4.4 基带传输的最佳化 …… 121
4.5 数字基带传输系统的误码性能 …… 122
4.6 眼图 …… 124
4.7 数字基带传输系统中的时钟同步 …… 126
4.7.1 自同步法 …… 126
4.7.2 外同步法 …… 127
4.8 时域均衡 …… 127
4.9 数字基带信号功率谱密度分析过程 …… 130
小结 …… 132
讨论题 …… 133
习题 …… 133
第 5 章 二元数字频带传输 …… 137
5.1 引言 …… 137
5.2 频带传输系统 …… 137
5.3 数字调幅 …… 137
5.3.1 ASK 信号分析 …… 138
5.3.2 ASK 信号接收 …… 139
5.3.3 ASK 其他传输方式 …… 143
5.4 数字调频 …… 143
5.4.1 FSK 信号分析 …… 144
5.4.2 FSK 信号接收 …… 145
5.5 数字调相 …… 148
5.5.1 PSK 信号分析 …… 148
5.5.2 PSK 相干接收的噪声性能 …… 149
5.5.3 相对相移键控(DPSK) …… 150
5.6 数字频带传输系统中的载波提取和形成 …… 155
5.6.1 从已调信号中提取接收载波 …… 155

5.6.2 利用插入导频提取接收载波 …… 156
小结 …… 157
习题 …… 157
第6章 改进的数字调制 …… 160
6.1 多元数字调幅 …… 160
6.1.1 MASK信号的调制解调 …… 160
6.1.2 MASK信号的误码性能 …… 161
6.2 多元正交调幅(MQAM) …… 163
6.2.1 MQAM信号的产生及基本构成特点 …… 163
6.2.2 MQAM信号的接收及误码性能 …… 164
6.3 多元数字调相 …… 165
6.3.1 MPSK信号的特点 …… 165
6.3.2 MPSK信号与MQAM信号的比较 …… 167
6.3.3 四相数字调相(QPSK) …… 168
6.3.4 交错正交数字调相(OQPSK) …… 171
6.3.5 差分正交数字调相(QDPSK) …… 172
6.4 多元频移键控 …… 175
6.4.1 MFSK信号的调制解调 …… 175
6.4.2 MFSK信号的误码性能 …… 176
6.5 最小频移键控(MSK) …… 176
6.5.1 MSK信号的相位特征 …… 177
6.5.2 MSK信号频率与码元周期关系 …… 178
6.5.3 MSK信号的正交调制方式 …… 179
6.5.4 高斯最小频移键控(GMSK) …… 181
6.6 扩频调制 …… 182
6.6.1 扩频通信概述 …… 182
6.6.2 PN序列 …… 184
6.6.3 直接序列扩频 …… 186
6.6.4 跳频扩频 …… 188
6.7 正交频分复用(OFDM) …… 190
6.7.1 OFDM信号 …… 190
6.7.2 OFDM的调制和解调系统 …… 192
6.7.3 OFDM特点与应用 …… 194
小结 …… 194
习题 …… 195
第7章 最佳接收方式 …… 197
7.1 信号空间与信号几何表示 …… 197
7.1.1 矢量空间 …… 197
7.1.2 信号空间 …… 198
7.1.3 信号正交化 …… 199

7.2 最佳接收问题与最佳接收准则 …… 201
7.2.1 AWGN 信道下接收信号的统计特性 …… 201
7.2.2 最佳接收准则 …… 202
7.3 相关接收机 …… 203
7.3.1 观察信号的正交表示与最小均方误差准则 …… 204
7.3.2 相关接收机 …… 205
7.4 利用匹配滤波器的最佳接收 …… 206
7.4.1 匹配滤波器的设计 …… 206
7.4.2 匹配滤波法最佳接收 …… 209
7.4.3 匹配滤波器与相关器的等价性 …… 212
7.5 随机相位信号的最佳接收 …… 212
7.5.1 直接匹配发送载波 …… 212
7.5.2 利用正交载波基信号 …… 214
7.6 最佳接收性能分析 …… 215
7.6.1 最佳接收误比特率分析计算 …… 215
7.6.2 最佳接收与相干接收的比较 …… 220
小结 …… 221
习题 …… 222
第 8 章 模拟信号的脉冲调制 …… 225
8.1 模拟信号的采样 …… 225
8.1.1 低通模拟信号的采样定理 …… 225
8.1.2 带通信号的采样定理 …… 228
8.2 模拟信号的量化 …… 230
8.2.1 最佳量化器 …… 230
8.2.2 均匀量化 …… 233
8.2.3 非均匀量化 …… 235
8.3 PCM 编码原理 …… 237
8.3.1 自然二进制码和折叠二进制码 …… 237
8.3.2 系统的抗噪性能 …… 240
8.4 自适应差分脉冲编码调制 …… 241
8.4.1 DPCM 的基本原理 …… 241
8.4.2 自适应预测 …… 245
8.4.3 自适应量化 …… 245
8.5 增量调制 …… 246
8.5.1 简单的增量调制(ΔM)原理 …… 247
8.5.2 增量调制系统中的量化噪声 …… 248
小结 …… 249
习题 …… 249
第 9 章 信道编码 …… 251
9.1 概述 …… 251

9.1.1 二元对称信道 …… 251
9.1.2 差错控制编码分类 …… 251
9.1.3 常用的差错控制码 …… 252
9.1.4 差错控制原理 …… 255
9.2 代数基础 …… 256
9.2.1 群 …… 256
9.2.2 有限域 …… 257
9.2.3 向量空间 …… 258
9.2.4 图 …… 260
9.3 线性分组码 …… 260
9.3.1 线性与编码 …… 260
9.3.2 译码 …… 262
9.3.3 最小汉明距离 …… 264
9.3.4 汉明码 …… 264
9.4 循环码 …… 265
9.4.1 生成多项式和校验多项式 …… 266
9.4.2 编码和译码 …… 267
9.4.3 BCH 码 …… 268
9.4.4 非二进制 BCH 码—RS 码 …… 269
9.5 卷积码 …… 270
9.5.1 基本结构 …… 270
9.5.2 Viterbi 算法 …… 274
9.6 低密度奇偶校验码 …… 279
9.6.1 背景 …… 279
9.6.2 表示法 …… 279
9.6.3 几何构造法 …… 280
9.6.4 译码算法 …… 283
小结 …… 288
习题 …… 289
附录 …… 291
附录 1 常用傅里叶变换对及傅里叶变换性质 …… 291
附录 2 互补误差函数表 …… 292
附录 3 格雷码编码示例 …… 293
附录 4 常用三角变换 …… 293
参考文献 …… 294

第1章 绪 论

交流是人类生活中不可缺少的活动，除了面对面的交流，人们还利用电话、传真、网络及广播电视多种方式与世界各地的人随时进行通信、处理日常事务，了解天下大事和社会百态。实现信息交互，特别是远程交互的通信技术的基本原理，是本书讨论的主题。本章首先阐述通信与信息的基本概念，然后对通信系统的基本构成和性能指标进行介绍，对通信信道和干扰问题进行简要讨论，最后回顾通信技术的发展历史。

1.1 通信与信息的基本概念

1.1.1 通信与信号

人类自出现起就有了原始的通信，手势、声音、烽火、狼烟、金鼓、旌旗、驿站传书都是信息交流的方式。人与人之间进行的思想交流需要以语言、文字、声音、图像等各种媒体形式的消息作为承载体，从消息发布者即信源到消息接收者即信宿的消息传递过程就称为通信。

人们认识到电与磁的现象后，开始利用电信号进行通信，可以实现快速、准确、可靠的远距离通信，不受时间、地点、距离的限制。自然科学范畴中的“通信”一般指这种利用电信号（也包括光信号）实现的远程通信（telecommunication），也称电信。社会科学中的“通信”（communication）是指更广泛意义的人际交流。前者关注技术实现，后者关注交流对人的影响。

通信系统中传输的具体对象是消息。消息指承载了信息的文字、数字、状态等符号序列或者语音、图像等随时间连续变化的信号。信号是消息的物理载体。语音可转换成为电信号，也可以转换成光信号。利用电信号的通信，就是把消息转换成电信号的形式并传递。在通信系统中，信号一般狭义地指电信号。

1.1.2 信息与信息量

通信的最终目的是传递信息，那么信息是什么？与消息有什么差别？又有什么联系？在日常生活中，“信息”这个概念常常与情报、资料、情况、数据等概念混用。例如，发送手机短信，也有人会说发个信息，实际上发送的是文字、符号、图片或者视频组成的消息。那么这个消息的内容是接收者在收到这个短信之前就已经完全知道，这个消息对于接收者来说就没有意义。而信息指消息中对接收者有意义的内容——获得对接收者来说事先不知道或者不确定的内容才是通信的意义所在。更严格地讲，信息是消息中对接收者能消除不确定性的内容。

发送方可能发送的消息集合可能包含有限或无限个元素。从对于接收者有意义的角度看，发送方发送消息的行为是随机的，通信过程才能使接收者获得信息。发送不同消息的可能性可以用概率描述。假设发送的消息集合仅包含0和1两个元素，是否可以比较度量哪个消息包含更多的信息？这就要对信息的大小进行度量。

度量信息的物理量称为信息量。应该如何设计这个测度？设想发送1的概率为0.1，发送0的概率为0.9，对于接收者来说可以估计的是大多数情况下都会收到0码，那么当接收者收到1

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

码时，是更不确定的事件发生了，因而获得的信息更多。

考虑到通信过程可能传递的是一个消息序列，信息量的测度应该具备的以下特点：

(1)消息 x 的信息量 $I(x)$是消息 x 出现概率 $P(x)$的函数；

(2)概率越小的消息所包含的信息量越大；

(3)具有可加性，若某个消息包含若干个独立消息，则该消息的信息量为每个独立消息所含信息量之和。

据此，可以定义信息量为

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

由式(1-1)可知，信息量 I 实际上是一个无量纲的物理量，信息量采用的单位与底数 a 的取值有关，a 取 2 时信息量单位为 bit(比特)；a 取 e 时信息量单位为 nat(奈特)；a 取 10 时信息量单位为 hatley(哈特莱)。二进制的数字通信中常用的是比特。在二进制通信系统中，传送的消息只有两种，分别以 0,1 表示，只需使用 1 个二进制位。如果 0 和 1 的出现概率都是 1/2，那么每个消息所包含的信息量都是 1 比特。在实际应用中，通常也把一个二进制位(binary digit) 称为 1 比特。

若信源符号集包含 M 个符号，每个符号 x_i，$(i=1,\cdots,M)$的平均信息量为

$$H(X)=-\sum_{i=1}^{M}P(x_i)\log_2 P(x_i) \qquad \text{单位 bit} \tag{1-2}$$

式中，$P(x_i)$为符号 x_i 的出现概率。当每个符号等概率出现时

$$H(X)=-M\left(\frac{1}{M}\log_2\frac{1}{M}\right)=-\log_2\frac{1}{2^k}=k \quad \text{bit} \quad (M=2^k) \tag{1-3}$$

平均信息量也称为信息熵(entropy)。熵曾经是波尔兹曼在热力学第二定律中引入的概念，用以描述分子运动的混乱度。信息熵也有类似的意义。信息熵大，意味着不确定性也大。

1.2 通信系统概述

利用电信号实现的通信可以是实时的，也可以是非实时的。实时通信指发送方产生的信号能够经历微小的几乎可以忽略不计的传播时间到达接收方，比如电话、传真。非实时通信，如电报、录像节目、Email、计算机批量数据传输等通信方式，需要通过对信息的缓存、处理、等待、转发、显示等环节实现信息的传递，存在较大的时延。另外，在采用磁盘、磁带、光盘等存储设备的系统中，可能经历更长的信息存储时间。在某种意义上，可以将这种存储系统视为在较长时间尺度上的信息传递。因此，广义的通信视为消息(或信息)在时间/空间上的传递。这种传递可以在点到点(如电话)、点到多点(如电视广播)或者多点到多点之间进行。完成通信过程的全部设备和传输媒介构成通信系统(communication system)。本书主要从系统的观点来讨论点到点通信的基本原理。

1.2.1 通信系统模型

通信系统的主要功能可以用通信系统模型来概括，如图 1-1 所示。

信源(source)是消息的发送者，完成消息从原始可感知的媒介形式，如声音、图像等，到电信号的转换，电话通信中的电话机可看成是信源。信源输出的电信号称为原始电信号，其频谱从零频附近开始，具有低通形式，所以也称为基带信号(baseband signal)。

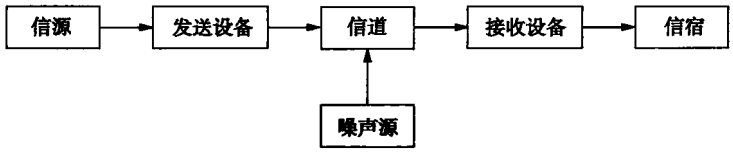

图 1-1　通信系统模型

发送设备(transmitter)的基本功能是将信源产生的原始电信号(基带信号)变换成适合在信道中传输的信号,实现信源和信道的匹配。变换方式多种多样,比如说,进行无线通信,需要把信源发出的信号通过调制技术从基带频段搬移到射频频段;如果需要对模拟信号采用数字传输方式,就需要把模拟信号转换成数字信号;数字信号传输一般还要进行信源编码和信道编码等。

信道(channel)是指信号传输的通道,可以采用电缆或光缆等有线介质,也可以利用无线介质,如电磁波。

通信系统中的噪声(noise)干扰无处不在,主要集中在信道上,因此集中在信道上进行模型化。图 1-1 中的噪声源是信道中所有噪声及分散在通信系统中其他各处噪声的集合。

在接收端,接收设备(receiver)的功能与发送设备相反,进行解调、译码等与发送设备所采用的信号变换相对应的各种信号反变换。它的任务是从带有干扰的接收信号中恢复出相应的原始电信号。

信宿(destination)是信息的接收者,将复原的原始电信号转换成相应的可感知媒介形式的消息,如电话机将接收设备输出的话音电信号还原成声音信号。

图 1-1 给出的是通信系统的一般模型,按照通信系统中传送信号不同的形式,通信系统可进一步分为模拟通信系统和数字通信系统。

模拟信号(analog)指信号参量(幅度、频率或相位)随时间连续变化,连续消息可以直接转换为模拟信号,如语音。如果信号的幅度代表消息变化,则幅度值在实数域连续取值,但在时间上可以连续取值,也可以离散取值。数字(digital)信号则指信号只能从有限的数值集合中取值,并且时间上也是离散取值——在一定的时间(一个符号周期)内只发送一个符号消息。如果原始消息离散,那么就可以直接转换成数字信号。

根据信源输出的原始电信号的形式,信源可分为数字信源和模拟信源。将信源发出的模拟信号转换成数字信号,也可以进行数字传输。所以,区分通信系统是模拟还是数字,依据是信道中传输信号的形式,而非信源信号的形式。

信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统,图 1-2 给出了模拟通信系统模型。在这种系统中,信源一般为模拟信源,完成连续消息到原始电信号的转换。由于原始电信号为基带信号,不适应远距离传输,因此需采用调制器,将原始基带信号调制为适合在信道中传输的频带信号,即频谱具有带通形式且中心频率远离零频的信号。

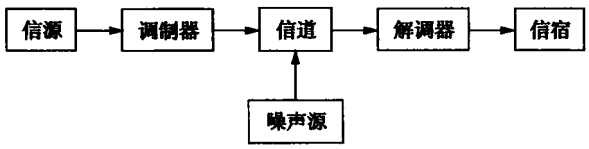

图 1-2　模拟通信系统框图

接收端则需要采用解调器，进行相应的反变换，恢复基带电信号，并且由信宿完成原始电信号到媒体信号的转换。

对于模拟信号传输而言，调制和解调的作用最为重要，所以相比图 1-1 的通信系统一般模型，这里只表示出调制器和解调器。实际上，常用的通信系统里可能还有滤波、放大、变频等过程，但一般可以视为理想线性，并且合并在信道中考虑。

信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。数字通信系统模型如图 1-3 所示。数字通信系统可进一步细分为数字频带传输通信系统和数字基带传输通信系统。

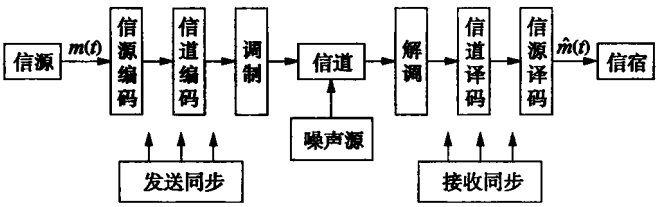

图 1-3　数字通信系统模型

数字通信系统中的信源可以是模拟信源，也可以是数字信源。信源编码的目的主要在于去除信源信号自身某种程度的冗余部分，或者根据质量要求，去除次要信息，用更少的编码位数来表示符合一定接收质量的信源符号，从而提高通信的有效程度。如果是模拟信源信号，信源编码过程还需要完成模拟信号到数字信号的变换，即进行模拟/数字(Analog/Digital，A/D) 转换；在接收端的信源译码过程则需完成相反的转换，即进行数字/模拟(Digital/Analog，D/A) 转换。在需要进行保密通信的情况下，还可以在信源编码中包含加密的功能，在压缩后进行保密编码。信源译码是信源编码的逆过程。

信道编码是按照一定的规则给信源编码器输出的信源码字增加冗余码元。如果接收端检查接收码字，发现这种规则遭到破坏，就能发现错误或者纠正错误，然后结合相应的差错处理措施即提高通信的可靠程度。信道译码是信道编码的逆过程。编码器和译码器合称编译码器(codec)。

同步器的作用是使接收端设备能够与发送端步调一致地工作以正确接收信息。“同步”是通信系统，特别是数字通信系统的重要组成部分。在数字和模拟通信系统中，要保证相干或相关解调方式能正确地恢复原始信号，接收端提供的本地参考载波，也称为相干载波(coherent carrier)，应该与接收到的已调载波严格同步，称为载波同步。时钟同步是指数字通信系统中，收发端之间需要有共同的时间标准，这样接收端才能知道接收序列中每个符号的起止时刻，从而实现正确接收。实现时钟同步有两种基本方式，一种方式是提供严格同步的时钟标准，收发双方严格遵守此时间标准，如同步数字系列(Synchronous Digital Hierarchy，SDH)传输系统采用的就是这种方式实现同步；另一种方式是通信双方没有严格同步的时钟源时，接收端采用同步电路，从接收的信号中提取码元同步信号，也称为位同步信号。另外，对于若干码元组成的码组，要保持同步，也需要从接收的信号中提取码组同步信息。这种位同步和码组同步信息可以包含在接收信号的结构特征中，也可以是发端在发送信号序列中独立插入的同步信号。如果收发之间失去同步，则接收端无法正确识别接收信号所包含的消息。

调制器和解调器与模拟通信系统中的功能一致。需要指出的是，引入了调制解调环节的数字通信系统可以称为数字频带传输系统。如果采用基带传输，则不需要调制解调。

图 1-4 给出了数字基带传输系统的构成图。基带信号形成器对信源送出的原始数字码元序列进行信号的码型转换和波形形成，以保证实现无码间干扰的传输。基带形成器还可以包括编码器、加密器等功能。接收滤波器除了限制发送信号之外的噪声，还与发送端波形形成滤波器配合以实现消除码间干扰的作用。取样判决从接收的连续信号中估计发送的数字序列。

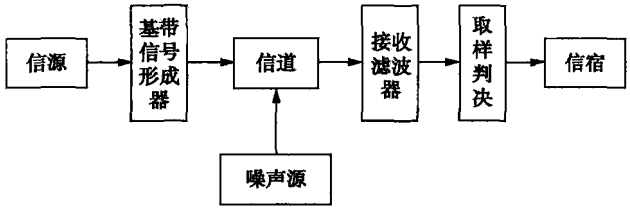

图 1-4 数字基带传输通信系统的组成框图

相比于模拟通信，数字通信具有抗干扰能力强、差错可控、易加密、易于与计算机等现代技术相结合等优点。

1.2.2 通信系统分类

实际的通信系统多种多样，可以从不同角度进行分类。下面讨论几种常见的分类。

(1)根据信道传输的信号是模拟信号还是数字信号，通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。

(2)根据通信的业务特征，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。这些系统之间可以兼容或并存。电报通信系统出现最早。电话通信应用最为广泛，现有的通信网大部分建立在电话通信系统基础之上。数据通信系统发展迅速，现在的互联网基于数据通信系统特别是计算机通信发展而成。

两个需要注意区分的概念是数字通信系统与数据通信系统。前者指信道传输的信号为数字信号的系统，而后者则指信源发出的信号为文字、数字、符号等数字信号的通信系统。数据通信系统可以采用数字传输方式，也可以采用模拟传输方式。

传输介质(media)指传输系统发送和接收端之间传输信号的物理载体。通信系统采用电磁波来传递电信号。电磁波的传播方式有两种基本形式，一种是沿导体即导向(guided)介质传播；另一种是在自由空间即非导向(unguided)介质中传播，称为无线电波传播。采用前一种传播方式的系统称为有线通信系统，采用无线电波传播方式的通信系统称为无线通信系统。

(3)根据通信系统是否采用调制，可以将通信系统分为基带传输系统和频带传输系统。基带传输系统包括音频市话、有线广播、数字基带通信系统等。频带传输系统则包括调幅广播、立体声调频广播、电视广播、市话、卫星通信等。

“复用”指在同一信道上传输多路信号的通信方式。常用的复用方式包括频分复用、时分复用、码分复用和空分复用等。

前面讨论的通信系统是单向通信系统。在实际应用中，多数情况需要进行双向通信，即通信双方都具有发送和接收设备，还需要双向的传输介质。按照系统中消息传送方向与时间的关系，双向通信可以分为单工传输方式(simplex transmission mode)、半双工传输方式(half-duplex transmission mode)和全双工传输方式(full-duplex transmission mode)。

在单工通信系统中，消息只能单向传输。广播、遥测、遥控等系统就属于单工方式的通信系

统。半双工系统支持双向通信，但是同一时间只能支持单向的通信。使用同一载频工作的无线电对讲机就属于这种方式的系统。全双工通信系统支持同时的双向通信。普通的电话就是典型的全双工通信方式。

1.3 通信系统性能指标

通信系统的性能可以从多方面衡量，从实现信号传输的角度看，最重要的是系统的有效性和可靠性。前者指系统能高效传输信息，后者指系统能准确地传输信息。通信系统实现通信需要消耗的资源主要包括信道带宽和发送信号的功率。

通信系统的设计目标就是在通信资源一定的条件下，一方面如何最经济地传输最大数量的消息；另一方面，针对噪声干扰，保证接收到消息与发送的消息尽可能一致。这两个要求往往相互矛盾，因此，系统在工程设计实践中应根据实际情况折中处理。

由于模拟通信与数字通信的差异，在有效性和可靠性的定量衡量上，需要采用不同指标。

1.3.1 有效性指标

1. 模拟通信系统的有效性指标

模拟通信系统的有效性一般采用有效传输带宽来衡量。例如，对于最大频率为 f_m 的信号，采用常规调幅系统传输此信号需要的有效传输带宽为 $2f_m$，而采用单边带调幅系统需要的带宽则为 f_m，那么后者比前者具有更高的有效性。引入多路复用技术和多址接入技术的目的就是提高系统有效性。从信道的角度看，一条物理线路上信号复用度越高，总带宽越大，有效性越高。从单路信号的角度看，一路信号自身占用的带宽越小，则给定带宽的信道中可以承载的信号越多，效率越高，有效性越好。

2. 数字通信系统的有效性指标

数字通信系统的有效性体现在一个信道中通过的信息速率。定义每秒传送的信息比特数为信息速率，单位比特/秒(bit/s)，也称为比特率。定义每秒传送的码元数量为码元速率，简称传码率，单位波特(Baud，简记为 B 或 Bd)。码元速率与信号使用的码元进制无关。

传码率与传信率均为衡量传输速率的指标，但有不同的概念，使用中不应混淆。二者之间在数值上可以换算。对于 M 进制的信号，若传码率为 R_B，相应的传信率 R_b，则

$$R_b = R_B H \tag{1-4}$$

其中，H 为该 M 进制信号消息集的平均信息量。实际系统通常默认 M 个消息出现的概率相等，则由式(1-3)可知 $H = \log_2 M$，则有

$$R_b = R_B \log_2 M \tag{1-5}$$

从系统资源消耗的角度看，具有同样传输速率的系统可能需要不同的传输带宽，频带利用率定义为单位频带内每秒传输比特数(信息量)，单位为 bit/s/Hz，即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \tag{1-6}$$

其中，B 为系统的有效传输带宽。频带利用率是一个综合带宽占用情况的有效性指标。

1.3.2 可靠性指标

1. 模拟通信系统的可靠性指标

采用通信系统的输出信噪比衡量可靠性。输出信噪比定义为输出信号平均功率 S_o 与输出噪声平均功率 N_o 之比，记为 S_o/N_o。由于这个比值是个无量纲的数值，为了表示其物理意义，采用分贝(dB)作为单位，即

$$\left(\frac{S_o}{N_o}\right)_{dB}=10\lg\frac{S_o}{N_o} \tag{1-7}$$

显然，输出信噪比越高，可靠性质量越好。例如，商业电话以 40dB 为优良质量；电视节目至少要求 50dB，优质的电视节目要达到 60dB 以上；公务通信的要求较低，需要 20～25dB。各种系统的特性差异很大，还需要考虑调制方式的差异。

2. 数字通信系统传输的可靠性指标

数字通信系统传输的可靠性指标可以用差错率来衡量，主要有误码率和误比特率两个指标。

误码率 P_e 定义为错误接收码元在传输码元总数中所占的比例，即传输每个码元发生错误接收的概率，

$$P_e=\frac{\text{错误码元数}}{\text{传输码元总数}} \tag{1-8}$$

误比特率 P_b 定义为错误接收比特在传输比特总数中所占的比例，即传输每个比特发生错误接收的概率，

$$P_b=\frac{\text{误比特数}}{\text{传输总比特数}} \tag{1-9}$$

在二进制下两种错误概率一样，不再区分。误码率大小涉及信号设计、信号发送功率、传输信道特性及接收方式等诸多因素。

系统误比特率达到一定规定值所需的最低归一化信噪比(即能量信噪比)定义为系统的功率利用率，记为 E_b/n_0，其中 E_b 表示系统的每比特信息能量，n_0 为噪声单边功率谱密度。误比特率一定时，所需的能量信噪比越低，则系统的功率利用率越高，反之则越低。

1.4 信道与干扰

要提高通信系统的性能，首先需要了解通信信道的特性，以及通信系统在传输中所受到的干扰。信道指信号的传输媒介，即物理信道，可以是有线或无线信道，也可以是物理存储介质，如光盘、磁盘等。

1.4.1 有线信道与无线信道

下面就有线信道和无线信道两类传输介质进行讨论。

1. 有线信道

明线(open wire)是指平行架设在电线杆上的架空线路。它本身是导电裸线或带绝缘层的导线。虽然它的传输损耗低，但由于易受天气和环境的影响，对外界噪声的干扰比较敏感，故逐

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com