

21 世纪高等学校电子信息类教材

# 通信原理简明教程

(非通信专业适用)

● 王新 陈学青 陈蕾 张轮 李颖洁 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校电子信息类教材

# 通信原理简明教程

(非通信专业适用)

王 新 陈学青 陈 蕾 张 轮 李颖洁 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书共 9 章, 主要内容包括: 绪论、信号分析的基本方法、信息与信道、传输技术、多路复用技术、编码技术、交换技术、通信网及数字通信系统。

本书突出简明、系统的特点, 精简模拟通信内容, 强化数字通信内容, 通过介绍现代的各种通信系统, 帮助学生掌握通信领域最新进展。

本书可作为高等学校计算机、电子工程、自动化、微电子等非通信专业本科生和研究生教材, 也可作为相关专业技术人员的参考书。

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

通信原理简明教程 / 王新, 陈学青, 陈蕾编著. —北京: 电子工业出版社, 2005.8

(21 世纪高等学校电子信息类教材)

ISBN 7-121-01520-X

I. 通... II. ①王...②陈...③陈... 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 (2005) 第 075287 号

责任编辑: 韩同平

印 刷: 北京李史山胶印厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 13 字数: 332.8 千字

印 次: 2005 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 5000 册 定价: 18.90 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 [zltts@phei.com.cn](mailto:zltts@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

# 前 言

通信原理是高等学校电子信息类各个专业的重要专业基础课。本书是为计算机、电子工程、自动化、微电子等非通信专业本科生、研究生编写的教材。

本书共分 9 章。第 1 章绪论。第 2 章介绍信号分析的基本方法,如确定信号分析、随机信号分析等。第 3 章介绍信息与信道的基本概念,如信息、信息度量、信道和噪声等。第 4 章介绍传输技术,包括模拟调制、模拟信号的数字传输、数字基带传输和数字频带传输等。第 5 章介绍多路复用技术,即多路信号在一个信道中传输的技术。第 6 章介绍通信中的编码技术,主要讲述信道编码技术,包括线性分组码和卷积码等。第 7 章介绍通信中的交换技术,包括电路交换、分组交换和 ATM 交换等。第 8 章介绍通信网技术,包括通信网基本结构、网络模型、基本通信网和网同步原理。第 9 章介绍当前数字通信系统的组成、关键技术、应用特点等,包括数字蜂窝、数字微波、卫星通信和无线局域网等。

本书注重基本概念,力争用较通俗而简明的文字和图表解释通信技术的基本原理,辅以一定的例题。本书联系当前实际应用的通信技术,帮助读者理清概念,在实际通信系统设计和使用中检验、应用基本理论。

本书配有电子教案和习题参考答案,如教学需要,可登录电子工业出版社华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 免费索取。

本书第 1,3 章由复旦大学陈学青编写,第 2,4 章由华东师范大学陈蕾编写,第 5,6 章由同济大学张轮编写,第 7,8 章由上海大学李颖洁编写,复旦大学王新编写第 9 章并负责全书统稿。

衷心感谢西安电子科技大学樊昌信教授、上海大学汪敏教授、同济大学董德存教授、同济大学何明德副教授、复旦大学薛向阳教授、中山大学马啸教授、北京航空航天大学刘凯副教授和电子工业出版社韩同平编辑对本书编写提供的指导和帮助。复旦大学秦臻、肖昆和赵力强同学绘制了本书部分图表,在此一并表示感谢。

诚挚感谢北京工业大学鲍长春教授认真审阅了书稿并提出许多中肯的意见和建议。

由于编著者水平有限,书中错误在所难免,殷切希望读者批评指正。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	(1)
1.1 通信的基本概念 .....	(1)
1.2 通信系统模型与分类 .....	(1)
1.2.1 通信系统模型 .....	(1)
1.2.2 通信系统分类 .....	(2)
1.3 通信方式 .....	(3)
1.4 通信系统主要性能指标 .....	(5)
思考题与习题 .....	(6)
<b>第 2 章 信号分析的基本方法</b> .....	(7)
2.1 信号基础 .....	(7)
2.1.1 信号表示 .....	(7)
2.1.2 信号分类 .....	(8)
2.2 确定信号的分析 .....	(9)
2.2.1 傅里叶级数与傅里叶变换 .....	(10)
2.2.2 功率(能量)谱 .....	(15)
2.2.3 时域抽样信号和抽样定理 .....	(18)
2.2.4 相关函数 .....	(20)
2.3 随机信号 .....	(21)
2.3.1 随机变量 .....	(21)
2.3.2 随机过程 .....	(22)
2.3.3 随机过程的统计特性 .....	(23)
2.3.4 平稳随机过程 .....	(24)
2.3.5 高斯过程 .....	(24)
2.3.6 窄带随机过程 .....	(24)
2.4 信号通过线性系统 .....	(25)
2.4.1 时域卷积定理和系统对信号的作用 .....	(25)
2.4.2 随机过程通过线性系统 .....	(26)
思考题与习题 .....	(26)
<b>第 3 章 信息与信道</b> .....	(28)
3.1 信息论 .....	(28)
3.2 信息的度量 .....	(28)
3.2.1 信息量 .....	(28)
3.2.2 平均信息量和信源熵 .....	(30)
3.3 信道与噪声 .....	(31)
3.3.1 信道的定义和模型 .....	(31)
3.3.2 信道中的噪声 .....	(32)

3.3.3 信道容量 .....	(33)
思考题与习题 .....	(34)
<b>第4章 传输技术</b> .....	<b>(35)</b>
4.1 模拟调制技术 .....	(35)
4.1.1 幅度调制(线性调制) .....	(36)
4.1.2 角度调制(非线性调制) .....	(37)
4.2 模拟信号的数字传输 .....	(39)
4.3 数字基带传输技术 .....	(41)
4.3.1 数字基带信号及其频谱特性 .....	(42)
4.3.2 基带信号的常用码型 .....	(45)
4.3.3 基带传输波形的形成 .....	(48)
4.3.4 基带传输系统的抗噪声性能 .....	(54)
4.3.5 眼图 .....	(56)
4.3.6 时域均衡 .....	(57)
4.4 数字频带传输技术 .....	(58)
4.4.1 二进制振幅键控 .....	(59)
4.4.2 二进制频移键控 .....	(65)
4.4.3 二进制相移键控 .....	(68)
4.4.4 几种二进制数字调制系统的性能比较 .....	(74)
4.4.5 多进制数字调制 .....	(75)
思考题与习题 .....	(79)
<b>第5章 多路复用技术</b> .....	<b>(82)</b>
5.1 概述 .....	(82)
5.2 信号的正交性原理与调制复用 .....	(82)
5.2.1 信号的正交性 .....	(82)
5.2.2 正交调制复用基本原理 .....	(87)
5.3 时分复用技术(TDM) .....	(88)
5.4 频分复用技术(FDM) .....	(91)
5.5 复合调制系统 .....	(92)
5.5.1 复合调制基本概念 .....	(92)
5.5.2 TDM与FDM变换 .....	(94)
5.5.3 单路SSB-FDM信号频谱 .....	(94)
5.5.4 单路SSB-PCM频谱 .....	(94)
5.6 波分复用技术(WDM) .....	(95)
5.7 多址通信方式 .....	(97)
5.7.1 时分多址方式(TDMA) .....	(98)
5.7.2 频分多址方式(FDMA) .....	(99)
5.7.3 码分多址方式(CDMA) .....	(100)
思考题与习题 .....	(104)
<b>第6章 编码技术</b> .....	<b>(105)</b>



6.1	概述	(105)
6.1.1	信源编码与信道编码	(105)
6.1.2	差错控制与编码分类	(106)
6.1.3	差错控制能力与编码效率	(107)
6.1.4	差错控制方式	(109)
6.2	常用的差错控制编码	(110)
6.2.1	奇偶校验码	(110)
6.2.2	重复码	(111)
6.2.3	二维奇偶校验码	(111)
6.2.4	群计数码	(112)
6.2.5	等比码	(113)
6.3	线性分组码	(113)
6.3.1	$(n,k)$ 线性分组码	(113)
6.3.2	$(n,k)$ 线性分组码的构成原理	(113)
6.3.3	生成矩阵和一致校验矩阵	(115)
6.3.4	伴随式和检错能力	(117)
6.3.5	汉明码	(118)
6.4	循环码	(119)
6.4.1	循环码概念	(119)
6.4.2	$(n,k)$ 循环码码字及多项式	(119)
6.4.3	生成多项式与生成矩阵	(120)
6.4.4	循环码编码方式	(121)
6.4.5	循环码译码方式	(121)
6.5	卷积码	(123)
6.5.1	卷积码概念	(123)
6.5.2	卷积码结构	(123)
6.5.3	卷积码树状图	(124)
6.5.4	卷积码网格图	(125)
6.5.5	卷积码解析表示	(126)
6.5.6	卷积码距离特性	(126)
6.5.7	卷积码最大似然译码	(127)
6.5.8	卷积码的维特比译码	(129)
	思考题与习题	(130)
<b>第7章</b>	<b>交换技术</b>	(132)
7.1	交换技术的发展	(132)
7.2	电路交换	(132)
7.3	分组交换	(136)
7.4	ATM 交换	(139)
7.4.1	ATM 基本概念	(139)
7.4.2	ATM 交换原理	(142)

7.4.3	ATM 交换结构 .....	(144)
7.4.4	ATM 网 .....	(146)
	思考题与习题 .....	(147)
<b>第 8 章</b>	<b>通信网 .....</b>	<b>(148)</b>
8.1	通信网基本概念 .....	(148)
8.1.1	概述 .....	(148)
8.1.2	通信网分类 .....	(148)
8.2	通信网理论基础 .....	(150)
8.2.1	通信网的基本结构及构成要素 .....	(150)
8.2.2	通信网的网络体系结构 .....	(151)
8.2.3	通信网的基本传输规程 .....	(156)
8.3	基本通信网 .....	(157)
8.3.1	电话通信网 .....	(157)
8.3.2	计算机通信网 .....	(160)
8.3.3	综合业务数字网 (ISDN) .....	(162)
8.4	同步原理 .....	(164)
8.4.1	载波同步 .....	(165)
8.4.2	位同步 .....	(166)
8.4.3	帧同步 .....	(168)
8.4.4	网同步 .....	(170)
	思考题与习题 .....	(171)
<b>第 9 章</b>	<b>数字通信系统 .....</b>	<b>(172)</b>
9.1	数字蜂窝通信系统 .....	(172)
9.1.1	“蜂窝”的概念 .....	(172)
9.1.2	第一代 (1G) 蜂窝通信系统 .....	(172)
9.1.3	第二代 (2G) 蜂窝通信系统 .....	(173)
9.1.4	第三代 (3G) 蜂窝通信系统 .....	(176)
9.2	数字微波通信系统 .....	(180)
9.3	卫星通信系统 .....	(183)
9.3.1	卫星通信概述 .....	(183)
9.3.2	卫星通信的发展历史 .....	(186)
9.3.3	我国通信卫星的发展 .....	(187)
9.4	无线局域网 .....	(188)
9.5	蓝牙通信系统 .....	(194)
9.6	其他通信系统 .....	(195)
	思考题与习题 .....	(198)
	参考文献 .....	(199)



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 通信的基本概念

按照传统的理解，通信就是信息的传输与交换，其最终目的是有效并可靠地获取、传递和交换信息。

通信传输的具体对象是消息，表现为将载荷信息的信息从一方传送到另一方。消息的表达有各种形式，如：符号、文字、语音、图像、视频、数据等。

实现通信的方式有很多，但使用广泛的是电通信和光通信。前者是用电信号携带消息，通过各种电信道进行传输，到达通信对方；而后者则是用光信号携带所要传递的消息来实现通信。目前使用最广泛的还是电通信，但随着科学技术的发展，光通信将会得到越来越多的应用。除非特别指出，本书所提到的通信都是指电通信。

## 1.2 通信系统模型与分类

### 1.2.1 通信系统模型

通信系统是指传递或交换信息所需的一切技术设备的整体。

通信发展到今天，网络通信大行其道，给人们的日常生活与工作带来了极大的便利与高效。尽管如此，通信的基础还是点对点通信，即把发送端的消息通过某种信道传递到接收端。这种点对点通信系统可以用如图 1-1 所示的通信系统的一般模型加以描述。

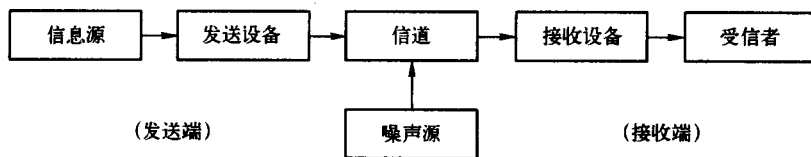


图 1-1 通信系统的一般模型

图 1-1 中，发送端信源（信息源）是发出信息的源，接收端信宿（受信者）是传输信息的归宿点。多数情况下，信源兼为信宿，通信的双方需要随时交流信息，因而要求双向通信。

信源可以是离散的数字信源，也可以是连续的模拟信源，其作用是将各种可能的消息转换成原始的电信号。

发送设备的基本功能是将信源和信道匹配起来，即将信源产生的原始电信号变换为适合于特定信道传输的电信号，以便送往传输信道。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。有时，发送设备可能还包括为达到某些特殊要求而进行的各种处理，如多路复用、保密处理、纠错编码处理等。

信道是指将信号由发送设备传输到接收设备的媒介或通道，可以是无线的，也可以是

有线的。实际上，模型中的信道部分也可以表示为传输系统。

信道既给信号以通路，也会对信号产生各种干扰和噪声，使得信号发生畸变。模型中的噪声源则是指信道噪声及分散在通信系统各处噪声的集中表示。传输媒介的固有特性和干扰直接关系到通信的质量。

在接收端，接收设备的功能恰好与发送设备的功能相反，它从接收到的电信号中恢复出相应的原始电信号，再由受信者将复原后的原始电信号转换为相应的消息。

### 1.2.2 通信系统分类

考察的角度不同，通信系统的分类方法也不同。下面介绍几种常见的分类体系。

- 根据消息的形式，通信系统可分为电报通信系统、电话通信系统、图像通信系统等。
- 根据传输媒介，通信系统可分为有线（电缆、光纤）通信系统和无线（微波、卫星）通信系统。
- 按照是否采用调制，通信系统可分为基带传输系统和频带传输系统。前者是将未经调制的信号直接进行传送，例如从模拟电话机到电信局之间就是采用基带传输；后者是对各种信号调制后再传输的总称，例如用调频台传送的广播信号，利用卫星信道传输的图像信号，利用有线电视电缆传送的有线电视信号等。常见的调制方式有幅度调制、频率调制和相位调制等。
- 根据信号复用方式，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。在传输多路信号时，频分复用就是使不同信号占据不同的频率范围，时分复用就是使不同信号占据不同的时间区间，码分复用则是用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号。
- 按照信号的性质，通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。

模拟通信是利用模拟信号作为载体来传送消息的。例如，在电话通信中，用户线上传送的电信号是随着用户声音大小的变化而变化的，这个变化的电信号无论在时间上还是在幅度上都是连续的，这种信号称为模拟信号。将这种在用户线上传输模拟信号的通信方式称为模拟通信。

模拟通信系统一般模型可由图 1-1 略加修改得到，即将其中的发送设备和接收设备分别用调制器和解调器替代，如图 1-2 所示。

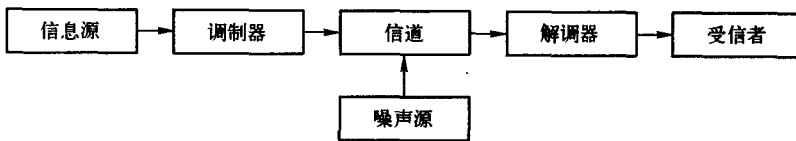


图 1-2 模拟通信系统模型

数字通信是指用数字信号作为载体，或用数字信号对载波进行数字调制后再传输的通信方式。数字信号与模拟信号不同，它是一种离散的、脉冲有无的组合形式，是载荷数字信息的信号。例如，电传机输出的信号、莫尔斯电报信号就属于数字信号。最常见的数字信号是只有两种幅度取值（用 0 和 1 代表）的二进制信号。

数字通信与模拟通信相比具有明显的优点：首先，抗干扰能力强。模拟通信时，模拟信号在传输过程中和叠加的噪声很难分离，噪声会随着信号被传输、放大，严重影响通信质量；

而数字通信中，信息包含在脉冲的有无之中，只要噪声绝对值不超过某一门限值，接收端便可判别脉冲的有无，以保证通信的可靠性。其次，远距离传输仍能保证通信质量。数字通信采用再生中继方式，在帧中继时，数字信号可以再生而消除噪声的积累，通信质量不受距离的影响，可高质量地进行远距离通信。此外，数字通信中传输的是数字信号，可以采取差错控制编码对差错进行控制，从而改善传输质量；便于采用现代数字信号处理技术对数字信息进行处理；数字信息易于进行高保密性的加密处理；数字通信可以综合传递各种消息，使通信系统的功能增强等。

综上所述，点对点数字通信系统可用如图 1-3 所示模型加以描述。一个实际的数字通信系统并不一定要包括图中的所有环节，而取决于系统具体的要求。

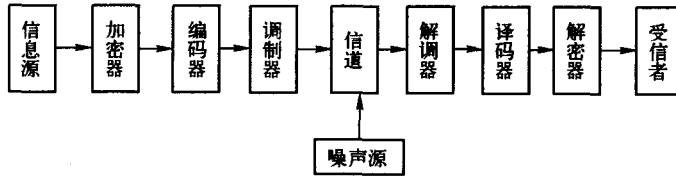


图 1-3 数字通信系统模型

数字通信为上述这些优点付出的代价是：比模拟通信占用更宽的系统带宽。我们知道，一路模拟电话一般只占据 4 kHz 的带宽，而一路相同质量的数字电话则可能要占用几十 kHz 的带宽。

## 1.3 通信方式

### 1. 单工、半双工和全双工传输

点与点之间的通信，根据消息传送的方向与时间关系，通信方式分为单工通信、半双工通信和全双工通信三种，如图 1-4 所示。

单工通信：消息只能在单个方向上传输，如图 1-4 (a) 所示。对于通信双方来说，只能是一方发送，另一方接收。例如遥控、遥测等就是单工通信方式。

半双工通信：通信双方都可以收发消息，但不能同时进行，如图 1-4 (b) 所示。甲方发送消息时，乙方接收；乙方发送消息时，甲方接收。因为只有一个传输信道，故不能同时进行。例如使用同一载频工作的无线对讲机就是采用了这种通信方式。

全双工通信：通信双方可同时进行收发消息的工作方式，如图 1-4 (c) 所示。例如普通电话就是采用了全双工的通信方式。

### 2. 串行传输与并行传输

串行传输只使用一条线路，在传送数据时，需要将由多个比特组成的数据转换为串行的比特串，然后逐一传送每一个比特（用符号“b”表示），如图 1-5 (a) 所示。例如，当传输 8b 字符串时，需要从高位到低位顺序排列每一个字符的每一个比特，从而将所有比特串依次接起来形成串行的比特流数据。当然也可以按照从低位到高位顺序传送，具体顺序取决于发送端和接收端双方的约定。串行传输往往传输速率较低，比较适合长距离的传输。但

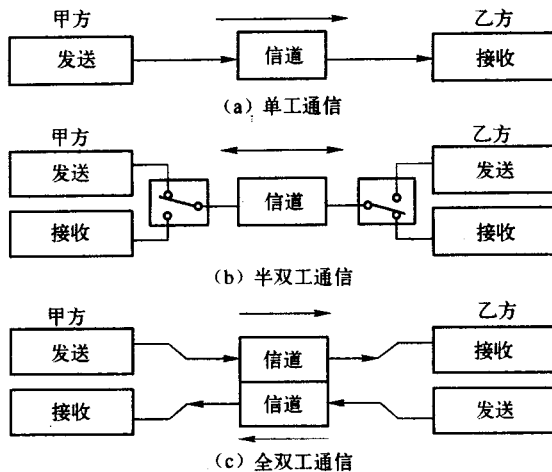


图 1-4 数字通信方式

是，在串行传输中存在接收端和发送端双方应保持同步的问题。目前有两种解决办法，即异步传输方式和同步传输方式。串行传输方式增加了发送设备和接收设备的复杂性。

并行传输指可以同时传输一组比特，每个比特使用单独的一条线路。即在多条并行信道上同时传输一组比特数据，如图 1-5 (b) 所示。并行传输非常普遍，主要用于短距离的设备之间的数据传输。例如，计算机向打印机发送数据就是一个短距离并行传输的典型实例。一般来说，并行传输通常采用同步方式，即一个时钟节拍传输一个多比特的数据，其发送和接收设备比较简单，单位时间内传输的数据量大。其缺陷也很明显，如不能长距离传输，需要多条线路等。

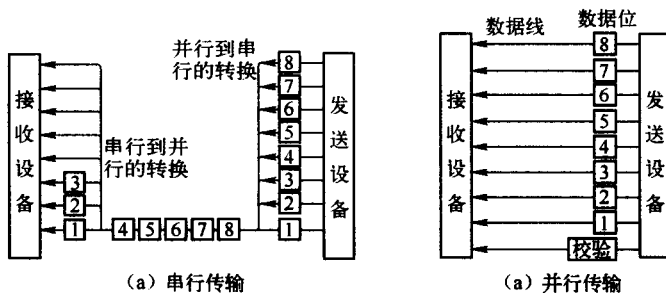


图 1-5 串行传输与并行传输

### 3. 异步传输与同步传输

异步传输一般以字符为单位，不论所采用的字符代码长度为多少位，在发送每一字符代码时，前面均加上一个“起”信号，其长度规定为 1 个码元，极性为“0”，即空号的极性；字符代码后面均加上一个“止”信号，其长度为 1 或 2 个码元，极性皆为“1”，即与信号极性相同。加上起、止信号的作用就是为了能区分串行传输的“字符”，也就是实现串行传输收、发双方码组或字符的同步。这种传输方式的特点是同步实现简单，收发双方的时钟信号不需要严格同步。缺点是对每一个字符都需加入“起、止”码元，使传输效率降低，故适用于 1200 b/s 以下的低速数据传输。

同步传输是以同步的时钟节拍来发送数据信号的，因此在一个串行的数据流中，各信号码元之间的相对位置都是固定的（即同步的）。接收端为了从收到的数据流中正确地分出每一个信号码元，首先必须建立准确的时钟信号。数据的发送一般以组（或称帧）为单位，一组数据包含多个字符，收发之间的码组或帧同步，是通过传输特定的传输控制字符或同步序列来完成的，传输效率较高。

## 1.4 通信系统主要性能指标

通信系统的性能指标主要包括有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性和可维护性等。从消息传输角度来说，通信的可靠性和有效性将是主要矛盾。可靠性主要指消息传输的质量，而有效性主要指消息传输的速度问题。一般来说，在满足一定的可靠性指标下，应尽量提高消息传输的速度，也就是有效性；或者在一定的有效性指标下，应尽可能地提高消息传输的质量，也就是可靠性。

### 1. 模拟通信系统的性能指标

对于模拟通信系统来说，其有效性用传输速度（主要取决于连续消息中所包含的信息量）和每路信号所需的传输带宽来衡量，带宽越窄，有效性越好；可靠性主要取决于发送的模拟信号和接收端所接收到的模拟信号之间的逼真程度，用输出信噪比来衡量，信噪比越大，可靠性越好。

### 2. 数字通信系统的性能指标

#### (1) 传输速率

在数字通信系统中，衡量系统有效性的主要性能指标是传输速率，通常用码元传输速率或信息传输速率来衡量或表征。

- 码元传输速率（常用  $R_B$  表示），又称码元速率、传码率、符号速率、调制速率、波特率等，定义为单位时间内传输的码元数目，单位为“波特”，常用符号“B”表示。
- 信息传输速率（常用  $R_b$  表示），又称信息速率、传信率、比特率等，定义为单位时间内传输的信息量，单位是“比特/秒”，用符号“b/s”或“bps”表示。
- 传码率与传信率之间的关系

通常一个码元可以代表多进制的符号，当采用二进制符号“0”和“1”时，一个二进制码元就代表符号“0”和“1”，此时码元速率  $R_B$  (B) 在数值上就等于信息速率  $R_b$  (b/s)；当采用  $N$  进制码元时，信息速率  $R_b$  (b/s) 和码元速率  $R_B$  (B) 之间存在下列关系

$$R_b = R_B \log_2 N$$

例如，一个四进制系统的码元速率为 1200 B，则该系统的信息速率为 2400 b/s。

#### (2) 差错率

差错率是衡量通信系统工作时传输消息可靠程度的重要指标，一般有两种表示方法，即误码率和误信率。误码率是指码元传输过程中出错的比例；误信率，又称误比特率，是指在信息传输过程中错误接收的信息量占总信息量的比例。

## 思考题与习题

- 1 何为通信？其最终目的是什么？
- 2 通信系统一般模型中，各模块主要功能是什么？
- 3 分别按消息形式、传输媒介、调制方式、信号复用方式和信号性质对通信系统进行分类。
- 4 数字通信有哪些特点？
- 5 点与点之间的通信，根据消息传送的方向与时间关系，通信方式分为哪几种？
- 6 串行传输与并行传输区别何在？
- 7 同步传输与异步传输有何区别？
- 8 通信系统主要性能指标有哪几个？
- 9 通信系统的两个有效性指标是什么？两者之间关系如何？
- 10 通信系统可靠性指标有哪几个？其间关系如何？

## 第2章 信号分析的基本方法

### 2.1 信号基础

信号是信息的载体。人们必须对所获得的信号进行分析和处理，才能得到其中的信息。

#### 2.1.1 信号表示

##### 1. 时域表示

信号是随时间变化的物理量（电、光、声等），可以用函数解析式描述，也可用图形（波形图）描述。

如余弦信号是一种非常简单的信号，其函数解析式可以描述为

$$x(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2-1)$$

式(2-1)有三个参数——幅度  $A_0$ 、角频率  $\omega_0$  和相位  $\varphi_0$ ，它们体现了信号的特征。其波形图如图 2-1 所示。

客观存在的信号都是实数函数，但为了方便数学上的分析和处理，人们也常常用复数形式来表示这些信号。

式(2-1)的余弦信号也可表示成复数形式

$$s(t) = A_0 e^{j(\omega_0 t + \varphi_0)} = A_0 e^{j\varphi_0} e^{j\omega_0 t} \quad (2-2)$$

可以看到，上述复数表示也同样具有  $A_0, \omega_0, \varphi_0$  三个参数，它们体现出信号变化的规律。复信号  $s(t)$  的实部就是实信号  $x(t)$ ，即

$$x(t) = \text{Re}[s(t)] \quad (2-3)$$

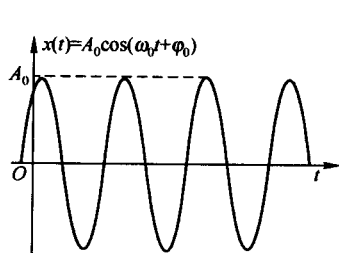


图 2-1 余弦信号波形

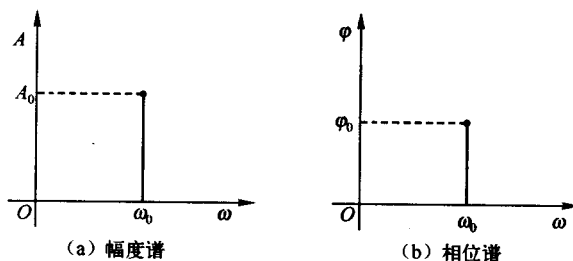


图 2-2 余弦信号的频谱

##### 2. 频域表示

对余弦波而言， $A_0, \omega_0, \varphi_0$  三个参数如能确定的话，函数或者波形就能惟一确定了。因此不妨考虑用如图 2-2 所示的方式来表示上述余弦波。



图 2-2 所示的新的坐标系（角频率  $\omega$  或频率  $f$  为横轴， $\omega = 2\pi f$ ，振幅和相位为纵轴）中，以两条线（甚至两个点就够了）表示时域波形如图 2-1 所示的信号，或者说，表示信号所有的特征信息（频率、幅度和相位），这种表示法被称为频域表示，表示的结果叫做“频谱”，对应于振幅或者相位分别为幅度谱和相位谱。

上述正弦信号为单一频率信号，因此其频谱只包含一根“线（谱线）”，人们常称其为“单色”信号。而在大多数应用场合中，信号是由若干不同频率的单色信号叠加而成的，称为“复合”信号。从频域角度看，复合信号的频谱包含若干条甚至无数条谱线。极端情况下，相邻谱线足够接近时，频谱就可表示成连续的曲线了，原来分立的谱线于是简化为曲线中的一个点（详见 2.2.1 节）。

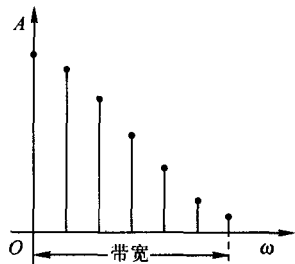


图 2-3 信号频带

考察某个信号的所有单色成分，这些成分所覆盖的频率范围，被形象地叫做“频带”。这个范围的大小，就是“带宽”，即频带宽度，如图 2-3 所示。带宽是衡量信号特性的一个重要指标。

频率和幅度对信号而言通常比相位具有更重要的意义。下面以声波信号为例进行说明。

- 频率小于 20 Hz 时为次声波，人耳通常听不到，但声强（与信号幅度有关）足够大时，人可以感觉到；
- 频率在 20 Hz~20 kHz 之间时为声波，能够被人听到；
- 频率大于 20 kHz 时为超声波，人无法听见，但其方向性好，因此在测量中具有重要的应用价值。

因此，在信号的频域表示中，有时只使用幅度谱。

在实际应用中，人们更习惯于使用“复频谱”（详见 2.2.1 节）来对信号进行表示和研究。“复频谱”的构成与上述实数谱有些差异，但原理完全相同。

## 2.1.2 信号分类

可以用多种方法对信号进行分类。以下是常见的三种分类方式。

### 1. 按信号的性质分类

这种方式可分为确定（性）信号和随机信号两类。

确定信号是指在相同的实验条件下，能够重复实现的信号。根据信号是否具有周期性，又有周期信号和非周期信号之分。

随机信号则是在相同的实验条件下，不能够重复的信号。

### 2. 按信号的自变量或函数取值分类

自变量多为时间  $t$ ，按照它的取值是否连续，可分为连续时间信号和离散时间信号。在此基础上按照函数取值是否连续，又可分为模拟信号、抽（采）样信号、量化信号、数字信号等。具体分类和特点可参见表 2-1 及图 2-4。有时也可以仅以函数取值进行分类，将上述模拟信号和抽样信号统称为模拟信号，将数字信号和量化信号统称为数字信号。

表 2-1 信号分类

自变量 $t$	函数值 $f(t)$	信号分类
连续 (时间信号)	连续	模拟信号
	离散	量化信号
离散 (时间信号)	连续	抽样信号
	离散	数字信号

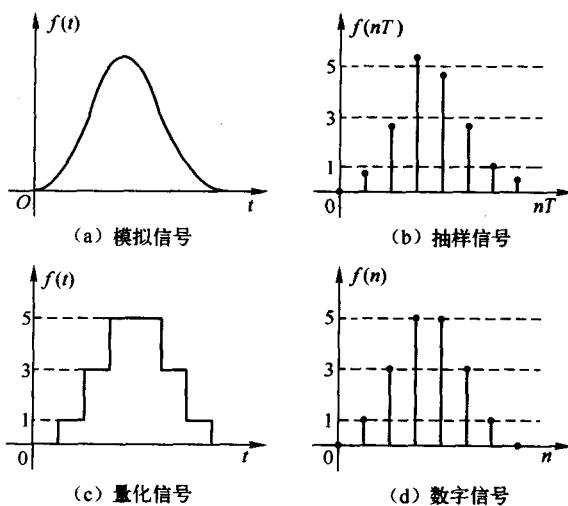


图 2-4 各种信号波形特点

### 3. 按信号的时间或频率定义范围分类

在有限的时间区间  $(t_1, t_2)$  内有定义, 而在区间外为零, 这类信号叫做时域有限信号, 简称时限信号。矩形脉冲、正弦脉冲等信号都属这种类型。而周期信号、指数信号、随机信号等, 则属于时域无限信号。

类似地, 若信号的所有频率成分都局限在某个范围之内, 则这个信号属于频域有限信号, 简称频限信号。正弦信号、限带白噪声等都属于这种类型。而冲激函数、白噪声、理想采样信号等, 则属于频域无限信号, 它们的带宽无限宽。

在信号理论中, 时域和频域之间存在着“对称性关系”——时限信号在频域上是无限信号, 而频限信号又对应于时域无限信号。这种关系意味着一个信号不可能同时在时域和频域上都是有限的。

## 2.2 确定信号的分析

一般说来, 信号分析就是将 (复杂) 信号分解为若干简单分量的叠加, 并以这些分量的组成情况对信号特性进行考察。

对信号进行分析的方法通常有两类: 时域分析和频域 (谱) 分析。其中时域分析以波形为基础, 这里不详细展开讨论。频域分析则将时域信号变换到频域中进行分析, 最基本的方法是将信号分解为不同频率的余 (正) 弦分量的叠加, 即利用傅里叶变换 (级数) 进行分析。