


21 世纪高职高专规划教材  
高等职业教育规划教材编委会专家审定

TONGXIN YUANLI

# 通信原理

主 编 李 辉  
副主编 孙群中 范兴娟

 北京邮电大学出版社  
www.buptpress.com



21 世纪高职高专规划教材  
高等职业教育规划教材编委会专家审定

# 通信原理

主 编 李 辉

副主编 孙群中 范兴娟



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

## 内 容 简 介

本书以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、基本原理和基本实现方法。

全书共9章,内容包括通信系统概述、信号分析、信道与噪声、模拟调制、模拟信号的数字传输、数字基带传输、数字调制、差错控制编码、同步原理等。

本书可作为高职高专通信、电子信息类或相近专业的教材,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/李辉主编. --北京:北京邮电大学出版社,2012.2

ISBN 978-7-5635-2869-1

I. ①通… II. ①李… III. ①通信原理—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第272188号

---

书 名: 通信原理

主 编: 李 辉

责任编辑: 王晓丹 彭 楠

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京联兴华印刷厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 15.25

字 数: 388千字

印 数: 1—3 000册

版 次: 2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷

---

ISBN 978-7-5635-2869-1

定 价: 35.00元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

# 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”的人才需求,越来越多的院校开设了“通信原理”课程。为适应高职高专教育的需要,针对高职高专学生的实际情况,依据“必需、够用”理论、重在应用的原则,编者在总结了许多工作在高职高专教育第一线教师的经验和现代通信技术发展成果的基础上编写成本书。本书的编写,在引导学生学习上尽量做到“以学生为中心”,加强教材、学生和教师的互动性。根据职业技术教育的特点,本书在编写过程中,既保证了知识的“系统性”和“完整性”,又重在“实用性”和“可读性”。本书的编写特点如下。

(1) 在具体内容的阐述上,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) 内容编写中列举了生活当中的形象例子加以说明,并加入了说明图片和表格。

(3) 各章开始作了前期的学习说明;各章结束作了归纳总结。

(4) 考虑到使用本书的部分学生之前没有学过“信号与系统”,在第2章增加了信号分析的内容。

(5) 本书每章后面附有大量习题及答案,题型涵盖填空、选择、判断、简答、计算等,使学生通过练习及时巩固所学。

本书共9章,各章主要包括如下内容。

第1章通信系统概述,主要介绍了通信的基本概念、通信系统的组成、信息及其度量、通信系统的分类及通信方式、通信系统的主要性能指标。

第2章信号分析,主要介绍了信号概述、确知信号分析和随机信号分析。

第3章信道与噪声,主要介绍了信道的概念及分类、信道容量和信道中的噪声。

第4章模拟调制,主要介绍了幅度调制(线性调制)原理、角度调制(非线性调制)原理和频分复用(FDM)。

第5章模拟信号的数字传输,主要介绍了脉冲编码调制(PCM)、增量调制和时分复用(TDM)。

第6章数字基带传输,主要介绍了数字基带传输系统组成、数字基带传输码型及功率谱特性、无码间干扰的数字基带传输系统、数字基带传输系统性能及处理。

第7章数字调制,主要介绍了幅度键控(ASK)、频率键控(FSK)、相位键控(PSK和DPSK)、现代数字调制技术。

第8章差错控制编码,主要介绍了差错控制的基本概念及原理、简单的差错控制编

码、线性分组码和汉明码、循环码、卷积码和 Turbo 码。

第 9 章同步原理,主要介绍了同步的概念和分类、载波同步、位同步、群同步等网同步。

本书的结构共分为四部分,第一部分为通信基础知识,包括第 1 章、第 2 章和第 3 章;第二部分为模拟通信原理,包括第 4 章;第三部分为数字通信原理,包括第 5 章、第 6 章、第 7 章和第 8 章,第四部分为同步原理,包括第 9 章。

本书第 1 章、第 2 章和第 8 章由李辉老师编写,第 4 章、第 6 章和第 9 章由孙群中老师编写,第 3 章、第 5 章和第 7 章由范兴娟老师编写,全书由李辉老师统稿。

本书编写过程中,参考了一些相关文献,在此对这些文献的作者表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误或不足之处,恳请专家和读者不吝指教,提出宝贵意见和建议。

编 者

# 目 录

<b>第 1 章 通信系统概述</b> .....	1
1.1 通信的基本概念 .....	1
1.2 通信系统的组成 .....	3
1.2.1 通信系统的模型 .....	3
1.2.2 模拟通信系统的模型 .....	4
1.2.3 数字通信系统的模型 .....	5
1.3 信息及其度量 .....	6
1.4 通信系统的分类及通信方式 .....	8
1.4.1 通信系统的分类 .....	8
1.4.2 通信方式 .....	9
1.5 通信系统主要性能指标.....	12
1.5.1 模拟通信系统的主要性能指标.....	12
1.5.2 数字通信系统的主要性能指标.....	12
本章小结 .....	15
习题 .....	15
<b>第 2 章 信号分析</b> .....	17
2.1 信号概述.....	17
2.1.1 信号的概念.....	17
2.1.2 信号的分类.....	19
2.1.3 几种常见信号.....	21
2.1.4 信号的时域分析和频域分析.....	24
2.2 确知信号分析.....	24
2.2.1 周期信号及其频谱.....	24
2.2.2 非周期信号及其频谱.....	31
2.3 随机信号分析.....	41
2.3.1 基本概念.....	41
2.3.2 随机过程的统计参数.....	43
2.3.3 相关分析.....	45
2.3.4 功率谱分析.....	46
本章小结 .....	47
习题 .....	48

<b>第 3 章 信道与噪声</b> .....	50
3.1 信道概念及分类 .....	50
3.1.1 信道概念 .....	50
3.1.2 信道分类 .....	51
3.1.3 信道模型 .....	57
3.2 信道容量 .....	60
3.2.1 连续信道信道容量 .....	60
3.2.2 离散信道信道容量 .....	62
3.3 信道中的噪声 .....	63
本章小结 .....	65
习题 .....	66
<b>第 4 章 模拟调制</b> .....	68
4.1 幅度调制(线性调制)原理 .....	69
4.1.1 幅度调制的一般模型 .....	69
4.1.2 完全调幅(AM) .....	69
4.1.3 抑制载波的双边带调制(DSB) .....	72
4.1.4 单边带调制(SSB) .....	73
4.1.5 残留边带调制(VSB) .....	75
4.1.6 线性调制系统的抗噪声性能分析 .....	76
4.2 角度调制(非线性调制)原理 .....	81
4.2.1 角度调制的基本概念 .....	81
4.2.2 窄带调频与宽带调频 .....	82
4.2.3 非线性调制系统的抗噪声性能分析 .....	84
4.3 频分复用(FDM) .....	85
本章小结 .....	86
习题 .....	87
<b>第 5 章 模拟信号的数字传输</b> .....	90
5.1 脉冲编码调制 .....	91
5.1.1 抽样 .....	92
5.1.2 量化 .....	94
5.1.3 编码 .....	99
5.2 增量调制 .....	103
5.3 时分复用 .....	105
本章小结 .....	108
习题 .....	109

<b>第 6 章 数字基带传输</b> .....	111
6.1 数字基带传输系统组成 .....	111
6.2 数字基带传输码型及功率谱特性 .....	113
6.2.1 数字基带信号的基本码型 .....	113
6.2.2 数字基带信号的频谱特性 .....	115
6.2.3 数字基带传输线路码型的要求 .....	118
6.2.4 数字基带传输线路码型 .....	118
6.3 无码间干扰的数字基带传输系统 .....	121
6.3.1 基带传输模型构成 .....	121
6.3.2 基带传输波形的形成——Nyquist 第一准则 .....	122
6.3.3 部分响应形成系统与编码 .....	127
6.4 数字基带传输系统性能及处理 .....	132
6.4.1 眼图 .....	132
6.4.2 均衡 .....	133
6.4.3 数据序列的扰乱与解扰 .....	136
本章小结.....	138
习题.....	138
<b>第 7 章 数字调制</b> .....	141
7.1 幅度键控(ASK) .....	142
7.1.1 2ASK 信号的调制 .....	142
7.1.2 2ASK 信号的带宽 .....	143
7.1.3 2ASK 信号的解调 .....	144
7.1.4 多进制幅度键控信号(MASK) .....	146
7.2 频率键控(FSK) .....	147
7.2.1 2FSK 信号的调制 .....	147
7.2.2 2FSK 信号的带宽 .....	148
7.2.3 2FSK 信号的解调 .....	149
7.2.4 多进制频率键控信号(MFSK) .....	151
7.3 相位键控(PSK 和 DPSK) .....	152
7.3.1 2PSK 信号 .....	152
7.3.2 2DPSK 信号 .....	154
7.3.3 多进制相位键控 .....	158
7.3.4 二进制数字调制系统的性能比较 .....	159
7.4 现代数字调制技术 .....	160
7.4.1 正交振幅调制(QAM).....	160
7.4.2 高斯最小频移键控(GMSK) .....	162
7.4.3 正交频分复用技术(OFDM) .....	163
本章小结.....	165



习题	166
<b>第 8 章 差错控制编码</b>	<b>168</b>
8.1 差错控制的基本概念及原理	168
8.1.1 差错控制的基本思想	169
8.1.2 差错类型	169
8.1.3 差错控制方式	169
8.1.4 差错控制编码原理	170
8.1.5 差错控制编码的分类	173
8.2 简单的差错控制编码	174
8.3 线性分组码和汉明码	176
8.3.1 线性分组码	176
8.3.2 汉明码	180
8.4 循环码	182
8.4.1 循环码的特性	183
8.4.2 循环码的码多项式	183
8.4.3 码多项式的按模运算	183
8.4.4 循环码的生成多项式和生成矩阵	185
8.4.5 循环码的编码方法	187
8.4.6 循环码的解码方法	190
8.4.7 循环冗余校验码	193
8.5 卷积码	193
8.5.1 卷积码的基本概念	193
8.5.2 卷积码的编码	194
8.5.3 卷积码的图解表示	195
8.5.4 卷积码的译码	197
8.6 Turbo 码	199
8.6.1 Turbo 码编码器	200
8.6.2 Turbo 码译码器	202
本章小结	203
习题	204
<b>第 9 章 同步原理</b>	<b>206</b>
9.1 同步的概念和分类	206
9.2 载波同步	207
9.2.1 直接法	207
9.2.2 插入导频法	209
9.2.3 载波同步系统的性能指标	210
9.3 位同步	211
9.3.1 插入导频法	211

9.3.2 直接法 .....	213
9.3.3 位同步系统的性能指标 .....	213
9.4 群同步 .....	214
9.4.1 起止同步法 .....	215
9.4.2 连贯式插入法 .....	215
9.4.3 间歇式插入法 .....	220
9.4.4 群同步系统的性能指标 .....	220
9.4.5 群同步的保护 .....	221
9.5 网同步 .....	223
本章小结 .....	225
习题 .....	226
<b>部分习题参考答案</b> .....	<b>228</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>233</b>

# 第 1 章 通信系统概述

## 本章内容

- ◇ 通信的基本概念；
- ◇ 通信系统的组成；
- ◇ 信息及其度量；
- ◇ 通信系统的分类及通信方式；
- ◇ 通信系统的主要性能指标。

## 本章重点

- ◇ 数字通信系统的组成；
- ◇ 信息及其度量；
- ◇ 衡量数字通信系统的主要性能指标。

## 本章难点

- ◇ 信息及其度量。

## 学习本章目的和要求

- ◇ 熟悉通信的基本概念和组成通信系统的各部分功能；
- ◇ 掌握信息量及熵的计算；
- ◇ 了解通信系统的分类及通信方式；
- ◇ 掌握数字通信系统有效性和可靠性指标的计算。

## 1.1 通信的基本概念

通俗地说,通信就是人们在日常生活中相互之间传递信息的过程。在古代,人们通过驿站、飞鸽传书、烽火报警、符号、身体语言、眼神、触碰等方式进行信息传递,到了今天,随着科学水平的飞速发展,相继出现了无线电、固定电话、移动电话、互联网甚至视频电话等各种通信方式。通信技术拉近了人与人之间的距离,提高了经济的效率,深刻地改变了人类的生活方式。

从古至今,通信的方式多种多样,包括以视觉、声音传递为主的古代的烽火台、击鼓、旗语、现代电信等及以实物传递为主的驿站快马接力、信鸽、邮政通信等。古代的通信对远距离来说,最快也要几天的时间。而现代通信往往以电信方式为主,如电报、电话、传真、短信和 E-mail 等。

通信(Communication),就是信息的传递,是指由一地向另一地进行信息的传输与交

换,其目的是传输消息。随着社会生产力的发展,人们对传递消息的要求不断提升,通信在人类实践过程中使得人类文明不断进步。在各种各样的通信方式中,利用“电”来传递消息的通信方法称为电信(Telecommunication),这种通信具有迅速、准确、可靠等特点,且几乎不受时间、地点、空间、距离的限制,因而得到了飞速发展和广泛应用。

1835年,美国人莫尔斯发明了电报系统,1844年,世界上第一个实用公共电报开始发送,从此人类进入了电信时代。1876年,美国人贝尔发明了电话,将人类从无声的电信时代带入了有声的电信时代。

### 1. 消息

“消息”一词最早出现于《易经》:“日中则昃,月盈则食,天地盈虚,与时消息。”意思是说,太阳到了中午就要逐渐西斜,月亮圆了就要逐渐亏缺,天地间的事物,或丰盈或虚弱,都随着时间的推移而变化,有时消减,有时滋长。由此可见,我国古代就把客观世界的变化,把它们的发生、发展和结局,把它们 的枯荣、聚散、沉浮、升降、兴衰、动静、得失等变化中的事实称为“消息”。到了近代,“消息”逐渐成为一种固定的新闻载体,所以“消息”又叫新闻。

在日常生活中,把关于人或事物的报道称为消息。通信的目的是传输含有信息的消息。在通信系统中传输的是各种各样的消息,而这些被传送的消息有着各种不同的形式,如文字、符号、数据、语言、音符、图片、图像等。所有这些不同形式的消息都是能被人们感觉器官所感知的,人们通过通信,接收到消息后,得到的是关于描述某事物状态的具体内容。

### 2. 信息

关于信息的定义实在太多了。哲学家从认识论定义;数学家从概率论定义;物理学家说,它是熵;通信专家说,信息是对消息解除不确定度。

1948年,美国数学家、信息论的创始人香农在题为《通讯的数学理论》的论文中指出:“信息是用来消除随机不定性的东西”。1948年,美国著名数学家、控制论的创始人维纳在《控制论》一书中指出:“信息就是信息,既非物质,也非能量。”

信息是指消息中包含的有意义的内容,它是通过消息来表达的,消息是信息的载体。

### 3. 信号

信号是消息的物理载体。在通信系统中信号以电(或光)的形式进行处理和传输。电信号最常用的形式是电流或电压。

信号基本上可分为两大类:模拟信号和数字信号。如果信号的幅度随时间作连续的、随机的变化,则称为模拟信号。模拟信号的特性如图 1-1 所示。语音信号就属于模拟信号。

如果信号的幅度随时间的变化只具有离散的、有限的状态,则称为数字信号。与模拟信号相反,数字信号的参量取值是离散变化的。数字信号的特性如图 1-2 所示。

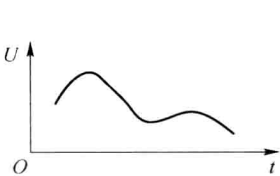


图 1-1 模拟信号

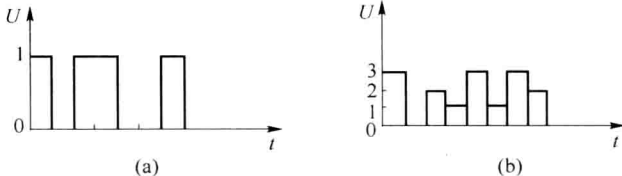


图 1-2 数字信号

### 4. 电信

国际电信联盟(International Telecommunications Union, ITU)是联合国的一个专门机

构,也是联合国机构中历史最长的一个国际组织,简称“国际电联”或“电联”,下设无线电通信部、标准化部、发展部和电信展览部。国际电联总部设于瑞士日内瓦,其成员包括 191 个成员国和 700 多个部门成员及部门准成员。每年的 5 月 17 日定为世界电信日,中国于 1920 年加入 ITU。

ITU 对电信的定义是:利用有线、无线、光或者其他电磁系统传输、发射或接收符号、文字、图像、声音或其他任何形式的信息。根据定义,凡是发信者利用电磁系统,包括有线电信系统、无线电信系统、光学通信系统以及其他电磁系统,采用包括符号、文字、图像、声音以及由这些形式组合而成的各种可视、可听或可用的信号,向一个或多个接收者发送信息的过程,都称为电信。

## 1.2 通信系统的组成

### 1.2.1 通信系统的模型

通信的任务是将信息从一地传送到另一地,完成信息传送的一系列设备及传输媒介构成通信系统,其基本模型如图 1-3 所示。

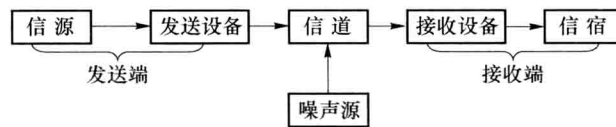


图 1-3 通信系统的基本模型

上述模型是一个基本的点对点通信的模型,它概括地反映了通信系统的共性,根据我们研究对象及所关心的问题不同,将会使用不同形式的较具体的通信系统模型。通信原理的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

从图 1-3 可以看出,通信系统由五部分组成,即信源、发送设备、信道和噪声源、接收设备、信宿。

#### 1. 信源

信源是指信息源,信息的发送者。其作用是把消息转换成原始的电信号,如电话机的送话器、电视摄像机、计算机等都可以看成是信源。信源输出的原始电信号,称为基带信号。

#### 2. 发送设备

发送设备是许多电路与系统的总称,其作用是将信源输出的信号进行处理,变换成适合在信道上传送的信号,送往信道,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。调制就是用基带信号来控制载波的参量(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。放大是将弱信号变成强信号。

#### 3. 信道和噪声源

信道是信号传输的通路,其作用是将来自发送端的信号发送到接收端。信道可分为两种,一种是有线信道,如双绞线、同轴电缆、光缆等;另一种是无线信道,如中长波、短波、微波

中继及卫星中继等。

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。上述前两种噪声与信号是否存在无关，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，称之为“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中加入。

#### 4. 接收设备

接收设备的功能正好与发送设备相反，它将从收到的含噪信号中恢复提取出有用的原始信号。

#### 5. 信宿

信宿与信源相对应，是信息的接收者。其作用是将由接收设备复原的原始信号转换成相应的消息，如电话机中的受话器，其作用就是将对方传送过来的电信号还原成了声音。

通信系统传输的消息具有不同的形式，将消息转换成模拟信号在信道上传输的通信方式称为模拟通信，相应的模拟通信系统是按照模拟信号的传输特点设计的。将消息转换成数字信号在信道上传输的通信方式称为数字通信，相应的数字通信系统是按照数字信号的传输特点设计的。

需要指出的是，模拟信号并不是一定要在模拟通信系统中才能传输，任何模拟信号经过模/数变换以后都能在数字通信信道上传输。同样，数字信号通过相应的终端设备转换，也可以在模拟通信系统中进行传输。而且无论是模拟通信方式还是数字通信方式，在整个通信系统中有较大一部分是公用的。

### 1.2.2 模拟通信系统的模型

传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统，其基本组成模型如图 1-4 所示。

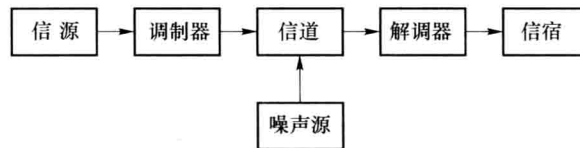


图 1-4 模拟通信系统的模型

模拟通信系统传输信息，需要两种变换。首先，将信源产生的连续消息要变换成原始电信号，接收端收到的信号要反变换成原连续消息。原始电信号由于它通常具有频率较低的频谱分量，一般不宜直接传输，因此，模拟通信系统常需要有第二次变换：将原始电信号变换成频带适合信道传输的信号，并在接收端进行反变换，这种变换和反变换通常称为调制和解调。

模拟通信系统传输连续的模拟信号，占用带宽窄，如每路语音信号带宽仅为 4 kHz。在信号的传输过程中，噪声叠加于信号之上，并随传输距离的增加而加强，在接收端很难将信号和噪声分离，系统的抗干扰能力较弱且不适于长距离信号传输。

### 1.2.3 数字通信系统的模型

传输数字信号的通信系统,称为数字通信系统,其基本组成模型如图 1-5 所示。

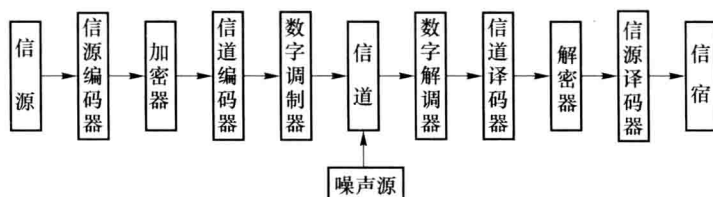


图 1-5 数字通信系统的模型

#### 1. 信源编码器与信源译码器

信源编码器是将信源送出的信号进行适当处理,产生周期性符号序列,使其变成合适的数字编码信号。信源编码的作用包含模拟信号的数字化和信源压缩编码两个范畴:一是如果信源输出的信号是模拟信号,信源编码器将对模拟信号进行抽样、量化、编码,使之变成数字信号,从而完成模/数转换任务;二是如果信源输出的是数字信号,这时信源编码器的作用是提高数字信号传输的有效性,去除或减少冗余并压缩原始信号的数据速率。

信源译码器实现信源编码的逆过程,即解压缩和数/模转换。

#### 2. 加密器与解密器

加密器主要用于需要保密的通信系统。加密处理的过程是采用复杂的密码序列,对信源编码输出的数码序列进行人为“扰乱”。

解密器实现的是加密器的逆过程,即从加密的信息中恢复出原始信息。

#### 3. 信道编码器与信道译码器

信号在信道中传输时,会受到各种噪声干扰,引起信号的差错和失真,导致误码。信道编码是为了提高数字传输的可靠性,对传输中产生的差错采用的差错控制技术,也称为差错控制编码。即在信号中按一定的编码规则加入冗余码元,以达到在接收端可以检出和纠正误码的目的。

信道译码器完成信道编码器的逆过程,即从编码的信息中恢复出原始信息。

#### 4. 数字调制器与数字解调器

与模拟通信系统的调制器作用一样,数字调制器将数字基带信号转换成适合于信道传输的频带信号。

数字解调器完成数字调制器的逆过程,即将收到的频带信号还原为数字基带信号。

相对于模拟通信系统而言,数字通信系统有如下优点。

(1) 抗干扰、抗噪声能力强,无噪声积累。在数字通信系统中,传输的信号是数字信号,以二进制为例,信号的取值只有两个,这样发送端传输的和接收端需要接收和判决的电平也只有两个值。若“1”码时取值为  $A$ ,“0”码时取值为  $0$ ,传输过程中由于信道噪声的影响,必然会使波形失真。在接收端恢复信号时,首先对其进行抽样判决,才能确定是“1”码还是“0”码,并再生“1”、“0”码的波形。因此只要不影响判决的正确性,即使波形有失真也不会影响再生后的信号波形。而在模拟通信系统中,如果模拟信号累加上噪声后,即使噪声很小,也

很难消除。

(2) 便于加密处理,保密性强。数字信号与模拟信号相比,更容易加密和解密。因此,数字通信保密性好。

(3) 差错可控。数字信号在传输过程中出现的差错,可通过纠错编码技术来控制。

(4) 利用现代技术,便于对信息进行处理、存储和交换。由于计算机技术、数字存储技术、数字交换技术以及数字处理技术等现代技术飞速发展,许多设备、终端接口均是数字信号,因此极易与数字通信系统相连接。正因为如此,数字通信才得以高速发展。

(5) 便于集成化,使通信设备微型化。

数字通信系统相对于模拟通信系统来说,主要有以下两个缺点。

(1) 数字信号占用的频带宽,以电话为例,一路数字电话一般要占据 20~64 kHz 的带宽,而一路模拟电话仅占用约 4 kHz 的带宽。如果系统传输带宽一定的话,模拟电话的频带利用率要高出数字电话的 5~15 倍。

(2) 对同步要求高,系统设备比较复杂。数字通信系统中,要准确地恢复信号,必须要求收端和发端保持严格同步。因此数字通信系统及设备一般都比较复杂,体积较大。随着数字集成技术的发展,各种中、大规模集成器件的体积不断减小,加上数字压缩技术的不断完善,数字通信设备的体积将会越来越小。

## 1.3 信息及其度量

### 1. 信息量定义

通信的目的在于传递信息。信息是消息中有意义的内容。消息一般指对人或事物情况的报道,其表现形式有语音、文字、数据、图像等。不同形式的消息,可以包含相同的信息。例如,分别用语音和文字传送的天气预报,所含信息内容相同。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。

传输信息的多少用“信息量”来衡量。对于接收者来说,某些消息比另外一些消息传递更多的信息。例如,天气预报部门公布“今年冬天的气候要比去年冬天更冷些”,比起“今年冬天的气候将与去年夏天一样热”来说,前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为在接收者看来,前一事件很可能发生,不足为奇,但后一事件却极难发生,听后使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义。而且可以看出,对接收者来说,事件越不可能发生,越是使人感到意外和惊奇,信息量就越大。

通过概率论可知,事件的不确定程度,可以用其出现的概率来描述。即事件出现的可能性越小,则概率就越小,反之,则概率就越大。消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关,消息出现的概率越小,则消息中包含的信息量就越大。如果事件是必然的(概率为 1),则它传递的信息量应为零;如果事件是不可能的(概率为 0),则它将有无穷的信息量。

设信源是由  $q$  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

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

(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  $s_i$  所具有的不确定程度。

(2) 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(1-1)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  $e$ ,信息量的单位为奈特(nit);底数为 10,信息量的单位为哈特(hart)。通常使用的单位是比特。

(4) 对于二进制信源符号,只有 1 和 0,假设 1 和 0 等概率出现,则有

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

即等概率二进制信源每一符号的信息量为 1 bit。同理,对于四进制,假设信源符号等概率出现,则每符号的信息量是 2 bit,是二进制的 2 倍。依此类推,对于  $M=2^k$  进制,假设各信源符号等概率出现,则每符号的信息量是  $k$  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,则平均每符号的信息量为

$$H(S) = \sum_{i=1}^q P(s_i) I(s_i) = - \sum_{i=1}^q P(s_i) \log_2 P(s_i) \quad (1-2)$$

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

(1) 其物理概念是信源中每个符号的平均信息量,单位是比特/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

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

(4) 当信源符号不等概率发生时,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 1.3.1】** 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。试求某信息 1022,0102,0130,2130,2120,3210,1003,2101,0023,1020,0201,0312,0321,0012,0210 的信息量。