



全国高职高专教育“十一五”规划教材

数字通信技术

廖继红 主 编

刘 俊 副主编



高等教育出版社

全国高职高专教育“十一五”规划教材

数字通信技术

廖继红 主 编

刘 俊 副主编

高等教育出版社

内容提要

本书以通信系统的构成为主线,重点介绍数字通信系统的相关通信技术。学习本课程,一方面,读者可以掌握调制/解调、信源编码、信道编码、复用原理、传输系统、同步系统等通信的基本概念、基本原理及应用;另一方面,从注重培养理论联系实际出发,本书简单介绍了典型数字通信技术应用,使学生能建立数字通信系统的完整概念,更为深刻地理解和掌握数字通信技术的知识与技能。

与普通高等院校教材相比,本书注重基本概念、基本理论和基本分析方法,对一些复杂的推导进行了删减,具有简明扼要的特点。通过本书的学习,学生能够掌握完整的数字通信基本知识和概况,并具有很强的通信系统认知能力。

本书可作为高等职业院校、高等专科院校、成人高校、民办高校及本科院校举办的二级职业技术学院通信技术、移动通信技术及相关专业的教学用书,也适用于五年制高职、中职相关专业,并可作为社会从业人士的业务参考书及培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信技术/廖继红主编. —北京:高等教育出版社,2006. 12

ISBN 7-04-019513-5

I. 数... II. 廖... III. 数字通信-高等学校:技术学校-教材 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 132100 号

策划编辑	孙杰	责任编辑	许海平	封面设计	王凌波	责任绘图	朱静
版式设计	马静如	责任校对	王效珍	责任印制	毛斯璐		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100011
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 唐山市润丰印务有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 9
字 数 210 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2006年12月第1版
印 次 2006年12月第1次印刷
定 价 11.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 19513-00

前 言

数字通信技术的发展日新月异,已经成为现代通信的主流技术,了解和掌握数字通信技术成为人们的迫切愿望。本书旨在为高职高专学生提供“对口”的数字通信技术教材,以“初步讲解理论,简要介绍技术”为指导思想展开数字通信基本原理与技术的介绍,避免复杂的数学推导。本书内容丰富、系统全面、层次分明、文字简练、图文并茂、通俗易懂,强调理论联系实际,力求反映最新的数字通信技术。

本书内容编排符合高职高专教育特点。以讲清概念、强化应用为教学重点,适当考虑培养学生具有一定的可持续发展能力。既讲述数字通信的基本原理、基本性能和基本分析方法,又介绍新技术、新发展。特别是注重数字通信技术在实际系统中的应用,注意吸收新技术和新的通信系统。

本书计划 72 学时,但本书章节组织富有弹性,不同专业可根据情况进行章节取舍。

本书共分六章,具体内容和要求如下:

第一章主要介绍数字通信和模拟通信的概念及其特点,要求学生重点掌握数字通信系统的模型和主要性能指标,难点是理解数字通信系统的性能指标;第二章主要介绍模拟通信系统的调制/解调技术和相关知识,要求学生重点掌握模拟通信系统的模型和技术指标,难点是理解频分复用技术;第三章主要介绍模拟信号的数字传输概念及其实现技术,要求学生重点掌握数字通信的信源编码技术、时分复用技术、信道编码原理和常见的几种信道编码,难点是 PCM 编码的实现;第四章主要介绍数字信号传输的实现及其特点,要求学生重点掌握实现数字基带传输和频带传输的相关技术,难点是理解基带传输和频带传输的关系;第五章主要介绍数字通信中定时、同步的概念及其实现方法,要求学生重点掌握 PCM 数字通信系统定时、同步的实现技术,难点是理解同步的实现方法;第六章简单介绍现代数字通信技术应用,包括数字光纤通信系统、数字微波通信系统、数字卫星通信系统、数字移动通信系统及个人通信,要求学生对数字通信的典型技术应用有系统的认识。

本书第一、三、四、五章由刘俊编写,第二章由廖继红编写,第六章由梁奂晖编写,廖继红负责统稿。

本书由空军工程大学电讯工程学院陈树新副教授审稿,他对本书的编写提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示感谢。

由于编写时间仓促、编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 9 月

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010) 58581897/58581896/58581879

传 真：(010) 82086060

E - mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街 4 号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100011

购书请拨打电话：(010)58581118

目 录

第一章 绪论	1
第一节 通信的基本概念	1
第二节 信道的基本概念	5
第三节 通信系统模型	10
第四节 通信系统的性能指标	13
第二章 模拟信号传输系统	16
第一节 模拟通信的一般模式	16
第二节 振幅调制及解调	19
第三节 角度调制及解调	22
第四节 频分复用技术	27
第五节 典型模拟通信系统及其特点	28
第三章 模拟信号的数字传输	31
第一节 信源编码	31
第二节 时分多路复用	54
第三节 数字复接技术	58
第四节 信道编码	65
第四章 数字信号传输系统	70
第一节 数字信号的基带传输	70
第二节 数字信号的频带传输	82
第五章 定时与同步	104
第一节 定时系统	104
第二节 同步系统	106
第六章 数字通信技术应用	116
第一节 数字光纤通信系统	116
第二节 数字微波通信系统	120
第三节 数字卫星通信系统	123
第四节 数字移动通信系统	126
第五节 计算机网络及个人通信	133
参考文献	137

第一章 绪 论

学 习 目 标

- 了解数字通信与模拟通信的基本概念
 - 掌握数字通信系统模型
 - 理解数字通信系统的性能指标
-

本章主要介绍数字通信和模拟通信的概念及其特点,重点掌握数字通信系统的模型和主要性能指标,难点是理解数字通信系统的性能指标。

第一节 通信的基本概念

在人类长期的生产实践活动中,一刻也离不开信息的交流与传递。通信就是实现信息交流与传递的各种相关技术手段或技能的总称,它将待传递的信息无失真地从一地传递到另一地,如古代的烽火、狼烟、金鼓、旗语,近代的信号灯,现代的电报、电话、传真、广播电视等都属于通信的范畴。人类从生存和发展的需要出发,不断将自身掌握的各种先进技术应用到通信中,从而不断改善生存环境和生活条件,促进人类社会的发展。随着现代通信技术的发展,尤其是数字通信技术的发展,人类社会的发展呈现着加速发展的趋势。

一、信息、消息和信号

正如前述,通信的目的是实现信息的交流与传递。要理解通信的基本含义,必须深刻理解信息、消息和信号之间的关系。

所谓信息(information)是指对于收、发双方具有一定意义的有待传递、交换、提取或存储的书面或口头内容,对收信者来说,这些内容是预先未知的。纯粹的信息是无法表达或传递的,它必须以某种形式表现出来才能实现交流与传递,如语言、文字、图像、数据等。一般将语言、文字、图像、数据等统称为消息(message)。显然,信息是消息的度量,特指消息中有意义的部分,即“有用的消息”;消息是信息的表现形式。

为了有效地传递和利用信息,常需将信息转换成便于传输和处理的表达形式,这种表达形式即信号(signal),它是反映信息或消息的物理量,是通信传递的客观对象。信号常见的形式有声、光、电、力等。物理上,信号是信息寄寓变化的形式;数学上,信号可以表示为单个自变量或多个自变量的函数;形态上,信号表现为一种波形。总之,信号是运载与传递信息的载体和工具,通常

使用数学函数表示,也用曲线、数据组等表达。现代通信一般采用电信号为媒介实现信息或消息的传递。

二、通信的定义

通信就是传递消息、给对方以信息的过程,它将包含信息的消息从一地传递到另一地;消息必须借助电信号等一定的形式才能远距离快速传递和进行各种处理,实现有效传递。

从本质上讲,通信是实现信息传递功能的一门科学技术,它通过抑制无用信息和有害信息,实现大量有用信息的无失真、高效率传输。现代数字通信不仅能有效地传递信息,还能实现存储、处理、采集及显示等功能,数字通信是现代信息社会的基石和前提条件。

三、通信的分类

通信的分类比较繁杂,从不同的研究角度或不同的研究方法出发,一般将通信分为以下几类:

(一) 按传输介质分类

按消息传递的传输介质不同,通信可分有线通信和无线通信。

有线通信指传输介质为电缆、光缆等通信形式,其特点是介质看得见、摸得着。有线通信的常见形式有光纤通信、架空明线、海底电缆等。

无线通信指传输消息的介质为看不见、摸不着的介质(如电磁波)的通信形式。无线通信常见的形式有微波通信、短波通信、移动通信、卫星通信、散射通信等。

(二) 按信道中所传信号的不同分类

信道即传输信号的通路。通常信道中传送的信号可分为数字信号和模拟信号。一般来说,模拟信号指幅度连续的信号,而数字信号指幅度离散的信号。

传送数字信号的通信称为数字通信;传送模拟信号的通信称为模拟通信。

(三) 按调制方式分类

根据信息在送到信道之前是否采用调制,通信可分为基带传输和频带传输。

基带传输是指不经过任何调制而直接在信道中传输基带信号的通信方式;频带传输是指为适合信道传输而将信号经过调制后再送到信道中传输的通信方式。

(四) 按照通信业务的内容不同分类

目前通信业务可分为电报、电话、传真、数据传输、可视电话、无线寻呼等。按通信业务的传递距离,又可将通信分为长途通信与本地通信。

从广义的角度来看,广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也列入通信的范畴。

(五) 按消息传送的方向与时间分类

根据消息传送的方向与时间,可将通信的方式分为单工通信、半双工通信与双工通信。

单工通信指通信双方只能单方向传递信息,如广播、无线寻呼等;半双工通信指通信双方只能分时双方向传递信息,如对讲机、收发报机等;双工通信指通信双方能同时双方向传递信息,如普通电话等。

(六) 按传送信号的复用方式不同分类

按照信号传输的复用方式不同,可将通信按频率、时间、波形(或编码)进行分类。

频分复用指不同信号占用不同的频率范围进行传递;时分复用指不同信号占用不同的时间区间(或时隙)进行传递;码分复用指用正交的脉冲序列携带不同信号进行传递。

(七) 按通信双方是否可以运动分类

按通信双方是否可以在运动中通信分为移动通信和固定通信。

移动通信是指通信双方至少一方可以在运动中进行信息传递的通信方式。移动通信是实现个人通信的必由之路和基本手段。

(八) 其他分类

根据通信的工作频率(或波长)不同,可将通信分为长波通信、中波通信、短波通信或微波通信。

根据通信业务使用的人群不同,可将通信分为专用通信与公用通信。

根据通信内容的不同,可将通信分为语音通信与数据通信。

四、通信系统的现状和发展

(一) 现代通信的发展阶段

通信的历史可以追溯到远古时代的烽火通信,但现代意义上的通信是从 19 世纪 40 年代开始的。现代通信的发展一般可分为三个阶段:

1834 年,Carl F. Gauss 和 Ernst H. Weber 发明电磁式电报机,以此为起点开始了通信的初级阶段,如表 1-1 所示。

表 1-1 通信初级阶段

年份	事 件
1834	Carl F. Gauss 和 Ernst H. Weber 发明电磁式电报机
1838	William F. Cooke 和 Charles Wheatston 建立电报系统
1844	Samuel F. B. Morse 演示电报通信过程
1864	James C. Maxwell 创立了电磁辐射理论
1876	Alexander Graham Bell 利用电磁感应原理发明了电话
1879	第一个专用人工电话交换系统投入运行
1880	第一个付费电话系统运营
1887	Heinrich Hertz 验证 Maxwell 理论,促使了后来无线通信的出现
1894	Oliver Lodge 演示 150 码无线通信
1900	Guglielmo Marconi 实现跨大西洋的无线通信
1907	电子管问世,通信进入电子信息时代
1915	横贯美国大陆电话开通;实现越洋语音连接
1918	调幅无线电广播、超外差式接收机问世

续表

年份	事 件
1925	开通三路明线载波电话,开始多路通信
1936	调频无线电广播开播
1937	Alex Reeves 发明脉冲编码调制,奠定了数字通信基础
1938	电视广播开播
20 世纪 40 年代	二战期间,雷达与微波通信得到发展
1946	第一台数字电子计算机问世
1947	晶体管在贝尔实验室问世,为通信器件的进步创造了条件

1948 年, Claude E. Shannon(香农) 提出信息论, 通信进入了近代通信阶段, 如表 1 - 2 所示。

表 1 - 2 近代通信阶段

年份	事 件
1848	Claude E. Shannon(香农) 提出信息论,建立了通信统计理论
1950	时分多路通信应用于电话系统
1951	直拨长途电话开通
1956	敷设越洋通信电缆
1957	发射第一颗人造地球卫星
1958	发射第一颗通信卫星
1962	发射第一颗同步通信卫星,开通国际卫星电话;脉冲编码调制进入实用阶段
20 世纪 60 年代	彩色电视机问世;阿波罗宇宙飞船登月;数字传输理论与技术得到迅速发展;计算机网络开始出现
1969	电视电话业务开通
20 世纪 70 年代	商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统投入使用;一些公司制定计算机网络体系结构

20 世纪 80 年代以后, 光纤通信应用、综合业务数字网崛起, 开创了现代通信阶段, 如表 1 - 3 所示。

表 1-3 现代通信阶段

年份	事 件
20 世纪 80 年代	开通数字网络的公用业务;个人计算机和计算机局域网出现;网络体系结构国际标准陆续制定
1980	贝尔公司推出光纤通信系统
1981	IBM 推出 PC 机
1989	卫星全球定位系统(GPS)完成
20 世纪 90 年代	蜂窝电话系统开始大量商用,各种无线通信技术不断涌现;光纤通信得到迅速、普遍地应用;国际互联网得到极大发展
1995	互联网大显身手
21 世纪	进入基于微处理器的数字信号处理、数字卫星通信、数字电视、扩频通信系统、个人通信系统等的新时代

(二) 数字通信的发展动向

数字通信已经成为现代通信的主流,数字通信涉及的主要技术问题是信源编/译码(实现数字化,实现数据压缩等)、纠错编/译码(抑制信道噪声)、基带传输、频带传输(数字调制/解调)、同步(载波同步、位同步、帧同步、网同步)、保密编/译码等,其发展动向可概括如下:

- ① 开展数字通信的基本理论和新技术及相关技术的研究。
- ② 发展高速大容量数字系统。
- ③ 采用高速大规模或超大规模集成器件。
- ④ 研制低速率数字系统,继续研究压缩数码率的编码技术。
- ⑤ 积极研究窄带、宽带综合业务数字网(N-ISDN、B-ISDN)及智能网(IN)。
- ⑥ 积极努力建设“信息高速公路”,实现多媒体通信。

总的来讲,数字通信的发展趋势是小型化、智能化、网络化以及在此基础上的综合化。

第二节 信道的基本概念

广义上,通信系统由三部分组成,即发送设备、信道和接收设备。发送设备实现信息的发送,接收设备实现信息的接收,而信道是发送设备和接收设备实现信息传递的桥梁。由于信道中的干扰或噪声(即对信号的干扰)是不可避免的,因此研究信道和噪声是研究通信的基础。本节主要介绍信道的基本概念,为学习通信系统打下基础。

一、信道及其分类

信道是信号的传输媒介,是通信系统不可缺少的组成部分,它组成传输信号的通路。

根据传输媒介的不同,信道可以分为有线信道和无线信道。有线信道通常指“可感、可摸”的有形传输媒介,包括架空明线、对称电缆、同轴电缆、光缆等;无线信道通常指“看不见、摸不着”的无形传输媒介,包括地波传播、短波电离层反射、超短波或微波视距中继、人造卫星中继以及各种散射信道等。

根据信道的内涵,可以把信道分为广义信道和狭义信道。一般,把传输信号的传输媒介称为狭义信道,如架空明线、对称电缆、光缆、自由空间、电离层、对流层等;而把传输媒介和传输需要的相关设备的综合称为广义信道,如调制/解调设备、编码/译码设备、放大及连接设备等。讨论通信原理常采用广义信道,常把广义信道简称信道。通信效果的好坏很大程度上依赖于狭义信道的特性。

根据研究对象的不同,广义信道又可以分为调制信道和编码信道,如图 1-1 所示。

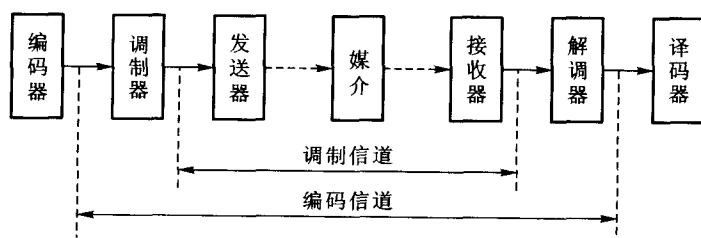


图 1-1 调制信道与编码信道

可见,调制信道是调制后、解调前的放大器、天线和传输媒介等通信设备的总和,调制信道关心的问题是信号的调制机制。而编码信道是编码后、译码前的包括调制/解调设备在内的所有设备的总和,编码信道关心的是信号的编/译码实现。

根据信道的特性,可以把信道分为无记忆信道、有记忆信道、恒参信道、随参信道。

一般,信道可以看成是一个传输网络,如图 1-2 所示。

调制信道可以细分为恒参信道、随参信道。如果信道参数或传输函数不随时间的变化而变化或基本不变化,称该信道为恒参信道;反之,称为随参信道。架空明

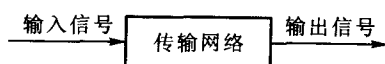


图 1-2 信道与传输网络

线、电缆、光缆、中长波地波传播、卫星中继、超短波/微波/光波视距传播等传输媒介构成的信道为恒参信道;由短波电离层反射、超短波/微波对流层散射、超短波电离层散射、超短波视距绕射等传输媒介构成的信道为随参信道。

编码信道可以细分为无记忆信道和有记忆信道。无记忆信道的输出数字序列码元仅仅依赖于输入数字序列相应码元和信道特性,而与前、后码元的差错无关,即信道中码元发生差错的事件是独立的;如果信道中码元发生差错的事件不是独立的,则该信道称为记忆信道。

二、信道中的噪声

正如前述,通信是指通过信号在传输媒介上传输,实现信息的传递。传输媒介会对信号引入一系列的影响,如衰减、畸变等,这些不利于信号传输的影响通常称为噪声或干扰。

(一) 乘性噪声和加性噪声

设 $x(t)$ 表示输入信号, $y(t)$ 表示输出信号,则图 1-2 所示的数学模型可表示为

$$y(t) = m(t) \times x(t) + n(t) \quad (1-1)$$

式中, $m(t) \leq 1$, $m(t)$ 完全依赖于传输网络的特性, $m(t) \times x(t)$ 反映传输网络特性对输入信号的影响。显然, $m(t)$ 对输入信号而言是一种噪声或干扰, 称为乘性噪声或干扰; $n(t)$ 是独立于信号而存在的噪声或干扰, 称为加性噪声或干扰。

乘性噪声是由于传输网络的非理想传输特性引起的, 会引起信号的各种线性畸变、非线性畸变。乘性噪声一般随信号的消失而消失。如前所述, 根据 $m(t)$ 的特性, 信道可以分为恒参信道和随参信道。恒参信道的乘性噪声产生的主要原因是信道的幅频特性不均匀、相频特性非线性和信号变换过程中的非线性, 如交越失真、互调失真等, 克服的主要措施是采用均衡技术; 随参信道的乘性噪声主要由复杂的传输媒介引起, 会造成信号衰落、频率弥散等问题, 主要的解决措施包括分集接收等技术。

加性噪声独立于信号而存在, 它将引起传输网络输出端信号信噪比下降, 甚至无法提取有用信号。加性噪声主要来源于以下几个方面: ① 人为噪声: 外台信号、电气开关合断、点火系统; ② 自然噪声: 天电噪声来源于雷电、磁暴、宇宙射线、太阳黑子; ③ 内部噪声: 系统设备内部本身产生的各种噪声, 如电阻器热噪声, 电子管、半导体管中的电子起伏(散弹噪声)。

无论是乘性噪声还是加性噪声, 常常和信号混杂在一起, 不可能完全消除, 只能通过相应的抗噪声技术设法减弱它们对信号的影响, 以保障通信的可靠性指标。

(二) 通信中常见的几种噪声

为了以后分析的需要, 这里简单介绍几种常见的噪声。

1. 白噪声

白噪声是指其功率谱密度函数在整个频率域内是常数, 即服从均匀分布。它类似于光学中包括全部可见光频率在内的白光, 因此称为白噪声。凡是不符合上述条件的噪声就称为有色噪声, 它只包括可见光频谱的部分频率。实际上完全理想的白噪声是不存在的, 通常只要噪声功率谱密度函数均匀分布的频率范围超过通信系统工作频率范围很多时, 就可近似认为是白噪声。

2. 高斯噪声

在实际信道中, 一种常见噪声是高斯(Gaussian)型噪声。高斯噪声是指其概率密度函数服从高斯分布(即正态分布)的一类噪声, 可用数学表达式表示为

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-2)$$

式中, a 为噪声的数学期望值; σ^2 为噪声的方差; $\exp(x)$ 是以 e 为底的指数函数。

3. 高斯白噪声

高斯白噪声是指噪声的概率密度函数满足正态分布统计特性, 同时它的功率谱密度函数是常数的一类噪声, 它是对噪声的两个不同方面而言的, 即对概率密度函数和功率谱密度函数而言的, 不可混淆。一般, 在分析通信系统时, 通常用高斯白噪声模拟实际的加性噪声。

三、信道容量

通信的目的是实现信息(消息)的传递, 而信号是传递信息(消息)的载体和工具。从前面的讨论中, 可以知道信道是实现信号传输的通路。因此, 研究信道的传输能力是必要的。信道容量就是衡量信道传输能力的重要指标, 指单位时间里某信道能无差错传输的最大信息量[通常单位

为 b/s , (比特/秒)]。如果实际传输的信息量小于信道容量,会造成信道空闲,影响信道的传输效率;如果实际传输的信息量大于信道容量,会造成信道溢出,影响信道的可靠性。

可见,要研究信道容量,必须首先研究信息如何度量。

(一) 信息的度量

为了衡量信道的传输能力,需要对被传输的信息进行定量的测量。正如前述,消息是信息的外在表现形式。一方面,不同形式的消息可以包含相同的信息,如分别用语音和文字发送的同样的航班信息。另一方面,一些消息包含的信息可能是不同的。例如消息“今天的午饭 16:00 吃”包含的信息比消息“今天的午饭 12:00 吃”包含的信息要“丰富”得多。因为前一个消息使人很惊奇,为什么午饭这么晚才吃?一定是发生了什么特殊的情况;而后一个消息描述的是一个正常的情况,不足为奇。即当某消息发生的可能性比较大时,该消息包含的信息量比较少;反之,该消息包含的信息量比较多。

消息可以分为两类,即离散消息和连续消息。下面重点研究离散信源的信息量。

消息中包含的信息大小具有不确定性,这种不确定性可以通过概率论的知识进行描述。事件发生的可能性越小,则概率越小;反之,则概率越大。小概率消息包含的信息量比大概率消息包含的信息量大。因此可有以下结论:

- ① 消息中所含信息量 I 是消息出现的概率 $P(x)$ 的函数。
- ② 消息出现的概率愈小,它所含信息量愈大;反之信息量愈小。
- ③ 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信息量的和。

可以用式(1-3)表示信息的度量

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-3)$$

信息量 I 的单位与对数的底数有关: $a=2$ 时,单位为比特(bit,简写为 b); $a=e$ 时,单位为奈特(nat,简写为 n); $a=10$ 时,单位为笛特(Det)或称为十进制单位。通常使用的单位为比特。当不特别标注 a 时,一般默认为 $a=2$ 。

当消息很长时,用符号出现的概率来计算消息的信息量是比较麻烦的,可以改用平均信息量来度量。平均信息量是指每个符号所含信息量的统计平均值。 N 个符号的离散消息源的平均信息量为

$$H(X) = - \sum_{i=1}^N P(x_i) \log P(x_i) \quad (1-4)$$

平均信息量计算公式与热力学和统计力学中的系统熵的公式一样,因此将它称为信源的熵或信息熵。

【实例分析】 一信源由 $A、B、C、D$ 组成,它们出现的概率分别为 $3/8、1/4、1/4、1/8$,它们的出现是独立的,试计算平均信息量。

解:直接利用式(1-4)进行计算,即

$$\begin{aligned} H(X) &= - \sum_{i=1}^N P(x_i) \log P(x_i) = - \left[\frac{3}{8} \times \log \frac{3}{8} + \frac{1}{4} \times \log \frac{1}{4} + \frac{1}{4} \times \log \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \times \log \frac{1}{8} \right] \\ &= 1.75 \text{ 比特/字符} \end{aligned}$$

即组成该信源每个字符的平均信息量为 $1.75b$ 。

(二) 信道容量

信道容量指信道极限传输信息的能力,即信道无差错传输信息的最大信息速率,记为 C 。信道容量一般分为编码信道容量和调制信道容量。

编码信道中,研究的是数字信号的传输。编码信道的参量是码元传输速率和差错率。如差错率的变化会影响每秒传输的信息量,使信道容量变小或变大。码元传输速率越大,差错率越少,则编码信道容量越大;反之,编码信道容量越小。编码理论指出只要实际传输的信息比特率小于编码信道容量,并且编码足够长,就几乎可以无差错传输。

调制信道中,研究的是模拟信号的传输。在加性高斯白噪声背景下,调制信道的参量是调制信道带宽、信号功率和高斯白噪声功率。著名的香农(Shannon)公式指出了调制信道容量的定量计算方法。

在高斯白噪声干扰下,调制信道容量采用香农公式计算

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1-5)$$

从式(1-5)中,可以看出:

① 调制信道容量三要素为高斯白噪声功率 N 、信号功率 S 、信道带宽 B 。

② 当 N 等于 0、 S 为常数,即噪声为 0 时,信道容量为无穷大;当 S 为无穷大、 N 为常数时,信道容量也为无穷大,显然,这两种情况都是不可能实现的。

③ 加大信道容量的途径是减小 N ,增大 S 。

④ 增大带宽 B 并不能使信道容量变为无穷大,因为带宽 B 无穷大时,噪声功率也变为无穷大了。

香农公式具有重大的意义,即香农公式给出了高斯白噪声信道上可靠传输速率的上限。设计实际的通信系统时,只能尽量接近香农公式计算出的速率,实现了香农极限信息速率的系统称为理想通信系统。香农公式给出了信噪比和信道带宽的关系,当信道容量一定时,通过增大带宽可以使系统的信噪比要求下降,它是扩频通信的理论基础。

【实例分析】 已知某标准音频线路带宽为 3.4 kHz。(1) 设要求信道的 $S/N = 30$ dB,试求这时的信道容量为多少?(2) 设线路上的最大信息传输速率为 4 800 b/s,试求所需的最小信噪比为多少?

解:

(1) $S/N = 30$ dB 表示该信道信号与噪声的功率比为 1 000,所以,这时的信道容量为

$$\begin{aligned} C &= B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \\ &= 3\,400 \log_2 (1 + 1\,000) \text{ b/s} \\ &\approx 33\,888.57 \text{ b/s} \end{aligned}$$

(2) 只有最大信息速率小于信道容量,才能实现无差错传输,则

$$\begin{aligned} 4\,800 &\leq 3\,400 \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \\ \Rightarrow \frac{S}{N} &\geq 2^{\frac{48}{34}} - 1 \\ \Rightarrow \frac{S}{N} &\geq 1.661 \end{aligned}$$

即这时所需的最小信噪比约为 1.661。

第三节 通信系统模型

通信系统即完成信息传递和交换的设备总和,它的通用模型如图 1-3 所示。

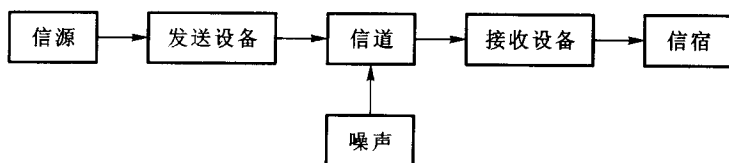


图 1-3 通信系统通用模型

信源即信息的发出者,可以是人或机器终端。在现代通信系统中,信源一般是机器终端,它的作用是把待传输的消息转换成原始电信号,如电话机等。

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成适合在信道中传输的信号,如编码、调制等。

信道是传输信号的通道,可以有线的,也可以是无线的。

噪声即干扰或影响信号传输的因素,噪声源是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集合。

接收设备的功能与发送设备相反,即进行解调、解码等,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。

信宿即信息的接收者,作用是将复原的原始电信号转换成相应的消息,如电话机将对方传来的电信号还原成声音。

按照信道中所传信号的形式不同,可进一步具体化为模拟通信系统和数字通信系统。模拟信号指代表消息的信号及其参数(幅度、频率或相位)随消息连续变化(其幅度变化是连续的,但在时间上可以是连续或离散的);数字信号指代表消息的信号及其参数(幅度、频率或相位)不仅在时间上,而且在幅度上都是离散的。可以根据幅度取值是否离散区别数字信号与模拟信号,它们在一定条件下可以相互转换。

一、模拟通信系统模型

利用模拟信号传递信息的通信方式称为模拟通信,实现模拟通信的系统称为模拟通信系统。早期的电话系统、广播电视系统均属于模拟通信系统。

在图 1-3 所示模型中,模拟通信系统的发送设备和接收设备分别为调制器、解调器,如图 1-4 所示。

模拟通信系统主要包含两种重要变换。

第一种变换是把连续消息变换成电信号(信源完成)或把电信号恢复成最初的连续消息(信宿完成)。由信源输出的原始电信号(基带信号)由于具有频率较低的频谱分量,一般不能直接作为传输信号而送到信道中去。

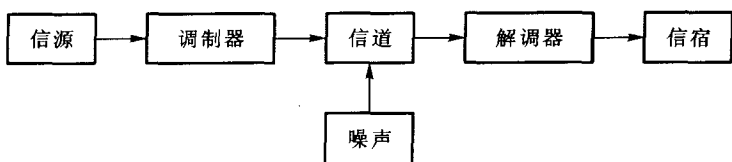


图 1-4 模拟通信系统模型

第二种变换是将基带信号转换成其适合信道传输的信号,这一变换由调制器完成;在接收端同样需经相反的变换,由解调器完成。经过调制后的信号通常称为已调信号,已调信号又常称为频带信号。

在模拟通信系统中,传输的信号是模拟信息变化的波形,要求接收机能高保真地恢复发送端发送的信号,因此,衡量模拟通信系统质量的主要指标是信噪比。

二、数字通信系统模型

采用数字信号传递信息的通信方式称为数字通信,实现数字通信的系统称为数字通信系统。数字电话、计算机网络通信、数字电视等系统均属于数字通信系统。

在图 1-3 所示模型中,数字通信系统的发送设备和接收设备比较复杂,如图 1-5 所示。

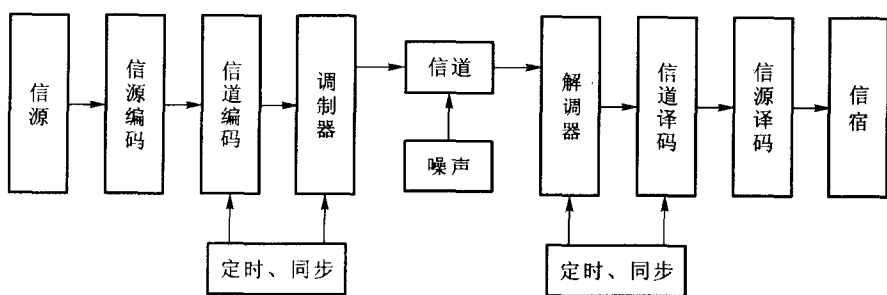


图 1-5 数字通信系统模型

图 1-5 所示是数字通信系统的一般模型,数字通信系统可进一步细分为数字基带传输通信系统、数字频带传输通信系统。

数字频带系统中,发送设备包括编码器(信源编码、信道编码)、调制器、定时和同步等设备;接收设备包括解调器、译码器(信道译码、信源译码)等设备。

数字基带系统中,没有调制/解调过程,因此,发送设备仅包括编码器(信源编码、信道编码)、定时和同步等设备;接收设备包括译码器(信道译码、信源译码)等设备。

在数字通信系统中,传输的信号是取有限个状态的离散脉冲,接收机的主要任务是在干扰环境中,正确判断接收信号的离散状态,因此,衡量数字通信系统的主要指标是误码率。

三、模拟与数字通信系统比较

数字通信系统中的信号具有“离散”或“数字”特征,与模拟通信系统相比,数字通信系统具有以下特征: