

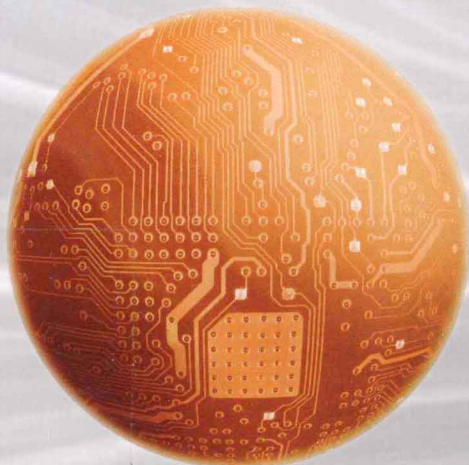


普通高等教育电子信息类专业“十二五”规划系列教材

通信原理



主编 ◎ 羊梅君 ·····



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

普通高等教育电子信息类专业“十二五”规划系列教材

通信原理

主 编 羊梅君
副主编 刘琴涛 黄文准 罗艳碧
谢永红 丁 洁

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书系统地阐述了通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法,主要内容包括模拟通信和数字通信,但侧重于数字通信。

全书共分八章,内容包括绪论、信道、模拟调制系统、数字信号的基带传输、基本的数字调制系统、模拟信号的数字传输、同步原理和信道编码与差错控制。各章均有习题,并附有部分习题答案。

本书可以作为通信工程、电子信息工程及计算机网络等相关专业应用型本科生的教材,也可以供从事相关专业的工程技术人员作为参考书。

本书配有免费的电子课件。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/羊梅君 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.8
ISBN 978-7-5609-9005-7

I. 通… II. 羊… III. 通信原理-高等学校-教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 102643 号

通信原理

羊梅君 主编

策划编辑:谢燕群

责任编辑:余 涛

封面设计:李 嫒

责任校对:李 琴

责任监印:周志超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:12

字 数:306 千字

版 次:2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:25.80 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前言 Preface



本书是高等学校应用型本科特色系列教材之一,是根据教育部高等教育的指导思想和培养目标,由华中科技大学出版社组织出版的,可以作为应用型本科高等院校通信与信息类及相近专业的专业基础理论课教材。

本书充分考虑了应用型本科教学的特点,在内容的选取上突出基础性、针对性和实用性,力求既能适应当前通信发展的现状,又能较好地跟踪未来通信发展的新动向。在内容阐述上,除必要的数学分析之外,尽量避免烦琐的数学推导,强调物理概念,突出重点,力求做到条理清楚、通俗易懂、深入浅出、循序渐进。本书中的符号、术语以及各种图形都尽量采用现行国标。

全书共八章,第1章为绪论,主要介绍了通信系统的基本概念、基本组成及其主要的性能指标;第2章为信道,介绍了恒参信道和随参信道的基本特征,以及它们对信号传输的影响,同时还介绍了信道中噪声的特点和信道容量的基本概念;第3章为模拟调制系统,从时域和频域的角度阐述了各种模拟调制解调技术的基本原理和实现方法,并分析了各种调制解调技术的抗噪声性能,最后介绍了频分复用技术;第4章为数字信号的基带传输,阐述了数字信号基带传输系统的原理和模型,讨论了系统无码间干扰的条件,介绍了眼图和时域均衡技术;第5章为基本的数字调制系统,阐述了各种二进制数字调制解调技术的原理、实现方法和抗噪声性能,介绍了多进制数字调制解调的原理;第6章为模拟信号的数字传输,阐述了模拟信号的量化、量化信号的编码和脉冲编码调制的原理及实现方法,介绍了增量调制和时分复用技术;第7章为同步原理,讨论了载波同步、位同步和群同步的基本概念、实现方法和主要性能指标;第8章为信道编码与差错控制,阐述了纠错编码的基本原理,重点讨论了线性分组码、循环码的编译码原理及纠错性能。

本书由华南理工大学广州学院羊梅君担任主编,负责全书的结构设计、修改和定稿工作。江汉大学文理学院刘琴涛、西京学院黄文准、大理学院罗艳碧、华南理工大学广州学院谢永红、海南大学信息科学技术学院丁洁,参与了本书的编写工作。

由于编者水平限制,且编写时间仓促,本书中疏漏和错误之处在所难免,敬请各位读者不吝指正。

编 者

2013年7月

目录

Content



第1章 绪论	(1)
1.1 通信的发展	(1)
1.2 通信系统的组成	(1)
1.2.1 通信系统的一般模型	(1)
1.2.2 模拟通信与数字通信系统模型	(2)
1.3 通信系统的分类及通信方式	(4)
1.3.1 通信系统分类	(4)
1.3.2 通信方式	(6)
1.4 信息及其度量	(6)
1.4.1 信息量的定义	(6)
1.4.2 平均信息量(熵)的概念	(7)
1.5 通信系统的性能指标	(8)
1.5.1 模拟通信系统的性能指标	(8)
1.5.2 数字通信系统的性能指标	(9)
习题	(11)
第2章 信道	(12)
2.1 信道的定义	(12)
2.1.1 狭义信道	(12)
2.1.2 广义信道	(18)
2.2 信道的模型	(19)
2.2.1 调制信道模型	(19)
2.2.2 信道中的噪声	(20)
2.2.3 编码信道模型	(21)
2.3 信道的传输特性	(21)
2.4 信道容量	(24)
2.4.1 离散信道的信道容量	(25)
2.4.2 连续信道的信道容量	(27)
习题	(29)
第3章 模拟调制系统	(30)
3.1 线性调制	(30)
3.1.1 线性调制的原理	(30)
3.1.2 标准调幅	(31)
3.1.3 抑制载波的双边带调幅	(34)

3.1.4 单边带调幅	(36)
3.1.5 残留边带调幅	(39)
3.2 非线性调制	(42)
3.2.1 角度调制的基本概念	(42)
3.2.2 窄带调频与宽带调频	(45)
3.2.3 调频信号的产生	(50)
3.2.4 调频信号解调	(51)
3.3 频分复用	(53)
习题	(54)
第4章 数字信号的基带传输	(57)
4.1 数字基带信号的波形	(57)
4.2 数字基带信号的传输码型	(59)
4.3 数字基带信号的功率谱分析	(62)
4.3.1 二进制数字基带信号的功率谱分析	(62)
4.3.2 多元数字基带信号的功率谱分析	(68)
4.4 数字基带信号的传输及码间干扰	(69)
4.4.1 基带传输系统模型	(69)
4.4.2 码间干扰	(71)
4.4.3 奈奎斯特准则	(72)
4.5 眼图	(77)
4.6 均衡	(79)
习题	(81)
第5章 基本的数字调制系统	(83)
5.1 二进制振幅调制	(84)
5.1.1 二进制振幅调制的基本原理	(84)
5.1.2 2ASK 信号的功率谱密度与带宽	(84)
5.1.3 2ASK 信号的解调与系统误码率	(86)
5.2 二进制频率调制	(89)
5.2.1 二进制频率调制的基本原理	(89)
5.2.2 2FSK 信号的功率谱密度与带宽	(91)
5.2.3 2FSK 信号的解调与系统误码率	(92)
5.3 二进制绝对相位调制	(95)
5.3.1 二进制绝对相位调制的基本原理	(95)
5.3.2 二进制绝对相移信号的功率谱密度与带宽	(96)
5.3.3 2PSK 信号的解调与系统误码率	(97)
5.4 二进制相对相位调制	(100)
5.4.1 2DPSK 调制的基本原理	(100)
5.4.2 2DPSK 信号的功率谱密度与带宽	(102)
5.4.3 2DPSK 信号的解调与系统误码率	(102)
5.5 二进制数字调制系统性能比较	(105)

5.6 多进制数字调制系统	(106)
5.6.1 多进制数字振幅调制	(107)
5.6.2 多进制数字频率调制	(108)
5.6.3 多进制绝对相位调制	(109)
5.6.4 多进制相对相位调制	(112)
5.6.5 多进制数字调制系统的性能比较	(114)
习题	(115)
第6章 模拟信号的数字传输	(118)
6.1 脉冲编码调制	(118)
6.1.1 模拟信号的采样	(118)
6.1.2 采样信号的量化	(121)
6.1.3 脉冲编码调制	(127)
6.2 增量调制	(133)
6.3 时分复用	(136)
习题	(139)
第7章 同步原理	(142)
7.1 载波同步	(142)
7.1.1 外同步法	(142)
7.1.2 自同步法	(143)
7.1.3 载波同步系统的性能指标	(145)
7.2 位同步	(145)
7.2.1 外同步法	(145)
7.2.2 自同步法	(146)
7.2.3 位同步系统的性能指标	(148)
7.3 群同步	(149)
7.3.1 集中插入法	(149)
7.3.2 分散插入法	(151)
7.3.3 群同步系统的性能指标	(151)
习题	(152)
第8章 信道编码与差错控制	(154)
8.1 概述	(154)
8.2 纠错编码的基本原理	(155)
8.3 常用的简单编码	(159)
8.3.1 奇偶监督码	(159)
8.3.2 二维奇偶监督码	(159)
8.3.3 恒比码	(160)
8.4 线性分组码	(160)
8.5 循环码	(164)
8.5.1 循环码原理	(164)
8.5.2 循环码的编、解码方法	(166)

习题	(168)
附录一 英文缩写词对照表	(170)
附录二 误差函数、互补误差函数表	(172)
部分习题参考答案	(173)
参考文献	(184)

第 1 章 绪论



1.1 通信的发展

通信就是消息的传递和交换。从这个意义上说,通信早在远古时代就已存在。人与人之间的对话是通信,快马与驿站传送文件是通信,用烽火传递战事情况也是通信。烽火是非常原始的光通信方式,它利用有或无光信号表示有或无“敌情”,属于最简单的二进制数字通信。目前,通信方式主要有两类:一类是利用人力或机械的方式传递消息,如常规的邮政,称为运动通信;另一类是利用电(或光)信号传递消息,即电通信,本书的讨论仅限于后者。

近代电通信技术始于 19 世纪,1837 年莫尔斯完善了有线电报系统,这可认为是电通信或远程通信,也是数字通信的开始。1876 年,贝尔发明了有线电话,成为模拟通信的先驱。1864 年麦克斯韦建立电磁场理论,1887 年赫兹验证了电磁波的存在。1901 年,马可尼实现了从英国到纽芬兰的跨大西洋无线电信号的接收,这是一次超过 2700 km 的无线电数字通信,充分显示了无线电通信的巨大潜力。20 世纪初,电子管的出现使得无线电话通信成为可能,这也是无线电模拟通信的开始。此后,随着晶体管、集成电路的出现和应用,无线电话、广播、电视和传真通信迅速发展起来。进入 20 世纪 50 年代,随着人造卫星的发射,以及电子计算机、大规模集成电路和光纤等现代科学技术成果的问世和应用,特别是数字通信技术的飞速发展,进一步促进了微波通信、卫星通信、光纤通信、移动通信和计算机通信等各种现代通信系统的快速发展,从而不断地满足人们在各方面对通信越来越高的需求。

展望未来,通信技术正在朝着智能化、综合化、宽带化、个人化的方向快速发展,各种新的电信业务也应运而生,电信服务的范围正朝着多个领域广泛延伸。人们期待着早日实现通信的最终目标,即无论何时、何地都能实现与任何人进行任何形式的信息交换,即全球个人通信。

1.2 通信系统的组成

通信的目的是传输消息,把实现消息传输所需的一切技术设备和传输媒质的总和称为通信系统。在实际中使用的各类通信系统,虽然其表现形式各异,但都具有一定的共性,这些共性可以抽象概括为通信系统模型。

1.2.1 通信系统的一般模型

对于基本的点对点通信系统,可以用图 1-1 所示的一般模型来描述。

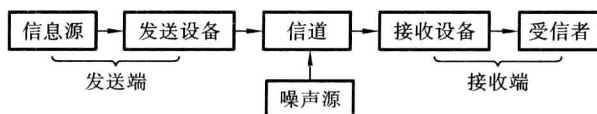


图 1-1 通信系统的一般模型

信息源的作用是将消息转换成随时间变化而变化的原始电信号,这样的原始电信号通常又称为消息信号或基带信号。常用的信源有电话机的话筒、摄像机、传真机和计算机等。

发送设备的基本功能是将信息源和信道匹配起来,即将信息源产生的原始电信号变换为适合于在信道中传输的信号形式。发送设备一般由载波发生器、调制器、滤波器和放大器等单元组成。在数字通信系统中,发送设备还包含加密器和编码器等。

信道是信号传输的通道,可以有线的,也可以是无线的。例如,双绞线、同轴电缆、光纤等都是有线信道,中长波、短波、微波中继及卫星中继等都是无线信道。

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。噪声主要来源于热噪声、外部的干扰(如雷电干扰、宇宙辐射、邻近通信系统的干扰等),以及信道特性不理想使得信号失真而产生的干扰。为了分析方便,通常将各种噪声抽象为一个噪声源并集中在信道上加入。

接收设备的基本功能是完成发送设备送来信号的反变换,如解调、解密、译码等。接收设备的主要任务是从接收到的带有干扰的信号中正确恢复出相应的原始电信号。

受信者又称为信宿,其作用是将接收设备恢复出来的原始电信号转换成相应的消息。

通信系统的一般模型反映了通信系统的共性。实际应用中,根据所要研究的对象及所关心的问题,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。

1.2.2 模拟通信与数字通信系统模型

一、模拟信号与数字信号

在通信系统中,为了实现消息的传递,首先要将消息转换为相应的电信号(以下简称信号)。通常这些信号是以它的某个参量(如幅度、频率、相位等)的变化来表示消息的。按照信号参量取值方式,信号可分为模拟信号和数字信号等两类。

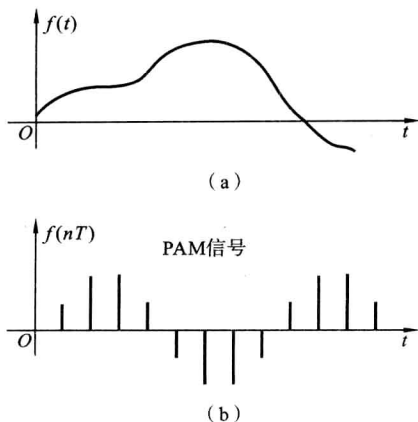


图 1-2 连续信号与 PAM 信号

凡表示消息的信号参量的取值是连续的或取无穷多个值的,且直接与消息相对应的信号,称为模拟信号,如电话机送出的语音信号,其幅度表示音量的大小,频率表示音调的高低,这两个参量都是连续取值的,所以是模拟信号。又比如,在图 1-2 中, $f(nT)$ 是对连续信号 $f(t)$ 进行采样而得到的 PAM 信号,是时间离散信号,但其表示消息的参量(幅度)的取样值有无穷多个,所以 $f(nT)$ 仍然是模拟信号。

凡表示消息的信号参量只能取有限个值,并且常

常不直接与消息相对应的信号,称为数字信号,如电传机送出的脉冲,只取 $0(V)$ 、 $A(V)$ 两个值,靠取值变化的排列表示信息,其幅度间接与信息对应,所以是数字信号。再比如,在图1-3中,PSK信号在时间上是连续的,但表示消息的相位却只取 0 和 π 两个值,是离散的,所以是数字信号。



图 1-3 PSK 信号波形

因此,区别数字信号与模拟信号的准绳,是看其参量取值是连续的还是离散的,而不是看时间。数字信号的波形在时间上可以是连续的,而模拟信号的波形在时间上可能是离散的。

根据通信系统所传输的是模拟信号还是数字信号,相应地,通信系统可以分成模拟通信系统和数字通信系统等两类。下面分别对这两种系统加以介绍。

二、模拟通信系统模型

传输模拟信号的系统称为模拟通信系统,其系统模型如图1-4所示。



图 1-4 模拟通信系统模型

在发送端,信息源将消息转换成模拟基带信号(原始电信号),再由调制器将基带信号转换为适合于信道传输的已调信号。已调信号的频谱具有带通的形式,因而又常称为频带信号。在接收端,解调器对接收到的频带信号进行解调,恢复出基带信号,再由受信者将其转换成消息。

需要注意的是,在实际的通信系统中,发送和接收装置还应包括滤波、放大等器件,这里都简化到了调制和解调装置中。

三、数字通信系统模型

传输数字信号的系统称为数字通信系统,其系统模型如图1-5所示。

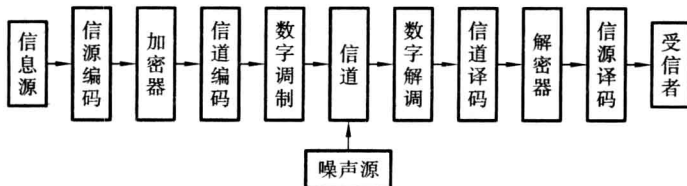


图 1-5 数字通信系统模型

与图1-4所示的模拟通信系统模型相比较,数字通信系统模型不仅包括调制和解调过程,也包括信源编(译)码、加(解)密、信道编(译)码和同步等过程。

在数字通信系统中,信息源的输出可以是模拟基带信号,也可以是数字基带信号。所以信源编码有两个主要任务:第一,若信息源输出的是模拟基带信号,则信源编码将包括模/数转换功能,即把模拟基带信号转换为数字基带信号;第二,实现压缩编码,减小数字基带信号的冗余度,以提高其传输速率。而信源译码则完成信源编码的逆过程,即解压缩和数/模转换。

某些数字通信系统可以根据需要对所传输的信号进行加密编码。通常采用的方法是,在发送端由加密器将数字信号序列人为地按照一定规律扰乱,在接收端再经由解密器按照约定的扰乱规律进行解码,恢复出原来的数字信号序列。

信道编码(又称为纠错编码)的主要任务是提高信号传输的可靠性。其主要做法是在数字信号序列中按一定的规则附加一些监督码元,以使接收端能根据相应的规则进行检错和纠错。信道译码是信道编码的逆过程,其功能是在检错和纠错之后,去掉之前附加上的监督码元,恢复出原来的数字信号序列。

同步是数字通信系统不可缺少的组成部分。系统的发送端和接收端之间需要有共同的时间标准,以便接收端准确知道接收的数字信号中每个符号(码元)的起止时间,从而同步地进行接收。若系统没有同步或失去同步,则接收端将无法正确辨识所接收的信号中包含的消息。

四、数字通信的特点

数字通信主要有如下优点。

(1) 抗噪声性能好。数字信号携带消息的参量只取有限个值,例如,二进制数字信号就只有“1”码和“0”码两种状态。若“1”码对应 $A(V)$,“0”码对应 $0(V)$,经过信道传输后,叠加上噪声就会使信号波形产生失真。但只要在判决时刻,噪声的影响不足以导致信号取值超过判决门限(这里为 $A/2$),则接收端仍可以正确地再生“1”、“0”码的波形,完全消除噪声的影响。而模拟信号携带消息的参量是连续取值的,一旦叠加上噪声,即使噪声很小,其影响也无法消除。

(2) 接力通信时无噪声积累。在接力通信系统中,模拟信号每经过一个中继站都有噪声积累,通信质量逐渐下降。而数字信号每经过一个中继站都再生一次原始信号,只要噪声的影响不使判决出错,则没有噪声积累。

(3) 差错可控。数字通信可以采用纠错编码等技术使错误概率降低。

(4) 数字通信易于加密处理,保密性强。

(5) 数字信号便于处理、存储、交换及与计算机等设备连接,可以使语音、图像、文字、数据等多种业务变换成统一的数字信号在同一个网络中进行传输、交换和处理。

(6) 易于集成化,体积小,成本低。

数字通信的缺点是占用频带比较宽。如 PSNT(公众业务电话网)中采用的是 PCM 编码,每路话音信号编码所占频带为 64 Kb ,相应的传输带宽约 64 kHz ,而模拟通信使用 $3\sim 4\text{ kHz}$ 带宽即可传输一路话音信号。但随着压缩编码技术及光纤等宽带信道技术的发展,这方面的问题在某种程度上已得到解决。

数字通信的另一个缺点是存在通信门限,即 S/N (信噪比)低于一定程度时,不能进行有效的通信。如短波通信系统仍采用模拟而非数字语音的通信方式就是这个原因所致。

1.3 通信系统的分类及通信方式

1.3.1 通信系统分类

可以从不同角度对通信系统进行分类,下面介绍几种较常见的分类方法。

一、按传输媒质分类

按传输信号媒质,通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信系统是用导线作为媒质来完成通信的,如架空明线、双绞线、同轴电缆、光纤等;无线通信系统是依靠电磁波在空间传播来达到通信的目的,如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

二、按信号的特征分类

按通信系统中传输的是模拟信号还是数字信号,相应地通信系统可以分为模拟通信系统和数字通信系统等两类。

三、按通信业务分类

按通信业务类型,通信系统可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统和图像通信系统等几类。

四、按调制方式分类

按信道中传输的信号是否经过调制,通信系统可分为基带传输系统和频带传输系统等两类。基带传输是将没有经过调制的信号直接传送的传输方式,如音频市内电话等;频带传输是对基带信号调制后再送到信道中传输的传输方式。各种常用的调制方式将在第3章和第5章中详细介绍。

五、按工作频段分类

按照通信设备工作频率,通信系统可分为长波通信系统、中波通信系统、短波通信系统、超短波通信系统、微波通信系统和远红外通信系统等几类。表1-1中列出了通信中使用的频段、波长、常用传输媒质及主要用途。

表 1-1 通信频段、常用传输媒质及主要用途

频率范围	波 长	名称与符号	传 输 媒 质	主 要 用 途
3 Hz~30 kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	甚低频(VLF)	有线线对长波无线电	音频电话、岸与潜艇通信、超远距离导航
30~300 kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	低频(LF)	有线线对长波无线电	电力线通信、地下岩层通信、远距离导航
300 kHz~ 3 MHz	$10^2 \sim 10^3$ m	中频(MF)	同轴电缆中波无线电	调幅广播、业余无线电、船用通信、中距离导航
3~30 MHz	$10 \sim 10^2$ m	高频(HF)	同轴电缆短波无线电	短波广播、移动无线电、军用无线电通信、业余无线电
30~300 MHz	1~10 m	甚高频(VHF)	同轴电缆米波无线电	调频广播、电视、雷达、军用无线电通信
300 MHz~ 3 GHz	0.1~1 m	特高频(UHF)	波导分米波无线电	陆地移动通信、电视、超短波电台及对讲机
3~30 GHz	1~10 cm	超高频(SHF)	波导厘米波无线电	微波视距接力、卫星和空间通信、雷达
30~300 GH	1~10 mm	极高频(EHF)	波导毫米波无线电	微波视距接力、雷达、射电天文学
$10^5 \sim 10^6$ GHz	$3 \times 10^{-7} \sim$ 3×10^{-6} m	紫外、可见 光或红外	光纤激光空间传播	光通信

六、按传输信号的复用方式分类

传送多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用和码分复用。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的传送方式,常在传统的模拟通信中采用;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的传送方式,大多用于数字通信;码分复用则是用一组正交的脉冲序列分别携带不同信号进行传输的传送方式,主要应用于扩频通信系统中。

1.3.2 通信方式

对于点对点之间的通信,按消息传送的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信和全双工通信等三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式,如图 1-6(a)所示。单工通信的例子很多,如广播、遥控、无线寻呼等。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时收和发的工作方式,如图 1-6(b)所示。无线对讲机就是这种通信方式的典型例子。

全双工通信是指通信双方可以同时进行收发消息的工作方式,如图 1-6(c)所示。普通电话就是一种常见的全双工通信方式。

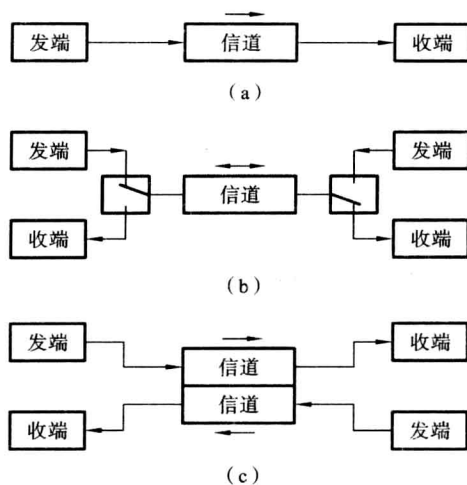


图 1-6 通信方式示意图

(a) 单工通信;(b) 半双工通信;(c) 全双工通信

1.4 信息及其度量

1.4.1 信息量的定义

通信系统传输的具体对象是消息,但是通信的最终目的却是传递信息。那么消息与信息

究竟有什么区别呢?

消息是指对人或事物情况的报道,其表现形式有语音、文字、图形、图像等。信息是指消息中所包含的有意义的内容,即接收者原来不知而待知的内容。不同形式的消息可以包含相同的信息,例如,在播报天气预报时,即可用语音,也可用文字,两者的表现形式不同,却可以包含同样的信息。

在一切有意义的通信中,虽然消息的传递即意味着信息的传递,但对于接收者而言,某些消息比另外一些消息含有更多的信息。例如,发布天气预报“明天的降雨量将有 1 mm”,比起预报“明天的降雨量将有 1 m”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,但后一事件却很难发生,听后使人惊奇。这表明,消息中有可能包含不同的信息量。可以看出,消息中的信息量与消息所表达的事件发生的概率有密切关系,事件发生的可能性越小,给接收者带来的信息量越大。如果事件是必然的(概率为 1),则它传递的信息量为零;如果事件是不可能的(概率为 0),则它将有无穷的信息量。

设信息源是由 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 出现的概率为 $P(s_i)$,则第 i 个符号 s_i 含有的信息量为

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

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,即

$$I[P_1(x) \cdot P_2(x) \cdots] = I[P_1(x)] + I[P_2(x)] + \cdots \quad (1-2)$$

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(b),底数为自然数 e (≈ 2.7138),则信息量的单位为奈特(nit);底数为 10 时,信息量的单位为哈特(hart),通常使用的单位为比特。

对于二进制信源符号,只有 0 和 1,即 s_0 和 s_1 ,若 0 和 1 等概率出现,则有 $I(s_0) = I(s_1) = 1$ b,即等概率二进制信源每一符号的信息量为 1 b。同理,对于四进制信源,符号有 0、1、2、3,若各信源符号等概率出现,则有 $I(s_i) = 2$ b,符号信息量是二进制的 2 倍。以此类推,对于 $M = 2^k$ 进制,假设各信源符号等概率出现,则有 $I(s_i) = k$ b,符号信息量是二进制的 k 倍。

1.4.2 平均信息量(熵)的概念

一般来说,信源各符号出现的概率是不相等的,此时各符号所含的信息量也不同。若各符号的出现统计独立,则该信源每个符号所含信息量的统计平均值(即平均信息量)为

$$H(s) = \sum_{i=1}^q P(s_i) I(s_i) = - \sum_{i=1}^q P(s_i) \log_2 P(s_i) \quad (1-3)$$

由于平均信息量 $H(s)$ 与热力学中的熵形式相似,因此又称为信息源的熵。

信息源的熵有如下性质:

- (1) 其物理概念是信源中每个符号的平均信息量,单位为 b/sym, sym 指符号;
- (2) 熵是非负的;
- (3) 当信源符号等概率发生时,熵具有最大值 $H_{\max}$,即

$$H_{\max}(s) = \sum_{i=1}^q P(s_i) I(s_i) = \log_2 q \quad (1-4)$$

(4) 信源符号不等概率时,则有 $H(s) < H_{\max}(s)$ 。

【例 1-1】 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。试求某消息

201020130213001203210100321010023102002010312032100120210

的信息量。

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,故该消息的信息量为

$$I = \left(23 \log_2 \frac{8}{3} + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 \right) \text{ b} = 107.55 \text{ b}$$

若用熵的概念来计算,由式(1-3)得

$$H(s) = \left(-\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{2}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \right) \text{ b/sym} = 1.906 \text{ b/sym}$$

则该消息的信息量为

$$I = 57 \times 1.906 \text{ b} = 108.642 \text{ b}$$

可见,两种算法的结果有一定误差,但当消息很长时,用熵的概念来计算比较方便,而且随着消息序列长度的增加,两种计算误差将趋近于零。

以上介绍了离散消息所含信息量的度量方法。对于连续消息,信息论中有一个重要结论,就是任何形式的待传信息都可以用二进制形式表示而不失主要内容。采样定理告诉我们:一个频带受限的连续信号,可以用每秒一定数目的采样值代替,而每个采样值可以用若干个二进制脉冲序列来表示。因此,以上信息量的定义和计算同样适用于连续信号。

1.5 通信系统的性能指标

设计和评价一个通信系统,往往要涉及许多性能指标,如系统的有效性、可靠性、适应性、经济性及使用和维护方便性等。这些指标可从各方面评价通信系统的性能,但从研究信息传输方面考虑,通信的有效性和可靠性是通信系统中最主要的性能指标。所谓有效性,是指消息传输的“速度”问题,而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。在实际通信系统中,对有效性和可靠性这两个指标的要求经常是矛盾的,提高系统的有效性会降低可靠性,反之亦然。因此在设计通信系统时,对两者应统筹考虑。

1.5.1 模拟通信系统的性能指标

一、有效性指标

模拟通信系统的有效性指标用所传信号的有效传输带宽来表征。当信道容许传输带宽一定,而进行多路频分复用,每路信号所需要有效带宽越窄,信道内复用的路数就越多。显然,信道复用的程度越高,信号传输的有效性就越好。信号的有效传输带宽与系统的调制方法有关,同样的信号用不同的方法调制而得到的有效传输带宽是不一样的。例如,单边带(SSB)调制与普通调幅(AM)比较,对于每路信号而言,SSB 占用的带宽只有 AM 的一半,因此在一

定频带内用SSB信号传输的信号路数比AM的多1倍,从而可以传输更多的信息,因此,SSB的有效性比AM的好。

二、可靠性指标

模拟通信系统的可靠性指标用整个通信系统的输出信噪比来衡量。信噪比是信号的平均功率 S 与噪声的平均功率 N 之比。信噪比越高,说明噪声对信号的影响越小。显然,信噪比越高,通信质量就越好。输出信噪比一方面与信道内噪声的大小和信号的功率有关,同时又与调制方式有很大关系。例如,带宽调频系统的有效性不如调幅系统的有效性高,但是调频系统的可靠性往往比调幅系统的好。

1.5.2 数字通信系统的性能指标

一、有效性指标

数字通信系统的有效性通常用传输速率和频带利用率来表征。

1. 传输速率

传输速率有两种表示方法:码元速率 R_B 和信息速率 R_b 。

1) 码元速率 R_B

码元速率简称传码率,又称符号速率、波形速率等,它表示单位时间内传输码元的数目,单位为波特(baud),常用符号“B”表示。

例如,若1秒内传输3600个码元(或符号),则码元速率为3600 B。实际中也经常用码元/秒、符号/秒或波形/秒作为码元速率的单位。

数字信号有二进制和多进制之分,二进制仅用两个符号(如0和1)来表示数字波形,而多进制如 M 进制,则相应用 M 个不同符号来表示数字波形。码元速率仅表征单位时间内传输码元的数目,而没有限定这时的码元是何种进制。也就是说,码元速率与进制数无关,只与传输的码元宽度 T_B 有关,即

$$R_B = \frac{1}{T_B}$$

2) 信息速率 R_b

信息速率简称传信率,又称比特率等。它表示单位时间内传输的信息量,单位是比特/秒,记为b/s。

在 M 进制下,每个码元或符号通常都有一定比特数的信息量,因此信息速率和码元速率的关系为

$$R_b = H(s)R_B \quad (1-5)$$

式中: $H(s)$ ——信源熵,即信源的平均信息量。

由式(1-3)和式(1-4)可知,在 M 进制下,若 M 个符号等概率传输,则信源熵有最大值 $\log_2 M$,信息速率也达到最大,即

$$R_b = R_B \log_2 M \quad (1-6)$$

例如,若码元速率为2400 B,采用八进制($M=8$)时,信息速率为7200 b/s;而采用二进制