

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

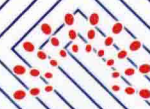
通信原理教程

孙会楠 主编
曹雷 丁文飞 郭秀娥 副主编

Course of
Communication Principles



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列

014061662

孙会楠 主编
曹雷 丁文飞 郭秀娥 副主编

通信原理教程

21世纪高等院校信息工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

TN911-43
64

Course of
Communication Principles

藏书
图书馆

TN911-43

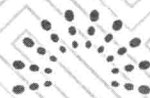
64



北航

C1748129

人民邮电出版社
北京



高校系列

338130410

图书在版编目(CIP)数据

通信原理教程 / 孙会楠主编. — 北京: 人民邮电出版社, 2014.9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-36252-0

I. ①通… II. ①孙… III. ①通信理论—高等学校—教材 IV. ①TN911②TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第163744号

内 容 提 要

本书以各种现代通信系统的基本组成为模型,全面系统地论述了现代通信的基本原理和技术。全书共8章,内容包括:绪论、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字调制系统、模拟信号的数字传输、同步原理、差错控制编码等。

本书最大的特点是物理概念清楚,公式推导详略得当,内容叙述深入浅出,语言流畅,条理清楚,例题丰富,便于读者自学以及组织实施教学活动。另外,本书的另一个特色是各章均有完整的知识小结和思考题与习题,便于读者更好地熟悉、提炼所学内容,以及对所学内容的掌握情况进行自我检查,有助于更好地掌握所学知识。

本书可作为应用型本科通信工程、信息工程、电子工程及相近专业的教材,适当删节也可作为相关专业的专科学子教材,还可供相关工程技术人员参考。

-
- ◆ 主 编 孙会楠
 - 副 主 编 曹 雷 丁文飞 郭秀娥
 - 责任编辑 邹文波
 - 责任印制 彭志环 杨林杰
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
 - 邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 13
 - 字数: 323千字
 - 2014年9月第1版
 - 2014年9月河北第1次印刷
-

定价: 33.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316
反盗版热线: (010)81055315

“通信原理”课程是伴随着通信科学技术的发展而不断变化的,随着历史的进程,教学内容也从模拟通信逐步过渡到以数字通信为主的格局。“通信原理”课程长期以来一直是通信工程、电子信息工程以及其他相关专业的一门专业基础必修课。通过本课程的学习,学生应能掌握通信系统一般模型的基本理论,为今后进一步学习专业知识打下基础。

目前市场上的同类教材很多,多是比较偏重于理论,知识过于繁杂,不适合于应用型本科院校电信类教学需求。为此,我们结合多年的“通信原理”教学实践所积累的经验编写了此教材,希望给读者奉献一本“看得懂、学得会、内容完整、概念清楚、深度适中”的《通信原理》教材,能对读者学好此课程有所帮助。

本书编写注重凝练课程内容,精简数学过程,突出实践环节,加强工程应用,体现技术发展;避免出现理论性太强,数学要求过高,教学内容偏多,覆盖面太宽等现象;教材编写突出应用型人才培养特征。

本书共分为8章:第1章主要是通信的基础知识,介绍通信的基本概念、通信系统模型、通信系统的性能指标、信息的度量等;第2章是信道与信道容量,包括信道的划分、信道中的噪声性能分析;第3章是模拟信号的调制与解调,包括线性调制与非线性调制的原理和抗噪声性能分析;第4章是数字信号的基带传输,包括数字基带信号的描述、理想传输特性、抗噪声性能分析、眼图、消除码间串扰技术;第5章是数字信号的频带传输,包括二进制和多进制的振幅键控、频移键控、相移键控的基本原理和抗噪声性能分析;第6章是模拟信号的数字化,包括抽样、量化、编码方法;第7章是同步原理,包括载波同步、位同步、群同步;第8章是差错控制编码,包括差错控制编码基础、线性分组码、循环码、卷积码、Turbo码。本书每章后附有本章小结、思考题与练习题,便于读者理解和复习。

本书建议学时数为56学时,可针对不同教学对象和时间酌情取舍。

本书由孙会楠任主编,曹雷、丁文飞、郭秀娥任副主编。本书第1章、第2章和第8章由孙会楠编写,第7章由曹雷编写,第5章和第6章由丁文飞编写,第3章和第4章由郭秀娥编写,杜洋、董岩担任本书的校对工作。全书由孙会楠统编定稿。

本书在编写过程中参考了大量相关领域的成熟和优秀教材,被引用书籍的作者对本书

的完成起到了重要作用，在此，本书所有参编人员对他们表示诚挚的感谢。

限于编者的水平，书中难免有不妥或错误之处，恳请读者批评指正。

编者联系方式：huinan_2008@126.com

编 者

目 录

第1章 绪论	1	2.5.3 连续信道信道容量	36
1.1 通信的基本概念	1	本章小结	37
1.2 通信系统的组成	2	思考题与练习题	38
1.2.1 通信系统一般模型	2	第3章 模拟调制系统	40
1.2.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型	3	3.1 线性调制的基本原理	40
1.3 通信系统的分类与通信方式	5	3.1.1 调幅	41
1.3.1 通信系统分类	5	3.1.2 双边带调制	44
1.3.2 通信方式	7	3.1.3 单边带调制	45
1.4 信息及其度量	8	3.1.4 残留单边带调制	47
1.5 通信系统的主要性能指标	11	3.1.5 解调	47
1.5.1 模拟通信系统的主要传输性能指标	11	3.2 线性调制系统的抗噪声性能分析	49
1.5.2 数字通信系统的主要传输性能指标	12	3.2.1 抗噪声性能的分析模型	49
本章小结	13	3.2.2 相干解调的抗噪声性能	50
思考题与练习题	14	3.2.3 非相干解调的抗噪声性能	53
第2章 信道	15	3.3 非线性调制的原理	56
2.1 信道的定义及其数学模型	15	3.3.1 角度调制的基本原理	56
2.1.1 信道的定义	15	3.3.2 窄带角度调制信号	57
2.1.2 信道的数学模型	16	3.3.3 调频信号的产生与解调	57
2.2 恒参信道及其对信号传输的影响	18	3.4 调频系统的抗噪声性能分析	59
2.2.1 恒参信道	18	3.4.1 相干解调的抗噪声性能	59
2.2.2 恒参信道特性及其对信号传输的影响	22	3.4.2 非相干解调的抗噪声性能	60
2.3 随参信道及其对信号传输的影响	24	3.5 调频系统的加重技术	64
2.3.1 随参信道	24	本章小结	65
2.3.2 随参信道特性及其对信号传输的影响	27	思考题与练习题	65
2.3.3 随参信道特性的改善	30	第4章 数字基带传输系统	67
2.4 信道的加性噪声	32	4.1 数字基带信号	67
2.5 信道容量	34	4.1.1 数字基带信号的码型设计原则	67
2.5.1 信道容量定义	34	4.1.2 数字基带信号的常用码型	68
2.5.2 离散信道信道容量	34	4.1.3 数字基带信号的频谱特性	72
		4.2 数字基带信号的传输与码间串扰	75
		4.2.1 数字基带传输系统的组成	75
		4.2.2 数字基带传输系统的数学分析	76

4.2.3 码间串扰的消除	77	6.1.2 脉冲振幅调制	120
4.3 无码间串扰的基带传输系统	77	6.2 抽样信号的量化	123
4.3.1 无码间串扰的时域条件	77	6.2.1 均匀量化	123
4.3.2 无码间串扰的频域条件	78	6.2.2 非均匀量化	125
4.3.3 理想基带传输系统	78	6.3 脉冲编码调制	128
4.3.4 实用的无码间串扰基带传输特性	79	6.3.1 脉冲编码调制基本原理	128
4.4 部分响应系统	81	6.3.2 常用的编码方法	129
4.4.1 部分响应系统的基本原理	81	6.3.3 A 律 13 折线编码	130
4.4.2 一种实用的部分响应系统	83	6.3.4 PCM 系统的抗噪声分析	134
4.4.3 一般形式的部分响应系统	83	6.4 差分脉冲编码调制	135
4.5 眼图	85	6.4.1 预测编码简介	135
4.5.1 眼图的概念	85	6.4.2 差分脉冲编码调制原理及性能	135
4.5.2 眼图形成原理及模型	85	6.5 增量调制	136
本章小结	86	6.5.1 增量调制原理	136
思考题与练习题	87	6.5.2 增量调制系统中的量化噪声	138
第 5 章 数字频带传输系统	89	本章小结	139
5.1 二进制幅移键控	89	思考题与练习题	139
5.1.1 基本原理	90	第 7 章 同步原理	141
5.1.2 功率谱密度及带宽	91	7.1 载波同步	141
5.1.3 二进制幅移键控抗噪声性能	92	7.1.1 直接法	142
5.2 二进制频移键控	96	7.1.2 插入导频法	148
5.2.1 基本原理	96	7.1.3 载波同步系统的性能	151
5.2.2 功率谱密度及带宽	98	7.2 位同步	153
5.2.3 二进制频移键控抗噪声性能	100	7.2.1 外同步法	153
5.3 二进制相移键控	103	7.2.2 直接法	155
5.3.1 基本原理	104	7.2.3 位同步系统的性能及其相位误差对性能的影响	160
5.3.2 功率谱密度及带宽	107	7.3 群同步	162
5.3.3 二进制相移键控抗噪声性能	108	7.3.1 连贯插入法	163
5.4 二进制数字调制系统的性能比较	110	7.3.2 间隔式插入法	165
5.5 多进制数字调制原理	112	7.3.3 群同步系统的性能	167
5.5.1 多进制幅移键控	112	7.3.4 群同步的保护	169
5.5.2 多进制频移键控	113	本章小结	169
5.5.3 多进制相移键控	114	思考题与练习题	170
本章小结	116	第 8 章 差错控制编码	172
思考题与练习题	116	8.1 差错控制编码基本概念	172
第 6 章 模拟信号的数字传输	118	8.1.1 差错控制方式	172
6.1 模拟信号的抽样	118	8.1.2 差错控制编码的分类	174
6.1.1 理想抽样	119		

8.1.3 检错与纠错的基本原理	174	8.4.1 循环码的特点	186
8.1.4 码长、码重、码距、编码效率	175	8.4.2 码多项式及按模运算	187
8.1.5 最小码距 d_0 与码的纠、检错能力之间的关系	176	8.4.3 循环码的生成多项式和生成矩阵	188
8.2 常用检错码	176	8.4.4 循环码的编码	189
8.2.1 奇偶校验码	176	8.4.5 循环码的解码	191
8.2.2 行列奇偶校验码	177	8.5 卷积码	192
8.2.3 恒比码	178	8.5.1 卷积码的编码原理	192
8.2.4 正反码	179	8.5.2 卷积码的图形描述	193
8.3 线性分组码	179	8.5.3 卷积码的维特比译码	194
8.3.1 线性分组码基本原理	179	8.6 Turbo 码	196
8.3.2 汉明码	186	本章小结	197
8.4 循环码	186	思考题与练习题	198
		主要参考文献	200

人类社会的发展和进步离不开信息的交互，社会越进步，信息交互就越频繁。进入 21 世纪以来，通信与网络就像决堤的洪水一般迅速渗透到人们生存环境的每一个角落，使人们无时无刻不感受到信息时代给生活带来的巨大变革。通信与传感器技术、计算机技术紧密结合，相互融合，已经成为推动人类社会文明进步与发展的巨大动力。

通信，顾名思义就是信息的传输与交换。本章作为后续各个章节的铺垫，主要介绍通信的基本概念、通信系统的组成及其分类、信息的度量和通信系统的主要技术指标等。

1.1 通信的基本概念

通信是指通过某种媒体把信息从一地有效、可靠地传输到另一地的过程，以实现信息的传输和交换。在古代，人们通过飞鸽传书、击鼓鸣号、烽火报警等方式进行信息传递，这种通信方式古老而低级，有效性和可靠性都不高；在今天，随着科学技术的飞速发展，相继出现了固定电话、移动电话、互联网、可视电话等多种现代通信手段，通信速度越来越快，通信质量越来越高。

在通信中常会出现信息与消息这两个词，应该说这是既有区别又有联系的两个概念，不能完全等同。信息是指消息中有用的内容，而通信的目的就是传输消息中包含的信息。

在通信系统中传输的是各种各样的消息，包括文字、数据、语言、图片、图像等，这些消息都能被人们生理器官所感知。然而，当某人接收到消息后，需要的是关于描述某事物状态的具体内容，这些具体描述就是信息，即消息中有用的内容。举例来讲，接电话听到的声音就是消息，但是声音中有些内容对你没用，有些有用，后者就是信息。

在通信中形式上传输的是消息，但本质上传输的是信息。消息中包含信息，是信息的载体，通过收到消息从而获得信息。同一则信息也可以由不同形式的消息来载荷，例如上海世博会进展情况可用报纸文字、广播语言、电视图像等不同消息来表述。而一则消息也可载荷不同的信息，例如电视图像可以包含非常丰富的信息。

从通信的观点，能够构成消息的各种形式必须具有两个条件：一是能够被通信双方所理解，二是可以传递。

由于用电和光来传递信息速度快，准确可靠，且很少受到时间、地点、空间、距离等方面的限制，因而发展迅速，应用广泛。利用各种电信号和光信号作为通信信号的方式称

之为电通信, 简称为电信。现代通信指的都是电通信, 其所要研究的内容就是如何把信息大量地、快速地、准确地、广泛地、方便地、经济地、安全地从发送端通过传输介质传送到接收端。

通信原理是介绍支撑各种通信技术基本概念和数学理论基础的课程, 其侧重点是信息的传输。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统一般模型

通信系统的目的是有效而可靠地把被称为信源的消息或信息通过一通路传输给被称为信宿的终端用户。信源和信宿通常远隔两地。为完成上述目的, 点对点通信系统模型如图 1-1 所示。

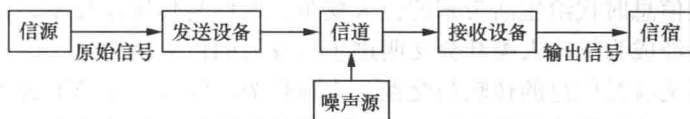


图 1-1 通信系统模型

1. 信源

信源是消息产生地, 其作用是把各种消息转换成原始电信号, 消息有多种形式, 包括文字、数据、图像和视频等原始电信号称为基带信号。

信源又可以分为模拟信源和数字信源。模拟信源输出连续的模拟信号, 如话筒、摄像机等; 数字信源则输出离散的数字信号, 如电传机、计算机等各种数字终端。

2. 发送设备

发送设备基本功能是将信源和信道匹配起来, 即将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号。有多种变换方式, 在需要频谱搬移的场合, 调制是最常见的变换方式。

3. 信道

信道是传输信号的物理媒质。在无线信道中, 信道可以是大气(自由空间); 在有线信道中, 信道可以是明线、电缆、光纤。信道在给信号提供通路的同时, 也会对信号产生各种干扰和噪声。信道的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。

4. 噪声源

噪声源不是人为加入的设备, 而是信道中的噪声以及通信系统其他各处噪声的集中表示。噪声通常是随机的, 其形式是多种多样的, 它的存在干扰了正常信号的传输。

5. 接收设备

接收设备完成发送设备的反变换。其目的是从受到干扰的信号中正确地恢复出原始的电信号。

6. 信宿

信宿是传输信息的归宿点，其作用是将接收设备恢复出的原始信号转换成相应的消息。

图 1-1 概括地反映了通信系统的共性。根据研究的对象及所关心的问题不同将会使用更详细和具体的通信系统模型。对通信原理的讨论就是围绕通信系统模型而展开的。

1.2.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型

实际通信中，信源发出的消息是多种多样的，但基本可以分成两类：连续消息和离散消息。连续消息是指消息的状态连续变化或不可数的，如语音、图像等。连续消息也称为模拟消息。离散消息则是指消息的状态是可数的或离散型的，如符号、文字或数据等。离散消息也称数字消息。

为了传递消息，各种消息需要转换成电或光信号。由图 1-1 的通信过程可知，消息与电信号之间必须建立单一的对应关系，否则在接收端就无法恢复出原来的消息。通常把消息寄托于电信号的某一参量上，如果电信号的参量携带着模拟消息，则该参量将是连续取值，称这样的信号为模拟信号。例如，普通电话机输出的信号 $f(t)$ 就是模拟信号，如图 1-2 所示。

如果电信号的参量携带着数字消息，则该参量必将是离散取值的。这样的信号就称为数字信号。例如，计算机输出的信号 $m(t)$ 就是数字信号，如图 1-3 所示。

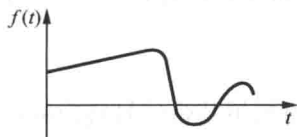


图 1-2 语音信号

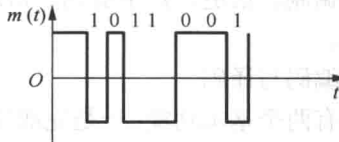


图 1-3 某计算机信号

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1. 模拟通信系统模型

模拟通信系统就是利用模拟信号来传递信息的通信系统，其模型如图 1-4 所示。

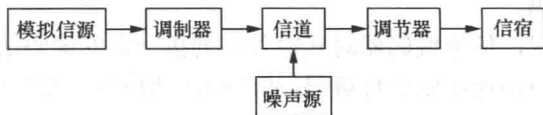


图 1-4 一种常见的模拟通信系统模型

模拟通信系统包括两种重要的变换：一是发送端将连续消息变换成原始电信号，而在接收端作相反变换，它们是由模拟信源和信宿完成的。二是在发送端将原始电信号转换成适合

于信息传输的信号或在接收端进行相应反变换,即调制或解调,它们是由调制器和解调器完成的。经第一种变换所得到的原始电信号具有较低的频谱分量,一般不适宜直接作为远距离传输信号,因此在模拟通信系统中常常需要进行第二种变换。通常将在发送端调制前或接收端解调后的信号称为基带信号,因此原始电信号又称为基带信号;而经过调制后的信号称为已调信号。

已调信号又称频带信号,它具有三个基本特征:①携带有用信息;②适合在信道中传输;③信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频。

需要指出,消息从发送端到接收端的传递过程中,不仅仅只有上述两种变换,实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。本书只着重研究上述两种变换与反变换,其余过程被认为都是足够理想的,而不予讨论。

2. 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传输数字信息或模数变换后信息的通信系统。其模型如图 1-5 所示。

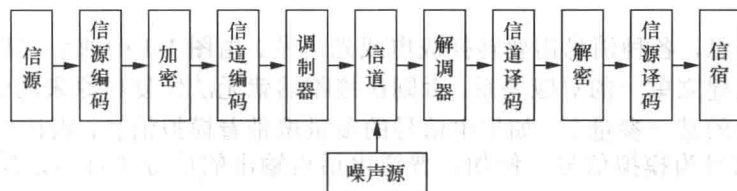


图 1-5 数字通信系统模型

数字通信系统比模拟通信系统的组成要复杂一些,其中包括了信源编码、信号加密、信道编码、数字调制、信道、数字解调、信道译码、信号解密、信源译码等一些区别于模拟通信系统的问题。

(1) 信源编码与译码

信源编码有两个基本功能:一是完成模/数转换,即将模拟基带信号转换成数字基带信号;二是提高信息传输的有效性,即进行某种数据压缩,用以减少码元数目和降低码元速率。码元速率在通信中直接影响传输所占的带宽,而传输所占的带宽又直接反映了通信的有效性。信源译码是信源编码的逆过程。

(2) 加密和解密

加密是指为了保证所传信息的安全,人为地将被传输的数字序列扰乱,即加上密码。解密是指在接收端利用与发送端相同的密码复制品对收到的数字序列进行解密,以便恢复出原来信息。

(3) 信道编码与译码

为了传输时的抗干扰,信道编码器对其输入序列按一定的编码法则加入多余度,在接收端的信道译码器按照相应的逆法则进行解码,从而纠正或检测出收到序列中发生错码的码元,提高通信系统的可靠性。

(4) 数字调制与解调

数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处,从而变换成适于在信道传输的调制信号。数字解调过程与数字调制正好相反,是将已调数字信号还原为数字基带信号。

上述所列数字通信的有些环节(如编码与译码、调制器与解调器)并不是必须的,它可根据不同的条件和要求决定是否采用。没有调制器与解调器环节,直接传输基带信号的数字通信系统称为数字基带传输系统。

3. 数字通信的主要特点

数字通信系统与模拟通信系统相比有以下优点。

(1) 远距离传输时可降低甚至避免噪声的积累,以获得高质量的通信。模拟通信系统传输时要求在接收端恢复发送端的模拟信号,若该信号中已含噪声则信号加噪声一同被恢复。这样一来,在远距离通信的多次中继传输时多次噪声加入就会发生噪声积累。数字通信系统传输时恢复的是“发送端发的是哪一个波形”,而不是恢复波形本身。例如二进制数字通信系统只要求恢复的是状态0或状态1。这时,比如在数字微波中继通信一次传输中,恢复的信号可尽可能地去除噪声,因此远距离通信时中继传输可避免噪声积累。

(2) 可通过差错控制编码方法,来减小信息传输中的误码率,提高通信系统的可靠性。

(3) 便于使用现代数字信号处理技术来对数字信息进行处理、变换和存储。比如模拟通信系统中采用的是模拟交换机,而现在的数字通信系统中采用的是数字交换机,这显著提高了信息交换的性能。

(4) 易于采用数字集成技术,因此便于降低成本和使设备小型化。

(5) 数字信息易于作数字加密技术以提高传输的保密性。

(6) 数字通信可以综合传递各种消息或业务,比如数据、语音和图像等,使通信系统功能增强。

但是,数字通信与模拟通信相比较,其突出的缺点是其信号占有的频带宽。例如,一路模拟电话仅占4kHz带宽,而一路数字电话要占20kHz~64kHz的带宽。然而,由于毫米波通信和光纤通信的出现,带宽问题得到解决,数字通信几乎成了唯一的选择。

1.3 通信系统的分类与通信方式

1.3.1 通信系统分类

通信系统有多种不同的分类方法,主要有以下几种情况。

1. 按通信业务类型分类

通信业务包括符号、文字、语言、数据、视频在内的多种类型,因此通信系统可分为电报通信系统、数据通信系统、电话通信系统、图像通信系统和综合业务网通信系统等。除综合业务网通信系统外,这些通信系统可以是专用的,但通常是兼容的或并存的。由于电话网最为普及,因而其他业务的通信系统常常借助于公用电话网来组成。

2. 按调制方式分类

根据信道中传输的信号是否经过调制,可将通信系统分为基带传输通信系统和频带传输通信系统。基带传输通信系统是将未经调制的信号直接传输,如远距离音频电话、有线广播等;频带传输通信系统是将基带信号经调制后送入信道传输。常用的调制方式及用途如表1-1所示。

表 1-1 常用的调制方式及用途

调制方式		用途举例	
连续波调制	线性调制	振幅调制 (AM)	广播
		单边带调制 (SB)	载波通信、短波无线电通信
		抑制载波双边带调制 (DSB)	立体声广播
		残留边带调制 (VSB)	电视广播、传真
	非线性调制	频率调制 (FM)	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 (PM)	中间调制方式
	数字调制	幅移键控 (ASK)	数据传输
		频移键控 (FSK)	数据传输
		相移键控 (PSK、DPSK 等)	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 (QAM、MSK 等)	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 (PAM)	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 (PDM)	中间调制方式
		脉位调制 (PPM)	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 (PCM)	市话中继线、卫星、空间通信
		增量调制 (DM、CVSD)	军用、民用数字电话
		差分脉码调制 (DPCM)	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 (ADPCM、LPC 等)	中速数字电话

3. 按传输信号特征分类

当信道中传输的是模拟信号时，所对应的通信系统称之为模拟通信系统，当信道中传输的是数字信号时，所对应的通信系统称之为数字通信系统。

4. 按传输介质分类

按传输介质不同，可将通信系统分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信系统需要以传输缆线作为传输介质，比如对称电缆、同轴电缆、光缆等。无线通信系统则以自由空间作为传播介质。

5. 信号复用方式分类

复用是指将多路信号组合成一路信号进行传输的过程，目的是为了更好地共享信道资源，适应信道传输。传输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用户的信号占据不同的频率范围，以实现多路通信；时分复用是用脉冲调制的方法使不同用户的信号占据不同的时间区间，以实现多路通信；码分复用是用正交的脉冲序列分别代表不同信号以实现多路通信。

模拟通信中都采用频分复用，随着数字通信的发展，时分复用的使用越加广泛。码分复用主要用于空间通信和移动通信中。

6. 按工作波段分类

由于不同频率的电磁波具有不同的传输特点, 为了便于充分利用和管理通信资源, 可按通信设备的工作频率不同分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信、远红外通信等。

波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad (1-3-1)$$

式(1-3-1)中的 c 为光波速度。

1.3.2 通信方式

前述通信系统是单向系统, 但在多数场合下, 信源兼为信宿, 需要双向通信。电话就是一个最好的例子, 这时通信双方都需要有发送和接收设备, 并需要各自的传输媒质, 如果通信双方共用一个信道, 就必须用频率或时间分割的方法来共享信道。因此, 通信过程中涉及通信方式与信道共享问题。

1. 按消息传递的方向与时间关系划分通信方式

对于点对点之间的通信, 按消息传递的方向与时间关系, 通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信 3 种。

(1) 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。例如: 广播、电视、遥测、遥控、无线寻呼等都是单工通信方式。

(2) 半双工通信: 是指通信双方都能收发消息, 但不能同时进行收和发的工作方式, 如图 1-6 (b) 所示。例如: 无线电对讲机、普通无线电收发报机等都是半双工通信方式。

(3) 全双工通信: 是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式, 如图 1-6 (c) 所示。例如: 普通电话、手机等都是全双工通信方式。

2. 按数字信号码元排列方式划分通信方式

在数字通信中, 按数字序列代码排列的顺序可分为串行传输和并行传输。

(1) 串行传输

串行传输是数字序列以串行方式一个接一个地在一条信道上传输, 如图 1-7 (a) 所示。串行传输方式只需要一条通道, 线路成本低, 一般的远距离数字通信大都采用串行传输方式。

(2) 并行传输

并行传输是将代表信息的数字序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上传输, 如图 1-7 (b) 所示。并行传输方式需要多条通路, 线路成本高, 一般适用于计算机和其他高速数字系统, 特别适用于设备之间的近距离通信。

此外, 还可以按照通信的网络形式划分。由于通信网的基础是点与点之间的通信, 所以本课程的重点放在点与点之间的通信上。

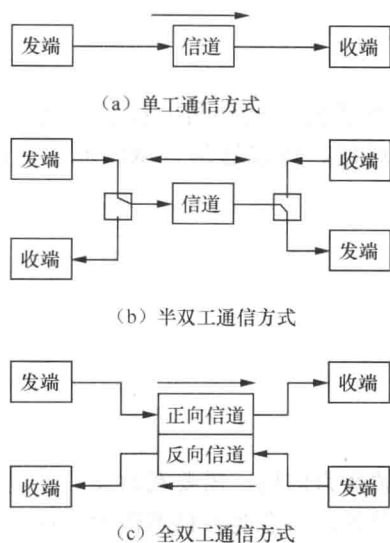


图 1-6 通信方式示意图

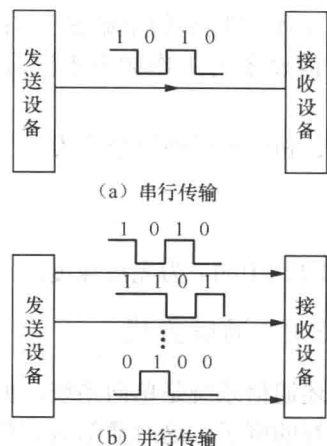


图 1-7 串行和并行传输方式示意图

1.4 信息及其度量

通信的目的在于传输消息中所包含的信息。信息是指消息中所包含的有效内容,或者说 是收信者预先不知而待知的内容。消息是信息的物理表现形式,信息是其内涵,传输信息的 多少是用“信息量”来衡量的。

消息是多种多样的,度量消息中所含的信息量的方法,必须能够用来度量任何消息的信 息量,而和消息种类无关。另外,消息中所含信息量的多少也应和消息的重要程度无关。

在有意义的通信中,对于接收者而言,只有消息中不确定的内容才构成信息;否则,信 源输出已确切知晓,就没有必要再传输它了。让我们从常识的角度来感觉 3 条消息:①明天 晴转多云;②明天有大暴雨;③明天温度将超过 60°C 。这 3 条消息中,第一条带来的信息量 最小,因为这样的事件发生很正常,人们不感到惊奇;第二条带来了较大的信息量,因为人 们对这样的极端天气重视程度很高,需要提前做好防范;第三条带来的信息高于第二条,因 为这样的事件在一般情况下几乎是不可能发生的,听后使人感到十分吃惊。这里例子表明, 对接收者而言,事件越不可能,越不可预测,越能使人感到意外和惊奇,所包含的信息量也 就越大。

根据概率论知识,事件的不确定程度可以用其出现的概率来描述。事件出现的可能性越 小,则概率就越小;反之,则概率就越大。消息所含的信息量可用消息发生概率的倒数的对 数来表示。在信息论中,消息所含的信息量 I 与消息 x 出现的概率 $p(x)$ 的关系式为

$$I = \log_a \frac{1}{p(x)} = -\log_a p(x) \quad (1-4-1)$$

式中,当 $a=2$ 时, I 的单位为比特 (bit); 当 $a=e$ 时,则 I 单位为奈特 (nat); 当 $a=10$ 时, 则 I 的单位为哈特来。经常使用的单位为比特,这时

$$I = \log_2 \frac{1}{p(x)} = -\log_2 p(x) \quad (\text{bit}) \quad (1-4-2)$$

式(1-4-2)实际上反映了信息量的大小与消息出现的概率之间存在如下对应关系。

(1) 事件出现的概率越小, 则消息中包含的信息量越大; 反之, 事件出现的概率越大, 消息中包含的信息量越小。

(2) 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。

(3) 如果消息是由若干个独立事件所构成, 那么消息总的信息量等于这些独立事件信息量的总和, 数学关系式为

$$\begin{aligned} I[p(x_1)p(x_2)\cdots] &= -\log_2[p(x_1)p(x_2)\cdots] \\ &= -\log_2 p(x_1) - \log_2 p(x_2) - \cdots = I[p(x_1)] + I[p(x_2)] + \cdots \end{aligned} \quad (1-4-3)$$

在通信系统中, 当传送 M 个等概率的消息之一时, 每个消息出现的概率为 $1/M$, 任一消息所含的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{M} = -\log_2 M \quad (1-4-4)$$

若 M 是 2 的整数次幂, 即 $M = 2^k$, $k = 1, 2, 3, \cdots$, 则式(1-4-4)可写为

$$I = \log_2 2^k = k \quad (\text{bit}) \quad (1-4-5)$$

式中: k 是二进制脉冲数目, 也就是说, 传送每一个 M ($M = 2^k$) 进制波形的信息量就等于用二进制脉冲表示该波形所需的脉冲数目 k 。

下面讨论非等概率条件下的信息量。设信息源中包含有 M 个消息符号, 每个消息 x_i ($i = 1, 2, 3, \cdots, M$) 出现的概率为 $p(x_i)$, 则各消息出现的概率为

$$\begin{bmatrix} x_1, & x_2, & \cdots, & x_M \\ p(x_1), & p(x_2), & \cdots, & p(x_M) \end{bmatrix}, \text{ 且有 } \sum_{i=1}^M p(x_i) = 1$$

则 $x_1, x_2, \cdots, x_M$ 所包含的信息量分别为

$$-\log_2 p(x_1), -\log_2 p(x_2), \cdots, -\log_2 p(x_M)$$

于是, 每个符号所包含的信息量的统计平均值, 即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= p(x_1)[- \log_2 p(x_1)] + p(x_2)[- \log_2 p(x_2)] + \cdots + p(x_M)[- \log_2 p(x_M)] \\ &= - \sum_{i=1}^M p(x_i) [\log_2 p(x_i)] \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned} \quad (1-4-6)$$

由于式(1-4-6)中 $H(x)$ 与热力学中熵的定义式相类似, 故在信息论中又通常称它为信息源的熵, 其单位为比特/符号。显然, 当 $p(x_i) = 1/M$ (每个符号等概率独立出现) 时, 式(1-4-6)即成为式(1-4-4), 此时信源的熵有最大值。

【例 1-1】 设有二进制信源 (0,1), 每个符号独立出现。

(1) 若 0 出现的概率是 $1/4$, 求每个符号的信息量和平均信息量(熵)。

(2) 若 0 和 1 出现等概, 重复(1)的计算。

解 (1) 题给定 $p(0) = 1/4$, 将此代入式(1-4-2), 得到 0 符号的信息量

$$I(0) = -\log_2 p(0) = -\log_2 (1/4) = 2(\text{bit})$$

和 1 符号的信息量

$$I(1) = -\log_2 p(1) = -\log_2 (3/4) = -1.284 + 2 = 0.416(\text{bit})$$

题给定各符号出现独立, 所以可将 $p(0) = 1/4$ 和 $p(1) = 3/4$ 代入式(1-4-6), 得到每符号