

面向21世纪高等学校精品规划教材
电子信息类

XIANDAITONGXIN
YUANLI

现代通信 原理

主 编 黄小虎
主 审 柳春锋

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TN911/110

2008

面向 21 世纪高等学校精品规划教材·电子信息类

现代通信原理

主 编 黄小虎
主 审 柳春锋

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书作为通信类专业的《现代通信原理》教材,系统地阐述了现代通信系统的基本概念、基本原理、基本技术及基本分析方法,较充分地反映了现代通信的新技术。

全书共8章,包括绪论、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字信号的频带传输、信源编码、信道复用及多址技术、同步技术、实验与课程设计。本书简单实用,便于教学和广大读者自学。

本书适合高等院校通信、信息及相关专业的学生学习,也可作为电子爱好者的自学读物。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理/黄小虎主编. —北京:北京理工大学出版社,2008.1

ISBN 978-7-5640-1371-4

I. 现… II. 黄… 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(2007)第190982号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京国马印刷厂

开 本/787毫米×960毫米 1/16

印 张/13.5

字 数/273千字

版 次/2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

印 数/1~2000册

定 价/20.00元

责任校对/陈玉梅

责任印制/周瑞红

图书出现印装质量问题,本社负责调换

出版说明

电子信息技术的发展水平是衡量一个国家现代化水平和综合国力的重要标志,是我国今后20年高科技发展的重点。目前,随着我国电子信息技术及理论研究的快速发展,电子信息技术各个领域急需大量的应用型工程技术人才。他们既掌握着比较丰富的基础理论知识,又具有比较强的动手能力和一定的专业实践经验,能够在实际工作中比较好地分析问题、解决问题;有较高的综合素质,能够在基层一线对自己所从事的工作和工程实际问题进行研究、探索,能够组织工程项目的实施。

近年来新建本科院校大都以应用型为办学定位,形成了一批占全国本科高校总数近30%的、与传统本科院校不同的应用型本科院校。教材是教学的主要依据,也是教学改革的重要组成部分。教学改革的种种设想和试验,大多要通过教材建设来具体体现;教材建设反过来又推动和促进教学改革。面对高等教育对象的扩展、教学模式的变革、教材内容需求的变化,为了更好地适应当前我国高等教育这种发展的需要,满足我国高校对电子信息类应用型人才培养的各种要求,北京理工大学出版社组织知名专家、学者,以培养应用型人才为主题进行深入的研讨,确立了电子信息类应用型本科教材的出版规划。

本套教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 定位明确。针对应用型本科“理论基础扎实,专业知识面广,实践能力强,综合素质高,并有较强的科技运用、推广、转换能力”的特点,在选择教材内容和确立编写体系时注意体现素质教育、创新能力与实践能力的培养,为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。

(2) 注重培养学生职业能力。电子信息类专业学生要能紧跟电子信息产业的迅

速发展，要有较强的适应工作的能力，具备使用先进应用软件的能力，在此套教材中强调培养学生利用诸如 protel、maxplusII、multisim、matlab 等工具软件进行电路设计和仿真调试的能力。

(3) 体系完整。此套教材包括了电子信息工程和通信工程的专业基础课和部分专业选修课。

(4) 保证质量。本套教材大多是在已经在学生中用过几轮并且经实际验证比较优秀的课程讲义的基础上形成的。在教材出版后我们将选择并安排一部分比较好的优秀教材修订再版，逐步形成精品教材。

(5) 提供教学软件包。可在北京理工大学出版社网站 [www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn) 下载。

本套教材可作为应用型本科院校电子信息工程、通信工程等专业的课程教学用书，也可以作为电子信息技术的技能培训用书。

前 言

本书的编写目的是提供一本适合应用型本科院校学生使用的通信原理教材。近年来,随着应用型本科教育的兴起及其规模的迅速扩大,应用型本科教育有普及的趋势。笔者一直从事通信原理教学,就目前通信原理的应用型本科教材来说感觉有三点不足:一是可供选用的教材较少;二是总体上仍偏难,理论分析过多,学生学习起来较吃力;三是实训环节薄弱,特别是综合性实训如课程设计缺乏,造成理论与实践不能较好的结合。因此,编写一本简单适用、通俗易懂的通信原理教材成为本教材编写的立足点与出发点。

在认真总结和借鉴国内外众多高等院校通信类专业教学经验,并广泛征求通信课程教学一线教师意见的基础上,对教学内容进行了适当地精简,减少了理论推导,强调通信技术的基本概念、基本原理和分析方法的学习,并增加了实验与课程设计等内容,从而加强了针对性和实用性,突出了本教材的特色。同时,考虑到通信技术的飞速发展,在教材中适当地对一些通信领域的新技术加以简单介绍,以使该教材具有一定的先进性。

全书共分8章,主要内容有绪论、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字信号的频带传输、信源编码、信道复用及多址技术、同步技术、实验与课程设计等基本知识。

本书由黄小虎主编,李伟民、徐敏、郭晓功、黄印君参编。其中李伟民编写第5章;徐敏编写第6章和第7章;郭晓功编写第4章并协助进行了部分章节插图的整理;黄印君编写第8章;黄小虎编写第1章、第2章和第3章。全书由黄小虎统稿。本书编写过程中,得到了湖北众友科技实业股份有限公司的大力支持,该公司的技术开发人员对本书实践部分进行了悉心指导。

本书由柳春锋副教授主审。他认真审阅了书稿,并提出许多宝贵意见。在本书出版之际,表示衷心感谢!

由于编者水平有限,错误与不妥之处在所难免,敬请同行专家及读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 通信系统的基本概念	(1)
1.2 信息及其度量	(5)
1.3 信道及信道容量	(5)
1.4 通信系统的主要性能指标	(10)
本章小结	(12)
思考与练习题	(12)
第2章 模拟调制系统	(14)
2.1 概述	(14)
2.2 幅度调制系统	(16)
2.3 幅度调制系统的性能分析	(26)
2.4 角度调制系统	(31)
本章小结	(38)
思考与练习题	(39)
第3章 数字基带传输系统	(41)
3.1 数字基带传输系统	(41)
3.2 数字基带信号常用码型	(45)
3.3 数字基带信号的频谱分析	(50)
3.4 数字基带传输系统的测量与调整	(51)
本章小结	(54)
思考与练习题	(55)
第4章 数字信号的频带传输	(56)
4.1 概述	(56)
4.2 二进制数字调制系统	(57)
4.3 多进制数字调制系统	(68)
4.4 最小频移键控 (MSK)	(74)



4.5 正交频分复用 (OFDM) 简介	(76)
本章小结	(78)
思考与练习题	(79)
第5章 信源编码	(80)
5.1 抽样与量化	(80)
5.2 脉冲编码调制 (PCM)	(98)
5.3 差分脉冲编码调制 (DPCM)	(109)
5.4 自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM)	(110)
5.5 增量调制 (DM)	(112)
本章小结	(116)
思考与练习题	(116)
第6章 信道复用及多址技术	(117)
6.1 概述	(117)
6.2 频分多路复用 (FDM)	(118)
6.3 时分多路复用 (TDM)	(121)
6.4 多址技术简介	(134)
本章小结	(139)
思考题与习题	(140)
第7章 同步原理	(142)
7.1 概述	(142)
7.2 载波同步	(143)
7.3 位同步	(148)
7.4 群同步	(154)
本章小结	(160)
思考与练习题	(160)
第8章 实验与课程设计	(162)
8.1 通信原理实验	(162)
8.2 通信原理课程设计	(195)
参考文献	(206)

第1章 绪 论

本章主要介绍通信的基本概念，名词术语和基础知识，为全书提供共同的基础。

1.1 通信系统的基本概念

1.1.1 通信的概念

通信是信息传输或交换的过程。这个过程可以是单向的，比如广播、电视通信；也可以是双向的，如电话通信，对讲机通信等。本书所指通信是指借助现代电子通信设备实现的通信，即通常所说的电通信。

通信的目的是传输或交换消息中包含的信息。消息也称原始消息，如语言、文字、图片等。信息是消息中对接收者有意义的部分。例如，在一次传真通信中，甲方给乙方传真了一份合同，乙方收到的合同上除了文字还有花纹和图案等，但对乙方而言，只有文字有意义，也就是说，对乙方而言，信息是文字，消息是整个合同。在一个消息中信息量的大小是可以计算的，这将在本章的第二节予以介绍。在电通信系统中，消息必须转化为电信号才能实现传输。所以，信号是消息的载体。这里所说的电信号包含两种类型：一种是在电路中传输的电压或电流信号，另一种是在自由空间传播的电磁波信号。

1.1.2 通信系统的模型

通信系统是指完成通信这一过程的全部设备、软件和传输媒介的总称。需要指出的是：通信软件在现代通信系统中的地位越来越重要，甚至可以替代传统通信系统中的硬件电路，使通信系统的功能变得更强大，支撑的业务更多，可靠性更高，设备体积更小巧。因此，在定义通信系统的概念时，应加入通信软件这一关键内容。通信软件不属于本课程探讨的内容，有兴趣的读者可自行参阅有关资料。

图1-1所示为通信系统的基本模型。

图1-1中，信源的作用是产生或形成消息。消息有许多种类型，如语言、文字、图像、数据等。从时间上看，消息有连续消息和离散消息两种，前者如语言，活动图像等；后者如

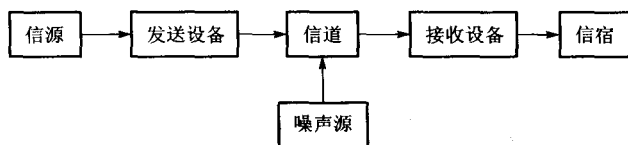


图 1-1 通信系统的基本模型

电报，数据等。

发送设备的作用是将消息变换为适合在信道中传送的信号。变换的方式很多，有时可以将信号直接在信道中传送，有时需将信号的频谱进行搬移，有时需进行 A/D 转换等。通常将信号分为两类：当信号的波形和取值均为时间的连续函数时，称为模拟信号；当信号的波形和取值均为时间的离散函数时，则称为数字信号。

信道是信号从发送设备传输到接收设备的媒介或通道，其传输性能直接影响到通信的质量。信道种类繁多，如常见的有电话线、电缆、同轴电缆、光纤、自由空间等，概括起来有两类：有线信道和无线信道。

噪声或干扰存在于通信系统的各处，并引起传输信号的失真，影响通信的质量。在图 1-1 中为方便起见将噪声源集中表示在一个方框里。

接收设备与发送设备的作用相反，用来将信号转换为消息。信宿是消息传输的对象，信源进行通信的目的就在于将消息传输到信宿，信源和信宿既可以是人也可以是设备。因此，有时它们也分别被称为发终端和收终端。

图 1-1 是通信系统的基本模型，能反映各种通信系统的共性。有时根据通信系统研究对象或关心问题的不同，会出现一些更具体的通信系统的模型。比较常见的有模拟通信系统模型和数字通信系统模型两种。

模拟通信系统模型如图 1-2 所示。由于调制在模拟通信系统中起关键作用，其他如放大、滤波等过程都可认为是线性的而把它们合并到信道中。因此，发送设备和接收设备简化为调制器和解调器。调制的目的在于变换信号，使信号适合信道的传输特性或简化传送设备。

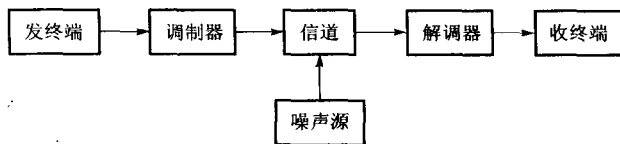


图 1-2 模拟通信系统模型

数字通信系统模型如图 1-3 所示。

信源编码的目的是对信源产生的信号进行数字压缩编码及加密。如果信源产生的消息是

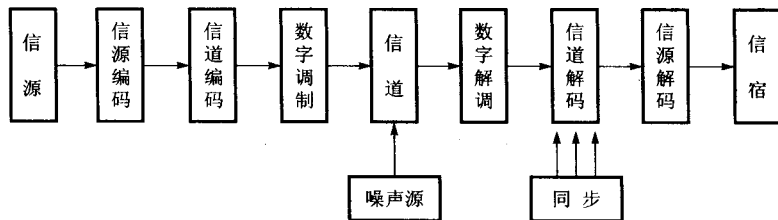


图 1-3 数字通信系统模型

模拟的，则首先要对其进行模拟/数字转换，如果消息本身就是离散的，则直接进行编码。信道编码也称检纠错编码，其编码方式是通过在信息码元中插入若干特定规律的监督码，在接收端就可以发现或纠正在传输中出现的误码，从而提高通信系统的可靠性。数字调制在本质上和模拟调制是相同的，都是把要传输的信号（调制信号）叠加到适合信道传输的高频载波上去，只是在数字通信系统中调制信号是数字信号而已。在接收端经过数字解调、信道解码和信源解码后可正确地恢复消息，在此过程中同步起到至关重要的作用。由于同步存在于数字信号接收的诸多环节中，因此图 1-3 中用一个方框集中来表示。

图 1-3 所示的数字通信系统也称数字频带传输系统，如果经过信道编码的数字信号不经数字调制就直接经信道传输到接收端，则称该系统为数字基带传输系统。相应的，数字基带传输系统在接收端也没有数字解调环节。

1.1.3 通信系统的分类

通信系统没有固定的分类方法，可从不同的角度对其进行分类。例如，早期的移动电话通信系统，既可称之为模拟通信系统，又可称之为无线通信系统，还可称之为移动通信系统。

通常通信系统可从以下角度进行分类。

1. 按传输信号的性质分

- (1) 模拟通信系统；
- (2) 数字通信系统。

2. 按传输媒质的不同分

- (1) 有线通信系统；
- (2) 无线通信系统。

3. 按通信的双方是否在移动中完成通信分

- (1) 移动通信系统；
- (2) 固定通信系统。



4. 按通信设备工作波段的不同分

按通信设备工作波段的不同可分为长波通信、中波通信、短波通信和微波通信等。表 1-1 列出了无线电波段的划分及其对应的通信应用情况。

表 1-1 通信用无线电波段划分表

波 段	波长范围	频率范围	频段	主要用途
超长波	10 ~ 100 km	3 ~ 30 kHz	甚低频 (VLF)	高功率、长距离、点对点通信，如声纳、水下通信等
长 波	1 ~ 10 km	30 ~ 300 kHz	低频 (LF)	长距离点对点通信，如导航、越洋通信等
中 波	100 ~ 1 000 m	300 ~ 3 000 kHz	中频 (MF)	广播、遇险求救通信，港口船舶调度通信等
短 波	10 ~ 100 m	3 ~ 30 MHz	高频 (HF)	中远距离的各种广播与通信，如电离层反射通信等
米 波	1 ~ 10 m	30 ~ 300 MHz	甚高频 (VHF)	短距离通信、雷达、电视、交通管制及散射通信等
分米波	10 ~ 100 cm	300 ~ 3 000 MHz	特高频 (UHF)	卫星通信、微波接力通信、雷达、导航、全球定位等
厘米波	1 ~ 10 cm	3 ~ 30 GHz	超高频 (SHF)	短距离通信、波导通信、微波接力、雷达、空间通信等
毫米波	1 ~ 10 mm	30 ~ 300 GHz	极高频 (EHF)	遥感遥测、光通信等
亚毫米波	< 1 mm	> 300 GHz		

5. 按工作方式不同分

- (1) 单工通信；
- (2) 半双工通信；
- (3) 双工通信。

6. 按信号复用方式不同分

- (1) 频分多址；
- (2) 时分多址；
- (3) 码分多址；
- (4) 空分多址；



(5) 复合多址。

1.2 信息及其度量

消息是多种多样的,消息中所包含的信息量的大小也不同,但可以通过一种确定的方法将消息中所包含的信息量度量出来,而且这种度量方法具有通用性,可以用来度量任何消息。

当接收者收到消息后,若事前认为消息中所描述事件发生的可能性越小,就认为这个消息的信息量越大;反之则认为越小。例如,天气预报发布“明天降雨量将有 10 mm”,接收者不会有什么奇怪,若是天气预报发布“明天降雨量将有 1 000 mm”,接收者将会大吃一惊。显然后者带给接收者的信息量大,因为“降雨量将有 1 000 mm”几乎不可能发生,令人难以置信。由此可知,确知事情(其发生概率为“1”)带给人们的信息量为“0”,如“太阳从东边升起”;不可能的事情(其发生概率为“0”)带给人们的信息量为无穷大,如“星际旅行将会遇到什么?”会给人以无尽遐想。

综上所述,假设消息所代表的事件出现的概率为 $P(x)$,消息中所含的信息量 I 可以按如下方法定义为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.2.1)$$

式中,如果 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit),常用(b)表示;如果 $a=e$,则单位为奈特(nit);如果 $a=10$,则单位为哈特莱(hartley)。

信息量最常使用的单位是比特,它代表出现概率为 $1/2$ 的消息所包含的信息量。在数字通信系统中典型的出现概率为 $1/2$ 的消息是二进制系统,在实际应用中,常把一位二进制消息(代码“0”或“1”)的信息量称为 1 b。

如果消息是由 n 个事件构成,假设这 n 个事件发生的概率分别为 $P_1(x)$ 、 $P_2(x)$ 、 $\dots$ 、 $P_n(x)$,那么可以证明该消息包含的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(x) \log_2 P_i(x) \quad (1.2.2)$$

式(1.2.2)与统计热力学中熵的定义类似,所以,常将它称为信源的熵,单位为比特/符号(b/符号)。

1.3 信道及信道容量

1.3.1 信道的概念

通俗地讲,信道是信号传输的通路,这种通路可以有或无线的传输介质。理想信道



可以保证信号无失真的传输, 阻断信号频带以外的各种干扰。实际信道可以保证信号通过, 但又给信号以限制和损害, 造成信号的失真。

通常将仅指信号传输介质的信道称为狭义信道, 如架空明线、光导纤维等。但在通信系统的分析研究中, 为简化系统模型和突出重点, 常把信道的范围适当扩大, 除了传输介质外, 还包括系统的有关部件和电路, 如天线、混频器、放大器及调制解调器等, 我们把这种扩大了的信道称为广义信道。

1.3.2 信道的分类

狭义信道通常按具体介质的不同分为有线信道和无线信道。所谓有线信道是指传输介质为架空明线、对称电缆、同轴电缆、光缆及波导管等这类能看得见的介质。有线信道是现代通信网中最常用的信道之一, 如光缆广泛应用于干线(长途)传输, 对称电缆则常用作近程(市内电话)传输。无线信道是指传输介质为自由空间的信道。表 1-1 所列无线电波段划分即通信用无线信道的划分, 无线信道具有方便灵活的特点, 在移动通信中只能采用无线信道, 但其传输特性没有有线信道稳定可靠。

广义信道通常也可分为两种: 调制信道和编码信道。调制信道是从研究调制和解调的基本问题出发而定义的, 包括从调制器的输出端至解调器的输入端的所有环节。从调制和解调的角度来看, 从调制器的输出端至解调器的输入端的所有电路和传输介质, 仅仅是对已调信号进行了某种形式的变换, 我们只关心变换的最终结果, 而不关心这个变换的过程。因此, 在研究调制和解调的基本问题时, 采用调制信道是方便和恰当的。

在数字通信系统中, 如果仅着眼于编码和译码问题, 则可定义另一种广义信道——编码信道。编码信道是指从编码器的输出端至译码器的输入端所有环节。从编译码角度来看, 编码器输出为某一数字序列, 译码器的输入为进行了某种变换的数字序列。因此, 从编码器的输出端至译码器的输入端, 所有电路和传输介质可以用一个可以进行数字序列变换的信道加以概括, 此信道称为编码信道。

调制信道和编码信道的示意图如图 1-4 所示。另外, 根据研究对象和关心问题的不同, 也可以定义其他形式的广义信道。

1.3.3 信道的模型

通常, 为了方便地描述信道的一般特性, 有必要引入信道模型的概念。

1. 调制信道模型

调制信道的输入、输出为连续信号(模拟信号), 也可称为连续信道。通过对调制信道的大量观察后, 可得出它具有如下主要特性:

- (1) 具有一对(或多对)输入、输出端;
- (2) 绝大部分信道是线性的, 即满足叠加原理;

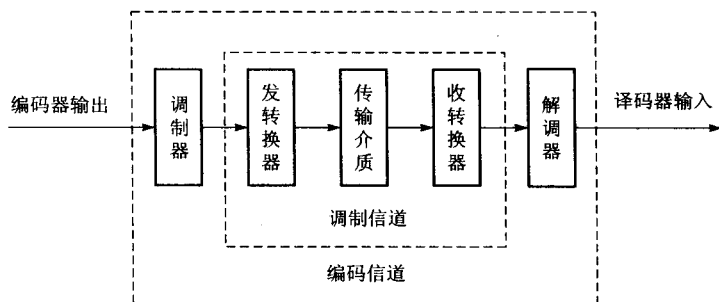


图 1-4 调制信道与编码信道

- (3) 信号通过信道会有一定的延时；
- (4) 信号通过信道会有一定的损耗（固定损耗或时变损耗）；
- (5) 没有信号输入时，信道输出端仍有噪声输出。

根据以上特性，最基本的单端输入、单端输出调制信道可以用图 1-5 所示模型来等效。该模型对于多端输入、多端输出的调制信道同样适用。

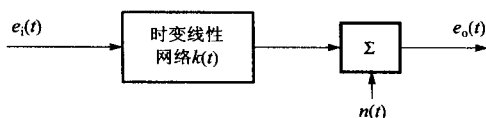


图 1-5 调制信道模型

其输入信号和输出信号之间的关系可以用下式来表示

$$e_o(t) = k(t)e_i(t) + n(t) \quad (1.3.1)$$

式 (1.3.1) 即调制信道的一般数学模型。 $k(t)$ 称为乘性因子，是一个很复杂的函数，它反映信道特性，表征信道传输特性对信号的影响，这种影响包括各种失真，如线性失真、非线性失真、传输衰减及延迟等。一般来讲，它是时间 t 的函数，因此调制信道可等效为一线性时变网络。若 $k(t)$ 随时间随机变化，则可称这种调制信道为随机参量信道，简称随参信道；若 $k(t)$ 基本上不随时间改变，或变化极小，则将这种信道称为恒定参量信道，简称恒参信道。因此，调制信道也可分为随参信道和恒参信道两大类。一般来讲，无线信道基本属于随参信道，有线信道基本属于恒参信道。

$n(t)$ 表示信道噪声，由于不管有无信号，在信道输出端总有噪声输出，因此它是以叠加的形式作用于信道，可以用一个叠加网络来表示。理想的调制信道 $k(t) = 1, n(t) = 0$ ，即信号经过该信道时既不失真，也不叠加噪声。

2. 编码信道模型

编码信道的输入、输出为数字序列，由图 1-4 可看出编码信道包含了调制信道。由于调制信道的非理想特性，数字序列在通过编码信道时会出现差错，如二进制序列中的“0”变为“1”或是“1”变为“0”。所以，可以用错误概率来描述编码信道的特性，这种错误概率常称为转移概率，用 $P(b/a)$ 来表示，其含义是：当输入为符号 a 时，输出为符号 b 的



概率。图 1-6 为常见的二进制无记忆（当前码元的差错与其前后码元的差错没有依赖关系）编码信道的模型。

转移概率完全由编码信道的特性所决定，一个特定的编码信道就会有相应确定的转移概率。应该指出，编码信道的转移概率一般需要对实际编码信道做大量的统计分析才能得到。

类似地，可以得到其他进制编码信道的模型。

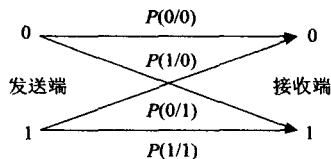


图 1-6 二进制编码信道模型

1.3.4 信道容量

在有干扰的信道中，由于信道的带宽限制和噪声的存在，信道传输信息的最大能力是有限的。信道容量是指信道传输信息的最大极限速率。根据香农（Shannon）信息论，对于连续信道，如果信道带宽为 B ，并受到加性高斯白噪声的干扰，其信道的容量 C 的理论公式为

$$C = B \log_2 (1 + S/N) \quad (1.3.2)$$

式中， N 为白噪声平均功率； S 为信号平均功率； S/N 为信噪比。虽然式（1.3.2）是在一定条件下获得的，但对一般情况也可近似使用。该式即著名的香农公式，是研究和评价通信系统原理和性能的理论基础。

根据香农公式可以得出以下重要结论：

（1）任何一个信道，都有信道容量 C 。如果信源的信息速率 R 小于或等于信道容量 C ，那么在理论上存在一种方法使信源的输出能以任意小的差错概率通过信道传输；如果 R 大于信道容量 C ，则无差错传输在理论上是不可能实现的。

（2）当信道噪声为高斯白噪声且单位频带内的噪声功率为 n_0 （W/Hz）时，噪声平均功率 $N = n_0 B$ ，若信道带宽趋于无穷大，此时的信道容量 C 将为

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \approx 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1.3.3)$$

由式（1.3.3）可知，当 S 和 n_0 一定时，信道容量随着信道带宽的增大而增大，然而当 $B \rightarrow \infty$ 时，信道容量不会趋于无穷大，而是趋于一极限值。

（3）给定的信道容量 C 可以用不同的带宽和信噪比的组合来传输。若减小带宽，则必须增大信噪比 S/N ，即增加信号功率，反之亦然。因此，当信噪比太小而不能保证通信质量时，可采用宽带系统传输，用增加带宽降低对信噪比的要求，以改善通信质量。这就是所谓的用带宽换功率的措施。应当指出，带宽和信噪比的互换不是自动完成的，必须变换信号使之具有所要求的带宽。实际上这是由各种类型的调制和编码完成的，调制和编码的过程就是实现带宽和信噪比之间的互换手段。

（4）由于信息速率 $C = I/T$ ， T 为传输时间，代入式（1.3.2）可得

$$I = TB \log_2 (1 + S/N) \quad (1.3.4)$$



可见, 当信噪比 S/N 一定时, 给定的信息量可以用不同的带宽和时间 T 的组合来传输。和带宽与信噪比互换类似, 带宽与时间也可以互换。

(5) 由式 (1.3.3) 可知, 若 $n_0 \rightarrow 0$, 则 $C \rightarrow \infty$, 这意味着无干扰信道容量为无穷大。

例 1.3.1 具有 6.5 MHz 带宽的某高斯信道, 若信道中信号功率与噪声功率之比为 7, 试求其信道容量。

解 根据香农公式

$$\begin{aligned} C &= B \log_2(1 + S/N) \\ &= 6.5 \times 10^6 \times \log_2(1 + 7) \\ &= 6.5 \times 10^6 \times 3 = 19.5 \text{ Mb/s} \end{aligned}$$

例 1.3.2 某一待传输的图片约含有 2.25×10^6 个像素。为了很好地重现图片, 需要 12 个亮度电平。假设所有这些亮度电平等概率出现, 且信道的信噪功率比为 30 dB。

(1) 试计算用 3 min 传送一张图片时所需的信道带宽;

(2) 若信道的信噪功率比变为 20 dB, 此时所需带宽为多少?

解 (1) 每个亮度出现的概率为

$$P(x_i) = 1/12, \quad i = 1, 2, \dots, 12$$

故每个像素的平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^{12} P_i(x) \log_2 P_i(x) \\ &= \log_2 12 \\ &= 3.58 \text{ b/符号} \end{aligned}$$

一幅图片的平均信息量为

$$\begin{aligned} I_{\text{图片}} &= 2.25 \times 10^6 \times 3.58 \\ &= 8.06 \times 10^6 \text{ b} \end{aligned}$$

3 min 传送一张图片的平均信息速率

$$\begin{aligned} R_b &= I/T = \frac{8.06 \times 10^6}{3 \times 60} \\ &= 4.48 \times 10^4 \text{ b/s} \end{aligned}$$

由于信道容量 $C \geq R_b$, 取 $C = R_b$, 则信道带宽

$$\begin{aligned} B &= \frac{C}{\log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)} \\ &= \frac{4.48 \times 10^4}{\log_2 1001} \\ &\approx 4.49 \times 10^3 \text{ Hz} \end{aligned}$$

(2) 若信噪比变为 20 dB, 则