

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

普通高等院校

电子信息类系列教材

TongXin YuanLi

通信原理

© 李世银 宋金玲 编著



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

普通高等院校电子信息类系列教材

通 信 原 理

李世银 宋金玲 编 著

赵培培 孙彦景 罗驱波 参 编

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目 (C I P) 数据

通信原理 / 李世银, 宋金玲编著 — 北京: 人民邮电出版社, 2009. 6

(普通高等院校电子信息类系列教材)

ISBN 978-7-115-20454-7

I. 通… II. ①李…②宋… 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 (2009) 第054122号

内 容 提 要

本书以现代通信系统为背景, 以数字通信为主要对象, 系统深入地介绍了现代通信技术的基本原理和方法。全书分为 7 章, 包括现代通信技术的基本概念、通信基础知识、数字基带传输、基本的模拟和数字调制原理方法及性能分析、现代 (多进制) 调制技术和现代通信系统等。本书注重理论联系实际, 从系统的角度出发, 突出基本概念和基本原理方法的阐述, 兼顾通信新技术的介绍和与实际通信系统的结合, 进一步突出了通信的核心内容: 调制解调本身的原理和方法。

本书可作为高等学校通信、信息、电子、计算机及自动化等电类专业本科生教材, 同时可供基础和起点较高的信息通信专业大专学生选用。本书也可作为通信工程技术人员和科研人员的参考书。

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

普通高等院校电子信息类系列教材

通 信 原 理

-
- ◆ 编 著 李世银 宋金玲
参 编 赵培培 孙彦景 罗驱波
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 12.5
字数: 306 千字 2009 年 6 月第 1 版
字数: 1-3 000 册 2009 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-20454-7/TN

定价: 24.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

人类社会进入了信息社会，信息的产生、获取、分析处理与传输十分重要。信息社会的技术支撑基础主要是电子技术、信息技术和通信技术。其中，电子技术是实现信息处理、信息传输的基础；信息技术为信息的获取、存储、处理、使用提供了理论、方法、手段；通信技术则为信息的传输、共享、交换提供技术保障。电子技术、信息技术和通信技术的发展推动了信息社会的形成，反过来后者又加速了前者的发展。因此，这三方面的技术知识成为了目前几乎所有电子、信息类科技人员和相应专业学生必须掌握的基本知识和技术。

由于开设“通信原理”课程的专业很多，不同专业学生的基础、学习目的和要求差异也很大，导致教材的选择上比较困难。目前，通信原理教材和参考书很多，一般都各有特色，但对多数院校来说，一些教材理论较深、篇幅较多。一方面，对于通信信息专业往往还有后续的数字通信技术等专业课，作为专业基础课的通信原理学时有限，讲不了如此多的内容；另一方面，特别是对于非信息类其他电专业及应用型本科学生来说，学习本课程的学时数较少，通信方面的基础知识欠缺，选择教材就更显困难。若采用这些教材，学生购买后利用率不高，往往只是学习了整本教材中的几章。而其他一些通信原理相关简明教程、概论类教材，为了使课程内容精简，往往只是限于对概念、方法、原理、结论的罗列概述，对通信原理的经典、核心理论缺乏必要的、完整的、清晰的介绍，不利于教学使用。

本书针对上述情况和问题，为适应和兼顾不同专业学生的需求，在内容上做了4个方面的调整。

第一，增加部分先修课程和相关基础知识的内容，对于这些内容以及信号分析、信道、信息论等内容采取讲清概念、物理意义和在通信原理中的作用，同时更进一步突出和强调通信原理的核心内容：传输、调制、解调及其性能特点，减轻学生学习的难度。

第二，针对数字通信的发展趋势和方向，压缩模拟信号数字传输的内容。主要考虑到A/D转换在信息采集及处理等相关课程中多有介绍，并且已经集成化，该内容更接近于信息处理，但保留和通信密切相关的抽样和编码的内容。

第三，革新现有教材中将“调制”分为“模拟调制”和“数字调制”相对立的两部分，将模拟调制和数字调制融合在一起进行介绍，以模拟调制为基础，并引出数字调制，重点介绍清楚二者之间的一致性和承接关系，增强学生对“调制”本身概念和方法的掌握和全面理解。

第四，注重和加强对通信“系统”概念和模型建立的介绍，增强学生对所学原理的理

解和掌握。

全书分为7章。其中，第1章为绪论，主要讲述通信系统的模型、性能、指标及相关的概念。第2章为通信基础，主要介绍通信理论中涉及的一些预备知识，如信号的频谱，噪声的数学模型，经典的语音编码方法PCM编码，以及通信系统中的带宽、复用和同步的概念。第3章为数字基带传输系统，主要介绍数字信号在发送端线路编码的方法，基带传输中的码间串扰及解决措施，数字基带通信系统的抗噪声性能，差错控制编码的基本原理及方法。第4章为调制解调原理，主要讲述调制解调的基本方法和原理，包括幅度调制(AM、DSB、SSB和2ASK)和角度调制(FM、2FSK和2PSK及2DPSK)的调制与解调原理，以及模拟调制与数字二进制调制之间的关系。第5章为基本调制通信系统的性能分析，包括各种解调方式的分析模型，模拟调制通信的解调器输入输出信噪化、数字调制传输系统解调器输出误码率等的分析推导计算方法。第6章为现代调制解调技术，介绍多进制调制系统MASK、MPSK、MSK及GMSK等调制技术。第7章为现代通信系统，主要介绍光纤通信、微波中继通信、卫星通信、移动通信的基本构成，着重于前面讲述的内容在现代通信中的应用。

本书大纲由李世银和宋金玲讨论制订。李世银编写第1、4、5章，并参与第3章后半部分内容编写；宋金玲编写第2、6章，并参与第3章前半部分内容编写；赵培培编写了第3章的主要内容；孙彦景编写了第7章；课后习题由罗驱波整理编写。李世银对全书初稿作了修改和定稿。

限于编者的水平，书中不妥和错误之处在所难免，敬请广大读者和同行批评指正。

编 者
2009.4

目 录

第1章 绪论	1	2.6 语音信号数字化	32
1.1 通信概念	1	2.6.1 抽样定理	33
1.2 通信系统组成	2	2.6.2 量化	35
1.2.1 通信系统的基本组成要素	2	2.6.3 编码	39
1.2.2 模拟通信系统与数字通信系统	3	2.6.4 自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM)	41
1.3 信息及其度量	5	2.6.5 增量调制(DM或 ΔM)	42
1.4 通信系统的性能指标	7	2.6.6 时分复用和复接	43
1.4.1 模拟通信系统指标	7	2.7 信号和系统的带宽	47
1.4.2 数字通信系统指标	7	思考与练习	48
思考与练习	8	第3章 数字基带传输系统	52
第2章 通信基础	10	3.1 数字基带信号时域特性	52
2.1 确知信号和随机信号	10	3.1.1 数字基带信号的概念	52
2.2 确知信号的分类	10	3.1.2 数字基带信号的码型设计 原则	53
2.2.1 周期信号和非周期信号	10	3.1.3 数字基带信号的常用码型	54
2.2.2 能量信号和功率信号	10	3.2 数字基带信号的频谱	59
2.3 确知信号的频谱函数	11	3.3 数字基带传输基本模型	62
2.3.1 周期信号的频谱函数	12	3.4 无码间干扰的基带传输特性	64
2.3.2 非周期确定信号的频谱函数	12	3.4.1 奈奎斯特第一准则	64
2.3.3 典型信号的傅里叶变换	13	3.4.2 理想低通特性	66
2.4 随机过程	15	3.4.3 升余弦滚降特性	68
2.4.1 随机变量及数学特征	16	3.5 部分响应系统	70
2.4.2 随机过程及数学特征	17	3.5.1 部分响应波形	70
2.4.3 随机信号的频谱	19	3.5.2 部分响应系统的实现	72
2.4.4 平稳随机过程	20	3.5.3 部分响应波形的推广	72
2.4.5 高斯随机过程	23	3.6 无码间干扰基带系统的抗噪声 性能	73
2.4.6 平稳随机过程通过线性系统	24	3.7 眼图	76
2.5 信道及噪声模型	26	3.8 基带传输中的时域均衡	77
2.5.1 信道及噪声的概念	26	3.9 差错控制编码	80
2.5.2 白噪声(AWGN)	27	3.9.1 差错控制编码基础	80
2.5.3 带限高斯白噪声	28	3.9.2 差错控制编码的基本原理	82
2.5.4 窄带高斯白噪声	28	3.9.3 编码效率	83
2.5.5 正弦波加零均值窄带高斯白 噪声	29		
2.5.6 信道容量	31		

3.9.4 常用的几种简单差错控制编码	83	6.2.5 交错 (偏移) QPSK (OQPSK)	146
思考与练习	86	6.2.6 八进制移相键控 (8PSK)	146
第4章 调制解调原理	90	6.3 多进制频率调制	147
4.1 概述	90	6.3.1 最小频移键控 MSK	147
4.2 幅度调制	92	6.3.2 高斯 MSK (GMSK)	153
4.2.1 模拟幅度调制	93	6.4 多进制正交振幅调制 (MQAM)	155
4.2.2 二进制数字振幅键控 (2ASK)	97	6.4.1 MQAM 基本原理	155
4.3 频率与相位调制	99	6.4.2 MQAM 的调制和解调	157
4.3.1 模拟角度调制 (FM)	99	6.4.3 MQAM 与 MPSK 的性能比较	158
4.3.2 二进制数字频移键控 (2FSK)	101	6.5 正交频分复用 (OFDM)	159
4.3.3 二进制数字相移键控 (2PSK 及 2DPSK)	103	6.5.1 OFDM 基本原理	160
4.4 频分复用原理	106	6.5.2 OFDM 实现方法	165
思考与练习	107	思考与练习	167
第5章 调制传输系统性能分析	109	第7章 现代通信系统	169
5.1 幅度调制抗噪声性能分析	109	7.1 微波通信系统	169
5.1.1 通信系统抗噪声性能的分析模型	109	7.1.1 基本概念	169
5.1.2 相干解调的抗噪声性能	110	7.1.2 微波中继通信系统组成	170
5.1.3 常规调幅包络检波的抗噪声性能	112	7.1.3 微波调制/解调技术	171
5.1.4 二进制数字振幅键控 (2ASK) 性能分析	115	7.2 卫星通信系统	171
5.2 频率与相位调制性能分析	119	7.2.1 卫星通信系统的组成	172
5.2.1 FM 性能分析	119	7.2.2 卫星通信线路的组成	172
5.2.2 二进制移频键控系统性能分析	124	7.2.3 卫星移动通信系统对调制方式的要求	173
5.2.3 二进制移相键控性能分析	126	7.3 光纤通信	174
5.3 性能比较	130	7.3.1 光纤通信	174
5.3.1 模拟调制性能	130	7.3.2 光纤通信的基本构成与调制方式	174
5.3.2 数字调制性能	131	7.3.3 光纤通信中的几种重要技术	176
思考与练习	133	7.4 移动通信系统	180
第6章 现代调制解调技术	136	7.4.1 GSM 数字移动通信系统	180
6.1 多进制数字振幅调制 (MASK)	137	7.4.2 3G 移动通信技术	181
6.2 多进制相位调制 (MPSK)	138	7.4.3 4G 移动通信系统	185
6.2.1 MPSK 信号的表达式	138	7.5 无线接入技术	191
6.2.2 MPSK 信号的矢量图	139	7.5.1 WiMAX	191
6.2.3 四相绝对移相键控 QPSK (4PSK)	139	7.5.2 Wi-Fi	191
6.2.4 四相差分移相键控 (4DPSK)	144	7.5.3 WiMAX 与 3G	192
		思考与练习	193
		参考文献	194

信息社会的支撑基础是电路电子技术、信息技术和通信技术。其中,电路电子技术为信息社会提供了基石,是实现信息处理、信息传输的基础;信息技术为信息的获取、存储、处理、使用提供了理论、方法、手段;通信技术则为信息的传输、共享、交换提供技术和理论保障。电子技术、信息技术和通信技术的发展推动了信息社会的形成;与此同时,信息社会的形成加速了这三方面技术的发展。因此,这三方面的技术知识成为了目前所有电子信息类专业必修课程的核心内容和相关专业学生必须掌握的基本知识和技术。

本书主要讨论信息传输、交换的基本原理、方法和技术,侧重于信息的传输理论,即通信的调制与解调原理。

1.1 通信概念

从时间上来讲,通信伴随着信息而产生,是一个非常古老的概念。从范围上来讲,除了我们通常熟悉的书信往来、烽火狼烟、电话交流、E-mail、QQ、BBS 等外,我们的考古、古生物研究等其实也是一种信息的获取与传递,甚至于眉目传情、鸟语花香、诗词歌赋无一不和通信(信息的传递与交换)休戚相关。从重要性来讲,通信不仅是现代信息社会的基本支撑条件之一,也深刻影响着人类社会的整个历程。众所周知的拿破仑滑铁卢战役,如果当时有现在先进的通信指挥手段,滑铁卢战役将可能会是另外一种结局。同样人与人之间之所以会有误会,历史上国与国之间的一些矛盾冲突往往也是由于沟通不畅所致。马克思指出“劳动是人的第一需要”,我们同样可以说通信是人的基本需要,是人类社会形成发展的基础之一。试想如果人与人之间没有通信交流,何以能形成社会?社会又何以能发展进步?

那么,通信是什么呢?

广义上讲,通信就是克服时间、空间、距离以及干扰等障碍,进行信息的可靠、快速的传输与交换。简单地说,通信的实质就是进行信息的传输、交换和共享。

通信技术理论的发展经历了最原始的面对面实时的语言、手势、表情等的通信方式;以绳子打结记事、各种符号、图案记事以及后来的文字书信等克服时间和距离的通信;印刷术的发明则使信息的传递及通信的范围得到巨大的扩展,从点到点的通信向发散的广播式通信发展;而随着电的发现以及电气、电子技术的发展,通信技术也进一步经历了电报、电话、电视、网络通信等发展阶段,进入到电信时代的现代通信。

本书主要讨论现代通信技术原理，即通过电/电磁波的形式进行信息的传输和交换的原理、方法与技术，通常称之为现代通信、电气通信，简称为“通信”，实际就是狭义的通信。

1.2 通信系统组成

1.2.1 通信系统的基本组成要素

传输和交换信息所需的一切技术设备和传输介质的总和称为通信系统。

现代通信手段和种类繁多，形式各异，但是，无论何种通信系统，其目的都是要完成从一点（或多点）到另一点（或多点）的信息的传递和交换。因此，在一次有效的通信中，必然包含 3 个最基本的参与者：通信的双方，即信息的发送者（信源）和信息的接收者（信宿），以及传递信息的通道（信道）。缺了信源是无源之水，少了信宿是对牛弹琴，没有信道就只能成为没有了鹊桥的牛郎织女。因此，一个通信系统总是包含 3 个必须的基本要素：信源、信宿和信道。

同时，在任何一个实际通信中，总是不可避免地客观存在着各种影响、阻碍通信准确、快速进行的干扰，这些干扰包括来自于大自然的风雪雨雾雷电，包括人为有意无意的破坏，包括通信系统本身的技术设备存在的缺陷，包括实现通信的设备内部产生的噪声等。这些林林总总阻碍通信完成的各种干扰，我们将其折合汇总在一起，成为一个通信中不受欢迎而又必然存在的因素：噪声源。

因此，一个通信系统的基本组成可以用如图 1-1 所示的模型来概括。

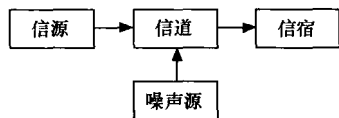


图 1-1 基本通信系统模型

1. 信源（信息源）

信源（信息源）是发出待传送信息的主体，即信息的产生者或信息的来源。在现代通信中，信源就是一个转换装置，即将各种待传输的对象消息（如符号、文字、语音、图像等）转换成待进行处理或传输的（原始）电信号（光信号）的装备或器件。这是一个比较宽泛的概念，有时将摄像头输出的未经处理的信号作为原始电信号，则这里的摄像头就是信源；而有时，我们则把整个经过摄像机本身处理以后输出的信号作为待传的原始电信号，那么此时整个摄像机就是信源，而非摄像头。有的信源很简单，如话筒（受话器）只是简单地将语音信号直接转换为原始电信号；有的信源非常复杂，要完成大量复杂的处理，如作为网络节点的一台计算机。

信源产生的原始电信号通常含有丰富的低频分量，这种信号常称为基带信号。

根据信源输出信号的性质不同，可以将信源分为模拟（连续）信源和数字（离散）信源。模拟信源（如话筒、摄像机等）输出幅度连续的信号；离散信源（如电机、计算机）输出离散的符号序列。模拟信源也可以通过抽样和量化变换为离散信源。

2. 信宿（收信者）

信息的接收者，将接收到的信息恢复为原始消息的设备或器件称为信宿。

3. 信道

信道是指信号传输的通道和信息存储的介质。根据研究对象和目的不同，信道可以只是

信号传输的介质，也可以包含其中的一些变换设备，前者称为狭义信道，包含了变换装置设备和传输介质的信道则称为广义信道。就狭义信道（传输介质）而言，可以是有线的（包括电缆、光纤等），也可以是无线的（自由空间）。

4. 噪声源

噪声源是信道中以及分散在通信系统各处的噪声的集中表示。噪声在通信中是普遍存在的，不可避免的。噪声的来源千差万别，影响各异，其大小和特性与通信系统本身设备的性能和所选信道的特性等有关。在设计良好的情况下，一般对通信影响最大、最普遍的是无数随机分散的小干扰噪声，其合在一起我们称之为随机噪声或起伏噪声。通信理论主要研究内容之一就是如何在选定的信道基础上，克服、减少噪声的影响，实现快速、可靠的信息传输。

在选定传输介质之后，一个通信系统所受干扰的特性一般也就确定了。为了适应所选传输介质的固有特性和克服干扰的影响，实现快速、可靠地信息传输，通常要对原始的电信号进行必要地处理和变换，以将传输的信号特性和传输介质及干扰特性匹配起来。变换方式是多种多样的，最常用的有调制解调（即频谱搬移）、编解码、复用等。通常将完成各种变换的设备统称为发送、接收设备。一个实际的通信系统可以用如图 1-2 所示的一般模型表示。

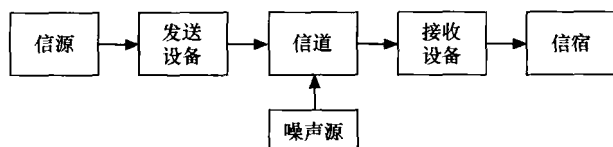


图 1-2 通信系统一般模型

根据不同的环境、不同的需要和不同的标准，通信系统又分为各种具体的类别。比如，根据消息的物理特征可分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、计算机网络、图像通信系统等；按传输介质可分为有线传输系统和无线传输系统；按传输信号的复用方式可分为频分复用（FDM，通过调制完成频率搬移，使各信号占用不同频带范围）、时分复用（TDM，通过抽样和脉冲调制方法，使各信号占据不同时间隙）、码分复用（CDM，用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号）等；根据是否对基带信号进行调制，可分为基带传输系统和调制（频带）传输系统。而最常用的分类方式为按传输信号的特征，将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1.2.2 模拟通信系统与数字通信系统

一般地，根据发送、接收设备不同及在信道中传输的是数字信号还是模拟信号，将通信系统划分为模拟通信系统和数字通信系统，这也是通信原理中最常用的一种分类方式。

对于模拟通信系统，其发送设备和接收设备主要完成两个变换：发送设备将信源输出的原始模拟信号/基带信号变换成其频谱特性适合于信道传输的新信号，并在接收端通过反变换将接收到的信号恢复为原始信号。

通常将这种变换称为调制，接收端的反变换称为解调；完成调制的装置称为调制器，完成解调的装置称为解调器；被变换的原始信号称为调制信号；调制器变换输出的信号称为已

调信号，它一般有两个基本特性：一是携带了原始信号的信息，二是便于在所选信道中传输。因此，可以得到模拟通信系统的一般模型，如图 1-3 所示。

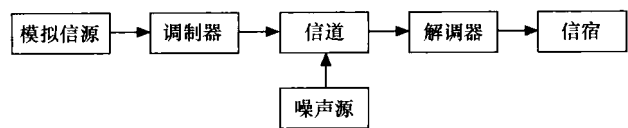


图 1-3 模拟通信系统的一般模型

对于一个点对点的数字通信系统来说，发送设备常常可分为信源编码、信道编码以及调制器等三部分，如图 1-4 所示。

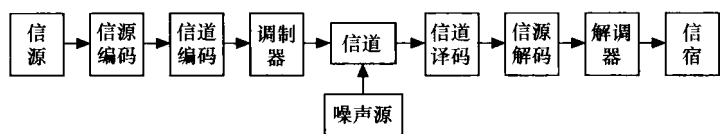


图 1-4 数字通信系统组成

信源编码将连续信号变换为数字信号；而信道编码则使数字信号与传输信道匹配，提高传输的可靠性和有效性。信道编码包括码型、波形选择变换、纠错编码、加密编码等。此外，作为一个完整的数字通信系统，往往还需要同步环节，以保持收发双方步调一致以完成复用和解复用等操作。但是，由于同步环节的位置并不固定，因此在图中未进行标示。

一个实际的数字通信系统并非必须要包含以上所有环节，比如当信源输出为数字信号时，信源编码就不需要了；或者可以没有信道编码或调制解调等。如果不进行调制而直接传输数字基带信号，就成为数字基带传输系统，如图 1-5 所示。

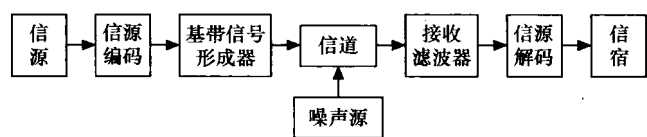


图 1-5 数字基带传输系统组成

基带信号形成器相当于前面的信道编码器。

近几十年以来，随着现代通信技术、计算机技术、网络技术、数字信号处理技术等迅速发展，数字通信已经成为了主要的通信方式，相对于模拟通信体现出了愈来愈明显的优势：

- (1) 信号容易再生，抗干扰能力强；
- (2) 便于进行各种数字信号处理；
- (3) 器件易于集成化；
- (4) 便于进行多路复用；
- (5) 利于实现各种业务的综合传输。

因此，通信的发展总体趋势为从模拟通信向数字通信发展。当然，数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的频带而交换得来的。以电话为例，一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽，但一路数字电话却要占据 20~60kHz 的带宽。

1.3 信息及其度量

通信的目的是传输和交换信息。但是,信息本身是一个非常抽象的概念,它必须以某种具体的形式、载体表现,或者说总是包含在一定的消息载体当中,比如语言、文字、图形图像、光/电信号等。因此,通信必须且只能通过传输这些具体的消息来传递信息。这里所说的信息就是指消息中所包含的对接受者有意义(价值)的内容。

我们知道日常生活中所遇到的消息是千变万化,多种多样的。不同消息对于我们每个人有不同的意义,即其所含信息多少是各不相同的。一些必然(肯定要发生的)事件的消息,对于受信者来说可以说是无关紧要的。而一些看来不可能发生事件的消息,我们则感到震惊,对我们的意义简直太大、太意外了,显然其所含的信息就多。同时,同一个事件或者信息又可以用不同的载体来传递,比如下雨这一事件,既可以用文字“下雨”描述,也可以用一幅图画表示,还可以用一段视频展现,或者用声音告诉你,虽然形式各异,但是其包含的信息内容是基本一样的。

为了衡量通信系统的传输能力,需要对被传输的信息进行定量的度量和测定,通常采用“信息量”来表示。

那么如何来度量一个消息中所含的信息量呢?

根据经验和直觉我们知道一个消息中包含的信息量随消息概率的增大而减小。例如,有则新闻“某某18岁考上了大学”,人们不以为奇,很正常;而“某某8岁考上了清华大学”,大家会觉得了不起,天才啊;对于“某某6岁考上了哈佛大学”,我们就只能惊叹不已了!“因为稀有,所以惊叹”,发生可能性越小的事发生了,带给我们的信息和冲击也就越大。

同样,我们还知道一般情况下当消息的持续时间越长,其信息量也越大。所谓“博学多才”,“学富五车,才高八斗”,因为读万卷书、行万里路,接收到的消息很多,所以获得的知识信息很丰富。一般地,若干独立消息之和的信息量应该是各消息所含信息量之和,即信息量具有可加性。

正是基于以上考虑,哈特莱首先提出采用消息 x_i 出现概率 $P(x_i)$ 的倒数的对数值来度量离散消息的信息量,即

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

根据 a 的不同,信息量取值有3种单位:即 $a=2$ 时,单位为比特(bit); $a=e$ 时,单位为奈特(nit); $a=10$ 时,单位为哈特莱。目前使用最广泛的信息量单位是比特(bit)。

例如,对于二进制数字信号,假设其“1”和“0”独立出现且概率相等,出现概率都为 $1/2$ 。则此时每一个二进制符号(“1”或“0”)的信息量都为

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

因此,1bit就是指传输一个独立等概的二进制符号所包含的信息量。而对于多进制数字信号(“ M ”进制),假设其每一个符号的出现独立且等概率,即出现概率都为 $1/M$,则收到或传输一个独立等概的 M 进制符号所包含的信息量为

$$I = \log_a \frac{1}{P} = \log_a M = \log_2 M \text{ (bit)} \quad (1-3)$$

若干个 (N 个) 相互独立事件所构成的消息, 所含的信息量等于 N 个独立事件信息量的总和, 即

$$I = \sum_{i=1}^N I(x_i) \quad (1-4)$$

当消息很长时, 用每个符号的出现概率来计算消息的信息量是比较麻烦的, 此时可采用平均信息量的概念来计算, 即用每个符号所含信息量的统计平均值 (信息源的熵) 来计算

$$H(X) = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1-5)$$

可以证明, 对于 M 进制数字系统, 当每一符号的出现相互独立且等概时, 其总信息量和平均信息量值最大。

相应地, 对于连续消息的信息量, 则常用概率密度函数描述, 即

$$H_f(X) = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_a f(x) dx \quad (1-6)$$

其中, $f(x)$ 为概率密度函数。

【例 1-1】 设一信息源由 4 个符号 0、1、2、3 组成, 它们出现的概率为 3/8、1/4、1/4、1/8, 且每个符号独立出现。试求某个消息 “20002013021301120321010 0321010032101002 3102002010312032100120210” 的总信息量和每个符号的平均信息量。

分析: 有两种方法, 一是先计算每一个符号的信息量, 然后相加得到总信息量; 二是用熵的概念来计算。

解:

方法 1

这里, $P(0)=3/8$, “0” 出现 23 次; $P(1)=1/4$, “1” 出现 14 次; $P(2)=1/4$, “2” 出现 13 次; $P(3)=1/8$, “3” 出现 7 次。

则各符号的总信息量

$$\begin{cases} I_0 = -23 \cdot \log_2 P(0) = 23 \log_2 \left(\frac{8}{3} \right) \approx 33 \text{bit} \\ I_1 = -14 \cdot \log_2 P(1) = 14 \log_2 4 = 28 \text{bit} \\ I_2 = -13 \cdot \log_2 P(2) = 13 \log_2 4 = 26 \text{bit} \\ I_3 = -7 \cdot \log_2 P(3) = 7 \log_2 8 = 21 \text{bit} \end{cases}$$

消息的总信息量

$$I = \sum I_i = I_0 + I_1 + I_2 + I_3 = 108 \text{bit}$$

平均信息量

$$\bar{I} = I / \text{符号数} = 108 / 57 \approx 1.89 \text{bit / 符号}$$

方法 2

信息源的熵 (平均信息量)

$$\begin{aligned} H(X) &= -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\ &\approx 1.906 \text{bit / 符号} \end{aligned}$$

消息总信息量

$$I = 57 \times H(X) = 57 \times 1.906 \approx 108.64 \text{ bit}$$

两种方法所计算的结果略有差异，这是由于前一种采用算术平均计算，后一种则采用统计平均计算，在符号量不大时两种结果存在差异。但是这种差异将随着收到的符号数增加而减小。

1.4 通信系统的性能指标

性能指标也称质量指标，它们是对整个系统综合提出和规定的，用以衡量系统的质量优劣。

通信系统的性能指标涉及通信的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性及维护使用等。但是就信息的传输来说，通信的有效性和可靠性是最重要的指标。

有效性是指传输一定的信息量所消耗的信道资源（带宽或时间），即消息传输的“速度”；通常可以根据发送端所采用的信号表示方式、调制技术等确定。

可靠性是指通信系统克服噪声影响准确传输信息的能力，即消息传输的“质量”，一般由通信系统接收端所采用的接收技术手段及其抑制噪声、提取信号的能力来衡量，也称为抗噪声性能。

有效性和可靠性这两项指标体现了对通信系统最基本的要求，同时由于干扰的存在，二者通常又是相互矛盾的，因此只能根据及技术发展水平尽可能取得适当的统一。

1.4.1 模拟通信系统指标

1. 有效性

模拟通信系统的有效性用有效传输带宽来度量。

同样的消息采用不同的调制方式，需要的频带宽度不同。频带宽度越窄，则有效性越好。如传输一路 4kHz 带宽的模拟电话信号，单边带信号只需要 4kHz 带宽，而常规调幅或双边带信号则需要 8kHz 带宽。显然，单边带系统的有效性比常规调幅系统要好。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性用接收端最终的输出信噪比来度量。信噪比越大，通信质量越高。信噪比是指信号平均功率和噪声平均功率之比。

不同调制方式在同样信道条件下所得到的输出信噪比是不同的。例如调频信号的抗干扰性能比调幅信号好，但调频信号所需的传输带宽却宽于调幅信号。

1.4.2 数字通信系统指标

数字通信系统的有效性用传输速率（传码率或传信率）来衡量，可靠性用差错率（误码率或误信率）来衡量。

1. 传输速率

数字信号由码元组成，码元携带有一定的信息量。

定义单位时间传输的码元数为码元速率 R_s (简称“传码率”), 单位为码元/s (又称波特——baud), 所以码元速率也称为“波特率”。

定义单位时间传输的信息量为信息速率 R_b (简称“传信率”), 单位为 bit/s, 所以信息速率又称“比特率”。

一个 M 进制码元的信息量为 $\log_2 M$ bit, 所以码元速率 R_s 和信息速率 R_b 之间的关系为

$$R_b = R_s \log_2 M \quad (\text{bit/s}) \quad (1-7)$$

设每秒钟传送 2400 个码元, 则当采用二进制时, 信息速率为 2400bit/s; 若采用四进制, 信息速率为 4800bit/s。

二进制的码元速率和信息速率在数量上相等, 有时简称它们为“数码率”。

传输数字信号所需的带宽 B 一般取决于码元速率 R_s , 而码元速率和信息速率 R_b 有着确定的关系。为了比较不同的系统的传输效率, 定义频带利用率为

$$\eta_b = R_b / B \quad (1-8)$$

其物理意义为单位频带能传输的信息速率, 单位为 bit/(s · Hz)。

2. 差错率

差错率通常有两种衡量方式。

定义误比特率

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-9)$$

定义误码元率

$$P_s = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-10)$$

通常将误比特率称为“误信率”, 将误码元率称为“误码率”。一般情况, 二者在数值上是相等的。

在二进制码中, 有 $P_b = P_s$, 此时误信率和误码率相同。

差错率越小, 通信的可靠性越高。对 P_b 的要求与所传输的信号有关, 如传输数字电话信号时, 要求 P_b 在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$, 而传输计算机数据时, 则要求 $P_b < 10^{-9}$ 。当信道不能满足要求时, 必须增加纠错措施。

思考与练习

- 1-1 通信的含义是什么?
- 1-2 消息、信息、信号有何区别和联系?
- 1-3 一个最简单的通信系统包括哪几部分? 请画出其方框模型。
- 1-4 模拟通信、数字通信分别有哪些特点?
- 1-5 通信系统如何分类?
- 1-6 通信系统的主要性能指标是什么?
- 1-7 信息量和信源熵如何计算?

1-8 如何衡量模拟通信系统的有效性和可靠性?

1-9 为什么不用信号带宽而用频带利用率衡量数字通信系统的有效性?

1-10 码元速率和信息速率有何区别和联系?

1-11 误码率和误信率之间有何关系?

1-12 设英文字母 c、e、o、x 出现的概率分别为 0.023、0.105、0.001、0.002, 试分别求它们的信息量。

1-13 已知二进制离散信源(0,1):

(1) 若“0”出现的概率为 0.9, 求“0”、“1”所包含的信息量以及平均信息量;

(2) 若“0”、“1”等概出现, 求“0”、“1”所包含的信息量以及平均信息量。

1-14 某信息源由 0, 1 两个符号组成, 它们出现的概率分别为 1/4 和 3/4, 且两个符号的出现是独立的, 求消息 10110101111010110111 的信息量和熵。

1-15 某离散信息源输出 $x_1, x_2, \dots, x_8$ 8 个不同的符号, 符号速率为 1800baud, 其中 3 个符号出现的概率为 $P(x_1)=P(x_2)=1/16$, $P(x_3)=1/4$, 其余符号等概出现。

(1) 计算该信息源的平均信息速率;

(2) 计算传送符号 1 小时可能达到的最大信息量。

1-16 某系统采用脉冲组方式传送信息。每个脉冲组包含 4 个信息脉冲和 1 个休止脉冲。每个信息脉冲和休止脉冲的宽度均为 1ms, 且 4 个信息脉冲等概出现, 试求码元速率和平均信息速率。

1-17 我国黑白电视系统的帧频为 25Hz, 每帧图像在屏幕上显示的有效(经折算)行数为 437 行, 屏幕宽高比为 4:3。假设图像的相邻像素间相互独立, 每一像素的亮度可划分为 10 级, 各级亮度出现概率相等, 试求该电视图像的平均信息速率。

1-18 某消息以二进制码方式传输, 信息速率为 2Mbit/s:

(1) 若在接收机输出端平均每小时出现 72bit 差错, 求误比特率;

(2) 若已知信道的误比特率 $P_b=5 \times 10^{-9}$, 试求平均相隔多长时间就会出现 1bit 差错。

1-19 在强干扰环境下, 某电台在 5min 内共收到正确信息量为 355Mbit, 假定系统信息速率为 1200kbit/s,

(1) 试问系统误信率 P_b 是多少?

(2) 若假定信号为四进制信号, 系统码元传输速率为 1200kbaud, 则 P_b 是多少?

1-20 已知某四进制数字信号传输系统的信息速率为 2400bit/s, 接收端共收到 216 个错误码元, 计算该系统 P_e 的值。

1-21 设一数字传输系统传送二进制码元的速率为 2000baud, 试求该系统的信息速率; 若该系统改为传送 16 进制信号码元, 码元速率为 1000baud, 则这时的系统信息速率为多少?

由第 1 章可知, 模拟通信系统和数字通信系统对性能评估的方法是不同的。模拟系统中的波形是连续的, 因此可以认为有无穷多个波形, 接收机要处理无穷多个波形。衡量模拟通信系统的性能指标主要有保真度标准, 如信噪比、百分比失真和收发波形之间的期望均方误差值等; 数字通信系统发送的是代表数字的信号(符号), 这些数字组成符号集, 对于接收机来说这些符号集是先验已知的, 衡量其性能指标主要是差错率和差错概率。在实际通信系统中, 发送信号、噪声及接收信号通常是一种随机对象, 模拟与数字通信系统的性能分析必须以对这些随机对象进行数学分析为前提。与模拟通信系统相比, 数字通信系统具有更好的抗失真和抗干扰能力, 因此数字通信系统得到更广泛的应用。对于一些模拟信源, 首先必须进行信源的数字化, 模拟信号的数字化也是本章的主要内容之一。

2.1 确知信号和随机信号

确知信号指的是信号的电压或电流幅值在任意时间的值都是确定的, 确知信号的时域波形可以用明确的数学表达式来表达, 如某一电压信号 $u(t) = 10 \sin 6t$; 随机信号指的是在信号实际发生之前, 它的值是不确定的, 这种信号的时域波形不能用确定性的数学表达式来表达, 只能采用一定的数学手段如概率分布函数、概率密度函数、数学期望、方差或自相关函数等来间接描述, 这种随机过程的数学模型, 对通信系统中的信号和噪声的分析是非常有用的。

2.2 确知信号的分类

2.2.1 周期信号和非周期信号

对于信号 $f(t)$, 若存在某一最小值 T , 满足式 (2-1), 即

$$f(t) = f(t - T) \quad -\infty < t < +\infty \quad (2-1)$$

则称该函数为周期函数, 满足条件的最小 T 值称为信号 $f(t)$ 的周期, 如果满足式 (2-1) 的 T 值不存在, 则称为非周期函数。

2.2.2 能量信号和功率信号

在通信系统中, 电信号的功率用归一化的功率值来表示。所谓归一化的功率值, 是指假