



普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

通信原理与实验教程

孙爱晶 主 编
张明远 和 煦 副主编



 中国工信出版集团

 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

通信原理与实验教程

孙爱晶 主 编

张明远 和 煦 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书围绕通信原理中的主要知识点,以基本理论知识为基础,从设计性、综合性、验证性实验的角度,分别在 SystemView 仿真平台、MATLAB 仿真平台和硬件平台上设计开发了相应的实验内容。全书共分为 4 章,内容包括通信原理基础理论、基于 SystemView 的通信系统仿真实验开发、基于 MATLAB 的通信系统仿真实验开发、基于硬件平台的通信系统验证实验开发,并附有适量的习题。

本书语言通俗易懂,叙述深入浅出,层次分明,适用面宽,可作为高等院校通信工程、电子信息工程、物联网工程、电子信息科学与技术、计算机科学与技术等专业的必修课或选修课教材,也可作为这些专业“卓越工程师教育培养计划”的选用教材,同时也适用于相关领域工程技术人员作为技术参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理与实验教程 / 孙爱晶主编. —北京: 电子工业出版社, 2015.8

ISBN 978-7-121-26271-5

I. ①通… II. ①孙… III. ①通信原理—高等学校—教材 ②通信原理—实验—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 125051 号

策划编辑: 赵玉山

责任编辑: 王凌燕

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 22.25 字数: 570 千字

版 次: 2015 年 8 月第 1 版

印 次: 2015 年 8 月第 1 次印刷

印 数: 3000 册 定价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

“通信原理”课程作为学习通信系统基础理论的主要课程，不仅仅是通信工程专业的核心专业基础课，也是许多电子信息类其他专业的必修课程，“通信原理实验”是这门课程的实践教学环节。在国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）中，明确提出了高等教育应加强实践教学环节，以及教育部实施的“卓越工程师教育培养计划”，都反映了现代高等教育越来越重视学生的实践能力培养。在“通信原理”课程教学中，如何通过实践环节，既能加强学生对基础知识的学习和掌握，同时又能激发学生的学习兴趣、提升实践能力、培养创新意识，一直以来都是我们长期从事“通信原理”课程教学的教师需要探索的问题。

我们自1990年开设“通信原理实验”课程，历经几代教师团队的开发，结合多种新技术平台，不断推陈出新，相关成果多次获得省级教学成果奖。本书凝聚了我们多年从事“通信原理实验”课程教学的经验与实践，针对电子信息类及其他相关专业的培养要求，对教材内容进行了认真梳理、选择和编排，期望使读者能通过本书对通信系统的本质和主要技术原理有更深入的认识。

本书的主要特点是以通信原理中主要知识点为线索，同一个知识点在介绍其基本原理的基础上，从验证性、设计性、综合性实验的角度，分别在硬件平台、SystemView 仿真平台、MATLAB 仿真平台上设计了相应的实验内容，譬如通信原理中的主要知识点：模拟调制（AM、DSB、SSB、FM）、数字调制（ASK、FSK、PSK、DPSK）、各类信号的编译码（AMI、HDB₃、PCM、汉明码）等，从基本原理开始介绍，然后在不同软、硬件实验平台上进行验证性和设计性实验，逐步帮助读者从不同的层面学习相关知识点，同时体会不同平台的特点，更好地掌握通信原理的理论知识和使用开发平台。本书的另外一个特点是对通信原理中的一些知识点进行了重新梳理，譬如按照通信系统的实际运行状况，在基本原理介绍和实验内容安排中，将数字信号的位同步提取部分与数字基带信号的编译码结合在一起考虑等。

全书共分为4章，参考学时为48~64学时。

第1章通信原理基础理论，介绍了通信系统的基本模型，确知信号和随机信号的时频域分析，信道和噪声的基本概念和特性，从时、频域的角度阐述了各种模拟调制的原理和调制解调方法，频分复用的基本概念，阐述了几种常用传输码型和汉明码的编/译码规则及数字基带信号的传输原理和眼图的概念，介绍了二进制的ASK、FSK及PSK（DPSK）的原理，四进制及16QAM的调制解调原理，以模拟信号数字化过程为线索，阐述了对信号的抽样、量化和编码，分析了时分复用的基本原理，介绍了PCM30/32系统的基群帧结构。

第2章基于SystemView的通信系统仿真实验开发，首先介绍了SystemView通信系统仿真平台，阐述了在此平台上开发的相关实验：恒参信道特性对信号传输的影响、随参信道的多径传播效应、各种模拟调制系统及频分多路复用、采样定理、量化与编译码、增量调制（DM）、时分多路复用、常见的数字基带信号及其功率谱密度、数字基带信号的传输、各种数字带通传输系统。

第3章基于MATLAB的通信系统仿真实验开发，首先简介了MATLAB仿真平台，阐述了在此平台上开发的相关实验：确知信号与随机信号分析、模拟线性调制系统、模拟非线性调制系统、数字基带信号及其频谱特性、数字基带传输常用码型、蒙特卡洛仿真、各种数字

频带通信系统、抽样定理、量化、PCM 编译码、分组码与线性分组码、循环码及综合性的通信系统综合仿真实验。

第 4 章基于硬件平台的通信系统验证实验开发，首先简介了 ZH7001 型通信系统硬件实验平台的基本情况，阐述了在此平台上开发的相关实验：模拟信号的采样与恢复、PCM 编译码系统、PCM 基群帧结构与帧同步、信道编码与译码、AMI 编译码及位定时提取、HDB₃ 编译码及位定时提取、(7,4)汉明编译码系统、各种数字带通传输系统及综合性的基于电话业务的语音通信系统实现。

本书系统性强，内容编排紧凑，每节内容安排了相应的习题，对通信原理中的基本概念和原理均设计了相关实验内容。本书语言简练、通俗易懂、深入浅出，适用对象广泛，可作为高等学校通信工程、电子信息工程、物联网工程、电子信息科学与技术、计算机科学与技术等专业的通信原理实验教材，也可作为这些专业“卓越工程师教育培养计划”的选用教材，同时也适用于相关领域工程技术人员作为技术参考书。

本书由孙爱晶担任主编并编写第 1 章，张明远编写第 2 章和第 4 章，和煦编写第 3 章，全书由孙爱晶统稿。与作者多年共同从事本课程教学的刘毓教授、吉利萍老师和党薇老师对本书出版给予了很大的支持，在此深表感谢。感谢李宗、焦淑云、黄源、顾小东、冯勋、马士雄和彭飞为本书的出版做出的贡献。同时，对书中所引用参考文献的作者表示崇高的敬意和真诚的感谢！

限于作者水平，书中错误与不足在所难免，恳请读者指正。

作者联系方式：sunaijing@xupt.edu.cn

作者

2015 年 3 月于西安

目 录

第 1 章 通信原理基础理论	1
1.1 引言	1
1.1.1 通信系统的一般模型	1
1.1.2 模拟信号与数字信号	2
1.1.3 模拟通信系统与数字通信系统	3
1.1.4 信息的度量	4
1.1.5 数字通信系统主要性能指标	5
本节习题	6
1.2 信号分析	6
1.2.1 确知信号和随机信号	6
1.2.2 确知信号的频域分析	7
1.2.3 随机过程的概念及统计描述	12
1.2.4 几种重要的随机过程	15
1.2.5 白噪声和带限白噪声	19
本节习题	22
1.3 信道特性对信号传输的影响	22
1.3.1 信道的分类	22
1.3.2 恒参信道及其对信号传输的影响	23
1.3.3 随参信道及其对信号传输的影响	25
本节习题	28
1.4 模拟调制系统	28
1.4.1 常规双边带调幅 (AM) 传输系统	29
1.4.2 抑制载波双边带调幅 (DSB-SC) 传输系统	34
1.4.3 单边带调制 (SSB) 传输系统	35
1.4.4 调频 (FM) 传输系统	39
1.4.5 频分多路复用	44
本节习题	45
1.5 模拟信号的数字化传输	45
1.5.1 模拟信号的抽样与恢复	46
1.5.2 量化与编译码原理	48
1.5.3 PCM 编译码系统	53
1.5.4 增量调制 (DM) 原理	55
1.5.5 时分复用及 PCM 基群	57
本节习题	60
1.6 数字基带信号及其传输	61
1.6.1 常见的数字基带信号及其功率谱密度	61

1.6.2	AMI 和 HDB ₃ 编译码及位定时提取	65
1.6.3	数字基带信号传输与码间串扰	68
1.6.4	眼图	71
1.6.5	(7,4)汉明编译码原理	72
	本节习题	74
1.7	数字频带传输系统	74
1.7.1	2ASK 传输系统	74
1.7.2	2FSK 传输系统	78
1.7.3	2PSK 传输系统	81
1.7.4	2DPSK 传输系统	84
1.7.5	多进制数字调制原理	87
	本节习题	94
第 2 章	基于 SystemView 的通信系统仿真实验开发	95
2.1	引言	95
2.2	SystemView 通信系统仿真平台简介	95
2.2.1	SystemView 的设计窗口	96
2.2.2	SystemView 设计窗口的菜单栏与工具栏	96
2.2.3	SystemView 设计窗口的时间窗口设置	97
2.2.4	SystemView 的分析窗口	98
2.2.5	SystemView 分析窗口的接收计算器	99
2.2.6	SystemView 的图符库	102
2.2.7	SystemView 的基本使用	109
2.3	信道特性对信号传输的影响	114
2.3.1	恒参信道特性对信号传输的影响	114
2.3.2	随参信道的多径传播效应	116
	本节习题	118
2.4	模拟调制系统	118
2.4.1	AM 传输系统	118
2.4.2	DSB 传输系统	120
2.4.3	SSB 传输系统	122
2.4.4	FM 传输系统	125
2.4.5	频分多路复用	128
	本节习题	130
2.5	模拟信号的数字化传输	130
2.5.1	采样定理	131
2.5.2	量化与编译码	136
2.5.3	增量调制 (DM)	140
2.5.4	时分多路复用	142
	本节习题	144
2.6	数字基带传输系统	144

2.6.1	常见的数字基带信号及其功率谱密度	144
2.6.2	数字基带信号的传输	147
	本节习题	153
2.7	数字带通传输系统	153
2.7.1	2ASK 传输系统	154
2.7.2	2FSK 传输系统	159
2.7.3	2PSK 传输系统	171
2.7.4	2DPSK 传输系统	176
	本节习题	187
2.8	四进制数字带通传输系统	187
2.8.1	4ASK 传输系统	187
2.8.2	4FSK 传输系统	200
2.8.3	QPSK 传输系统	213
2.8.4	QDPSK 传输系统	220
	本节习题	235
2.9	16QAM 传输系统	235
	本节习题	242
第 3 章	基于 MATLAB 的通信系统仿真实验开发	243
3.1	MATALB 基础	243
3.1.1	MATLAB 概况	243
3.1.2	MATLAB 基本运算	244
3.1.3	MATLAB 程序设计	248
3.1.4	计算结果可视化	254
	本节习题	258
3.2	确知信号与随机信号分析	259
3.2.1	确知信号分析	259
3.2.2	随机信号分析	264
	本节习题	269
3.3	模拟通信系统	270
3.3.1	模拟线性调制系统	270
3.3.2	模拟非线性调制系统	279
	本节习题	282
3.4	数字基带通信系统	282
3.4.1	数字基带信号及其频谱特性	282
3.4.2	数字基带传输常用码型	285
3.4.3	蒙特卡罗仿真	289
	本节习题	292
3.5	数字频带通信系统	293
3.5.1	二进制数字通信系统	293
3.5.2	多进制数字通信系统	306

本节习题	314
3.6 模拟信号的数字传输	314
3.6.1 抽样定理	315
3.6.2 量化	318
3.6.3 PCM 编译码	321
本节习题	324
3.7 差错控制编码	324
3.7.1 分组码与线性分组码	325
3.7.2 循环码	328
本节习题	331
3.8 通信系统综合仿真	331
第 4 章 基于硬件平台的通信系统验证实验开发	332
4.1 引言	332
4.2 ZH7001 型通信系统硬件实验平台简介	332
4.3 模拟信号的数字传输	336
4.3.1 模拟信号的采样与恢复	336
4.3.2 PCM 编译码系统	336
4.3.3 PCM 基群帧结构与帧同步	337
本节习题	339
4.4 信道编码与译码	339
4.4.1 AMI 编译码及位定时提取	339
4.4.2 HDB3 编译码及位定时提取	340
4.4.3 (7, 4)汉明编译码系统	341
本节习题	342
4.5 数字带通传输系统	342
4.5.1 2PSK 传输系统	342
4.5.2 2DPSK 传输系统	343
本节习题	343
4.6 基于电话业务的语音通信系统的实现	343
本节习题	344
参考文献	345

第 1 章 通信原理基础理论

1.1 引 言

人类的社会活动总离不开消息的传递和交换。古代的消息树、烽火台和驿马传令，以及现代社会的文字、书信、电报、电话、广播、电视、网络等，这些都是消息传递的方式或信息交流的手段。可见，消息（message）是人类物质或精神状态的一种反映，在不同的时期具有不同的表现形式。人们接收消息，关心的是消息中所包含的人们原来未知而待知的内容，即信息（information）。因此，通信的根本目的在于传递消息中所包含的信息。通信从本质上讲是信息传递功能的一门科学技术。

实现通信的方式和手段很多，人们可以利用旌旗、消息树、烽火台、手势等“非电”方式进行信息传输，也可以利用电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、因特网和计算机网等“电”方式进行通信。它是消息的物质载体，即消息是载荷在电信号的某一参量上的。例如，可以利用信号的振幅来传递消息。

通信的目的是交换不同地点的消息。例如，将地点 A 的消息传输到地点 B，或者反过来将地点 B 的消息传输到地点 A。待传输的消息可以是语言、文字、图像或者数据等。消息在发送端首先被变换为各种形式的电信号，然后经过各种各样的信道（如有线通信中的明线、电缆，无线通信中的短波、微波等）传输到接收端，接收端再把接收到的电信号还原为与发送端相同或尽可能相同的消息。将各种通信系统和设备中消息传输的完整过程高度概括，可以得到通信系统的一般模型。

1.1.1 通信系统的一般模型

实现信息传递所需的一切技术设备和传输媒质的总和称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1.1.1 所示。

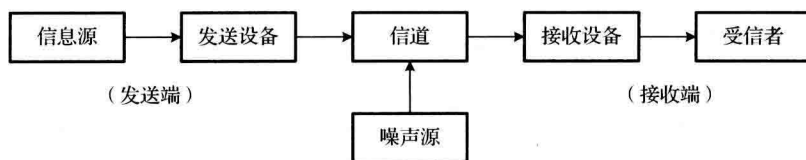


图 1.1.1 通信系统的一般模型

图 1.1.1 中各部分的功能简述如下。

1. 信息源

信息源（简称信源）是消息的产生地，其作用是把各种消息转换成原始电信号。根据信息源输出信号的特征不同可分为模拟信源和数字信源。模拟信源输出模拟信号，如话筒（将人的声音转换为音频信号）、摄像机（将图像转换为视频信号）；数字信源则输出数字信号，

如电传机（将键盘字符转换为数字信号）、计算机等各种数字终端。信息源产生信息的种类和速率不同，因而对传输系统的要求也各不相同。

2. 发送设备

发送设备是将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号，其作用是使发送信号的特性和信道特性相匹配，具有抗信道干扰的能力，并且具有足够大的功率以满足远距离传输的需要。因此，发送设备是一个总体概念，它涵盖的内容很多，可能包含变换、放大、滤波、调制、编码、保密等过程。对于多路传输系统，发送设备中还包括多路复用器。

3. 信道

信道是传输信号的物理媒质，用来将来自发送设备的信号传送到接收端。常用的信道有架空明线、电缆、光纤等有线信道和中长波、短波、微波等无线信道。信道既给信号提供传输的通路，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

噪声主要来自于信道，发送设备和接收设备中也有一定的噪声。为了便于描述，把噪声源视为通信系统中各处噪声的集中表现而抽象加入到信道。噪声通常是随机的、形式多样的，它的出现干扰了正常信号的传输。

5. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换，即进行解调、译码、解密等。它的任务是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始基带电信号。

6. 受信者

受信者是传输信息的归宿点，其作用是将恢复的原始基带电信号转换成相应的消息，如扬声器等。

1.1.2 模拟信号与数字信号

在电通信系统中，消息的传递是载荷在电信号的某一参量上的（如连续波的幅度、频率或相位；脉冲波的幅度、宽度或位置）。依据电信号参量的取值方式不同，可以把信号分为两类：模拟信号和数字信号。判断一个信号是模拟信号还是数字信号，关键在于确定携带消息的信号参量是哪个物理量，然后再根据物理量的取值状态进行判断。

(1) 模拟信号：携带消息的信号参量取值连续无限，如图 1.1.2 所示的语音信号(a)和抽样信号(b)。由图可见，随着时间的变化，信号的幅度在变，因此可以确定携带消息的信号参量是信号的幅度。无论是语音信号还是抽样信号，幅度的取值状态都是连续无限的，不同的是，前者是时间连续信号，后者是时间离散信号。

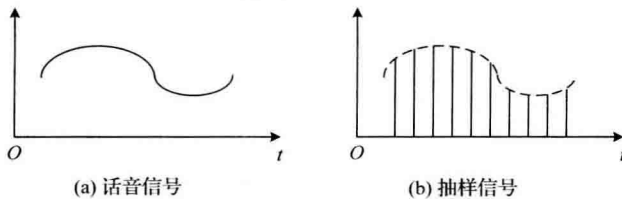


图 1.1.2 模拟信号

(2) 数字信号：携带消息的信号参量取值离散有限，如图 1.1.3 所示的二进制信号(a)和 2PSK 信号(b)。在图 1.1.3(a)中，携带消息的物理参量是矩形波的幅度，幅度只有两种状态的变化；在图 1.1.3(b)中，携带消息的物理参量是正弦波的相位，相位只有 0 和 π 两种状态的变化。因此，它们均属于数字信号，并且都是时间连续信号。

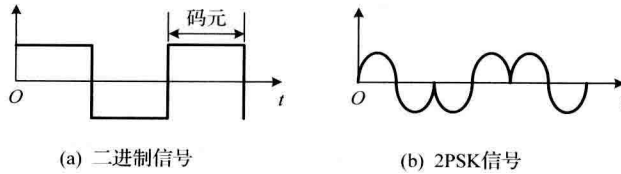


图 1.1.3 数字信号

1.1.3 模拟通信系统与数字通信系统

通常，按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信系统是利用模拟信号来传递消息的通信系统，其模型如图 1.1.4 所示。

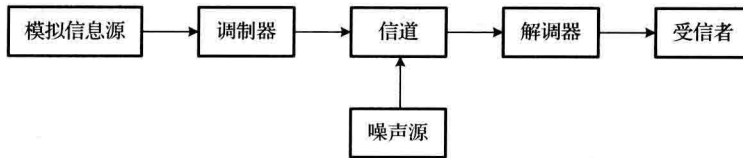


图 1.1.4 模拟通信系统模型

在模拟通信系统中，通常包含两种重要变换。第一种变换：信息源将模拟消息转换成原始电信号，并在接收端进行相反的变换，这种变换和反变换由信源和受信者来完成。这里所说的原始电信号通常称为基带信号，基带的含义是信号的频谱从零频附近开始，频率都比较低，如话音信号的频率范围为 $300\sim 3400$ Hz，图像信号的频率范围为 $0\sim 6$ MHz。有些信道可以直接传输基带信号，而以自由空间作为信道的无线电传输却无法直接传输这些基带信号。因此，模拟通信系统中常常需要进行第二种变换：把基带信号变换成适合在信道中传输的信号，并在接收端完成反变换。完成这种变换和反变换的通常是调制器和解调器。经过调制以后的信号称为已调信号，它应具有两个基本特征：一是携带信息；二是适宜在信道中传输。由于已调信号的频谱通常具有带通形式，因而已调信号又称为带通信号或频带信号。

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统。其模型如图 1.1.5 所示。

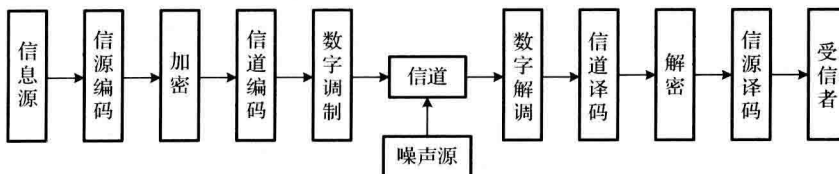


图 1.1.5 数字通信系统模型

1. 信源编码与译码

信源编码有两个基本功能：一是提高信息传输的有效性，即在保证原始消息质量的前提下，通过某种数据压缩技术尽量设法减少码元数目和降低码元速率；二是完成模/数（A/D）变换，即当信息源输出的是模拟信号时，信源编码器将其转换成数字信号，以实现模拟信号的数字化传输。信源译码是信源编码的逆过程。

2. 加密与解密

在需要实现保密通信的场合，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，这种处理过程叫加密。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，恢复原来信息，这种处理过程叫解密。

3. 信道编码与译码

信道编码是对原始信号的第二次编码，目的是增强数字信号的抗干扰能力，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，形成适合在信道中传输的带通信号。基本的数字调制方式有振幅键控（ASK）、频移键控（FSK）、绝对相移键控（PSK）、差分相移键控（DPSK）。

5. 同步

同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致，是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提条件。

1.1.4 信息的度量

通信系统的任务是传递消息，每一消息信号中必定包含有接收者所需要知道的信息。信息是指消息中包含的有效内容，消息以具体信号形式表现出来，而信息则是抽象的、本质的内容。消息的出现是随机的、无法预知的。一个预先确知的消息不会给接收者带来任何信息，因而就失去了传递的必要。如同运输货物的多少可以采用“货运量”来衡量一样，传输信息的多少也可以采用“信息量”来进行衡量。

消息的种类是众多的，因此度量消息中所含信息量的方法，必须能够用来度量任何种类的消息，而且，这种度量方法应该与消息的重要程度无关，对接收者来说，消息中不确定的内容才构成信息，消息所表达的事件越不可能发生，越不可预测，越会令人感到意外和惊奇，则消息包含的信息量就越大。

因此，消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越小，则消息中包含的信息量就越大。假设 $P(x)$ 表示消息发生的概率， I 表示消息中包含的信息量，则 I 与 $P(x)$ 之间的关系式为：

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (\text{bit}) \quad (1.1-1)$$

设离散信息源是一个由 M 个符号组成的集合，其中每个符号 $x_i (i=1,2,3,\dots,M)$ 按一定的概率 $P(x_i)$ 独立出现，即

$$\left[\begin{array}{cccc} x_1, & x_2, & \cdots, & x_M \\ P(x_1), & P(x_2), & \cdots, & P(x_M) \end{array} \right], \text{ 且有 } \sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$$

则 x_1, x_2, \dots, x_M 所包含的信息量分别为

$$-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_M)$$

于是, 每个符号所含信息量的统计平均值, 即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[-\log_2 P(x_1)] + P(x_2)[-\log_2 P(x_2)] + \cdots + P(x_M)[-\log_2 P(x_M)] \\ &= -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit / 符号}) \end{aligned} \quad (1.1-2)$$

平均信息量 H 等于各符号所包含的信息量乘以各符号出现的概率之和。由于 H 同热力学中的熵形式相似, 故通常又称它为信息源的熵, 其单位为 bit / 符号。

当离散信源中各符号等概率独立出现 ($P(x_i) = 1/M$) 时, 平均信息量 H 达到最大值, 为

$$H_{\max} = \log_2 M \quad (\text{bit / 符号}) \quad (1.1-3)$$

1.1.5 数字通信系统主要性能指标

模拟通信在历史上曾经占据过主导地位。但近 30 年来, 随着超大规模集成电路工艺的成熟及计算机技术和数字信号处理技术的充分发展, 数字通信发展迅速, 大多数的模拟通信系统已被数字通信系统所取代。尽管在未来一段时间内数字通信系统还不能完全取代模拟通信系统, 但通信朝着数字化方向发展是不会改变的。因此, 这里主要介绍数字通信系统的性能指标。

数字通信系统的有效性通常用传输速率和频带利用率来衡量。

1. 有效性指标

(1) 码元传输速率 R_B (或称码元速率、传码率、数码率)。它被定义为单位时间 (每秒) 内传送码元的数目, 单位为波特 (Baud), 简记为 B。根据码元速率的定义, 若每个码元的长度为 T 秒, 则有

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{B}) \quad (1.1-4)$$

(2) 信息传输速率 R_b , 简称为传信率, 又称比特率。它被定义为单位时间 (每秒) 内传递的平均信息量或比特数, 单位为比特/秒, 简记为 b/s 或 bps。

码元速率 R_B 和信息速率 R_b 之间的关系:

若每个码元所含的平均信息量为 H , 则有

$$R_b = R_B \cdot H \quad (\text{b/s}) \quad (1.1-5)$$

当各码元等概率出现时, $H_{\max} = \log_2 M$ (即 M 进制的每个码元携带 $\log_2 M$ 比特的信息量), 此时有

$$R_b = R_B \cdot \log_2 M \quad (\text{b/s}) \quad (1.1-6)$$

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 M} \quad (\text{B}) \quad (1.1-7)$$

(3) 频带利用率。在比较不同通信系统的有效性时,不能单看它们的传输速率,还应考虑所占用的频带宽度,因为两个传输速率相等的系统其传输效率并不一定相同。所以,真正衡量数据通信系统的有效性指标是频带利用率,它定义为单位带宽(每赫兹)内的传输速率,即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{B/Hz}) \quad (1.1-8)$$

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad \text{b/(s}\cdot\text{Hz)} \quad (1.1-9)$$

数字通信系统的可靠性可用差错率来衡量。差错率常用误码率和误信率表示。

2. 可靠性指标

(1) 误码率 P_e , 是指错误接收的码元数在传输总码元数中所占的比例, 即

$$P_e = \frac{\text{错误码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1.1-10)$$

(2) 误信率 P_b , 又称误比特率, 是指错误接收的比特数在传输总比特数中所占的比例, 即

$$P_b = \frac{\text{错误比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1.1-11)$$

显然, 在二进制中有 $P_b = P_e$, M 进制时, 有 $P_b < P_e$ 。

本节习题

1. 通信系统是如何分类的?
2. 何谓数字信号? 何谓模拟信号? 两者的根本区别是什么?
3. 何谓数字通信? 数字通信的优缺点是什么?
4. 试画出数字频带通信系统的模型, 并简要说明各部分的作用。
5. 衡量数字通信系统的主要性能指标是什么?
6. 何谓码元速率和信息速率? 它们之间的关系如何?
7. 何谓误码率和误信率? 它们之间的关系如何?

1.2 信号分析

信号是由消息转换而成的, 携带有信息。信息的传输和处理是通过信号来进行的, 所以对信号进行分析是研究信息传输和处理的基础。信号分析是从不同的角度、不同的侧面来揭示信号的本质, 以便对信号进行传输和处理。

通信系统中传输的信号本质上都具有随机性, 这种具有随机特性的信号称为随机信号。而在前续课程中学习的确知信号, 只是随机信号的一种特定形式, 如果几个确知信号随机出现, 则构成了一种随机信号, 所以确知信号的分析是随机信号分析的基础。

1.2.1 确知信号和随机信号

确知信号: 可以用确定时间函数表示的信号, 对于任意指定的时刻, 可确定一相应的函数值。如一个正弦波形, 当幅度、角频率和初相均为确定值时, 任意给定一时刻 t_0 , 函数在 t_0 时刻的取值都是确定的, 因此它属于确知信号。

随机信号：不能用确定的时间函数来表示，在任意时刻的取值都具有不确定性，我们只可能知道它的统计特性，如在某时刻取某一值的概率，这类信号称为随机信号或不确定信号。如上述正弦波中某一参量（比如相位）在其可能取值范围内没有固定值的情况，可将其表示为： $f(t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \theta)$ ，其中 A_0 和 ω_0 为确定值， θ 是在 $(0, 2\pi)$ 范围内随机取值，那么任意给定一时刻 t_0 ，函数在 t_0 时刻的取值都是随机的，因此它属于随机信号。电子系统中的起伏热噪声、雷电干扰信号是两种典型的随机信号。

1.2.2 确知信号的频域分析

从确知信号的时域波形能看出信号的电压或电流值在各时间点的大小，而对信号的一些重要的参数如频率成分等不能直观地反映。因此，需要从信号的其他变换空间对信号进行深入分析。如果从幅度—频率空间对信号进行分析，则可以得到信号的频谱特性。对应的数学变换称为频谱变换。需要注意的是，由于信号具有不同的特性，因此对于不同的信号，频谱分析时采用的分析方法是不同的，周期信号采用傅里叶级数或傅里叶变换，非周期信号采用傅里叶变换，随机信号采用功率谱的方法进行频谱分析。

1. 非周期信号的傅里叶变换

对于非周期信号 $f(t)$ ，可用傅里叶变换求出信号的频谱密度函数 $F(j\omega)$ ，即

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1.2-1)$$

反傅里叶变换为

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (1.2-2)$$

$f(t)$ 与 $F(j\omega)$ 的关系常记为

$$f(t) \leftrightarrow F(j\omega) \quad (1.2-3)$$

2. 周期信号的傅里叶变换

对于周期信号 $f(t)$ ， T 为其周期，那么周期信号 $f(t)$ 可展开成指数形式的傅里叶级数

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\Omega t} \quad (1.2-4)$$

式中， $\Omega = 2\pi/T$ 为周期信号的基波角频率； F_n 为指数形式傅里叶级数的系数，它表示为

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t)e^{-jn\Omega t} dt \quad (1.2-5)$$

或者根据傅里叶变换和傅里叶级数的系数之间的关系，有

$$F_n = \frac{1}{T} F_0(j\omega) \Big|_{\omega=n\Omega} \quad (1.2-6)$$

式 (1.2-6) 中 $F_0(j\omega)$ 是周期信号的第一个脉冲信号 $f_0(t)$ 的傅里叶变换。

3. 傅里叶变换的性质

傅里叶变换的性质归纳如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 傅里叶变换的性质

名称	时域 $f(t)$	频域 $F(j\omega)$
线性	$af_1(t) + bf_2(t)$	$aF_1(j\omega) + bF_2(j\omega)$
奇偶性	$f(t)$ 为实信号	$ F(j\omega) = F(-j\omega) , \varphi(\omega) = -\varphi(-\omega)$
		$R(\omega) = R(-\omega), X(\omega) = -X(-\omega)$
	$f(t) = f(-t)$	$F(j\omega) = R(\omega), X(\omega) = 0$
	$f(t) = -f(-t)$	$F(j\omega) = jX(\omega), R(\omega) = 0$
对称性	$F(jt)$	$2\pi f(-\omega)$
尺度变换	$f(at), a \neq 0$	$\frac{1}{ a } F\left(j\frac{\omega}{a}\right)$
时移	$f(t \pm t_0)$	$e^{\pm j\omega t_0} F(j\omega)$
频移	$f(t)e^{\pm j\omega_0 t}$	$F[j(\omega \mp \omega_0)]$
卷积定理	时域	$f_1(t) * f_2(t)$
	频域	$F_1(j\omega)F_2(j\omega)$
	$f_1(t)f_2(t)$	$\frac{1}{2\pi} F_1(j\omega) * F_2(j\omega)$
时域微分	$f^{(n)}(t)$	$(j\omega)^n F(j\omega)$
时域积分	$f^{(-1)}(t)$	$\pi F(0)\delta(\omega) + \frac{F(j\omega)}{j\omega}$
频域微分	$(-jt)^n f(t)$	$F^{(n)}(j\omega)$
频域积分	$\pi f(0)\delta(t) + \frac{f(t)}{-jt}$	$F^{(-1)}(j\omega)$

4. 典型信号的傅里叶变换

1) 单位冲激函数 $\delta(t)$

单位冲激函数的定义为

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ \infty & t = 0 \end{cases} \quad \text{且} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.2-7)$$

其傅里叶变换式为

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t)e^{-j\omega t} dt = 1 \quad (1.2-8)$$

可见，单位冲激函数的频谱函数是常数 1，它均匀分布于整个频率范围。其波形和频谱如图 1.2.1 所示。

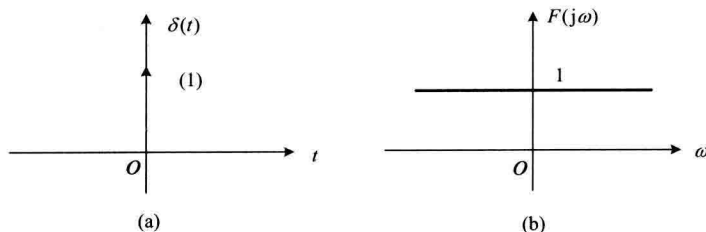


图 1.2.1 单位冲激函数的波形及其频谱