



高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

通信原理及 System View 仿真测试

主编 尹立强 张海燕



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

内 容 简 介

本书系统地介绍了通信的基本概念和基本理论。在简要介绍模拟通信原理的基础上,以数字通信原理为重点,讲述了通信系统的组成、性能指标、工作原理、性能分析和设计方法。

全书共 10 章,内容包括绪论、确知信号、随机过程、信道、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字带通传输系统、新型数字带通调制技术、模拟信号的数字传输、数字信号的最佳接收。

本书既可作为普通高等学校工科电子信息类专业的教科书或参考书,也可作为从事通信专业工作的工程技术人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理及 SystemView 仿真测试/尹立强,张海燕主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2012.6

高等学校电子与通信类专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2778-6

I. ① 通… II. ① 尹… ② 张… III. ① 原信原理—高等学校—教材

② 通信系统—系统仿真—应用软件, System View—高等学校—教材 IV. ① TN911 ② TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 054522 号

策 划 毛红兵

责任编辑 毛红兵 樊新玲

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2012 年 6 月第 1 版 2012 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 20.5

字 数 485 千字

印 数 1~3000 册

定 价 36.00 元

ISBN 978-7-5606-2778-6/TN·0650

XDUP 3070001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

前 言

通信是人类社会传递信息、交流思想、传播知识的重要手段。在古代,人们通过驿站、飞鸽传书、烽火报警、符号、身体语言、眼神、触碰等方式进行信息传递。到了今天,随着科学技术的飞速发展,相继出现了无线电、固定电话、移动电话、互联网甚至视频电话等各种通信方式,尤其是通信与计算机的结合,更为通信技术的飞跃发展注入了新的生机和活力。通信技术拉近了人与人之间的距离,提高了工作效率,深刻地改变了人类的生活方式和 社会的发展。

通信原理是一门专业基础课,其任务是介绍现代通信系统的基本原理、基本技术、基本分析方法和基本性能。本书在简要介绍了模拟通信原理的基础上,以数字通信原理为重点,深入透彻地讲述了通信系统的组成、性能指标、工作原理、性能分析和设计方法。

本书在内容选取上注重基础性、先进性、实用性、系统性和方向性,理论联系实际。在叙述上力求概念清晰、重点突出、层次分明、深入浅出、通俗易懂。除必要的数学分析外,本书尽量避免繁琐的数学推导。

全书共分 10 章。第 1 章是全书的基础,主要介绍通信系统的基本模型、主要指标;第 2 章和第 3 章扼要介绍本书后面章节所需的确知信号和随机信号的数学知识;第 4 章介绍信道;第 5 章介绍模拟调制原理,为学习数字调制奠定基础。第 6、7 章主要介绍数字传输的基本原理和技术,这一部分也是全书的重点。第 8 章主要介绍几种新型的数字调制技术。第 9 章介绍模拟信号的数字传输;第 10 章介绍数字信号的最佳接收。

本书参考学时为 56~68 学时。选用本书作为教材,可根据课程设置的具体情况、专业特点和教学要求的侧重点,对书中内容进行适当的取舍。

本书自成系统,便于自学,可作为高等学校计算机、网络工程、通信工程、信息技术和其他相近专业的教材,也可供从事这方面工作的广大科技工作者阅读和参考。

本书由尹立强、张海燕主编,其中第 1、7 章由尹立强编写,第 2、9 章由王晓红和张海燕共同编写,第 3 章由高玲编写,第 5 章由高玲和张佳共同编写,第 4 章由宋蕊编写,第 6 章由张海燕编写,第 8 章由苏新红编写,第 10 章由魏征编写。全书由尹立强统稿,张海燕审定。

西安电子科技大学出版社对本书的出版给予了极大的帮助和支持,在此我们表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏,殷切希望广大读者批评指正。

编 者

2012 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1	3.2.2 平稳随机过程的各态历经性	29
1.1 通信的基本概念	1	3.2.3 平稳随机过程的自相关函数与 功率谱密度	29
1.1.1 什么是通信	1	3.3 高斯随机过程	32
1.1.2 通信的发展历程	1	3.3.1 高斯随机过程的定义	32
1.2 通信系统	2	3.3.2 高斯随机过程的重要性质及 一维分布	32
1.2.1 通信方式	2	3.4 平稳随机过程通过线性系统	35
1.2.2 通信系统的分类	4	3.5 窄带随机过程	37
1.2.3 通信系统的模型	5	3.5.1 窄带随机过程的定义	37
1.2.4 通信系统的主要性能指标	9	3.5.2 同相分量和正交分量的 统计特性	38
1.3 信息	10	3.5.3 随机包络和相位的统计特性	40
1.3.1 信息的基本概念	10	3.6 正弦波加窄带高斯过程	42
1.3.2 信息的度量方法	11	3.7 高斯白噪声和带限白噪声	44
思考题	12	3.7.1 白噪声	44
练习题	13	3.7.2 高斯白噪声	45
第 2 章 确知信号	14	3.7.3 带限白噪声	45
2.1 确知信号的类型	14	思考题	46
2.2 确知信号的频域性质	15	练习题	47
2.2.1 功率信号的频谱	15	第 4 章 信道	48
2.2.2 能量信号的频谱密度	16	4.1 有线信道	48
2.2.3 能量信号的能量谱密度	18	4.1.1 双绞线	49
2.2.4 功率信号的功率谱密度	19	4.1.2 同轴电缆	50
2.3 确知信号的时域性质	20	4.1.3 光纤	52
2.3.1 能量信号的自相关函数	20	4.2 无线信道	56
2.3.2 功率信号的自相关函数	20	4.2.1 电磁波谱	56
2.3.3 能量信号的互相关函数	21	4.2.2 无线通信中电磁波的传播方式	57
2.3.4 功率信号的互相关函数	22	4.2.3 无线传输介质	59
思考题	23	4.3 信道的数学模型	61
练习题	23	4.3.1 调制信道的模型	61
第 3 章 随机过程	25	4.3.2 编码信道的模型	62
3.1 随机过程的基本概念	25	4.4 信道特性及其对信号传输的影响	63
3.1.1 随机过程	25	4.4.1 恒参信道特性及其 对信号传输的影响	63
3.1.2 随机过程的统计特性	26		
3.2 平稳随机过程	28		
3.2.1 平稳随机过程的定义	28		

4.4.2 随参信道特性及其 对信号传输的影响	65	练习题	143
4.5 信道中的噪声	68	第6章 数字基带传输系统	144
4.5.1 噪声的分类	68	6.1 数字基带信号及其频谱特性	144
4.5.2 起伏噪声的统计特性	69	6.1.1 数字基带信号	144
4.5.3 噪声对信号的影响	69	6.1.2 基带信号的频谱特性及仿真	146
4.6 信道容量	69	6.2 基带传输的常用码型	150
4.6.1 离散信道的容量	70	6.2.1 传输码的码型选择原则	150
4.6.2 连续信道的容量	70	6.2.2 几种常用的传输码型	151
思考题	71	6.3 数字基带信号传输与码间串扰	153
练习题	71	6.3.1 数字基带传输系统的组成	153
第5章 模拟调制系统	73	6.3.2 数字基带信号传输的 定量分析及仿真	155
5.1 幅度调制原理	73	6.4 无码间串扰的基带传输特性	156
5.1.1 幅度调制的一般模型	73	6.4.1 消除码间串扰的基本思想	156
5.1.2 常规调幅及仿真	74	6.4.2 无码间串扰的条件	157
5.1.3 双边带调幅及仿真	85	6.4.3 无码间串扰的传输特性的设计	158
5.1.4 单边带调幅及仿真	90	6.5 基带传输系统的抗噪声性能	161
5.1.5 残留边带调幅	95	6.5.1 二进制双极性基带系统及仿真	162
5.2 线性调制系统的抗噪声性能	97	6.5.2 二进制单极性基带系统及仿真	163
5.2.1 抗噪声性能分析模型	98	6.6 眼图及仿真	164
5.2.2 DSB 调制系统的性能及仿真	99	6.7 部分响应与时域均衡	166
5.2.3 SSB 调制系统的性能及仿真	103	6.7.1 部分响应系统及仿真	166
5.2.4 AM 系统包络检波的 性能及仿真	107	6.7.2 时域均衡	170
5.3 角度调制原理	112	6.8 仿真实训	175
5.3.1 角度调制的基本概念	112	思考题	176
5.3.2 窄带调频	113	练习题	177
5.3.3 宽带调频	116	第7章 数字带通传输系统	178
5.3.4 调频信号的产生、解调及仿真	119	7.1 二进制数字调制原理	179
5.4 调频系统的抗噪声性能	124	7.1.1 二进制振幅键控(2ASK)	179
5.4.1 输入信噪比	125	7.1.2 二进制频移键控(2FSK)	183
5.4.2 大信噪比时的解调增益	125	7.1.3 二进制相移键控(2PSK)	188
5.4.3 小信噪比时的门限效应及仿真	129	7.1.4 二进制差分相移键控(2DPSK)	191
5.4.4 预加重和去加重技术	133	7.2 二进制数字调制系统的抗噪声性能	195
5.5 各种模拟调制系统的比较	135	7.2.1 2ASK 的抗噪声性能	196
5.6 频分复用和调频立体声	137	7.2.2 2FSK 的抗噪声性能	200
5.6.1 频分复用	137	7.2.3 2PSK 和 2DPSK 系统的 抗噪声性能	205
5.6.2 调频立体声广播	139	7.3 二进制数字调制系统的性能比较	209
5.7 仿真实训	139	7.4 多进制数字调制原理	211
思考题	142		

7.4.1 多进制振幅键控(MASK)	211	9.5.3 电话信号的编/译码器	266
7.4.2 多进制频移键控(MFSK)	215	9.5.4 PCM 系统中噪声的影响	268
7.4.3 多进制相移键控(MPSK)	216	9.6 差分脉冲编码调制	270
7.4.4 多进制差分相移 键控(MDPSK)	219	9.6.1 预测编码简介	270
7.5 多进制数字调制系统的抗噪声性能 ...	221	9.6.2 差分脉冲编码调制原理及性能 ...	271
7.5.1 MASK 系统的抗噪声性能	221	9.7 增量调制	272
7.5.2 MFSK 系统的抗噪声性能	221	9.7.1 增量调制原理	272
7.5.3 MPSK 系统的抗噪声性能	222	9.7.2 增量调制系统中的量化噪声	274
7.5.4 MDPSK 系统的抗噪声性能	223	9.8 时分复用和复接	275
7.6 仿真实训	223	9.8.1 基本概念	275
思考题	226	9.8.2 准同步数字系统	276
练习题	226	9.8.3 同步数字系统	277
第 8 章 新型数字带通调制技术	228	9.9 仿真实训	279
8.1 正交振幅调制及仿真	228	思考题	281
8.2 最小频移键控和高斯最小 频移键控及仿真	232	练习题	281
8.2.1 最小频移键控	232	第 10 章 数字信号的最佳接收	284
8.2.2 高斯最小频移键控	236	10.1 数字信号的统计特性	284
8.3 正交频分复用及仿真	238	10.2 数字信号最佳接收的 误码率及仿真	285
8.4 仿真实训	242	10.3 确知数字信号的最佳接收机	289
思考题	243	10.4 确知数字信号最佳接收的 误码率及仿真	291
练习题	243	10.5 随相数字信号的最佳接收	295
第 9 章 模拟信号的数字传输	244	10.6 起伏数字信号的最佳接收及仿真	297
9.1 引言	244	10.7 实际接收机和最佳接收机的 性能比较	299
9.2 模拟信号的抽样	245	10.8 数字信号的匹配滤波接收法	299
9.3 模拟脉冲调制	250	10.9 最佳基带传输系统	301
9.4 抽样信号的量化	253	10.10 仿真实训	303
9.4.1 量化原理	253	思考题	305
9.4.2 均匀量化	254	练习题	305
9.4.3 非均匀量化	256	练习题答案	307
9.5 脉冲编码调制	261	参考文献	319
9.5.1 脉冲编码调制的基本原理	261		
9.5.2 自然二进制码和折叠二进制码 ...	263		

第1章 绪 论

教学目标：

- ❖ 熟悉通信基本概念(通信、消息、信号、信息等)；
- ❖ 理解通信系统的模型、分类和通信方式；
- ❖ 了解通信的发展历史；
- ❖ 掌握信息量和通信系统主要性能指标的计算。

1.1 通信的基本概念

1.1.1 什么是通信

通信是指从一个地方向另一个地方进行消息的有效传递与交换，其目的是传递消息中所包含的信息。消息在不同的时期具有不同的表现形式，它是物质或精神状态的一种反映；信息是指消息中所包含的有效内容，它是人们真正关心的；而通信是指传输信息的手段或方式，它与电子技术、计算机技术以及传感技术等的发展息息相关，且相互融合。在高速发展的信息化社会，信息和通信已成为现代社会的命脉，不管是现在还是未来，通信对人们的生活方式和都会产生重大和深远的影响。

1.1.2 通信的发展历程

说到通信的历史，我们可以追溯到远古时期。那时，人们就通过简单的语言、壁画等方式交换信息。千百年来，人们一直在用语言、图符、烟火、钟鼓、竹简、纸书等传递信息。在古代，人们用结绳的方式来传递信息，用点燃烽火来传递战情，用飞鸽来传信……这些都可以说是通信的原始方式。在现代社会中，航海中采用的旗语、交通警察的指挥手势等也是古老通信方式的进一步发展和延伸。

19 世纪中叶，随着电报、电话的发明以及电磁波的发现，通信产生了根本性的巨大变革，人类开始利用电磁波来传输信息。利用电磁波通信的历史大致可划分为三个阶段。

(1) 电报的开始标志着进入了通信的初级阶段。1837 年，美国人塞缪尔·莫尔斯(Samuel Morse)成功地研制出世界上第一台电磁式电报机。他利用自己设计的电码，先将信息转换成一串或长或短的电脉冲传向目的地，在目的地再将电脉冲转换为原来的信息。

1844年5月24日,莫尔斯在国会大厦联邦最高法院会议厅用“莫尔斯电码”发出了人类历史上的第一份电报,从而实现了长途电报通信。1864年,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell)建立了一套电磁理论,预言了电磁波的存在,说明了电磁波与光具有相同的性质,两者都是以光速传播的。1875年,苏格兰青年亚历山大·贝尔(A. G. Bell)发明了世界上第一台电话机,并于1876年申请了发明专利。1878年,贝尔在相距300 km的波士顿和纽约之间进行了首次长途电话实验,并获得了成功,后来就成立了著名的贝尔电话公司。1888年,德国青年物理学家海因里斯·赫兹(H. R. Hertz)用电波环进行了一系列实验,发现了电磁波的存在,他用实验证明了麦克斯韦的电磁理论。这个实验轰动了整个科学界,成为近代科学技术史上的一个重要里程碑,促使了无线电的诞生和电子技术的发展。

(2) 1948年香农提出的信息论标志着近代通信的开始。信息论的奠基人香农曾说过,“通信的基本问题就是在一点重新准确地或近似地再现另一点所选择的消息”。他提出的香农定理解决了过去很多悬而未决的问题,对通信系统模型的建立、信道的研究等起到了巨大的推动作用。

(3) 20世纪80年代以后光纤通信的应用、综合业务数字网的崛起标志着通信进入了现代通信阶段。当今人们对通信的要求越来越高,除原有的语音、数据、传真业务外,还要求综合传输高清晰度电视、广播电视、高速数据传真等宽带业务。综合业务数字网的出现为满足这些迅猛增长的通信需求奠定了基础。另外,光纤传输的应用也极大地改善了通信的模式,为用户提供了更快、更准确的通信。

经过100多年的发展,通信已经深入渗透到了人类的生活中,只要人们打开电脑、手机等就很容易实现彼此之间的联系。未来的通信将是移动与宽带的统一、融合以及演进,可以说,未来的通信是“一切皆有可能”。

1.2 通信系统

1.2.1 通信方式

通信方式是指通信双方之间的信号传输方式或工作方式。

1. 并行传输和串行传输

进行通信时,根据一次传输数据的多少可将数据传输方式分为并行传输和串行传输。

1) 并行传输

并行传输是指将代表信息的数字信号码元序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输,如图1-1(a)所示。

并行传输的优点是节省传输时间,速度快,这是因为并行传输不需要字符同步措施。其缺点是传输时需要 n 条通信线路,成本相对较高。并行传输一般用于短距离设备间的通信或设备内部的通信。

2) 串行传输

串行传输是指将数字信号码元序列以串行方式一个码元接一个码元地在一条信道上传输,如图1-1(b)所示。

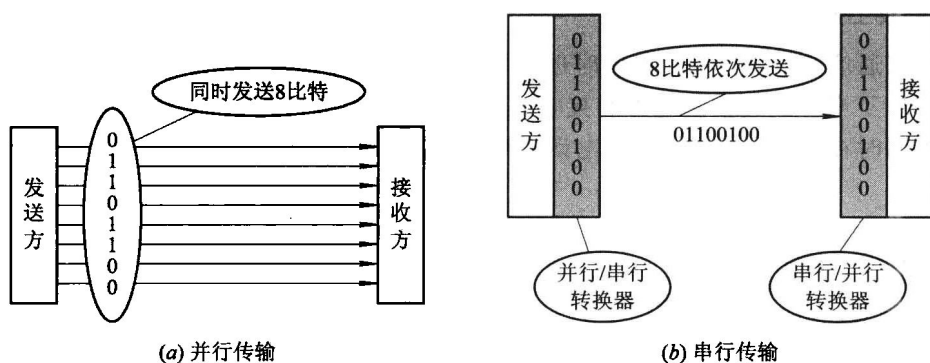


图 1-1 并行、串行传输示意图

2. 单工、半双工和全双工通信

根据通信线路上的传输方向及其与时间的关系，串行通信可分为三种方式：单工、半双工、全双工方式。

1) 单工通信

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式，如图 1-2(a)所示。在这种工作方式下，数据始终只能在一个方向上传输，任何时间不能进行反向传输。常见的单工通信如广播电视。

2) 半双工通信

半双工通信是指通信双方都能收发消息，但不能同时收发的工作方式，如图 1-2(b)所示。在这种工作方式下，允许数据在设备间两个方向上传输，但在某一时刻只允许数据在一个方向传输，即设备间只有一条传输通道，所以信号只能分时传输。常见的半双工通信如对讲机。

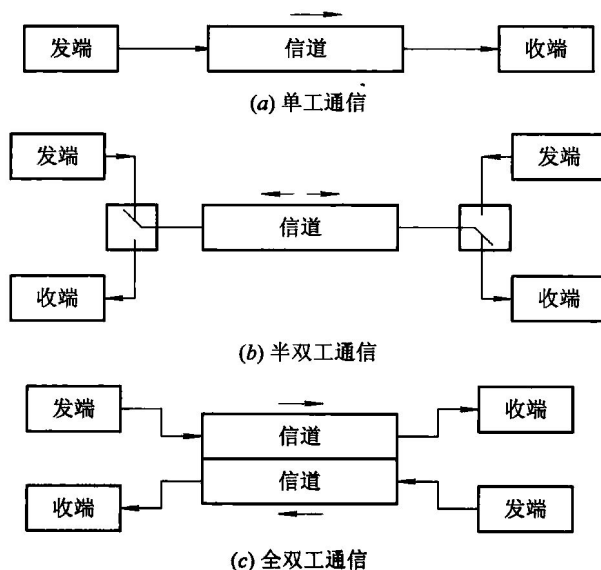


图 1-2 串行通信方式示意图

3. 全双工通信

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 1-2(c)所示。全双工通信解决了半双工通信发送方和接收方之间切换所花费的时间问题,提高了传输速率,允许数据同时在两个方向上传输。电话系统、计算机网络等大多数通信系统都采用全双工通信方式。

1.2.2 通信系统的分类

1. 按信号特征分类

根据信道传输信号的种类不同,可将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信是指用模拟信号来表示和传递消息的通信方式。数字通信是指用数字信号来表示和传递消息的通信方式。

2. 按传输介质分类

按传输信号时所用的介质不同,可将通信系统分为有线通信系统和无线通信系统。通常我们把利用导线,如电缆、光纤等作为介质的通信系统叫做有线通信系统,如市话系统、闭路电视系统、普通的计算机局域网等。所谓无线通信,是指传输消息的媒质为看不见、摸不着的媒质(如电磁波)的一种通信形式。无线通信常见的形式有微波通信、短波通信、移动通信、卫星通信、散射通信和激光通信等,其形式较多。

3. 按调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输。基带传输是将没有经过调制的信号直接传送,如音频市内电话;频带传输是对各种信号调制后再送到信道中传输的总称。

4. 按照通信业务和用途分类

根据通信业务和用途的不同,可将通信系统分为常规通信、控制通信等。其中常规通信又分为话务通信和非话务通信。话务通信业务主要以电话服务为主,程控数字电话交换网络的主要目标就是为普通用户提供电话通信服务。非话务通信主要包含分组数据业务、计算机通信、传真、视频通信等。在过去很长一段时期内,由于电话通信网最为发达,因而其他通信方式往往需要借助于公共电话网进行传输,但是随着因特网的迅速发展,这一状况已经发生了显著的变化。控制通信主要包括遥测、遥控等,如卫星测控、导弹测控、遥控指令通信等。

5. 按工作频段分类

按通信设备工作频率的不同,可将通信系统分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。表 1-1 列出了通信中使用的频段、常用传输介质及主要用途。

工作频率和工作波长可互换,其关系为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中: λ 为工作波长,单位为 m; f 为工作频率,单位为 Hz; $c=3\times 10^8$ m/s,为电波在自由空间中的传播速度。

表 1-1 通信频段、常用传输介质及主要用途

频率范围	波 长	频段名称	常用传输介质	用 途
3 Hz~30 kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	甚低频 (VLF)	有线线对超长波 无线电	音频、电话、数据终端、长距离 导航、时标
30 kHz~300 kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 (LF)	有线线对长波无 线电	导航、信标、电力线通信
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、移动陆地通信、业余 无线电
3 MHz~30 MHz	$10 \sim 10^2$ m	高频 (HF)	同轴电缆短波无 线电	移动无线电话、短波广播、定点 军用通信、业余无线电
30 MHz~300 MHz	1~10 m	甚高频 (VHF)	同轴电缆超短 波/米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆 通信、导航、集群通信、无线寻呼
300 MHz~3 GHz	10~100 cm	特高频 (UHF)	波导微波/分米 波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点 对点通信、移动通信
3 GHz~30 GHz	1~10 cm	超高频 (SHF)	波导微波/厘米 波无线电	微波接力、卫星和空间通信、 雷达
30 GHz~300 GHz	1~10 mm	极高频 (EHF)	波导微波/毫米 波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
10^3 GHz~ 10^7 GHz	3×10^{-6} cm~ 3×10^{-4} cm	红外、可见 光、紫外	光纤激光空间 传播	光通信

另外, 还有其他一些分类方法, 如按收发信者是否运动, 可将通信分为移动通信和固定通信; 按多址方式, 可分为频分多址通信、时分多址通信、码分多址通信等; 按用户类型, 可分为公用通信和专用通信; 按通信对象的位置, 可分为地面通信、对空通信、深空通信、水下通信等。

1.2.3 通信系统的模型

通信系统的一般模型如图 1-3 所示。

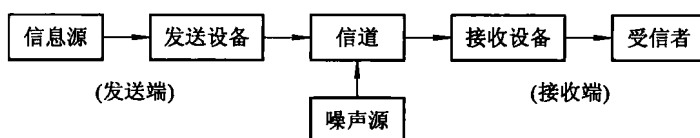


图 1-3 通信系统的一般模型

下面对图中各部分的作用作一简要描述。

(1) 信息源。信息源简称信源, 它是消息的产生地, 其作用是把各种消息转换成原始

电信号。按照信息源产生的消息形式不同,可将信源分为模拟信源和数字信源。模拟信源也称连续信源,输出连续的模拟信号,如电话机、电视摄像机等属于模拟信源;数字信源,也称离散信源,输出离散的数字信号,如电传机、计算机等各种数字终端设备属于数字信源。

(2) 发送设备。发送设备的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。变换方式是多种多样的,在需要频谱搬移的场合,调制是最常见的变换方式。对数字通信系统来说,发送设备常常又可分为信源编码和信道编码。

(3) 信道。信道是指传输信号的物理介质,用来将发送设备输出的信号传送到接收端。在有线信道中,信道可以是明线、电缆和光纤;在无线信道中,信道可以是大气(自由空间)。有线信道和无线信道均有多种物理介质,不同介质的固有特性及引入的干扰和噪声将直接影响通信的质量。

(4) 噪声源。噪声指的是信道中不需要的电信号,它是通信系统中各种设备以及信道所固有的,即使没有传输信号,通信系统中也有噪声,噪声永远存在于通信系统中。噪声的来源是多种多样的,它对信号的传输是有害的,它会使模拟信号发生失真,使数字信号发生错码。关于信道和噪声的具体分析,我们将在第4章中一一讲解。

(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,其目的是从接收到的衰减信号中正确地恢复出原始的电信号。对于多路复用信号,它还包括解除多路复用,实现正确分路的功能。

(6) 受信者。受信者简称信宿,它是信息传输的归宿点,其作用与信源相反,即把恢复的原始电信号转换成相应的消息。

图1-3概括地描述了一个通信系统的组成,它反映了通信系统的共性,因此称之为通信系统的一般模型。根据所关注的问题和研究对象的不同,模型中的各小方框的内容和作用也将有所不同,与之对应的也有更加具体的通信模型,后面的讨论将围绕系统的模型来展开。

根据前面介绍的通信系统的分类可知,按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可将通信系统相应地分为模拟通信系统和数字通信系统。下面分别介绍这两种通信系统。

1. 模拟通信系统

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统。模拟通信系统的模型如图1-4所示。它是由图1-3所示的一般模型略加演变而来的。图中的调制器和解调器就代表图1-3所示的发送设备和接收设备。

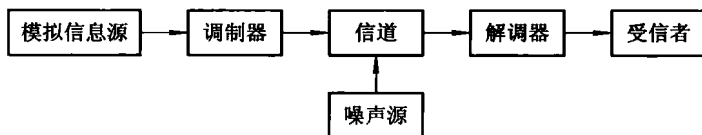


图 1-4 模拟通信系统模型

在通信系统中,有两种重要的变换和反变换过程。一是在发送端要将信源发出的连续消息变换成原始电信号,即基带信号,在接收端要作相反的处理,能够完成这种变换和反

变换的是信源和信宿；二是要将基带信号变换成调制信号，这是因为通常基带信号具有频率很低的频谱分量，如语音信号的频率范围为 300 Hz~3400 Hz，它们一般不适宜直接传输，这就需把基带信号变换成适合在信道中传输的信号，并在接收端进行相应的反变换。完成这种变换和反变换作用的通常是调制器和解调器。有关模拟信号调制和解调的内容我们将在第 5 章详细讲解。

经过调制的信号称为已调信号。已调信号有三个基本特征：一是携带有信息；二是适合在信道中传输；三是信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频，所以又称已调信号为频带信号。

模拟通信系统的优点是：信号频谱较窄，信道利用率高。

其缺点是：

- (1) 信号连续混入噪声后不易清除，即抗干扰能力差，不宜保密；
- (2) 设备不易大规模集成化，不适应飞速发展的计算机通信要求。

2. 数字通信系统

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统，如图 1-5 所示。

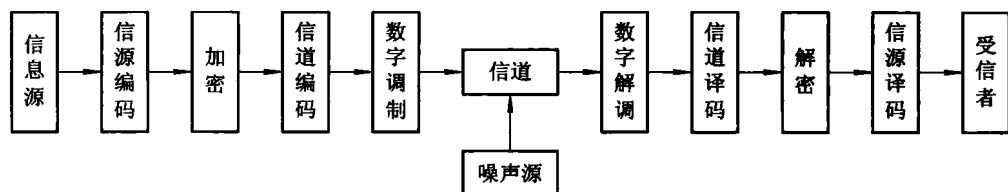


图 1-5 数字通信系统模型

数字通信涉及的技术问题较多，其中主要包括信源编码与译码、信道编码与译码、数字调制与解调、加密与解密、同步与复接等。

1) 信源编码与译码

当信源给出的是模拟语音信号时，通过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，对于数字信号进行数据压缩，提高通信效率。接收端的信源译码器按一定规则解码。

2) 信道编码与译码

数字信号在信道中传输时，由于噪声、衰落以及人为干扰等影响，将会引起差错。为了减少差错，信道编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分（监督码元），组成所谓“抗干扰编码”。接收端的信道译码器按一定规则进行译码，在译码过程中发现错误或纠正错误，从而提高通信系统的抗干扰能力，实现可靠通信。

3) 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，这种处理过程称为加密。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解除密码，恢复原来信息，称为解密。

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频带信号。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)、相

对(差分)相移键控(DPSK)。对这些信号可以采用相干解调或非相干解调,将其还原为数字基带信号。对高斯噪声下的信号检测,一般用相关接收机或匹配滤波器实现。

5) 同步与复接

同步是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的不可缺少的前提条件,它使收、发两端的信号在时间上保持步调一致。按照功用的不同,可将同步分为载波同步、位同步、群同步和网同步。

数字复接是指依据一定的复用基本原理(如时分复用、频分复用、码分复用等),把若干个数字信号合并成一个数字信号,以扩大传输容量和提高传输效率。

图1-5所示是数字通信系统的一般模型。实际的数字通信系统不一定包括图中的所有环节。如在某些有线信道中,当传输距离不太远且通信容量不太大时,数字基带信号无需调制,可以直接传送,称之为数字信号的基带传输,其模型中就可以不包括调制与解调环节。还应该指出的是,模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输,数字电话系统就是以数字方式传输模拟语音信号的例子。

当然,数字信号也可以在模拟通信系统中传输,如计算机数据可以通过模拟电话线路传输,但这时必须使用调制解调器(Modem)将数字基带信号进行正弦调制,以适应模拟信道的传输特性。可见,模拟通信与数字通信的区别仅在于信道中传输的信号种类。

数字通信系统具有如下优点:

(1) 抗干扰能力强。由于在数字通信中,传输的信号幅度是离散的,以二进制为例,信号的取值只有两个,这样接收端只需判别两种状态。信号在传输过程中受到噪声的干扰,必然会使波形失真,接收端对其进行抽样判决,以辨别是两种状态中的哪一个。只要噪声的大小不足以影响判决的正确性,就能正确接收(再生)。而在模拟通信中,传输的信号幅度是连续变化的,一旦叠加上噪声,即使噪声很小,也很难消除它。

数字通信抗噪声性能好,还表现在微波中继通信时,它可以消除噪声积累。这是因为数字信号在每次再生后,只要不发生错码,它仍然像信源中发出的信号一样,没有噪声叠加在上面。因此,即使中继站再多,数字通信仍具有良好的通信质量。而模拟通信中继时,只能增加信号能量(对信号放大),而不能消除噪声。

(2) 差错可控。数字信号在传输过程中出现的错误(差错),可通过纠错编码技术来控制,以提高传输的可靠性。

(3) 易加密。与模拟信号相比,数字信号容易加密和解密。因此,数字通信保密性好。

(4) 易于与现代技术相结合。由于计算机技术、数字存储技术、数字交换技术以及数字处理技术等现代技术飞速发展,许多设备、终端接口均是数字信号,因此极易与数字通信系统相连接。

数字通信系统的缺点有:

(1) 频带利用率不高。数字通信中,数字信号占用的频带宽。以电话为例,一路模拟电话通常只占据 4 kHz 带宽,但一路接近同样话音质量的数字电话可能要占据 20 kHz~60 kHz 的带宽。因此,如果系统传输带宽一定,则模拟电话的频带利用率是数字电话的 5~15 倍。

(2) 系统设备比较复杂。数字通信中,要准确地恢复信号,接收端需要严格的同步系

统,以保持收端和发端严格的节拍一致、编组一致。因此,数字通信系统及设备一般都比较复杂,体积较大。

另外,数字通信系统对于同步的要求也比较高。

不过,随着新的宽带传输信道(如光导纤维)的采用、窄带调制技术和超大规模集成电路的发展,数字通信的这些缺点已经弱化。随着微电子技术和计算机技术的迅猛发展和广泛应用,数字通信在今后的通信方式中必将逐步取代模拟通信而占主导地位。

1.2.4 通信系统的主要性能指标

对一个通信系统性能的好坏进行评估时,我们通常要考虑通信系统的很多性能指标,如有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性以及维护的方便性等。因为通信的主要任务是快速、准确地传递信息,所以,从研究信息传输的角度来说,有效性和可靠性是评价通信系统优劣的主要性能指标。有效性是指传输的“速度”问题,而可靠性是指传输的“质量”问题。本节就着重讨论这两个性能指标。

通信系统的有效性和可靠性指标是相互矛盾而又相对统一的。一般情况下,要增加系统的有效性,就得降低可靠性,反之亦然。在实际中,常常依据实际系统的要求采取相对统一的办法,即在满足一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速率,即有效性;或者,在维持一定有效性的条件下,尽可能提高系统的可靠性。

对于模拟通信系统,其有效性可用消息占用的有效带宽来度量,可靠性可用接收端输出的信噪比来度量。数字通信系统的有效性用码元传输速率、信息传输速率和频带利用率来表示,其可靠性通常用误码率和误信率来表示。下面分别讨论之。

1. 码元传输速率

码元传输速率指单位时间内传送码元的数目,简称传码率,又称为码元速率和调制速率,单位为波特,记作 Baud。如果每个码元的长度为 T 秒,则根据码元传输速率的定义,可得

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{Baud}) \quad (1-1)$$

2. 信息传输速率

信息传输速率定义为单位时间内传递的平均信息量或比特数,单位为比特/秒,简记为 b/s。

3. 码元传输速率和信息传输速率之间的关系

在 M 进制数字通信系统中,若 $M=2^k$,它表示每 k 个二进制符号与 M 进制符号之一相对应,则 M 进制的码元速率与二进制的信息速率之间的关系为

$$R_b = R_B \lg M \quad (1-2)$$

或者

$$R_B = \frac{R_b}{\lg M} \quad (1-3)$$

它表示每秒传送 R_B 个 M 进制符号,相当于每秒传送 $R_b \lg M$ 个二进制符号。在二进制中,码元传输速率和信息传输速率在数值上是相等的,但是单位不同,意义也是不同的,两者

不可混淆。

4. 频带利用率

频带利用率指单位频带内的码元传输速率,即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \quad (\text{Baud/Hz}) \quad (1-4)$$

或者定义为

$$\eta_b = \frac{R_b}{B} \quad (\text{b/s} \cdot \text{Hz}) \quad (1-5)$$

对不同通信系统的有效性进行衡量时,除了考虑它们的传输速率之外,还应该考虑其在相应的传输速率下所占用的信道频带宽度。所以频带利用率是衡量数字通信系统有效性的另一个重要指标。

5. 误码率

误码率指码元在传输过程中被传错的概率,即

$$P_e = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传输总码元数}} \quad (1-6)$$

6. 误信率

误信率指发生差错的比特数在传输总比特数中所占的比例,即

$$P_b = \frac{\text{错误接收比特数}}{\text{传输总比特数}} \quad (1-7)$$

对于二进制,误码率和误信率在数值上相等。

1.3 信 息

1.3.1 信息的基本概念

在 1.1 节中已经介绍过,信息是消息中包含的有效内容。为了帮助读者理解消息、信息和信号三者之间的区别和联系,这里我们把三个概念阐述一下。

消息(message)是表达信息的形式,是通信系统中传输的具体对象。消息的形式是多样的,它包括符号、文字、语音、数据、图像、视频等。

信息(information)是消息所包含的内容。例如,每天的天气预报是一种消息,预报中告知某日某时的真实天气情况如何,就是该消息所包含的“信息”,即消息的含义。同一种信息的内容可用不同形式的消息来表达。例如,天气预报可用文字消息来表达,也可用语音消息来表达。

信号(signal)是传播消息的一种载体(例如一种随时间变化的波形)。电(光、声)通信中,消息的自然形式必须转换成电(光、声)信号形式以后才能进行传递和识别。

消息有可能包含丰富的信息,但也可能包含的信息甚少,若这种信息并未给人们带来新的知识,那么这种消息所包含的信息实际等于零。所以信息是给人们带来新知识的消息,消息是外壳,信息是消息的内核。

1.3.2 信息的度量方法

1. 信息量

在通信系统中, 传输信息的多少可以采用信息量来度量, 信息量的大小取决于信息内容消除人们认识的不确定程度。比如, 在炎热的夏天, 天气预报说“明天下雪”, 我们一定会感觉很惊讶, 因为这一事件发生的概率极小; 反过来如果预报说“明天 37 摄氏度”, 我们就觉得不足为奇了。相比这两条消息, 第一条消息的不确定性更大, 它提供给我们的信息量也更大。

由此可见, 消除的不确定程度大, 则发出的信息量就大; 消除的不确定程度小, 则发出的信息量就小。如果事先就确切地知道消息的内容, 那么消息中所包含的信息量就等于零。

事件的不确定程度可以用其出现的概率来描述, 所以我们可以利用概率来度量信息: 消息出现的概率越小, 则消息中包含的信息量就越大。

设某消息发生的概率为 $P(x)$, 该消息中所包含的信息量为 I , 则信息量和概率的关系可定义如下:

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-8)$$

信息量的单位与对数的底数 a 有关。当 $a=2$ 时, 信息量的单位为比特(bit); 当 $a=e$ 时, 信息量的单位为奈特(nit); 当 $a=10$ 时, 信息量的单位为哈特莱(Hartly)。

例 1-1 已知二进制信源码元“0”和“1”出现的概率分别为 $1/4$ 和 $3/4$, 试求“0”和“1”的信息量各为多少。

解 “0”的信息量为

$$I_0 = -\lg \frac{1}{4} = 2(\text{b})$$

“1”的信息量为

$$I_1 = -\lg \frac{3}{4} = 0.412(\text{b})$$

从这个例题可以看出, 码元出现的概率越小, 信息量越大。

2. 平均信息量

1) 离散信源的平均信息量

设一个离散信源是由 M 个符号组成的集合, 其中每个符号 $x_i (i=1, 2, \dots, M)$ 按一定的概率 $P(x_i)$ 独立出现, 即

$$\begin{bmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_M \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_M) \end{bmatrix}$$

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