



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理

张力军 钱学荣 张宗橙 曹士珂 编著



高等教育出版社
Higher Education Press

TN911/118

2008



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理

张力军 钱学荣 张宗橙 曹士珂 编著



高等教育出版社
Higher Education Press

内容简介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,系统深入地分析了通信系统的模型、基本原理和性能,包括模拟通信系统和数字通信系统,并以数字通信系统为主。从通信信号传输的角度主要介绍传输信号、调制、均衡和最佳接收内容,从信息传输的角度主要介绍信源和信源编码、信道容量和信道编码等内容。

全书共分 10 章,包括绪论、随机过程、模拟调制系统、数字基带传输系统、二进制数字带通传输系统、改进的数字带通传输系统、信源与信源编码、信道容量与信道编码、多径衰落信道上的数字信号传输和扩频通信系统。

本书内容和概念的表达清晰易懂,对理论的分析由浅入深、条理清楚,重在讲清原理和分析方法,物理概念与必要的理论推导相结合,减少冗长的推导,可读性好。

本书可作为高等院校通信工程、信息工程、电子工程和其他相近专业本科生的教材,也可作为通信工程技术人员和科研人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/张力军等编著. —北京:高等教育出版社,
2008.6

ISBN 978 - 7 - 04 - 024357 - 4

I. 通… II. 张… 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(2008)第 057882 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京地质印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 26.5
字 数 650 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 6 月第 1 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 32.90 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24357 - 00

Higher Education Press

前言

“通信原理”是通信与电子信息类专业的一门重要的专业基础课。多年教学实践经验表明,“通信原理”课程内容具有“物理中的数学,数学中的物理”的特点,本书系统深入地分析了通信系统的模型、基本原理和性能,包括模拟通信系统和数字通信系统,并以数字通信系统为主。从通信信号传输的角度主要介绍传输信号、调制、均衡和最佳接收内容,从信息传输的角度主要介绍信源和信源编码、信道容量和信道编码等内容。在编写本教材时,力求概念表达清晰易懂,对理论的分析由浅入深、条理清楚,重在讲清原理和分析方法,物理概念与必要的理论推导相结合,减少冗长的推导,便于阅读。使用本书的读者应具备高等数学、线性代数、概率论与随机过程、信号与系统等基础知识。

第1章主要介绍通信技术的发展、通信系统的组成与分类、通信信道及其数学模型和通信系统的性能评价。

第2章结合通信系统性能分析需要,主要论述窄带高斯过程、余弦波加窄带高斯过程和循环平稳过程,以及平稳随机过程通过线性系统。

第3章主要介绍模拟调制(幅度和角度调制)的原理和性能分析比较,以及频分复用原理。

第4章介绍数字基带传输信号码型和波形(包括部分响应信号),根据二进制基带传输系统的等效模型,分析影响系统性能的损伤因素,采用联合最佳化的分析法,导出最佳传输系统的结构和最佳接收机的性能,其中还介绍了准匹配滤波器与匹配滤波器的比较,以及信道自适应均衡、符号同步等内容。

第5章介绍了基本的二进制数字调制方式的基本原理和性能分析,还采用综合法由最佳接收准则导出二进制数字调制系统的最佳接收机的结构和性能。

第6章在前一章的基础上论述 M 进制的数字调制方式的基本原理和性能分析,还论述了适合无线信道传输的连续载波相位调制和有效性高的多载波调制与正交频分复用(OFDM)。

第7章介绍了信息论的基本概念和结论,介绍了无记忆和有记忆两种离散信源无损编码的典型方法。接着围绕模拟信源的量化、编码进行了讨论,介绍了标量量化方法和矢量量化概念,对波形编码特别是PCM码作了论述,并简要介绍了预测编码、变换编码和模型基编码的基本情况,最后介绍了数字信号的时分复用。

第8章的前三节是信道和编码的基本理论,包括典型的信道模型、信道容量计算以及信道编码定理。接着以差错控制编码发展的历史轨迹为顺序,以利用冗余度和噪声随机化为基本思路,着重介绍了分组码、卷积码的编码译码方法,还介绍了TCM码和级联码基本概念。

第9章主要介绍无线通信的基础性知识,包括无线信道的特性和多径衰落信道的分类,在频

率非选择性慢衰落信道上二进制数字调制信号传输性能,抗信道衰落的分集技术原理和应用等。

第10章论述了第三代移动通信中常用的扩频通信基本原理,几种扩频方式(直接序列、跳频、跳时和混合扩频等)的原理和性能,还介绍了常用的扩频序列。

本书编著者有:第1、9章 张力军;第2、3章 曹士珂;第4章 曹士珂、张力军;第5、6、10章 钱学荣;第7、8章 张宗橙。张力军负责全书统稿。东南大学毕光国教授仔细审阅了全书,并提出了十分宝贵的意见。在本教材的编写过程中,得到了南京邮电大学校领导的大力支持,徐澄圻教授、郑宝玉教授和宋荣方教授提出了许多建设性的意见。南京邮电大学通信与信息工程学院2006级研究生魏松铎、吴水芳、刘海丽、尹进森、梁耸、任德云以及王键等为制作书稿中的插图做了大量的工作。高等教育出版社为本书出版和提高出版质量做了很多努力。在此一并表示诚挚的谢意。

本书为教育部普通高等学校“十一五”国家级规划教材并得到2007年江苏省高等学校立项精品教材项目的资助。

本书可作为通信工程、信息工程、电子工程和其他相近专业本科生的教材,也可作为通信工程技术人员和科研人员的参考书。

限于水平,加之时间比较仓促,书中难免有缺点和错误,敬请读者不吝指正。编著者 E-mail:zhlj@njupt.edu.cn。

编著者

2008年2月

于南京邮电大学

目 录

第1章 绪论	1	3.2 幅度调制系统	40
1.1 通信技术发展简介	1	3.2.1 标准调幅系统(AM)	40
1.2 通信系统的组成与分类	3	3.2.2 双边带调制系统(DSB)	49
1.2.1 通信系统的组成	3	3.2.3 单边带调制系统(SSB)	52
1.2.2 数字通信系统	5	3.2.4 残余边带调制系统(VSB)	56
1.2.3 通信系统的分类	7	3.3 角度调制系统	58
1.3 通信信道及其数学模型	7	3.4 模拟调制系统的性能比较	65
1.3.1 信道的损伤	8	3.5 频分复用	66
1.3.2 三种类型常用信道	9	3.6 本章小结	69
1.3.3 信道的数学模型	10	习题	69
1.4 通信系统的性能评价	11	第4章 数字基带传输系统	72
习题	14	4.1 引言	72
第2章 随机过程	15	4.2 常见数字基带信号	74
2.1 引言	15	4.3 线路编码	79
2.2 随机过程的统计特性	15	4.4 数字信号功率谱	84
2.3 平稳的随机过程	17	4.5 基带传输系统的分析	90
2.4 高斯随机过程	20	4.6 无码间干扰的基带传输特性	94
2.5 平稳随机过程的功率谱	22	4.6.1 带限信道的无码间干扰条件: 奈奎斯特准则	94
2.6 窄带随机过程	28	4.6.2 升余弦滤波器	96
2.7 余弦波加窄带高斯过程	31	4.6.3 无码间干扰基带数字传输系 统的性能	98
2.8 循环平稳的随机过程	34	4.7 无码间干扰基带传输系统性能 的最佳化	101
2.9 平稳随机过程通过线性系统	35	4.7.1 匹配滤波器	101
2.10 本章小结	36	4.7.2 最佳接收机及其性能	108
习题	37	4.7.3 准匹配滤波器及实际接收机	110
第3章 模拟调制系统	39	4.8 最佳基带传输系统	113
3.1 引言	39		

4.8.1 理想信道下的最佳基带传输系统	113
4.8.2 非理想信道的最佳基带传输系统	114
4.9 部分响应系统	115
4.9.1 双二进制部分响应系统	117
4.9.2 变型双二进制部分响应系统	122
4.9.3 单极性基带传输的部分响应系统	125
4.9.4 一般的部分响应系统	127
4.10 信道均衡	130
4.10.1 峰值失真准则和迫零算法	132
4.10.2 均方误差准则和 LMS 算法	135
4.11 符号同步	138
4.11.1 早迟门同步法	139
4.11.2 最小均方误差同步法	140
4.12 本章小结	141
习题	143
第 5 章 二进制数字带通传输系统	146
5.1 引言	146
5.2 二进制数字调制原理	148
5.2.1 二进制幅移键控调制(2ASK)	148
5.2.2 二进制频移键控调制(2FSK)	152
5.2.3 二进制相移键控调制(2PSK 及 2DPSK)	158
5.2.4 载波同步方法	162
5.3 二进制数字带通信号常规解调性能	167
5.3.1 二进制幅移键控调制系统常规解调性能	167
5.3.2 二进制频移键控调制系统常规解调性能	172
5.3.3 二进制相移键控调制系统常规解调性能	175
5.3.4 二进制数字带通系统常规解调性能比较	179
5.4 二进制数字信号的最佳接收及其性能	181

5.4.1 最佳接收的概念	181
5.4.2 最佳接收原理和准则	182
5.4.3 二进制信号最佳接收机的结构	184
5.4.4 二进制信号最佳接收机的性能分析	186
5.4.5 二进制带通信号的最佳接收机结构与性能	190
5.4.6 最佳接收机与相干接收机的性能比较	194
5.5 本章小结	195
习题	196

第 6 章 改进的数字带通传输系统

6.1 引言	199
6.2 多进制数字带通传输系统	199
6.2.1 M 进制幅移键控调制(MASK)	200
6.2.2 M 进制频移键控调制(MFSK)	204
6.2.3 M 进制相移键控调制(MPSK 及 MDPSK)	207
6.2.4 三种多进制数字带通系统的性能比较	218
6.2.5 偏移 QPSK	218
6.2.6 振幅相位二维联合调制(APK)	223
6.3 连续载波相位调制	229
6.3.1 连续相位调制的 FSK	229
6.3.2 最小移频键控(MSK)	230
6.3.3 高斯最小移频键控(GMSK)	236
6.4 多载波调制与正交频分复用	238
6.5 本章小结	243
习题	244

第 7 章 信源与信源编码

7.1 信源的数学模型	245
7.2 信息量与熵	246
7.3 离散信源编码	249
7.3.1 离散无记忆信源的编码	249
7.3.2 平稳离散信源的编码	253
7.4 模拟信源量化	255

7.4.1 标量量化	256	8.5.4 RS 码	303
7.4.2 矢量量化	258	8.6 卷积码	304
7.5 模拟信源的编码技术	258	8.6.1 卷积码的基本概念和描述方法	304
7.5.1 波形编码	258	8.6.2 卷积码的最大似然译码——维特比算法	309
7.5.2 预测编码	263	8.6.3 卷积码的性能限与距离特点	315
7.5.3 变换编码	264	8.7 网格编码调制(TCM)	317
7.5.4 模型基编码	267	8.8 级联与迭代译码	322
7.6 数字信号的时分复用	269	8.8.1 串行级联码	322
7.7 本章小结	272	8.8.2 乘积码	324
习题	273	8.8.3 级联码的迭代译码	325
第 8 章 信道容量与信道编码	275	8.9 本章小结	327
8.1 信道模型	275	习题	328
8.1.1 二进制对称信道(BSC)	276	第 9 章 多径衰落信道上的数字信号传输	330
8.1.2 离散无记忆信道(DMC)	276	9.1 引言	330
8.1.3 离散输入、模拟输出信道	277	9.2 多径衰落信道的数学模型与分类	330
8.1.4 模拟输入、模拟输出的波形信道	277	9.2.1 无线信道的特性	330
8.1.5 突发差错编码信道模型	278	9.2.2 信道的数学描述	334
8.2 信道容量	278	9.2.3 信道的分类	337
8.2.1 DMC 信道的容量	279	9.2.4 多径衰落信道的模型	339
8.2.2 离散输入、模拟输出无记忆信道的容量	280	9.3 在频率非选择性慢衰落信道上二进制数字信号传输	342
8.2.3 带限波形信道的容量	281	9.4 分集技术	345
8.3 信道编码的基本原理	283	9.5 频率选择性慢衰落信道的 RAKE 接收机	348
8.3.1 信道编码定理	283	9.6 本章小结	350
8.3.2 实现可靠通信的途径	284	习题	351
8.4 线性分组码	286	第 10 章 扩频通信系统	352
8.4.1 线性分组码基本概念	286	10.1 引言	352
8.4.2 矢量空间与码空间	288	10.2 扩频通信的基本原理	352
8.4.3 分组码的最小距离与纠错能力	291	10.2.1 扩频通信的定义	352
8.4.4 伴随式与译码	293	10.2.2 扩频通信的理论基础	353
8.4.5 完备码	294	10.2.3 扩频通信的主要特点	355
8.5 循环码	296	10.3 扩频通信系统模型	357
8.5.1 循环码构造	296		
8.5.2 CRC 码	300		
8.5.3 BCH 码	302		

10.4 直接序列扩频	358	10.8.2 伪随机序列	381
10.4.1 直扩系统组成	358	10.9 本章小结	390
10.4.2 直扩系统的信号分析	360	习题	391
10.4.3 扩频通信系统的主要性能指标	363	附录 A 带通信号与带通系统	393
10.4.4 直扩系统的优缺点	364	附录 B 数字基带发送信号自相关函数 $R_u(\tau)$ 的推导	399
10.5 跳频扩频	365	附录 C 几种典型基带脉冲波形 $g(t)$ 及其幅度谱 $ G(f) $	401
10.5.1 跳频系统的组成	366	附录 D 矩形脉冲的理想低通准匹配滤波器 r_o/r_{MF} 的推导	404
10.5.2 跳频系统的信号分析	367	部分习题答案	406
10.5.3 跳频系统的处理增益及特点	370	参考文献	412
10.6 跳时扩频 (Time Hopping, TH)	371		
10.7 混合扩频	372		
10.7.1 DS/FH 方式	373		
10.7.2 DS/TH 方式	375		
10.7.3 TH/FH 方式	376		
10.7.4 各种扩频方式的比较	377		
10.8 常用的扩频序列	377		
10.8.1 正交编码	378		

第 1 章

绪 论

在现代社会中,小到个人家庭、大到一个国家和世界各国各组织之间都离不开信息和信息的交互。人们每天打电话、发短信,听无线电广播新闻和音乐,看电视节目和球赛实况,上网查找资料、聊天和网络游戏;政府的运作,企业的商业信息往来,应急部门的调度指挥,军事作战指挥等都需要利用各种通信工具、通信网络和计算机互联网。当今,通信网和互联网已成为社会的神经系统,无时无刻不在传递着大量的信息。各种类型的信息,如话音、数据、文本、图像、视频等,都是以电信号的形式在网络中传送的。不论何种网络(包括互联网在内)传送电信号都是建立在通信系统的传输功能基础上的,通信系统是各种网络的物理基础。通信系统的任务就是可靠高效地传送电信号形式的信息。

本章简要介绍通信技术的发展,通信系统的组成与分类,通信信道及其数学模型,通信系统的性能评价等有关通信系统的一些基本概念和术语。

1.1 通信技术发展简介

电信号的通信系统发展至今已有一百多年的历史。通信系统是由电子元器件构成的。通信技术的发展与电子技术有着密切的关系。通信系统技术设备与计算机一样经历了电子管、晶体管、集成电路和大规模集成电路和计算机技术等更新换代的发展阶段。在这一发展过程中,通信理论研究、实验、技术研发和系统应用不断地互动和相互促进。

19 世纪 30 年代至 19 世纪末的 80 年中,是电报和电话发明阶段。莫尔斯发明了有线电报,马可尼发明了无线电报,贝尔发明了电话,麦克斯韦提出了电磁场方程。

20 世纪初至 20 世纪 30 年代末的 40 年中,发明了真空管,阿姆斯特朗发明了调频技术,由此推动了调幅和调频广播及电子管收音机的迅速发展,这是无线通信的重大进展。此后,电视广播先后在英国和美国开播。此阶段,三路明线载波机投入使用,发明了脉冲编码调制原理。

20 世纪 40 年代初至 20 世纪 50 年代末的 20 年中,第二次世界大战推动了雷达和微波通信的发展。发明了晶体管、激光和集成电路,大大推动了通信设备的小型化,加快了新的复杂的通信设备研制,如对称电缆、同轴电缆和海底电缆多路载波电话,微波通信、卫星通信,彩色电视、脉冲编码调制通信设备等开始迅速发展起来。在通信理论上,1948 年香农提出了信息论奠定了统计通信理论基础。在此阶段数字通信理论和技术开始快速发展。

20 世纪 60 年代初至 20 世纪 70 年代末的 20 年中,大规模集成电路、通信专用集成电路和低损耗光纤研制成功,程控交换机、光纤通信系统、基于分组交换的数字数据通信系统、商用卫星通信系统迅速发展。市话网、长途电信网和计算机网络迅速发展起来。

20 世纪 80 年代以来的 20 多年中,超大规模集成电路研制成功,微电子技术和器件发展迅速,有线通信和固定通信网、计算机通信网以及移动无线通信网发展极其迅速。

有线通信逐步被光缆所取代,规模庞大的固定通信网为广大用户提供包括话音、数据和宽带视频等多种电信业务,增值业务也迅速发展。综合业务数字网(ISDN)的提出和快速发展,实现了在现有的用户线上提供话音和数据综合业务。到 20 世纪 90 年代初又提出宽带综合业务数字网(B-ISDN)和异步转移模式(ATM)以适应不断增长的宽带业务。

宽带固定通信网的快速发展为计算机网络的发展和洲际互联奠定了可靠的物理基础。在此期间,微电子技术和光储存介质技术的发展推动了个人计算机性能不断升级,视窗操作系统功能也不断增强,价格不断下降,个人计算机的迅速普及和广泛应用,极大地推动了基于 TCP/IP 协议的计算机互联网(简称 IP 网络)的飞速扩展,并对通信网的技术和业务产生了越来越深刻的影响。

基于 TCP/IP 协议的 IP 网络的参考模型结构分为五层:物理网络层、网络接口层、互联网层(IP 层)、传输层(TCP 层)和应用层。IP 层提供无连接分组传送服务,具有“尽力传送”的特点。TCP 层提供可靠的传输服务。应用层提供用户所需的各种服务。IP 网络通过网络接口层与底层各种异构物理网络相连接(包括各种固定和移动无线网络),形成全 IP 网络。也就是说,IP 协议便于各种异构网络互连,采用统一的 IP 地址,IP 数据报格式、路由协议和传输控制协议进行通信,在应用层上提供各种业务。由于 IP 网络简单可靠而实用,网络的兼容性和应用的扩展性很强,因此具有强大的生命力。IP 网络将成为下一代网络(NGN)承载网。十多年来,互联网快速发展,已遍及世界各个角落,互联网正在以强劲技术和市场动力发展成为世界公共统一的通信大平台。互联网不仅为人们提供丰富多彩的信息服务,而且在技术上不断地改进和提高服务质量(QoS),将为人们提供电信级质量的话音、视频和多媒体通信服务。

移动无线通信的发展早期可以追溯到 20 世纪的 20 年代,那时由于技术的原因,功能简单,性能较差,只是在短波的几个频段上实现小容量的专用移动通信系统。从 20 世纪 40 年代到 20 世纪 60 年代,由于技术的进步,各种移动通信系统相继建立,实现了移动通信系统与公众电话网的连接,用户不断增加。因为系统的频率资源有限,系统的容量很小,限制了移动通信用户和业务的发展,但这也推动了移动通信技术的研究,研究的重点是开发新频段和提高频谱利用率的新技术。到 20 世纪 70 年代末出现了蜂窝式移动通信系统,大大提高了系统的容量。在 20 世纪 80 年代中,移动电话的用户发展速度很快。但这种通信系统采用的是模拟调制技术,容量仍然不能满足市场需求,业务能力低,缺乏安全性保障。20 世纪 80 年代开始发展数字无绳电话系统,与此同时数字蜂窝移动电话系统也快速发展起来。移动电话(手机)已成为老百姓的常用的通信工具。与模拟系统相比,数字移动通信系统更能满足大容量、高质量、智能化和综合化等要求。目前广泛使用的数字移动通信系统是基于时分多址(TDMA)的 GSM 系统和基于码分多址(CDMA)的 IS-95 系统。

移动通信的第一代模拟通信网已被第二代 GSM 数字移动通信网取代,目前正向第三代扩频码分多址(CDMA)演进,第四代移动通信的理论、技术和标准的研究正在加紧进行,新的高宽带和超宽带的移动无线通信系统将成为新一代移动无线网络的基础。

与此同时,移动数据网也随着移动通信网快速发展。移动数据网有电路交换和分组交换两种交换方式,其核心网具有相应的外部接口分别与 PSTN、ISDN、PDN 和互联网相连,可以提供基于电路交换和分组交换的数据业务。同时,各种无线网络(如无线局域网 WLAN 和 HIPERLAN、无线个域网 WPAN、无线 Ad Hoc 网络等)都采用 IP 技术与互联网相连。因此,各种类型的移动网和无线网成为互联网的无线扩展,或互联网的无线接入网,使得它们的各种移动和无线终端可以通过无线方式接入互联网,从而可以获得互联网的各种信息和服务,并能在互联网平台上进行通信。这种扩展了的互联网称为移动互联网或无线互联网。

在移动互联网中,移动网可看做固定互联网的无线扩展。这种“扩展”包含两层含义:形式上的扩展和内容上的扩展。前者是指移动网的网络结构和基础设施与固定互联网互连互通,互联网信息服务的范围扩展到移动网无线覆盖的区域;而后者是指固定互联网信息服务类型、内容和质量扩展到无线覆盖的区域。由于移动网是无线网络,与固定互联网相比是异质异构网络,网络技术发展具有渐进性和阶段性,因此,固定互联网的无线扩展(形式和内容两方面)也是逐步演进的,移动网的手机用户不可能很快得到与固定互联网类型、内容和质量完全相同的信息服务。

在现阶段的无线扩展中,移动网的三个组成部分(核心网、无线接入网和移动终端)都存在着技术上的障碍和限制:核心网的协议体系与互联网之间存在的差异,无线接入网中无线链路速率的限制,移动终端资源和处理能力的限制。因此,必须在移动网和互联网之间引入一种“适配”机制,才能使手机可以获得互联网的信息服务。例如,WAP(无线应用协议)就是用来解决这个问题。WAP 协议支持底层各种类型电路交换和分组交换的移动网和无线网,但网络需增加一个 WAP 网关,用来进行协议变换和面向手机的代码变换。这样人们使用 WAP 手机就可以获得互联网某种程度的信息服务。

随着核心网的技术发展和向全 IP 网络演进、无线通信技术的发展和无线链路速率的提高、采用新技术手机的功能增强并向电脑化发展,上述的障碍和限制将逐步缩小和消失,原有的适配功能将弱化或提出新的适配要求。手机通过移动互联网可以获得越来越多的固定互联网上丰富多彩的信息服务,在信息服务的类型、内容和质量上逐步接近固定互联网。

近几年来,制造商陆续推出的功能强大的智能手机支持并可获得网络彩信(MMS)和视频流媒体服务,反映了移动互联网新的技术发展趋势。智能手机将使整个手机产业发生全新的变化,智能手机向电脑化方向发展的同时,将整合进 PDA、数码相机、游戏机、MP3 音乐播放机及其他消费类电子产品的功能。根据用户个性化需求,智能手机将向智能电脑手机、智能商务手机和智能娱乐手机等三个主要方向发展。

1.2 通信系统的组成与分类

1.2.1 通信系统的组成

通信系统的作用就是将信(息)源产生的信息传送到目的地收信者。现代通信系统都是电

子系统,由电子器件和芯片装配而成,因此在通信系统中信息的传送是以电信号形式进行的。通信系统的基本组成框图如图 1.2-1 所示,系统由信源、发送机、信道、接收机和收信者等五个部分组成。信源产生的信息可以是声音(如话音、音乐等)、数据(包括各种电的或非电物理量测试数据)、文本文件、图像(静止图像)、影像(活动图像)等。对信源产生的非电物理量信息必须先通过相应的变换器变换成电信号形式。例如,用话筒作为声电变换器,数码相机将图像变换成图像格式的文件,摄像头将影像变换成电信号,还可以用不同的传感器将位置、速度、温度、压力、光强等非电物理量变换成电信号。

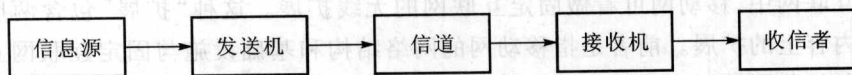


图 1.2-1 通信系统的基本组成框图

收信者可以是人,也可以是一个大控制系统(如遥控、遥测系统)中的一个子系统,通信系统也是这个大系统中的一个子系统。如果收信者是人,那么,接收到的电信号形式的信息,必须再通过相应的变换器变换成人的感觉器官(耳、眼等)可以接受的形式(声音、图像)。但如果收信者是一个电子子系统,那么接收到的电信号形式的信息就可以直接送入到该子系统的接口。

在信源和收信者之间是发送机、信道和接收机,这是通信系统核心的三个基本组成部分。它们的基本功能简要介绍如下。

发送机,主要功能是将信源电信号形式的信息变换成适合信道传输的发送信号。对这种变换最基本要求,一是发送信号频率范围要符合信道的频谱配置(大多数实际应用的通信系统都有相应的国际和国家规范和标准),二是该信号在信道传输过程中应该具有足够能力抗信道噪声和干扰,以便在接收端还原的信息电信号的“质量”符合要求。发送机的这种变换功能是通过调制器对一载波调制来实现的。根据输入调制器的信号形式是模拟和数字的不同,分为模拟调制和数字调制,并由此将通信系统划分为两种基本类型—模拟通信系统和数字通信系统。

模拟通信系统基本组成框图与图 1.2-1 相似,其中的信源是模拟信源,发送机的主要功能部件是模拟调制器,接收机的主要功能部件是模拟解调器。信源产生的模拟信号对正弦载波信号的幅度、频率和相位进行调制,分别称为幅度调制(AM)、频率调制(FM)和相位调制(PM)。这三种调制分别通过载波的幅度、频率和相位来携带信源的信息,通过信道传送到接收机。日常使用的收音机调幅广播和调频广播就是一种典型的模拟调制通信系统。

信道,是通信的物理媒质。发送机输出的已调制信号经信道传输后到达接收机的输入端,成为接收机的接收信号。信道可以分为有线信道(包括铜线、双绞线、对称电缆、同轴电缆、光缆等)和无线信道(通常根据传输信号的波长或频率来划分,如中波、短波、微波等)两大类。

因为真实的物理信道都不是理想的,因此都存在各种不利因素给所传输的信号带来损伤。所有信道最基本的损伤是热噪声,在无线信道中还可能含有其他噪声,如人为噪声、大气噪声和宇宙噪声。

另一个重要的损伤因素是信道的线性和非线性失真,使传输波形恶化或产生线性和非线性码间干扰。在一些复杂的多用户通信系统中,当多用户信号在同一信道中传输时,还可能产生各用户信号之间的相互干扰。信道各种类型的失真和干扰都是影响信道传输质量重要的损伤因素。

信道对传输信号损伤的最终后果是通信系统的性能下降,模拟通信系统的输出信噪比下降,数字通信系统的误码率上升。

接收机,主要功能是从含有噪声和干扰的接收信号中恢复信源的信息,也就是说从收到含有噪声和干扰恶化的已调制正弦信号的幅度、频率和相位中提取(卸载)所含的信息,这种功能称为解调。解调器也相应地划分为模拟和数字两种基本类型,通常也将数字解调称为“检测”。通信系统的抗噪声和干扰的能力与调制的类型和方式有密切关系,一般数字调制优于模拟调制,调频优于调幅。

在模拟通信系统的接收机中,模拟解调器进行幅度解调(在 AM 广播收音机中称为检波)、频率解调(也称为鉴频)和相位解调(也称为鉴相)。

下面着重介绍数字通信系统。

1.2.2 数字通信系统

数字通信系统的基本组成框图如图 1.2-2 所示。与图 1.2-1 所示框图比较,在发送机中的功能部件除了数字调制器外,增加了信源编码器和信道编码器;在接收机中除了数字解调器外,相应地增加了信道译码器和信源译码器。在数字通信系统中,信源产生的信息可以是离散的二进制数字信息,例如,计算机的数据或其他数字终端设备输出的数据。信源产生的信息也可以是由连续的模拟信息通过模数转换而成的数字信息。例如,连续的话音信号可以通过抽样、量化和编码转换成二进制数字信号。通常,模拟信源信息可能含有大量冗余信息,信源编码器的作用就是进行数据压缩,尽量减少冗余信息,以尽可能少的二进制数字来表示信源的信息,这样可以提高信道的利用率。



图 1.2-2 数字通信系统(数字调制系统)的基本组成框图

信道编码器是针对信道对传输信号的损伤而设置的一个功能部件。信道的损伤造成数字通信系统接收机输出的误码率增加,使信息的恢复受到恶化。信道编码器的作用就是通过对信息序列进行编码的方式来提高接收机识别差错(检错)和改正差错(纠错)的能力,从而降低误码率改善恢复信息的质量。信道编码的基本思想是,对信源的二进制数字信息序列以一种受控方式引入一定的冗余度,来提高信息序列抗信道损伤的能力,接收机中的译码器在去除受控冗余度的译码过程中有一定的检错和纠错能力。举一个简单的例子,一个信源产生的信息码元 0 或 1(也统称为比特,bit),若直接以二进制码元序列传送,信道损伤造成一比特码元的差错概率为 p ,设 $p = 0.1 = 10^{-1}$ 。若采用简单的重复码的“受控方式”来进行信道编码,约定的“受控方式”(即编码规则)是:用 3 比特的重复码组来表示信息比特,即用 000 码组表示信息比特 0,用 111 码组表示信息比特 1;并约定译码规则是:采用“少数服从多数”进行译码,亦即,3 比特中按其中相同的

2 个比特译码。因此,只有在 3 个比特中同时至少发生 2 个比特差错,才会错译。这样,信息比特差错概率为 $(p^2 + p^3) = 0.011 \approx 10^{-2}$,可见信息比特差错率降低了一个数量级,其原因是在 3 比特重复码中引入了 2 个受控冗余比特的缘故。复杂的编码方式可以是将 k 个信息比特变换成 n 比特码组 ($n > k$),这时编码引入的冗余度可用比值 n/k 来度量,编码效率(码率)为 k/n 。

信道编码由于引入了冗余度而降低了系统的差错率,亦即改善了系统的可靠性性能。但与此同时也带来负面影响。因为,在信息比特速率不变情况下,要求信道传输速率高于信息速率,这就要求占用更多的信道频率资源,信道的频带利用率下降,系统的有效性降低。所以,信道编码提高系统可靠性的代价是牺牲系统的有效性。

数字调制器的功能是以数字信号序列来调制载波的幅度、频率和相位,输入调制器的数字信号序列称为基带数字信号。最基本的数字调制是二进制数字调制,其基带信号是二进制数字序列。二进制数字信号 0 和 1 通过调制映射成载波的两个不同的幅度或频率或相位,分别称为幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)。复杂的数字调制是 M 进制的。在 M 进制(元)调制中,基带每 k 个二进制比特组映射一个 M 进制的符号(symbol,或称码元),该符号有 $M = 2^k$ 个不同的取值,再通过调制映射成载波的 M 个不同的幅度或频率或相位(也可以是幅度和相位的组合),即 M 个不同的发送波形。若基带的信息速率(比特率)为 R_b 比特/秒(bit/s),则信道的传输速率也就是符号速率(或码元速率)为 $R_s = R_b/k$,单位为符号/秒,或波特(baud)。可见, M 进制数字调制系统中,发送信号在信道中的传输速率(符号速率)低于基带的信息速率(比特率),因此相应减少了对占用信道带宽的要求,从而提高了信道的频带利用率,也就是提高了系统的有效性。但系统为此也付出了代价。例如, M 进制数字调幅信号的幅度电平数多于基带信号的 2 个电平,为不降低可靠性需保持相邻两个幅度电平之间距离不变,必须提高发送信号的功率;倘若保持发送功率不变,势必压缩多电平之间的间距,使得可靠性下降。

在接收机中,数字解调器的解调功能是调制的逆过程,从接收信号波形的幅度、频率和相位中提取信息,即解调为二进制数字序列(如果是 M 进制的,则需逆映射为二进制序列),该序列中的码元是发送二进制数字信息码元的估计值,其中可能会有差错。信道译码器对该序列进行检错和纠错,减少或消除由于信道损伤引起的差错,同时去除受控冗余度。信道译码器输出二进制数字信息序列,再通过信源译码器还原成原始的信息比特序列。

在图 1.2-2 所示的数字通信系统中除了图中所表示的信源编码/译码,信道编码/译码,数字调制/解调等基本功能外,在实际系统中还包括两个辅助功能:同步和保密。同步功能对保证数字通信系统正常工作是必须的,它包括载波同步和符号同步。载波同步就是使接收机解调器的本地载波与接收信号中的载波保持同频同相。而符号同步就是使接收机的定时抽样脉冲与接收的信息符号序列在时域上保持同频同相。载波同步和符号同步对数字通信系统获得最佳的接收性能是至关重要的。保密功能是根据用户对信息安全的需要而设置的:在发送端用加密器对数字信息序列进行加密,在接收端再用相应的解密器进行解密,以增强信息序列在传输过程中的安全性。

图 1.2-2 所介绍的数字通信系统是通过数字调制的方式将基带数字信号序列变成带通信号送到信道中传输。这种传输基带数字信号的方式称为带通(或频带)数字传输。该数字通信系统也称为数字调制系统,该系统中的信道是带通型信道。

在数字通信系统中,如果信道是低通型的,那么传输基带数字信号就不必用载波来调制成带

通信号,而是直接在基带传输。这种传输方式称为基带数字传输。基带数字传输系统的基本组成如图 1.2-3 所示。基带数字传输系统的功能与数字调制系统中的基带部分相类似,因此基带系统也是研究数字调制系统的基础,同时数字调制系统也可以等效成基带系统来分析研究。

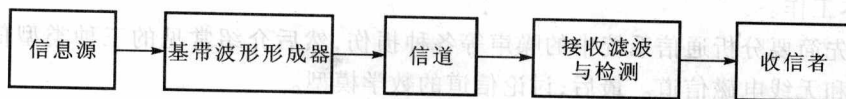


图 1.2-3 基带数字传输系统组成框图

1.2.3 通信系统的分类

上面根据输入调制器的信号形式是模拟和数字的不同,将通信系统划分为两种基本类型——模拟通信系统和数字通信系统。这两类系统都是用调制信号(模拟信号或数字信号)去调制单个正弦载波的幅度、频率和相位三个参数,因此它们又可分为调幅、调频和调相三种基本形式。在此基础上,还有复杂的数字调制方式,如多进制的数字调制,同时调制载波两个参数的组合调制,同时调制两个相位正交载波参数的正交调制(如正交幅度调制 QAM、正交相位调制 QPSK)。除了单载波和正交载波调制的数字调制外,还有更复杂的多载波调制。

上面介绍的调制方式都是连续的正弦波调制,它们大多用于公众通信网的传输系统。如公众广播和电视系统,公众数据通信、传真通信、卫星通信、微波通信、无线电台等。

除此之外,还有一种脉冲调制方式,也可分为脉冲模拟调制和脉冲数字调制两种基本类型。脉冲模拟调制就是用模拟信号调制脉冲的幅度、宽度和位置三个参数,分别称为脉幅调制、脉宽调制和脉位调制。而脉冲数字调制又包括脉码调制(PCM)、增量调制(DM)等类型。PCM 调制常用于市话,这种调制方式是对连续的话音信号进行抽样-量化-编码,将话音信号变换成编码的数字信号进行传输。脉冲模拟调制方式主要用于一些专用的遥测系统、光纤传输等系统中。脉冲数字调制方式主要用于民用和军用电话、可视电话、空间通信等系统中。

从 20 世纪 90 年代以来,微电子技术、计算机技术快速发展,与此同时数字通信理论和数字信号处理理论和技术的研究也快速发展并不断取得新的成果。采用集成芯片、数字信号处理、数字通信技术和软件技术的新的通信系统设备不断研制成功和应用。基于数字通信技术和系统的通信网与计算机网络正在从技术上和业务上走向相互融合,计算机互联网的普及和强劲发展的动力,以及两种网络技术研发的互动,成为数字通信技术和系统发展强大的驱动力,数字通信技术和系统已占据各种类型通信网主导地位,发展的趋势是将完全取代模拟通信技术和系统。例如,20 世纪末我国 TACS 制式的模拟移动通信网已被淘汰,现在运行的移动通信网都是数字移动通信网 GSM 和 CDMA 网络。

1.3 通信信道及其数学模型

信道是通信系统的一个重要的组成部分,任何实际的物理信道的频率资源都是有限的,而且

都存在噪声和干扰,它们对通信系统的传输信号造成限制和损伤。从通信信号和信息传输角度讲,通信系统及其各功能部件设计以及系统性能分析主要是针对信道的特性和损伤而进行。因此,了解和掌握通信信道特性和损伤是学习通信系统的一个重要的内容,也是通信系统研究和设计的一项基本工作。

本节,首先简要分析通信系统中的噪声等各种损伤,然后介绍常见的三种类型信道:有线信道、光纤信道和无线电磁信道。最后,讨论信道的数学模型。

1.3.1 信道的损伤

信道损伤是指通信系统信道中影响信号无失真传输的各种不利因素。信道的各种损伤因素都会损害通信系统的性能,使模拟通信系统的输出信噪比下降,使数字通信系统的误码率上升。概括地说,信道的损伤就是信道中的噪声和干扰。下面对信道的损伤进行简要分析。

1. 噪声

在通信系统中噪声是普遍存在的,噪声的来源有两大类,一类是来自通信系统内部,称为内部噪声;另一类噪声是来自通信系统的外部,称为外部噪声。不论噪声来自何处,人们在研究分析通信系统时,一般将噪声视为信道的一种损伤。

内部噪声主要是系统内部电子器件和导体中自由电子受热激励引起的随机运动而产生的,这种噪声也称为热噪声。热噪声主要来自于接收机中的前端放大器,它对接收机的输出信噪比产生最直接、最主要的影响。因为所有的通信系统都存在热噪声,因此热噪声是各种通信系统最基本的损伤。普通的电话信道在正常通信条件下,接收机的信噪比一般在 20 ~ 30 dB 范围内。

外部噪声包括大气噪声、人为噪声和宇宙噪声。大气噪声主要由雷电引起,故又称为天电噪声(干扰)。它具有突发冲击的特点,在低于 100 MHz 时,其场强与频率成反比,因此它对 AM 广播(540 kHz ~ 1.6 MHz)的影响,远远超过对 TV 和 FM 广播的影响。

人为噪声主要是工业干扰和邻台干扰。工业干扰由各种电器和电力网产生,如汽车发动机的电火花噪声,还有电钻、电焊、各种电子医疗器械、各种家用电器、高压输电线等。邻台干扰主要有同频邻台干扰和干扰台的干扰。这类噪声随时间和地点而变化,可比大气噪声强得多。城市比农村严重得多。

宇宙噪声来源于太阳(如太阳黑子爆炸)和宇宙中其他星球,这种噪声的频率范围在几兆赫到几吉赫。

热噪声、人为噪声、大气噪声都是加性噪声,因为在接收信号中这些噪声与传输信号的关系是相加的关系,这些噪声是独立存在的,与传输信号无关,发送机不发送信号时,接收机照样接收到信道的加性噪声。还有一类噪声称为乘性噪声,如脉冲编码调制中的量化噪声,又如移动无线信道是多径衰落信道(见第9章),其衰落对传输信号的影响相当于乘性高斯噪声。乘性噪声与传输信号的关系是相乘的关系,这些噪声不是独立存在的,而是伴随传输信号而出现的,无发送信号时也无乘性噪声可言。

2. 线性失真

信道的线性失真是由于信道的频率特性 $H(f)$ (包括幅频和相频特性)不理想而引起的。在模拟通信系统中,信道的线性失真会使传输信号的频谱失真,例如使传输的语音和图像信号失真,同时信道的相频特性不理想也会使接收机输出信噪比下降。在数字通信系统中,信道的线性