

通信系统原理

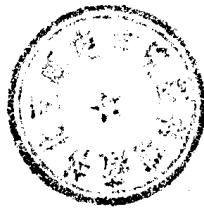
沈振元 聂志泉 赵雪荷
西安电子科技大学出版社

TONG XIN XI TONG
YUAN LI

TN914-43
S 459
0658493

通信系统原理

沈振元 聂志泉 赵雪荷



21113000663514

4027/01

西安电子科技大学出版社
1993

(陕)新登字 010 号

内 容 简 介

本书是在 1984、1988、1991 年通信工程学院出版的《通信系统原理》教材的基础上,经过近十年的本科生、大专生的教学实践进一步修改而成的。书中讲述现代通信系统的基本原理,主要包括模拟通信和数字通信,而以数字通信基础为主。全书共十一章,可分为四个部分:第一部分(第 1~3 章)为通信基础知识和数学基础,第二部分(第 4 章)为模拟通信系统,第三部分(第 5~9 章)为数字通信系统和模拟信号的数字化,第四部分(第 10、11 章)为信道编码原理和信息论基础。

本书最主要的特点是物理概念清楚、公式推导详细、通俗易懂、便于自学。本书每章均有例题、思考题和习题,并附有习题答案,因而便于教学。

本书既可作为通信专业大学本科和大专的教材,又可作为通信工程技术人员的参考书。

通 信 系 统 原 理

沈振元 聂志泉 赵雪荷 编

责任编辑 叶德福

西安电子科技大学出版社出版发行

陕西省大荔县印刷厂印刷

新华书店经销

开本 787×1092 1/16 印张 28 14/16 字数 687 千字

1993 年 10 月第 1 版 1993 年 10 月第 1 次印刷 印数 1—1 000

ISBN 7-5606-0232-0/TN·0073(课) 定价:14.85 元

前 言

这是一本根据通信专业教学大纲编写的“通信系统原理”教材,主要讨论数字和模拟通信系统的基本原理,但以数字通信系统为主。由于“编码技术”、“统计无线电技术”、“信息论基础”等单独开设了选修课,因此有关这些方面的内容在本教材中只作简要介绍。

本教材由绪论、确知信号分析、随机信号分析、模拟通信系统、数字信号的基带传输、数字载波调制、模拟信号的数字传输,同步原理,数字信号的最佳接收、信道编码原理、信息论基础等 11 章组成。

本教材是在中国人民解放军通信工程学院沈振元、聂志泉、赵雪荷、汪复兴编写的“通信系统原理”基础上进一步修改而成的。改编工作由沈振元、聂志泉、赵雪荷完成。改编过程中得到沈琪琪、朱德生、宋祖顺、谢佑兴、朱茂祥、张道顺、陆存乐等的关心和帮助。

改编时由于在内容上作了一些调整,版面字数上作了较大的压缩,因此难免有这样那样的问题,请读者给予指正。

编 者

1993 年 3 月

目 录

<p>第一章 绪论 1</p> <p>§ 1-1 通信系统的组成 1</p> <p> 一、通信的目的是传输消息 1</p> <p> 二、通信系统的组成和各部分作用 1</p> <p> 三、模拟信号与数字信号, 模拟通信与数字通信的区别与联系 2</p> <p> 四、三种通信系统模型 3</p> <p>§ 1-2 数字通信系统各部分作用和优缺点 5</p> <p> 一、数字通信系统中各部分的作用 5</p> <p> 二、数字通信系统的主要优缺点 7</p> <p>§ 1-3 通信系统的质量指标 7</p> <p> 一、模拟通信系统的质量指标 8</p> <p> 二、数字通信系统的质量指标 8</p> <p>§ 1-4 本教材的主要内容 11</p> <p>复习题 11</p> <p>第二章 确知信号的分析 13</p> <p>§ 2-1 信号和系统的分类 13</p> <p> 一、信号的分类 13</p> <p> 二、系统的分类 14</p> <p>§ 2-2 周期和非周期信号的频谱分析 15</p> <p> 一、周期信号付氏级数展开的三种表示式 15</p> <p> 二、典型周期信号的频谱分析 16</p> <p> 三、非周期信号的频谱函数——付氏积分 19</p> <p> 四、周期信号的频谱函数 22</p> <p> 五、常用信号的频谱函数 23</p> <p>§ 2-3 付氏变换的运算特性 26</p> <p> 一、付氏变换的运算特性 27</p> <p> 二、时间卷积定理及其应用 28</p> <p> 三、频率卷积定理及其应用 30</p> <p>§ 2-4 帕塞瓦尔定理和能量(或功率)谱密度 31</p> <p> 一、功率和能量的一般计算公式 31</p> <p> 二、帕塞瓦尔定理 33</p> <p> 三、能量谱密度 $G(\omega)$ 和功率谱密度 $P(\omega)$ 34</p>	<p> 四、信号带宽 B 35</p> <p>§ 2-5 信号通过线性系统和不失真传输条件 38</p> <p>§ 2-6 波形的相关 40</p> <p> 一、互相关函数和自相关函数 40</p> <p> 二、归一化相关函数和相关系数 44</p> <p> 三、相关函数与谱密度 [$G(\omega)$ 及 $P(\omega)$] 的关系 45</p> <p>小结 46</p> <p>复习题 48</p> <p>习题 48</p> <p>第三章 随机信号的分析 51</p> <p>§ 3-1 引言 51</p> <p>§ 3-2 随机事件与概率 51</p> <p> 一、事件和概率 51</p> <p> 二、复杂事件 52</p> <p> 三、条件概率与统计独立 52</p> <p> 四、概率的基本定理 52</p> <p>§ 3-3 随机变量与概率分布 53</p> <p> 一、随机变量的概念 53</p> <p> 二、概率分布函数和概率密度函数 53</p> <p> 三、多维随机变量和多维概率分布 54</p> <p> 四、几种典型的概率分布 55</p> <p>§ 3-4 随机变量的函数 57</p> <p>§ 3-5 随机变量的数字特征 57</p> <p> 一、数学期望 57</p> <p> 二、n 阶矩 58</p> <p> 三、两个随机变量的矩 58</p> <p>§ 3-6 随机过程的概念及其统计特性 59</p> <p> 一、随机过程的概念 59</p> <p> 二、随机过程的统计描述 60</p> <p> 三、随机过程的数字特征 62</p> <p>§ 3-7 平稳随机过程和各态历经性 63</p> <p> 一、平稳随机过程 63</p> <p> 二、各态历经性 64</p> <p>§ 3-8 高斯随机过程 65</p> <p>§ 3-9 平稳随机过程的功率谱密度及其与自相关函数的关系 66</p> <p>§ 3-10 随机过程通过线性系统 70</p>
---	--

§ 3-11 白噪声	73	§ 4-7 调频信号解调的门限效应	137
§ 3-12 通信系统中的噪声	75	§ 4-8 加重技术	139
一、噪声的分类	75	§ 4-9 频分复用 (FDM) 技术	140
二、起伏噪声	75	复习题	143
三、窄带高斯噪声	77	习题	144
§ 3-13 正弦波加窄带高斯噪声	81	第五章 数字信号的基带传输	147
§ 3-14 匹配滤波器	83	§ 5-1 数字基带信号传输系统的构成	
一、问题的提出	83	及各部分功用	147
二、匹配滤波器的传输特性	84	一、数字基带信号传输系统的方框图	147
三、匹配滤波器的性质	85	二、各部分的功用	147
小结	88	三、基带数字信号传输的应用	150
复习题	90	§ 5-2 数字基带信号的码型和波形	150
习题	90	一、信息怎样转换为二进制代码	150
第四章 模拟通信系统	93	二、常用码型	152
§ 4-1 引言	93	三、基带波形的形成	155
一、调制在通信系统中的作用	93	§ 5-3 数字基带信号的频谱分析	156
二、调制的基本特性和分类	94	一、随机脉冲序列的波形和一般	
三、调制系统中讨论的主要问题和		表示式	156
主要参数	95	二、数字基带信号功率谱密度的推导	158
§ 4-2 模拟基带信号传输	95	三、对功率谱密度 $P_x(\omega)$ 的讨论	160
一、线性失真及均衡	95	四、常用数字基带信号的功率谱密度	161
二、非线性失真和压扩	96	五、数字基带信号功率的计算	164
三、基带传输系统中的噪声	97	§ 5-4 数字基带传输中的码间	
§ 4-3 线性调制	98	串扰和噪声	165
一、双边带调制 (DSB)	98	一、码间串扰和噪声对误码的影响	166
二、振幅调制 (AM)	100	二、数字基带信号传输系统的模型	
三、抑制边带调制 (SSB 和 VSB)	102	和数学分析	167
四、小结	111	§ 5-5 无码间串扰的传输特性	170
§ 4-4 线性调制系统的抗噪声		一、无码间串扰传输函数 $H(\omega)$ 的特例	
性能分析	111	171
一、概述	111	二、无码间串扰传输特性的数学分析	172
二、线性调制系统同步解调时抗噪		三、几种常用的无码间串扰的传输特性	
声性能分析	112	174
三、线性调制系统非同步解调时抗		四、码元速率 f_s 、带宽 B 和频带利用率	176
噪声性能分析	116	五、几个问题的讨论	178
§ 4-5 非线性调制 (角调制)	118	§ 5-6 无码间串扰时噪声对传输	
一、角调制信号的一般概念	119	性能的影响	181
二、角调制信号的频谱	121	一、信号与噪声的分析	181
三、调频信号的平均功率	126	二、加性噪声作用下误码的分析	182
四、调频信号的产生与解调	126	三、误码率 P_e 的计算公式	184
§ 4-6 调频系统的抗噪声性能分析	132	四、误码率 P_e 与信噪功率比 ρ 的	
一、概述	132	关系曲线	186
二、抗噪声性能分析	133	五、误码率 P_e 与码元速率 f_s 的关系	187

§ 5-7 多进制数字基带信号的传输	188	二、极性比较——码变换法检测时 2DPSK	
一、多进制数字基带信号传输系统	188	系统的误码率	237
二、多进制基带数字信号的频谱和带宽		三、差分检测时 2DPSK 系统的误码率 ...	238
.....	188	四、2PSK 与 2DPSK 系统的比较	240
三、多进制基带数字信号传输时		§ 6-8 二进制数字调制系统性能的比较	
的误码率	190	240
§ 5-8 眼图	192	一、同一调制方式不同检测方法的比较	
一、什么是眼图	192	242
二、眼图的基本原理	192	二、同一检测方法不同调制方式的比较	
三、眼图的模型	194	242
§ 5-9 为改善数字信号基带传输性能		§ 6-9 多进制数字振幅调制	242
的几个措施	194	一、MASK 信号的波形及表示式	242
一、部分响应系统	195	二、MASK 信号的带宽及频带利用率	244
二、时域均衡	201	三、实现的方法	245
复习题	204	四、MASK 系统的优缺点	245
习题	204	§ 6-10 多进制数字频率调制	246
第六章 数字载波调制	208	一、MFSK 系统的方框图	246
§ 6-1 概述	208	二、MFSK 信号的带宽及频带利用率	247
§ 6-2 二进制数字振幅调制	209	§ 6-11 多进制数字相位调制	249
一、一般原理及实现方法	209	一、相位配置的两种形式	249
二、2ASK 信号的功率谱及带宽	210	二、四相制信号的产生	251
§ 6-3 二进制幅移键控系统的性能	213	三、四相制信号的解调	256
一、包络检测时 2ASK 系统的误码率	213	§ 6-12 多进制数字调制系统的性能	260
二、相干检测时 2ASK 系统的误码率	215	§ 6-13 其它数字调制方式	263
三、相干检测与非相干检测时 2ASK		一、时频调制	264
系统的比较	216	二、时频相调制	267
§ 6-4 二进制数字频率调制	217	三、窄带数字调制	268
一、实现调制的方法	217	复习题	272
二、2FSK 信号的解调方法	218	习题	273
三、2FSK 信号的功率谱及带宽	221	第七章 模拟信号的数字传输	275
§ 6-5 二进制频移键控系统的性能	224	§ 7-1 概述	275
一、包络检测时 2FSK 系统的误码率	224	一、什么是模拟信号的数字传输	275
二、相干检测时 2FSK 系统的误码率	226	二、模拟信号数字传输的关键是模拟	
三、相干检测与包络检测时 2FSK		信号和数字信号的互相转换	276
系统的比较	227	三、脉冲编码调制 (PCM) 脉冲振幅	
§ 6-6 二进制数字相位调制	228	调制 (PAM) 的区别	276
一、绝对码和相对码	228	四、本章主要内容	277
二、绝对相移和相对相移	229	§ 7-2 抽样定理及其应用	277
三、2PSK 信号的产生和解调	230	一、概述	277
四、2DPSK 信号的产生和解调	232	二、低通信号的均匀理想抽样	279
五、二进制移相信号的功率谱及带宽	234	三、自然抽样 (曲顶抽样)	283
§ 6-7 二进制相移键控系统的性能	236	四、平顶抽样	284
一、相干检测 2PSK 系统的误码率	236	五、实际应用时应注意的问题	287

六、带通信号的抽样定理	287	三、两种载波同步方法的比较	348
§ 7-3 模拟信号的量化	289	§ 8-3 载波同步系统的性能	349
一、量化和量化噪声	289	一、稳态相位误差	349
二、均匀量化和量化信噪功率比的计算	291	二、随机相位差	350
三、非均匀量化的基本原理	294	三、建立时间和保持时间	351
四、压缩与扩张的特性	295	§ 8-4 同步载波频率和相位误差	
§ 7-4 编码和译码	300	对解调性能的影响	352
一、常用的二进制码	300	§ 8-5 位同步的方法	353
二、编码器	301	一、引言	353
三、译码器	305	二、用插入导频法提取位同步信号	354
§ 7-5 PCM 通信系统	306	三、直接法提取位同步信号	355
一、PCM 通信系统的方框图	306	§ 8-6 位同步系统的性能和相位误差	
二、PCM 信号的码元速率和带宽	307	对性能的影响	357
三、PCM 系统的抗噪声性能	307	§ 8-7 群同步(帧同步)	360
§ 7-6 增量调制系统	310	一、引言	360
一、简单增量调制(ΔM)	310	二、连贯式插入法	360
二、简单增量调制系统抗噪声性能分析	314	三、间歇式插入法	363
三、简单增量调制抗噪声性能小结	319	四、起止式同步法	366
四、PCM 和 ΔM 系统性能比较	320	五、群同步系统的性能	367
§ 7-7 各种改进型增量调制	321	六、群同步的保护	368
一、总和增量调制($\Delta-\Sigma$ 调制)	321	复习题	370
二、数字音节压扩增量调制	324	习题	370
三、数字音节压扩 $\Delta-\Sigma$ 调制	327	第九章 数字信号的最佳接收	372
四、脉码增量调制(DPCM)	328	§ 9-1 引言	372
§ 7-8 时分复用及其与频分复用的比较	330	§ 9-2 二元假设检验和各种判决准则	372
一、时分复用的原理	330	一、最小平均风险准则(亦称贝叶斯准则)	375
二、时分复用的 PCM 系统		二、错误概率最小准则(亦称理想观测者准则)	377
(TDM-PCM)	332	§ 9-3 多次量测	378
三、时分复用(TDM)和频分复用(FDM)的比较	333	§ 9-4 二元确知信号的最佳接收	380
复习题	334	一、最佳接收机结构	380
习题	335	二、最佳接收机的检测性能	382
第八章 同步原理	339	三、实际接收机与最佳接收机的比较	386
§ 8-1 概述	339	复习题	387
一、按同步的功用来区分	339	习题	387
二、按传输同步信息方式的不同来区分	340	第十章 信道编码原理	388
§ 8-2 载波同步的方法	340	§ 10-1 概述	388
一、直接法(自同步法)	341	一、信源编码与信道编码	388
二、插入导频法(外同步法)	344	二、纠错码的分类	388
		三、差错控制的工作方式	389
		四、纠错码的基本概念	390
		§ 10-2 检错码	392

一、奇偶监督码	392	四、离散无记忆信源的扩展	417
二、行列监督码	394	§ 11-3 离散无记忆信源编码	417
三、恒比码	394	一、编码器的作用	417
§ 10-3 线性分组码	395	二、定长码的编码定理	419
一、基本概念	395	三、变长码的编码定理	420
二、汉明码	396	§ 11-4 离散无记忆信道 (DMC)	423
三、循环码	399	一、离散无记忆信道的数学模型	
四、交错码	404	和概率关系	424
§ 10-4 卷积码	405	二、互信息量和平均互信息量	425
§ 10-5 m 序列	406	三、信道容量	427
一、正交码与伪随机码的概念	406	§ 11-5 山农公式及其应用	430
二、线性反馈移位寄存器	407	一、连续消息的熵	430
三、m 序列产生器	407	二、有扰连续信道的信道容量	431
四、m 序列的性质	408	三、信号体积和信道容积	434
复习题	410	四、山农公式的应用	435
习题	411	复习题	437
第十一章 信息论基础	412	习题	437
§ 11-1 概述	412	主要参考资料	440
§ 11-2 信息源与信息的测度	412	附录	441
一、离散消息的统计特性	412	各章习题答案	446
二、信息的测度	413		
三、离散无记忆信源的平均信息量			
——熵	415		

第一章 绪 论

本章将扼要介绍以下几个问题：

- (1) 通信系统的组成；
- (2) 数字通信系统各部分作用和优缺点；
- (3) 通信系统的质量指标；
- (4) 本教材的主要内容。

介绍这几个问题的目的是使读者在学习各章具体内容之前，先对通信系统有一个初步了解，以便搞清各章的学习目的和各章在全课程中的地位和作用。

§ 1-1 通信系统的组成

一、通信的目的是传输消息

通信的目的是交换不同地点的消息，例如把地点A的消息传输到地点B，或者反过来把B点的消息传输到A点。需要传输的消息有语言、文字、图像、数据等。消息在发送端首先变换为各种形式的电信号，然后经过各式各样的电信道（例如有线通信中的明线，电缆，无线通信中的短波、微波……）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发送的相同的或者尽可能相同的消息。

传输消息有时也称为传输信息；按照信息论的观点，在进行有意义的通信时，传输消息就是传输了信息，信息可以理解为消息中所包含的对受信者有意义的内容。在本课程中对消息和信息不准备作严格的区分，两者可以混用。

电信号是消息的电的表示形式，在本课程中研究的都是电信号，因此以后我们就把电信号简称为信号。总之通信的根本目的是传输代表消息的电信号，也就是研究信号传输的问题。

二、通信系统的组成和各部分作用

对于使用各种通信工具的人来说，他并不一定需要知道消息究竟是怎样传输的，但是

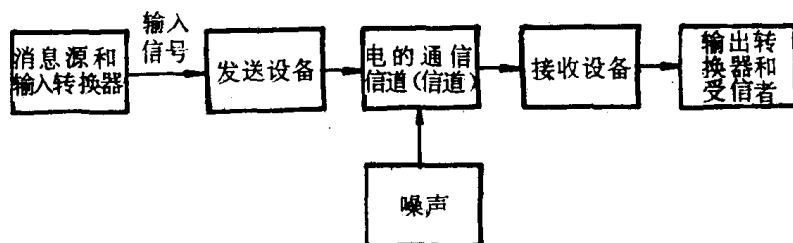


图 1-1 通信系统模型

对于组织通信联络的人员，特别是研究设计和维护修理各种通信设备的人员来说，他们必

须搞清消息传输的过程以及各种通信设备的工作原理。我们可以把各种通信系统和设备中消息传输的完整过程高度概括后得出如图 1-1 所示的通信系统模型,其中每一个方框完成一定的功能,而每个方框都可能包括很多的电路,甚至是一个庞大的设备。下面我们简要介绍一下图 1-1 中各方框的作用。

1. 消息源和输入转换器

消息源是需要传输的消息来源,如语言、文字、图像、数据等。输入转换器的作用是把消息源的消息转换为电信号,例如通电话时,话筒就是转换器,它把语言转换为话音信号。通常这种直接由消息转换得到的电信号的频率都是比较低的,而且最高频率和最低频率(最低频率可以为 0)比值很大,可以远大于 1,这种信号称为基带信号。例如话音这种基带信号的频率在 100~5 000 Hz 范围,但主要能量集中在 200~3 000 Hz 范围以内。又如电视图像信号的频率在 0~6 MHz 范围以内。至于数据信号的频率范围与传输速率有关(以后要讲到),也都属于基带信号。

2. 发送设备

基带信号可以直接经过放大器等向信道传输,这种传输称为基带传输,此时发送设备比较简单,只要有放大器,滤波器等即可。但通常基带信号通过调制以后,把基带信号的频谱搬移到比较高的频率范围后再传输,这种经过调制频谱变高以后的信号称为频带信号,这种传输方式称为频带传输。当采用频带传输时,发送设备就要复杂得多了,需要由调制器,振荡器、放大器、滤波器等很多部件组成。

3. 信道和噪声

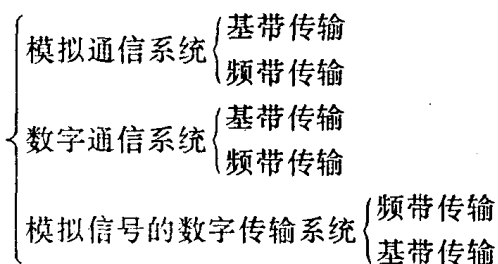
发送设备输出的信号,可以通过各种不同的信道传输,目前常用的信道有架空明线,电缆等有线信道和中长波、短波、微波等无线信道。信号在信道中传输时一方面由于信道特性不好,引起信号波形的失真,另一方面有各种噪声与信号混在一起。噪声主要来自信道,但实际上发送设备和接收设备中也有一定的噪声,特别是接收设备的前端各级电路中的噪声也有一定的影响。为了画图方便起见,在通信系统的模型中把噪声集中画在一起。

4. 接收设备和输出转换器

接收设备的主要任务是从受噪声影响的有噪信号中区分信号和噪声,并取出信号。如果是基带传输,取出的信号经过放大器等以后,再由输出转换器还原为消息。如果是频带传输,接收设备中还应了解调器等先把频带信号还原为基带信号,然后再由输出转换器还原为消息。对于话音信号来说,输出转换器就是耳机或扬声器。

三、模拟信号与数字信号,模拟通信与数字通信的区别与联系

上面我们介绍的通信系统模型是一个高度概括的模型,在实际应用中可以从不同的角度进行不同的分类得出不同的通信系统模型;例如可以根据传输的信道不同分为有线通信(架空明线,电缆等)和无线通信(中长波、短波、微波接力、卫星通信、散射通信等)。但在本课程中将由传输信号的性质来区分,此时可以分为:



在介绍各种不同通信系统模型以前，我们先对模拟信号和数字信号以及模拟通信和数字通信等的区别和联系作一些说明。

1. 模拟信号与数字信号的区别

(1) 模拟信号——凡信号的某一参量（如连续波的振幅、频率、相位，脉冲波的振幅、宽度、位置等）可以取无限多个数值，且直接与消息相对应的，称为模拟信号。如强弱连续变化的语言信号，亮度连续变化的电视图像信号等。

(2) 数字信号——凡信号的某一参量只能取有限个数值，并且常常不直接与消息相对应的，称为数字信号。如早期的电报信号，电机机送出来的脉冲信号等。

(3) 这里要强调一下，模拟信号有时也称连续信号，这个连续是指信号的某一参量可以连续变化（因为可以取无限多个值），而不一定在时间上也连续，例如各种脉冲调制，经过调制以后已调信号脉冲的某一参数是可以连续变化的，但在时间上是不连续的。因此不要因为模拟信号有时也称连续信号，就认为它在时间上也都是连续的。但由于多数情况下模拟信号在数值上和时间内都是连续变化的，因此，有的书上把模拟信号说成是代表消息的信号在时间上和幅度上都随着消息连续变化的信号。对这一点在看书时不要过多地在定义的细节上花费时间。同样我们还要强调一下，数字信号有时也称离散信号，这个离散是指信号的某一参量是离散（不连续）变化的，而不一定在时间上也离散。以后我们要讲到不少数字信号在时间上是连续的（如 PSK、FSK）。

2. 模拟通信与数字通信的区别与联系

(1) 模拟通信——通常把传输模拟信号的通信方式称为模拟通信。

(2) 数字通信——通常把传输数字信号的通信方式称为数字通信。

(3) 模拟信号经过模数转换以后，也可以在数字通信系统中传输，即模拟信号的数字传输系统，如数字电话。另外不论模拟通信还是数字通信，在整个通信系统中有好大一部分是可以共用的（在下面要介绍的各种通信系统模型中可以看到）。因此，在通常用作模拟通信的系统中，只要加上数字终端设备，也可以传输数字信号。

四、三种通信系统模型

1. 模拟通信系统模型

传输模拟信号的通信系统模型大体上与图 1-1 差不多，其方框图如图 1-2 所示。

由于此时传输模拟信号，因此消息源为模拟的，经过输入转换器得到模拟信号。另外发送设备包括很多部件，如调制、放大、滤波、天线等。但我们在图 1-2 中只画了调制器，而把其它部分省略掉，其原因一方面是为了突出调制器的重要性，另一方面其它部分可以认为是理想线性的，对信号传输可以看作不产生失真，不引入噪声。同样接收设备只画出一个解调器。这样，图 1-2 就是一个最简化了的模拟通信系统，因此称为模拟通信系统模

型。

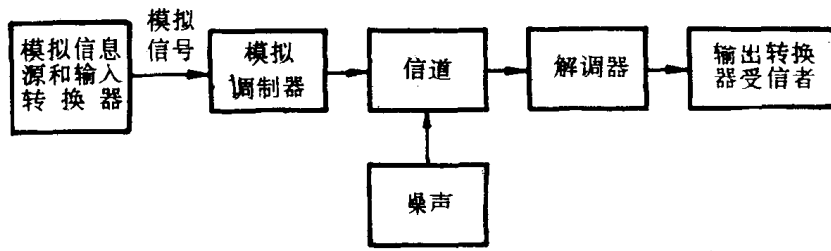


图 1-2 模拟通信系统模型

2. 数字通信系统模型

按照模拟通信系统模型的画法，如果也只画出最主要的部件，可以得到图 1-3 所示的方框图。图中加密器和解密器的位置可前可后，例如加密器可以在信道编码之前，也可以在信道编码之后。另外对于一个实际数字通信系统来讲，其中有的方框可能没有，例如不用保密时，加密器和解密器就不要了，又如不要抗干扰的信道编码时，信道编码器和信道译码器就不要了。此外数字通信系统中必不可少的同步系统，由于它和很多部件结合在一起，不好单独画出，因此图 1-3 中并没有画出。由于数字通信系统模型远比模拟通信系统模型复杂，而且具有一些模拟通信系统不可能有的优点，因此下一节我们还要简要介绍一下数字通信系统各部分的作用和它的优缺点。

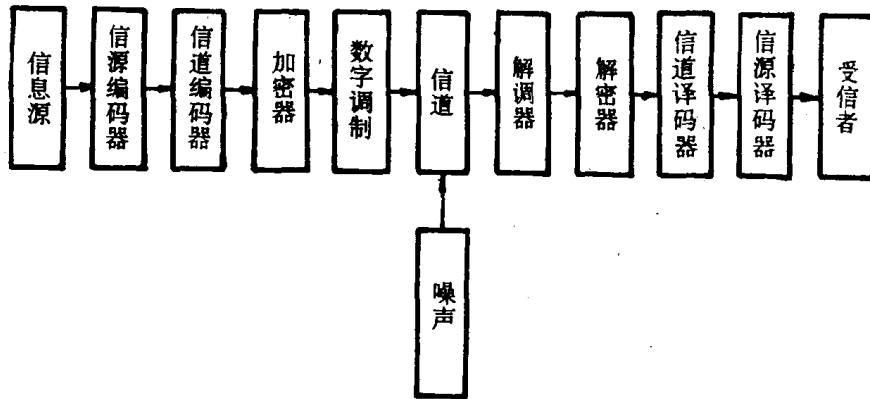


图 1-3 数字通信系统模型

3. 模拟信号的数字传输系统模型

模拟信号的数字传输系统，是先把模拟信号转换为数字信号，然后按照数字信号传输的方法传输，接收端再把数字信号转换为模拟信号即可。因此这种传输系统的模型与图 1-3 差不多；发端只要把信息源看作是模拟信号源，信源编码器看作模数转换器即可，而收端只要把信源译码看作数模转换器即可。我们在图 1-4 中画出一个模拟信号数字传输系统的模型，主要是强调它与数字通信系统的区别和联系；这样在第七章讨论模拟信号的数字传输时只要讨论它的特殊部分即可。

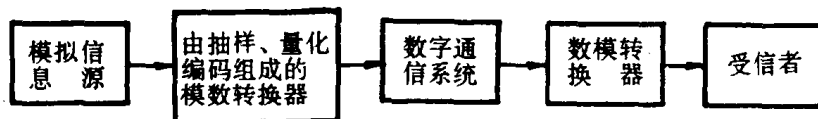


图 1-4 模拟信号的数字传输系统模型

§ 1-2 数字通信系统各部分作用和优缺点

一、数字通信系统中各部分的作用

这里主要讲数字通信系统中特殊部分的作用,至于信道噪声等与前面介绍过的一样,这里不再重复。

1. 信息源

图 1-3 所示的数字通信系统模型中,信息源一般指的是由电传机、纸带读出机等送来的数字基带信号。最典型的数字基带信号为如图 1-5 所示的二进制矩形脉冲,平常我们称它为二进制码或二进制代码。二进制代码中的 $\begin{cases} 1 \text{ 码幅度为 } A, \\ 0 \text{ 码幅度为 } 0 \text{ (或 } -A)。 \end{cases}$ 这种二进制数字信号只有两个值, A 和 0 (或 $-A$)。

在接收端判决结果也只有两个值,这一点是与模拟信号(取值是连续的)完全不同的。

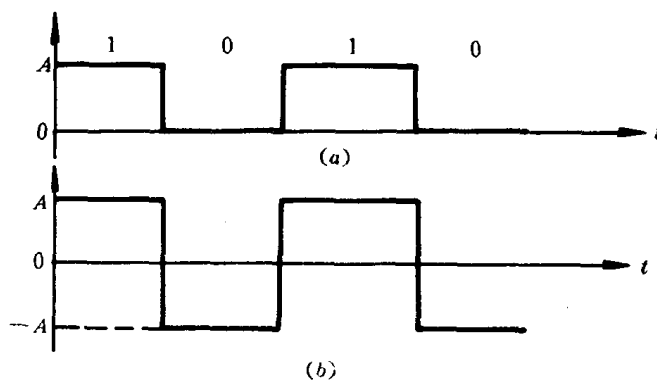


图 1-5 二进制数字基带信号

2. 信源编(译)码

信源编码器的主要作用是进行降低信号多余度的编码,其目的是减少码元数目和降低码元速率,关于这方面的内容本课程中不讲,只是在教材的第十一章信息论基础中提到一些。如果信息源送来的是模拟信号,那么信源编码还包含一个把模拟信号转换为数字信号的模数转换器,即通过抽样、量化和编码三个步骤把模拟信号变成数字信号。有时候就把模数转换称作信源编码,关于这方面内容在本教材第七章中将详细介绍。

信源译码的作用与信源编码相反,例如信源编码为模数转换器时,信源译码就是数模转换器,关于这方面内容在第七章中也将详细介绍。

3. 信道编(译)码

信道编码又称抗干扰编码和纠错编码。它是将信源编码器输出的数字基带信号人为地按照一定的规律加入多余码元,以便在接收端译码器中发现或纠正码元在传输中的错误,这样可以降低码元传输的错误概率。初看起来,信道编码增加多余度的作用与信源编码降低多余度的作用互相抵消了。其实不然,因为信源编码中降低的是输入数字信号中的自然多余度,这种自然多余度留着不能起纠错码的作用。而信道编码中加入的多余码元是有一定规律的,这种规律能有效地提高传输性能,减少传输后码元错误率。关于信道编(译)码的内容在第十章作简要介绍。

4. 加(解)密器

它的位置可以在信道编(译)码的前面,也可以在信道编(译)码的后面,加密的方法很多,例如可以把数字信号和一个周期很长的 M 序列模二相加,这样将原来的数字信号变成一个不可理解的另一序列(或者简单地说把数字信号序列搞乱了),这样被人窃取后无法理解其内容。在接收端必须再加上一个同发端一样的 M 序列,再和收到的信号模二加一次,就可以恢复原来发送的数字信号。关于加(解)密器的内容本课程不作介绍。

5. 数字调制(解调)器

前面得到的数字信号都还是基带信号,数字调制器是将数字基带信号经过各种不同的调制变为适合于信道传输的频带信号。数字调制的方法很多,有的可以和模拟通信系统中的调制方法一样。但由于数字基带信号往往是二进制脉冲序列,因此数字调制往往用键控方式调制,这样就有振幅键控法(ASK)、频率键控法(FSK)和相位键控法(PSK)等数字调制方式,其波形如图 1-6 所示。其中图(a)为基带信号;图(b)为 ASK 信号,幅度只有两种 A 和 0 (或 $-A$);图(c)为 FSK 信号,1 码时频率为 f_1 ,0 码时频率为 f_2 ,FSK 信号的频率受基带信号调制,FSK 信号在时间上是连续的;图(d)为 PSK 信号,振幅频率都是不变的,但它的相位受基带信号调制,它的波形在时间上也是连续的。

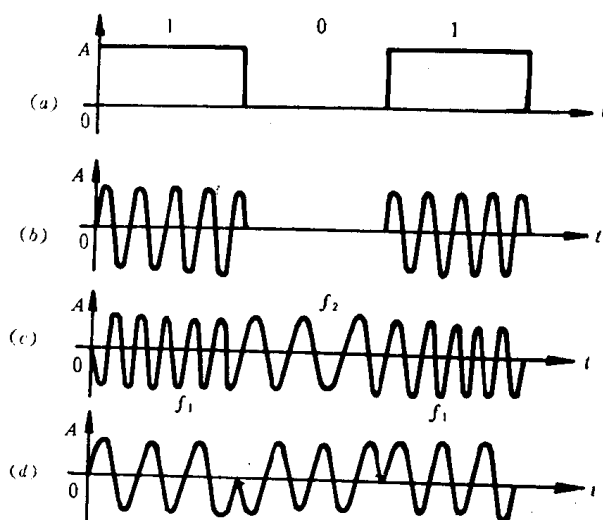


图 1-6

这三种调制都有相应的解调器,把接收到已调的频带数字信号还原为基带数字信号。数

字调制是本课程的重点内容之一，将在第六章介绍。如果数字基带信号不经过调制，直接传输，则称为数字信号的基带传输，将在第五章介绍。

6. 同步问题

数字通信系统中还有一个同步问题（在模型中没有画出）；数字通信系统中的同步有载波同步、位同步和群同步三种，由于各种同步信号的传输和提取是比较复杂的问题，而且与很多部件有关，如果分散在各章不容易把问题说清楚，因此我们把它放在第八章集中讨论。

二、数字通信系统的主要优缺点

通过上面对数字通信系统模型和各部分作用的简要介绍后，我们简要地介绍一下数字通信的主要优缺点。

1. 抗噪声性能好

由于数字通信传输的数字信号携带消息的参量只有有限个取值，一般都是采用只有两个取值的二进制信号，这样发送端传输的和接收端需要接收和判决的只有两个值，例如二进制信号 1 码取值为 A ，0 码取值为 0，传输的信号如图 1-5 (a) 所示的波形。传输过程中由于噪声引入对波形有影响，使波形产生失真，甚至产生很大的失真。接收端接收到受噪声影响而失真的波形以后，对它进行判决，确定是 1 码还是 0 码，并再生 1、0 码的波形。因此只要不影响判决的正确，即使波形有失真也不会影响再生以后的波形。而模拟通信时噪声使模拟信号失真以后，那怕噪声很小，噪声的影响也是无法消除的。因此和模拟通信相比，抗噪声性能好是数字通信的最主要的优点。

2. 数字通信用到接力通信时可以消除噪声的积累

在接力通信时信号传输经过很多中继站再传到接收端，模拟通信时，每一站的噪声的积累使通信质量下降；数字通信时只要噪声不使判决发生错误，经过再生以后噪声的影响可以消除，各站的噪声不会积累起来，因此中继站增多时仍可有良好的通信质量。

3. 数字通信中可以采用信道编码技术使错码率降低

4. 数字通信便于加密

5. 数字信号便于处理、存贮、交换，便于和计算机等联接

关于 3、4、5 不作详细说明了，总之数字通信与模拟通信相比有很多优点，但数字通信也有它的缺点，最主要的一个缺点是占用的频带比较宽（这一方面在绪论中是不可能说清楚的）我们只举一个例子给出大致的数量概念。以通电话为例，模拟通信使用 3~4 kHz 带宽即可，而数字电话一般需要几十 kHz 的带宽；此外数字通信的设备一般比模拟通信复杂一些。

§ 1-3 通信系统的质量指标

在研究设计或者评价一个通信系统的好坏时，必然涉及系统的质量指标问题。通信系统中的质量指标是很多的，特别是军用通信系统对质量指标的要求更高，涉及电气性能、工艺结构、使用维修、经济效益等等。归纳起来主要有以下几个方面：

(1) 有效性：指消息的传输速度；

- (2) 可靠性：指消息传输的质量；
- (3) 适应性：指环境使用条件；
- (4) 标准性：指元件的标准性互换性；
- (5) 经济性：指成本是否低；
- (6) 保密性：是否便于加密；
- (7) 使用维修：是否方便。

但其中最主要的是有效性和可靠性，因为这两个要求，基本上体现了对军用通信正确、迅速和不间断的要求。

有效性和可靠性这两个要求通常是矛盾的，根据实际需要尽可能取得满意的结果；例如在一定可靠性指标下，尽量提高消息传输的速度；又如在一定有效性条件下，使消息传输质量尽可能提高。

由于模拟通信和数字通信系统对这两个指标要求的具体内容有很大差别，因此下面分别加以讨论。

一、模拟通信系统的质量指标

1. 有效性

有效性指消息传输的速度，它取决于消息所包含的信息量和对信息源的处理；处理的目的是使单位时间内传输更多的消息或者一定频带范围内传输更多的消息。对于这方面的内容展开讨论是很复杂的，而且涉及后面各章学习的内容。我们只举一个简单的例子：例如单边带 (SSB) 调制和普通调幅 (AM) 比较，对于每路话音信号，SSB 占用频带只有 AM 的一半，因此在一定频带内用 SSB 信号传输的路数比 AM 多一倍，可以传输更多消息，因此 SSB 的有效性比 AM 好。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性最终用信噪功率比表示。信噪功率比 S/N 越大，通信质量越高。模拟通信时对 S/N 的要求

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{一般无线通信, } S/N \geq 26 \text{ dB} \\ \text{听清 95\% 以上, } S/N \geq 40 \text{ dB} \\ \text{电视节目, 看起来很清楚, } S/N \geq 40 \sim 60 \text{ dB} \end{array} \right.$$

S/N 是由信号功率和信号传输过程中引起的失真和各种干扰、噪声决定的，其中信号功率和信道中的加性噪声又是最主要的因素。

但经过对后面各章内容的学习，我们可以得出另一个决定 S/N 的因素，这就是调制和解调方式；当信号功率一定，信道噪声一定时，即接收机输入端的信噪比一定时，经过不同的解调方法后输出端的信噪比 S/N 是不同的。因此我们在以后学习中要特别注意比较不同调制方式的抗噪声性能，使用时注意选择抗噪声性能好的调制方式以提高通信系统的可靠性。

二、数字通信系统的质量指标

数字通信系统中的有效性通常用码元速率 R_b 和信息速率 R_i 表示。而可靠性通常用误码