



高等职业教育电子信息类专业规划教材

GAO DENG ZHI YE JIAO YU DIAN ZI XIN XI LEI ZHUAN YE GUI HUA JIAO CAI



通信原理

(第2版)

■ 沈保锁 孙小红 刘松 崔雁松 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业教育电子信息类专业规划教材

GAO DENG ZHUYE DIAO XI DIAN ZI XIN XI LEI ZHUAN YE GUI HUA JIAO CAI



通信原理

(第2版)

■ 沈保锁 孙小红 刘松 崔雁松 编著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

通信原理 / 沈保锁等编著. -- 2版. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2011.9
高等职业教育电子信息类专业规划教材
ISBN 978-7-115-25995-0

I. ①通… II. ①沈… III. ①通信原理—高等职业教育—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第135436号

内 容 提 要

本书是针对高等职业教育的特点,结合高职学生的特点和多年来高职教育的实践经验编写而成的。全书共分为9章,第1章绪论;第2章信号分析与信道;第3章模拟通信系统;第4章模拟信号的数字传输系统;第5章数字信号的基带传输系统;第6章数字信号的频带传输系统;第7章通信系统中的同步;第8章通信系统中的差错控制编码技术;第9章利用 System View 对通信系统进行仿真。在编写上力求通俗易懂、简化数学推导过程,适当增加例题和习题练习,适当淡化理论公式推导,强调应用。使学生通过学习本课程,掌握通信原理在编码、传输、调制及信道等方面的基本理论和分析方法,为学好通信及相关专业课程打好理论基础。

本书的特点是系统性强,内容编排连贯,突出基本概念、基本原理,减少不必要的数学推导和计算,各章均有小结及习题。

本书可以作为通信、电子信息、电子工程、自动化、计算机等专业高职高专、函授和成人教育的教材,也可供有关专业技术人员参考。

高等职业教育电子信息类专业规划教材

通信原理 (第2版)

-
- ◆ 编 著 沈保锁 孙小红 刘 松 崔雁松
责任编辑 李 强
 - ◆ 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 电子邮件 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: 13.75
字数: 341千字
印数: 1-3 000册
- 2011年9月第2版
2011年9月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-25995-0

定价: 28.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

再版前言

本书以各种基本通信系统为主线，共分为9章。第1章从系统出发，给出了通信系统的通用模型；第2章把通信原理中涉及的数学定义、公式和理论集中到一起，不追求数学上烦琐的推导；第3章到第8章，每章都以通信系统的通用模型的框图为线索，介绍了模拟通信系统、模拟信号的数字传输系统、数字信号的基带传输系统、数字信号的频带传输系统、通信系统中的同步、通信系统中的差错控制编码技术的基本原理、基本概念和相关技术。此次再版，在原版理论知识的基础上，又加入了一些实用的典型通信系统，使抽象的内容具有真实性和实用性。第9章为新增章节，介绍了通信仿真软件 System View 的使用和仿真操作实验，通过仿真软件的相关实验，起到对理论的验证作用。

本书在内容选择方面注重体现职业教育的特色，强调物理概念，注意实用性及其与后续课程的衔接；力求系统地阐述现代通信系统的基本原理和新技术，突出系统的基本分析方法、工作原理和信号流程，以便建立数字通信的整体概念；注重数字通信技术核心内容的阐述；每章末附有习题或思考题。

本书可作为高职高专通信、电子、信息工程类专业的教材，也可供应用型本科、电大、函大、成人自考等相关专业选用，还可供相关工程技术人员参考。

编者

目 录

第 1 章 绪论	1	习题	28
1.1 通信的概念	1	第 3 章 模拟通信系统	30
1.2 通信系统模型	1	3.1 调制的概念	30
1.2.1 通信系统模型	1	3.2 幅度调制系统	30
1.2.2 模拟通信系统模型	2	3.2.1 标准调幅 (AM)	30
1.2.3 数字通信系统模型	2	3.2.2 抑制载波双边带调幅 (DSB)	32
1.3 通信系统的分类及通信方式	3	3.2.3 单边带调制 (SSB)	33
1.3.1 通信系统的分类	3	3.2.4 残留边带调幅 (VSB)	35
1.3.2 通信方式	5	3.2.5 调幅系统的解调	35
1.4 通信系统的主要性能指标	6	3.3 频率调制系统	37
1.4.1 模拟通信系统的性能指标	6	3.3.1 角度调制的基本概念	37
1.4.2 数字通信系统的性能指标	6	3.3.2 窄带调频 (NBFM)	39
1.5 通信的发展历史及趋势	7	3.3.3 宽带调频 (WBFM)	40
1.5.1 通信系统的发展历史	7	3.3.4 调频信号的产生与解调	43
1.5.2 通信系统的发展趋势	8	3.4 模拟调制系统的抗噪声性能	44
习题	9	3.4.1 各种调幅系统相干解调的抗噪声性能	45
第 2 章 信号分析与信道	10	3.4.2 调频系统的抗噪声性能	47
2.1 信号分析	10	3.4.3 调频系统的专用芯片	50
2.1.1 消息与信号	10	3.5 频分多路复用 (FDM)	51
2.1.2 信号分析	11	3.6 典型模拟通信系统	53
2.1.3 周期信号的傅里叶级数	12	3.6.1 无线电发信机和收信机	53
2.1.4 非周期信号的频谱	14	3.6.2 多路无线广播信号的频分多路复用	54
2.1.5 波形的互相关与自相关	17	习题	55
2.1.6 随机信号分析	19	第 4 章 模拟信号的数字传输系统	57
2.2 信息及其度量	22	4.1 概述	57
2.3 信道与噪声	23	4.2 脉冲编码调制 (PCM)	58
2.3.1 信道定义及其数学模型	23	4.2.1 PCM 通信系统	58
2.3.2 信道噪声	25		
2.3.3 信道容量	26		
2.4 通信系统中的带宽	27		

4.2.2	抽样	59	模型	91	
4.2.3	量化	61	5.4.2	基带传输中的码间串扰与 无码间串扰的基带传输	92
4.2.4	编码与解码	65	5.5	数字基带传输系统的 抗噪声性能	97
4.2.5	PCM 系统的噪声性能	69	5.6	眼图与均衡	99
4.2.6	PCM 编解码器芯片	69	5.6.1	基带传输系统测量 工具——眼图	99
4.3	时分复用 (TDM)	70	5.6.2	时域均衡技术	100
4.3.1	时分复用原理	71	5.7	典型数字基带传输系统	102
4.3.2	时分复用所需的信道 带宽	72	5.7.1	基带数字系统在电力 系统中的应用	102
4.4	增量调制 (ΔM)	72	5.7.2	基带传输系统在电话 传输系统中的应用	103
4.4.1	增量调制的基本原理	72	习题	104	
4.4.2	量化噪声和过载噪声	74	第 6 章	数字信号的频带传输系统	106
4.4.3	增量调制系统的抗噪声 性能	75	6.1	数字调制技术概述	106
4.4.4	PCM 和 ΔM 的 性能比较	76	6.2	二进制数字调制原理	107
4.5	其他脉冲数字调制系统	77	6.2.1	二进制幅移键控 (2ASK) 调制与解调	107
4.5.1	总和增量调制 (Δ - ΣM)	77	6.2.2	二进制频移键控 (2FSK) 调制与解调	108
4.5.2	数字压扩自适应增量 调制	78	6.2.3	二进制相移键控 (2PSK) 调制与解调	110
4.5.3	差分脉冲编码调制 (DPCM)	79	6.2.4	二进制数字调制信号的 频谱特性	113
4.6	典型模拟信号的数字传输系统	80	6.2.5	二进制数字调制系统的 抗噪声性能	115
4.6.1	脉冲编码调制 (PCM) 技 术在电话通信系统中的 应用	80	6.2.6	二进制数字调制系统的 性能比较	115
4.6.2	自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM) 在语音信号编 码中的应用	82	6.3	多进制数字调制系统	116
习题		83	6.3.1	多进制幅移键控 (MASK) 调制原理	116
第 5 章	数字信号的基带传输系统	85	6.3.2	多进制频移键控 (MFSK) 调制原理	117
5.1	概述	85	6.3.3	多进制相移键控 (MPSK)	
5.2	数字基带信号的常用码型	85			
5.3	数字基带信号的频谱分析	89			
5.4	数字基带传输系统	91			
5.4.1	数字基带信号传输系统				

调制原理	118	7.6 同步技术应用举例	155
6.3.4 多进制数字调制系统的 抗噪声性能	122	习题	156
6.4 现代数字调制技术	122	第 8 章 通信系统中的差错控制编码	
6.4.1 正交幅度 调制 (QAM)	122	技术	158
6.4.2 偏移四相相移键控 OQPSK(Offset Quadri- Phase Shift Keying)	124	8.1 纠错编码原理和方法	158
6.4.3 $\pi/4$ -QPSK	125	8.1.1 差错控制系统	158
6.4.4 最小频移键控 (MSK)	125	8.1.2 差错控制编码的基本 概念	159
6.4.5 其他恒包络调制	128	8.2 常用的简单编码	160
6.4.6 扩展频谱通信	131	8.2.1 奇偶监督码	160
6.5 典型数字频带传输系统	133	8.2.2 二维奇偶监督码	161
6.5.1 数字频带传输技术在数字 电视传输系统中的应用	133	8.2.3 恒比码	161
6.5.2 数字频带传输系统在 GSM 移动通信系统 中的应用	135	8.2.4 正反码	162
习题	136	8.3 线性分组码	162
第 7 章 通信系统中的同步	138	8.3.1 监督矩阵 H 和生成 矩阵 G	163
7.1 同步的概念	138	8.3.2 错误图样 E 和校正子 S	165
7.2 载波同步	139	8.3.3 汉明码	166
7.2.1 插入导频法	139	8.4 循环码	167
7.2.2 非线性变换——滤波法	140	8.4.1 循环码的概念	167
7.2.3 同相正交法 (科斯塔 斯环)	141	8.4.2 码多项式及按模运算	167
7.3 位同步	142	8.4.3 码的生成多项式和 生成矩阵	169
7.3.1 插入导频法	142	8.4.4 循环码的编码	170
7.3.2 自同步法	143	8.4.5 循环码的解码	172
7.4 帧同步	146	8.5 卷积码	174
7.4.1 对帧同步系统的要求	146	8.5.1 卷积码的编码原理	175
7.4.2 起止式同步法	147	8.5.2 卷积码的图解表示	176
7.4.3 集中插入同步法	147	8.5.3 卷积码的生成矩阵和 监督矩阵	177
7.4.4 分散插入同步法	151	8.5.4 卷积码译码	181
7.5 网同步	153	8.6 交织编码	185
		8.6.1 分组交织编码	185
		8.6.2 卷积交织编码	186
		8.7 差错控制编码技术在通信 系统中的应用举例	188

8.7.1	ISBN 国际统一图书编号 中的差错控制编码技术	188	选择操作	197	
8.7.2	GSM 移动通信系统 中的差错控制编码技术	188	9.2.2	系统定时操作	203
习题		191	9.2.3	分析窗操作	204
第 9 章	利用 System View 对通信系统 进行仿真	194	9.2.4	利用 System View 进行通 信系统仿真的基本步骤	206
9.1	System View 仿真软件简介	194	9.3	利用 System View 仿真软件对 通信系统进行仿真	206
9.1.1	System View 特点	194	9.3.1	模拟通信系统仿真分析	206
9.1.2	System View 系统视窗	196	9.3.2	二进制数字调制系统仿真 分析	209
9.2	System View 仿真软件使用	197	习题		211
9.2.1	系统窗下各种库的设置及		参考文献		212

第 1 章 绪 论

1.1 通信的概念

在人类社会里，为满足生产和生活的需要，人们在进行思想感情的交流以及知识的获取等方面都离不开信息的传递。古代的烽火台、金鼓、旌旗；当今的书信、电报、电话、可视电话、电视等都是传递信息的方式。广义地说，通信就是由一地向另一地传递信息。

随着人类社会文明、科学技术的发展，通信所传递的信息形式越来越多，不仅有语言、符号、文字、音乐，还包括数据、图片、图像和文本等。实现这些消息的传递可采用各种各样的通信方式，在诸多通信方式中，利用“电”来传递信息的通信方式——电通信，能使消息几乎在任意通信距离上实现既迅速、有效，又准确、可靠的传递，缩短了通信双方的时间和距离的差异，因而得到飞速的发展及广泛的应用。电话、传真、可视电话、数据传输、电视、广播、雷达、遥测、遥控等均属于“电”通信方式。本书所讲的通信即为“电”通信，简称通信。

1.2 通信系统模型

1.2.1 通信系统模型

通信是由通信系统来实现的，通信系统是指完成信息传输过程的全部设备和传输媒介。点对点通信系统的模型如图 1-1 所示，它可将消息从发送端送到接收端。图 1-1 中，信息源的作用是把各种可能的消息转换成原始电信号；为了使这个原始电信号适合在信道中传输，在发送端通过发送设备对其进行某种变换后送入信道；信道是指信号的传输媒介；在接收端，接收设备的功能与发送设备的功能相反，它能从接收信号中恢复出相应的原始电信号，而受信者（或信息宿）是将原始电信号复原转换成相应的消息；图中的噪声源是信道中的噪声以及分散在通信系统其他各处噪声的集中表示。



图 1-1 通信系统的模型

上述通信系统的模型表示了通信系统的基本组成。根据我们所研究的对象及所涉及问题

的不同，将会选择不同形式的较具体的通信系统模型。本书就是围绕与通信系统模型有关的通信原理及基本理论进行讨论的。

1.2.2 模拟通信系统模型

通信所传输的各种消息可分成两大类：一类是状态连续变化的消息——连续消息（或模拟消息），如连续变化的语言、图像等；另一类是消息的状态是可数的或离散的消息——离散消息（或数字消息），如符号、文字和数据等。

为了传递消息需将各种消息转换成电信号参数的变化。这种转换就是在消息与电信号的某一参量或几个参量间建立起一一对应的关系。若消息为离散消息，它所对应的电信号参量是离散取值的，该信号为数字信号；若消息为连续消息，它所对应的电信号参量是连续取值的，这样的信号为模拟信号。我们按信道中传输信号的特征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。

此外，可以采用数字通信系统来传递模拟信号。它是在发送端先将模拟信号转换成数字信号（A/D转换），再经数字通信系统传输后，在接收端再进行相反的转换（D/A转换），还原出模拟信号。

模拟通信系统的模型如图 1-2 所示。其中包含两种重要的变换：一是在发送端将连续消息转换成原始电信号，或在接收端作相反变换，它是由信息源或受信者完成；二是在发送端将原始电信号转换成其频带适合于信道传输的信号或在接收端作相反变换，即调制或解调，它们由调制器或解调器完成。经第一种变换所得到的原始电信号具有较低的频谱分量，一般不宜直接进行远距离传输，因此在模拟通信系统中常常需要进行第二种变换。通常我们将在发送端调制前或接收端解调后的信号称为基带信号，因此原始电信号又称基带信号，而经过调制的信号称已调信号。调制的目的主要有 3 方面：①将基带信号变换为适合于信道传输的频带信号，如在无线通信中，必须将基带信号运载在高频上才能发射出去；②改善系统性能；③实现信道复用，提高信道利用率。

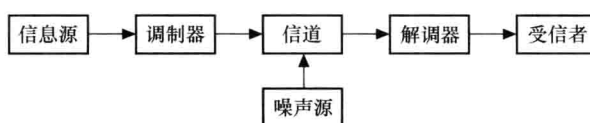


图 1-2 模拟通信系统模型

除了上述两个变换外，模拟通信系统中还包括滤波、放大、变频及二/四线转换等环节。本书重点介绍两个变换及反变换，其他部分的重要环节也给予简要介绍。

从模拟通信系统模型可看出，模拟通信研究的基本问题包括：①收发两端的换能过程及基带信号的特性；②调制与解调原理；③信道与噪声特性及其对信号传输的影响；④存在噪声条件下的系统性能等。

1.2.3 数字通信系统模型

数字通信系统的模型如图 1-3 所示。在数字通信中，必须保证接收端数字信号与发送端数字信号有一致的节拍，否则就会使收发步调不一致，而造成数据混乱，使传输出错。这个节拍我们称为同步。图 1-3 中应包含同步环节，但由于数字通信中有 3 种同步方式，且每种

方式的位置又不是固定的，故图中没有示出。

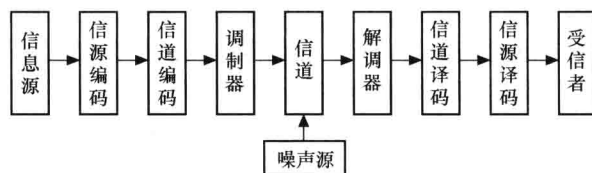


图 1-3 数字通信系统模型

图 1-3 中，编码和译码组成一对环节，编码包括信源编码和信道编码。信源编码的主要任务是提高数字信号传输的有效性，包括数/模转换和数据压缩。若从信息源传来的信号是模拟信号，则先要进行 A/D 转换，信源编码的输出就是信息码。此外，信源编码还包括数据扰乱、数据加密、话音和图像压缩编码等。信道编码的主要任务是提高数字信号传输的可靠性。由于数字通信在信道传输过程中混入的噪声或干扰会造成数字信号传输的差错，需通过差错控制编码来实现差错控制，以提高系统的可靠性。

调制器与解调器构成一对环节，其作用与模拟通信系统中的调制与解调作用相同，不同的是这里的调制与解调的是数字信号。数字通信系统中，基带信号仍是调制器前和解调器后的信号，信道中传输的调制后的信号为已调信号。

上述所列数字通信的有些环节（如编码与译码、调制与解调）并不是必需的，它可根据不同的条件和要求决定是否采用。没有调制器与解调器环节，直接传输基带信号的数字通信系统称为数字基带传输系统。

从数字通信系统模型可看出，数字通信研究的基本问题包括：①收、发两端的换能过程，模拟信号数字化及数字式基带信号的特征；②数字调制与解调原理；③信道与噪声的特性及其对信号传输的影响；④抗干扰编码和译码，即差错控制编码；⑤通信保密；⑥同步。

目前，无论是模拟通信还是数字通信，都是已经获得广泛应用的通信方式。综合模拟通信和数字通信的各自特点，数字通信与模拟通信相比有以下优点。

- ① 数字传输的抗噪声（即抗干扰）能力强，数字信号传输中可通过中继再生消除噪声的累积。
- ② 数字通信可以通过差错控制编码技术，提高通信的可靠性。
- ③ 便于利用现代数字信号处理技术对数字信息进行处理。
- ④ 数字信息易于加密，且保密性强。
- ⑤ 数字通信可以传递各种消息（模拟的和离散的），使通信系统灵活性好、通用性强。
- ⑥ 数字通信采用数字集成电路，具有体积小、重量轻、可靠性高及调整调试方便的优点。

但是，数字通信与模拟通信相比较为突出的缺点是其信号占有的频带宽。如一路模拟电话仅占 4kHz 带宽，而一路数字电话要占 20~64kHz 的带宽。然而由于毫米波通信和光纤通信的出现，带宽问题得到解决，数字通信将逐步取代模拟通信。

本书以下各章将分别对上述两种通信系统中的基本问题进行较为详细的讨论。

1.3 通信系统的分类及通信方式

1.3.1 通信系统的分类

通信系统有多种分类方法，下面介绍常见的 5 种通信系统的分类方法。

1. 按通信业务类型分类

根据通信业务类型的不同，通信系统可分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。由于电话通信网最为普及，因而除电话通信外的其他一些通信业务也常通过公共电话通信网进行传输，如电报通信和远距离计算机通信（数据通信）都可通过电话信道传输。现在建成的综合业务数字通信网（ISDN）适应于多种类型业务的信息传递。

2. 按调制方式分类

按照信道中传输的信号是否经过调制，可将通信系统分为基带传输和频带传输。基带传输是将未经调制的信号直接传输，如远距离音频电话、有线广播等；频带传输是将基带信号经调制后送入信道传输。调制方式很多，常用的调制方式及用途如表 1-1 所示。

表 1-1 常用调制方式及用途

		调制方式	用途举例
连续波调制	线性调制	振幅调制（AM）	广播
		单边带调制（SSB）	载波通信、短波无线电话通信
		抑制载波双边带调制（DSB）	立体声广播
		残留边带调制（VSB）	电视广播、传真
	非线性调制	频率调制（FM）	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制（PM）	中间调制方式
连续波调制	数字调制	幅移键控（ASK）	数据传输
		频移键控（FSK）	数据传输
		相移键控（PSK）、DPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉冲振幅调制（PAM）	中间调制方式、遥测
		脉冲宽度调制（PDM、PWM）	中间调制方式
		脉冲位置调制（PPM）	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉冲码调制（PCM）	市话中继线、卫星、空间通信
		增量调制 DM（ ΔM ）、CVSD 等	军用、民用数字电话
		差分脉冲码调制（DPCM）	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 ADPCM、LPC 等	中速数字电话

3. 按信号特征分类

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统两类。模拟通信系统传输的是模拟信号，数字通信系统则传输数字信号。

4. 按传输媒介分类

按传输媒介，通信系统分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信系统以传输缆线作为传输媒介，传输媒介包括电缆通信、光纤通信等；无线通信系统是无线电波在自由空间传播信息，包括微波通信、卫星通信等。

5. 按信号复用方式分类

按信号复用方式，通信系统又可分为频分复用（FDM）、时分复用（TDM）和码分复用（CDM）等系统。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围；时分复用是用抽样或脉冲调制方法使不同信号占据不同的时间区间；码分复用则是用互相正交的码型来区分多路信号。

传统的模拟通信中大都采用频分复用，如广播、电视通信。随着数字通信的发展，时分复用通信系统得到了广泛的应用。码分复用在现代通信系统中获得广泛应用，如卫星通信系统、移动通信系统和光纤通信系统。

1.3.2 通信方式

通信系统中有多种通信方式，它可按不同的方法划分如下。

1. 按传输的方向与时间关系划分

对于点对点的通信，按传输的方向与时间关系，通信方式可分单工通信、半双工通信及全双工通信3种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式，如图1-4(a)所示。例如广播、电视、遥测等都是单工通信方式。

半双工通信是指通信的双方都能收发信息，但各方不能同时进行收发信息的通信方式，如图1-4(b)所示。例如无线电对讲机和普通无线电收发报机等是半双工通信方式。

全双工通信是指通信的双方都可同时收发信息的通信方式，如图1-4(c)所示。例如普通电话、计算机通信网络等采用的就是全双工通信方式。

2. 按数字信号码元排列方法划分

在数字通信中按数字信号码元排列方法不同，可划分为串序传输和并序传输两种通信方式。串序传输是将数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输，如图1-5(a)所示，如计算机网络通信。

并序传输是将数字信号码元序列分割成两路或两路以上的数字信号码元序列同时在信道中传输，如图1-5(b)所示。例如计算机和打印机之间的数据传输。

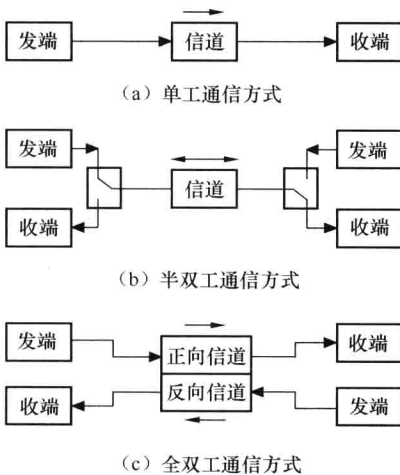


图 1-4 通信方式示意图

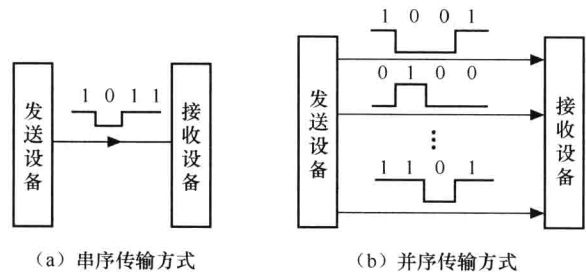


图 1-5 串序和并序传输方式

串序传输方式只需一条通路，线路成本低，适合于长距离的通信；而并序传输方法需要多条通路，线路成本高，传输速度快，适合于短距离的通信。

3. 按照网络结构划分

通信系统按照网络结构划分为专线和通信网两类。点对点的通信是专线通信；多点间的通信属网通信。网通信的基础仍是点对点的通信。

1.4 通信系统的主要性能指标

设计和评价一个通信系统，往往要涉及许多性能指标，如系统的有效性、可靠性、适应性、经济性、标准性及使用维护方便性等。这些指标可从各个方面评价通信系统的性能，但从研究信息传输方面考虑，通信的有效性和可靠性是通信系统中最主要的性能指标。有效性主要是指消息传输的“速度”问题，而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。由香农（Shannon）定理可知，系统的带宽能够决定信号的极限传输速度。信号在传输过程中的噪声干扰和信道特性不理想使信号产生畸变，造成接收信号与发送信号间出现差异，影响了通信质量。有效性和可靠性的要求是相互矛盾而又相互联系的。提高有效性会降低可靠性，反之亦然。因此在设计通信系统时，对二者应统筹考虑。

1.4.1 模拟通信系统的性能指标

在模拟通信系统中，有效性是利用消息传输速度（即单位时间内传输的信息量）或者有效传输频带来衡量的。同样的消息采用不同的调制方式，则需要不同频带的宽度。频带宽度越窄，则有效性越好。如传输一路模拟电话，单边带信号只需要 4kHz 带宽，而常规调幅需要 8kHz 的带宽，因此在一定频带内用单边带信号传输的路数比标准调幅信号多一倍，显然，单边带系统的有效性比标准调幅系统要好。

模拟通信系统的可靠性用接收机输出端的信噪比（即输出信号平均功率与噪声平均功率的比值）来衡量，如通常电话要求信噪比为 20~40dB，电视则要求 40dB 以上。输出信噪比越高，通信质量越好，它除了与信号功率和噪声功率的大小有关外，还与信号的调制方式有关。如调频信号的抗噪声性能（输出信噪比/输入信噪比）比调幅信号好，但调频信号所需传输频带要宽于调幅信号。

1.4.2 数字通信系统的性能指标

在数字通信系统中，常常用相同的时间间隔去表示一个 N 进制信号，每个间隔的信号都是一个码元，而这个间隔就是码元宽度。对于 N 进制通信系统的每个 N 进制信号都是一个 N 进制码元，每个码元都有 N 种可能的符号可采用。二进制通信系统中的每个二进制信号都是二进制码元 0 或 1。下面讨论数字通信系统的有效性和可靠性问题。

1. 数字通信系统的有效性

数字通信系统的有效性可用码元速率、信息速率及系统带宽利用率这 3 个性能指标来描述。

(1) 码元速率 R_B

码元速率 R_B 又称码元传输速率或传码率。它被定义为每秒所传送的码元数目，单位为“波特（Baud）”，常用符号“B”或“Bd”表示。

(2) 信息速率 R_b

信息速率 R_b 又称信息传输速率或传信率。它被定义为每秒所传输的信息量，单位为“比特/秒”，或记为 bit/s（也可写成 bps）。

由于每位二进制数都包含有 1bit 的信息量，因此信息速率也就是每秒传输的二进制码元

数。对于二进制码元的传输，码元速率与信息速率相等即 $R_B=R_b$ ；而对于 N 进制码元的传输来说，由于每一位 N 进制码元可用 $\log_2 N$ ($N=2^K$, K 为每位 N 进制码元所用二进制码元表示的位数) 个二进制码元表示，传输一个 N 进制码元相当于传输了 $\log_2 N$ 个二进制码元，因此信息速率与码元速率的关系是：

$$R_b = R_B \log_2 N \text{ (bit/s)} \quad (1.1)$$

对于不同进制通信系统来说，码元速率高的通信系统，其信息速率不一定高。因此在对它们的传输速度进行比较时，不能直接比较码元速率，需将码元速率换算成信息速率后再进行比较。

(3) 系统的频带利用率

在比较两个通信系统的有效性时，仅从传输速率上看是不够的，还应考察系统所使用频带的大小。这是因为香农定理指出通信系统的频带影响传输信息的能力。衡量系统效率的另一个指标是系统频带的利用率。通信系统的频带利用率定义为每秒在单位频带上传输的信息量，单位为比特/秒·赫兹或记为 $\text{bit/s} \cdot \text{Hz}$ 。不同的调制方式具有不同的频带利用率，如二进制振幅调制系统频带利用率为 $1/2$ 。系统的频带利用率越高，其有效性发挥得越好。

2. 数字通信系统的可靠性

由于在数字通信系统中（尤其是信道中）存在干扰，接收到的数字码元可能会发生错误，而使通信的可靠性受到影响。数字通信系统的可靠性指标主要用误码率 P_e 或误信率 P_b 衡量。

(1) 误码率 P_e

误码率是指通信过程中，系统传错码元的数目与所传输的总码元数目之比，也就是传错码元的概率，即

$$P_e = \frac{\text{传错码元的数目}}{\text{传输的总码元数目}} \quad (1.2)$$

(2) 误信率 P_b

误信率又称误比特率，是指错误接收的信息量（传错的比特数）与传输的总信息量（传输的总比特数）的比，即

$$P_b = \frac{\text{传错比特的数目}}{\text{传输的总比特数目}} \quad (1.3)$$

显然，在二进制通信系统中有 $P_e = P_b$ 。

通信系统中存在误码是不可避免的。不同的应用场合对误码率的要求也不一样，如数字电话通信中误码率在 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 即可满足正常通话的要求；而计算机通信中对可靠性要求更高，误码率更小。为减小误码率，可采取减小干扰、改进调制方式和解调方法及采用差错控制措施等方案。

1.5 通信的发展历史及趋势

1.5.1 通信系统的发展历史

自从有了人类社会以来，通信就产生并逐步发展起来。按照通信交流方式与技术的不同可以将通信的发展划分为 4 个历史阶段。第一阶段是语言通信，人们通过人力、马力以及烽火台等原始通信手段传递消息；第二阶段是出现文字后的邮政通信；第三阶段是电气通信时代，其主要代表性的通信方式是电话、电报和广播等；第四阶段是信息时代，它不仅要求对信息的

传递，还包括了对信息的存储、处理和加工，其主要代表为计算机网络和信息高速公路等。

真正有实用意义的电通信起源于19世纪30年代。1835年，莫尔斯电码出现；1837年，莫尔斯电磁式电报机出现；1866年，利用大西洋海底电缆实现了越洋电报通信；1876年，贝尔发明了电话机，开始了有线电报、电话通信，使消息传递既迅速又准确。

19世纪末，出现了无线电报；20世纪初电子管的出现使无线电话成为可能。从20世纪60年代以来，随着晶体管、集成电路的出现和应用，无线电通信迅速发展，无线电话、广播、电视和传真通信相继出现并发展起来。

进入20世纪80年代以来，随着人造卫星的发射，电子计算机、大规模集成电路和光导纤维等现代化科学技术成果的问世和应用，特别是数字通信技术的飞速发展，进一步促进了微波通信、卫星通信、光纤通信、移动通信和计算机通信等各种现代通信系统的竞相发展，以不断满足人们在各个方面对通信的越来越高的要求。

1.5.2 通信系统的发展趋势

通信就意味着信息的传递和交换，在当代社会中，信息的交换日益频繁，随着通信技术和计算机技术的发展及它们的密切结合，已能克服空间和时间的限制，大量的、远距离的信息传递和存取已成为可能。展望未来通信技术正在向数字化、智能化、综合化、宽带化、个人化方向迅速发展，各种新的电信业务也应运而生，朝着信息服务多种领域广泛延伸。未来通信将在以下7个领域快速发展。

① 传输在向高速、大容量、长距离发展，光纤传输速率越来越高，波长从1.3 μm 发展到1.55 μm 并已大量采用。波分复用技术已进入实用阶段，相干光通信、光孤子通信已取得重大进展。光放大代替光电转换中继器可使无中继距离延长到几百甚至上千公里。无线传输包括微波接力和卫星通信已由4/6GHz的C频段发展到11/14GHz的Ku频段，并在向20/30GHz的Ku频段甚至更高发展，这样不但扩充了可用频段，而且大大地增加了容量。传输复用采用同步数字系列SDH使各国复用系列得到了统一，上下电路则更为灵活。同时采用数字交叉连接设备(DXC)使传输网上具有电路群交换功能，大大便利了组网，并提高了网的效率和可靠性。

② 交换技术发展趋势：一个是增大单个交换机的容量，目前技术上已可达到几十万线；二是实行分散化和采用模块技术，使之更接近用户以缩短用户线。模块的功能也在不断提高。更多应用了计算技术，如总线技术、并行技术等，使交换机结构上更为合理。另一个趋势是为了适应传递宽带信号的要求发展宽带交换。目前以快速分组交换为原理的异步转移模式ATM作为宽带交换技术基础已成为定论。

③ 数据网的速率越来越高，DDN已可达149Mbit/s，同时随着传输质量的提高、误码率的减少，网的规程简化，出现帧中继方式。另外随着美国的因特网计算机通信网向国际发展，TCP/IP协议的应用范围越来越广，各种服务器、连接器也层出不穷，得到大量应用。

④ 为了克服每种业务（电报、电话、数据、图像）建单独网的缺陷，更好地满足用户多种业务的需要，通信网在向综合业务网发展。目前以两个话路带宽加一个信令通道（2B+D，144kbit/s宽带）为单元的宽带综合业务网已在使用，在发达国家已达到电话用户的1%~5%。宽带网正在大力开发中。

⑤ 随着通信接续的自动化，原来由话务员、报务员操作的功能已转由用户自己来操作。随着技术的发展，通信网可提供更多的功能。因此把由用户来判断、操作的相当部分功能交

给通信网来进行,从而使通信网具有人工智能功能,这是通信发展的智能化方向。目前已有—批智能业务,使用最广泛的如被叫集中付费、转移呼叫、电话卡、语言信箱等业务,随着需求和技术的发展,还将有更多的智能业务被开发。

⑥ 随着人的流动性增加,移动通信使用越来越广泛,技术发展也非常快。从无绳电话、寻呼到蜂窝式移动电话。下一步发展目标是实现个人化,即一个人在任何地方均可以用—号码实现主叫和被叫通信,这样号码就不是分配给固定地点的固定终端,而是分配给特定的人。为了实现更大覆盖,除了地面手段外,卫星移动通信正在取得进展。在业务上除了移动电话外,移动数据通信发展也很快。

⑦ 由于综合业务,尤其是宽带业务的发展使得用户接入成为突出的问题,因此目前重点为接入网工程,已开始有采用原电话对称铜线提高使用频率,原电缆电视的同轴线与光纤混合,使用全光纤、无线接入等多种方式。这是一个正在蓬勃发展的领域。

习 题

1-1 什么是模拟通信?什么是数字通信?数字通信有哪些优缺点?

1-2 模拟通信和数字通信系统模型中的各主要组成部分功能是什么?

1-3 模拟通信和数字通信研究的基本问题各是什么?

1-4 按照调制方式、电信业务类型、信号特征、传输媒介及复用方式,分别指出通信系统是如何分类的?

1-5 按数字信号码元排列方法划分了哪两类通信方式?各有何优缺点?

1-6 以无线广播和电视为例,说明图 1-1 模型中信息源、受信者及信道包含的具体内容是什么?

1-7 按消息的物理特征,通信系统如何分类?

1-8 按调制方式,通信系统如何分类?

1-9 模拟通信和数字通信系统主要性能指标是什么?它们是如何定义的。

1-10 某一数字通信系统传输的是四进制码元,4秒钟传输了8000个码元,求系统的码元速率是多少?信息速率是多少?若另一通信系统传输的是十六进制码元,6秒钟传输了7200个码元,求它的码元速率是多少?信息速率是多少?并指出哪个系统传输速度快。

1-11 一个四进制数字通信系统,码速率为1kBd,连续工作1小时后,接收到的错码为10个,求误码率。

1-12 设—数字传输系统传递二进制码元的速率为1200B,试求该系统的信息传输速率,若该系统改为八进制码元传递,传码率仍为1200B,此时信息传输速率又为多少?

1-13 已知二进制数字信号的传输速率为2400bit/s。试问变换成4进制数字信号时,传输速率为多少波特?