



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定
新编高等职业教育电子信息、机电类规划教材



电子技术专业

现代通信原理

(第5版)

陶亚雄 主编
黄 祎 副主编
林 勇 主 审

全书共8章，涵盖通信基本概念、模拟/数字通信系统、现代通信技术三个部分；

主要章节后面均附有一节相关技术应用的实际通信系统介绍；

各核心知识点后均附有相应实验验证环节介绍；

题型丰富，题量大，并附有答案；

极力淡化理论分析，结合实际系统阐述原理，浅显易懂。

华信教育资源网免费提供电子课件



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>



“十二五”职业教育国家规划教材

经全国职业教育教材审定委员会审定

新编高等职业教育电子信息、机电类规划教材·通信技术专业

现代通信原理

(第5版)

陶亚雄 主 编

黄 祎 副主编

林 勇 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材为第5版,根据教育部关于高职院校通信专业的教学大纲编写。全书共8章,主要介绍通信中的基本概念和术语;模拟调制系统中的线性AM、DSB、SSB和VSB方式及非线性FM、PM方式;脉冲编码调制PCM系统;数字基带调制系统;数字频带调制ASK、FSK和PSK系统;信息的概念和度量、信源编码和信道编码的原则以及原理;最佳接收原理;通信中载波同步、位同步和群同步的概念及其实现原理,每章的后面附有小结和习题。此外,还在各章最后一节分别介绍了现行各种实际通信系统的工作原理、技术。

本书极力淡化枯燥的理论分析,尽量结合实际通信系统进行原理阐述,并配有大量的插图说明,浅显易懂,既是高职高专通信、电子和网络类专业的教材,同时也可用作工程技术人员的相关参考书籍。

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

现代通信原理/陶亚雄主编. —5版. —北京:电子工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-121-30544-3

I. ①现… II. ①陶… III. ①通信原理-高等学校-教材 IV. ①TN911
中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第290031号

策划编辑:陈晓明

责任编辑:郭乃明 特约编辑:范丽

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:787×1092 1/16 印张:16.25 字数:416千字

版 次:2004年1月第1版

2017年1月第5版

印 次:2017年1月第1次印刷

印 数:3000册 定价:38.00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)88254888,88258888。

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

本书咨询联系方式:88254561。

前 言

本教材是“新编高等职业教育电子信息、机电类规划教材”通信技术专业主干课程《现代通信原理》第5版。本着教育部关于适当降低高等职业教育的理论深度、强化实际动手能力训练、培养新一代综合应用型人才的精神,按教育部高职教育电子与通信类专业“现代通信原理”的教学大纲,结合前四版教材使用反馈意见修改、编写而成。

本教材在内容选取、章节安排和编写上,具有如下特点:

1. 充分考虑高职学生的文化基础和学习能力,文字上力求浅显通俗,并适当增加了一些示意性的插图和例题,以帮助学生更好地理解教材内容。

2. 内容选取上更强调针对性和实用性,尽量避免了本课程容易流于泛泛而谈的情况。

3. 为进一步在教学内容上体现现有通信系统的有关新知识、新技术和新方法,教材对现行实际主要通信系统的基本原理、技术和功能进行了详尽的分析阐述,其核心技术安排在相应篇章的最后一节,力求使读者在阅读本书时可获得有效的实用知识而非枯燥的原理与公式。

4. 在教学内容上突出对基本概念和性质的掌握,注重对学生科学思维方法和学习能力的有效培养。

5. 鉴于通信原理教材中普遍存在的练习题题型单调、题量小、计算题中不注意对学生分析理解并解答问题能力的逐步引导等情况,本版教材继续有大量多种类型的基本概念掌握与强化(填空、单项选择、多项选择、判断等)、理论知识分析与扩展(计算、画图等)练习,既有利于学生理解掌握所学知识,也为教师开展教学提供了有力帮助。

6. 免费提供相关电子课件,力求协助教师顺利完成教学工作以及学生达成学习目的。

全书共八章,分别介绍了模拟通信和数字通信系统中常用的调制与解调方式、多路信号复用、收发同步以及最佳接收的问题,并简要讲述了信息论的有关基本概念和编码理论,本课程参考学时为80~90学时(含实验学时)。

本教材是通信、电子类教学用书,同时也可作为计算机通信、网络类专业相关课程的教学用书,还可作为相关工程技术人员的参考用书。

该书由重庆职业技术学院陶亚雄教授主编,黄祎统稿,林勇教授主审。其中,第1、2章,第3章,第4章,第5、7章,第6章,第8章分别由重庆电子工程职业学院黄祎、陶亚雄、郭谕、郭燕、张林生、刘之舟编撰、改写。此外,本书编写过程中得到天津师范大学通信学院刘南平教授及其所在院校的大力支持和帮助,在此一并表示由衷的感谢;同时,也对为本书付出辛苦劳动的电子工业出版社编审人员,以及提供大量文献参考资料的专家、学者们表示深深的敬意。

由于能力与水平限制,疏漏甚至错误之处在所难免,欢迎各位读者批评指正。

编者

2016年7月

目 录

第1章 序论	(1)
1.1 通信的概念及其发展简史	(1)
1.1.1 通信的定义	(1)
1.1.2 通信的方式	(1)
1.1.3 通信发展史	(5)
1.2 通信系统的基本概念	(6)
1.2.1 信息、信号及分类	(6)
1.2.2 通信系统的构成	(7)
1.2.3 通信系统的主要性能指标	(9)
1.3 通信的频段划分	(11)
1.4 现代通信的发展方向	(12)
习题1	(13)
第2章 模拟调制系统	(16)
2.1 调制的功能及分类	(16)
2.1.1 调制的功能	(16)
2.1.2 调制的分类	(17)
2.2 线性调制系统	(18)
2.2.1 常规双边带调制系统	(18)
2.2.2 抑制载波的双边带调制 (DSB)	(23)
2.2.3 单边带调制 (SSB) 和残留边带调制 (VSB)	(27)
2.3 非线性调制系统	(31)
2.3.1 一般概念	(31)
2.3.2 频率调制 (FM)	(32)
2.3.3 相位调制 (PM)	(37)
2.4 模拟调制系统的抗噪声性能	(38)
2.4.1 线性调制系统的抗噪声性能	(38)
2.4.2 非线性调制系统的抗噪声性能	(40)
本章小结	(41)
习题2	(42)
第3章 数字基带调制与传输	(48)
3.1 数字基带信号的码型及其功率谱	(48)
3.1.1 二元码	(49)
3.1.2 差分码	(50)
3.1.3 非归零单极性码的功率谱	(51)
3.1.4 非归零双极性码的功率谱	(53)

3.1.5	伪三元码及其功率谱	(53)
3.2	脉冲编码调制 (PCM)	(55)
3.2.1	抽样和抽样定理	(56)
3.2.2	量化	(59)
3.2.3	编码	(65)
3.3	PCM 系统的噪声	(72)
3.4	差分脉冲编码调制 (DPCM)	(74)
3.4.1	差分脉冲编码调制 (DPCM) 的原理	(74)
3.4.2	DPCM 的编、译码过程	(74)
3.4.3	DPCM 的性能	(75)
3.5	增量调制 ΔM (DM)	(75)
3.5.1	增量调制原理	(75)
3.5.2	增量调制的量化噪声	(77)
3.6	数字基带传输系统及其误码率	(78)
3.6.1	数字基带传输系统结构	(78)
3.6.2	升余弦滚降滤波器	(79)
3.6.3	码率和误码率	(83)
3.6.4	误码率的一般公式	(84)
3.6.5	眼图	(86)
3.7	信道均衡及部分响应系统	(88)
3.7.1	时域均衡及其功能	(88)
3.7.2	部分响应系统概念	(89)
	本章小结	(92)
	习题 3	(92)
第 4 章	数字频带调制	(98)
4.1	幅度键控 (ASK) 系统	(98)
4.2	频移键控 (FSK) 系统	(100)
4.2.1	频移键控 (FSK)	(100)
4.2.2	频移键控 (FSK) 的解调	(101)
4.2.3	相位连续的频移键控 (CPFSK)	(103)
4.2.4	最小频移键控 (MSK) 与高斯最小频移键控 (GMSK) 调制系统	(104)
4.3	相移键控 (PSK) 系统	(106)
4.3.1	绝对相移键控	(106)
4.3.2	绝对相移键控的解调	(107)
4.3.3	二进制相对相移键控 (2DPSK)	(108)
4.3.4	相对相移键控 (DPSK) 的解调	(110)
4.3.5	FSK/PSK/DPSK 调制/解调电路举例	(111)
4.4	四相绝对移相键控 (QPSK) 系统	(113)
4.4.1	四相绝对移相键控 (QPSK)、相对移相键控 (QDPSK) 调制	(113)
4.4.2	四相绝对移相键控 (QPSK)、相对移相键控 (QDPSK) 的解调	(117)
4.5	多元数字频带调制	(120)
4.5.1	多电平调幅 (MASK)	(120)

4.5.2 其他多元调制方式	(121)
本章小结	(122)
习题4	(122)
第5章 信道复用	(128)
5.1 通信信道概述	(128)
5.1.1 信道定义	(128)
5.1.2 传输媒介	(129)
5.2 频分复用 (FDM)	(133)
5.3 时分复用 (TDM)	(135)
5.4 复合调制与多级调制系统	(137)
5.5 多址通信方式	(137)
5.5.1 频分多址 (FDMA) 方式	(138)
5.5.2 时分多址 (TDMA) 方式	(140)
5.5.3 码分多址 (CDMA) 方式	(142)
5.5.4 混合多址方式	(142)
本章小结	(144)
习题5	(144)
第6章 编码技术	(149)
6.1 信源编码	(149)
6.1.1 信息的度量	(149)
6.1.2 信源编码	(155)
6.2 信道容量与香农公式	(159)
6.3 信道编码	(165)
6.3.1 差错控制原理	(165)
6.3.2 码重与码距	(168)
6.3.3 几种常用的差错控制码	(169)
6.4 线性分组码	(172)
6.4.1 线性分组码的定义及性质	(172)
6.4.2 生成矩阵 G 和监督矩阵 H	(173)
6.4.3 汉明码	(175)
6.5 循环码	(177)
6.5.1 循环码的特点	(177)
6.5.2 循环码的生成多项式	(178)
6.5.3 循环码的编码过程	(179)
6.5.4 循环码的编码电路	(180)
6.5.5 循环码的译码	(182)
本章小结	(184)
习题6	(184)
第7章 最佳接收机	(188)
7.1 最大输出信噪比准则和匹配滤波接收机	(188)
7.1.1 最大输出信噪比准则	(188)

7.1.2	匹配滤波器的传递函数 $H(f)$	(188)
7.1.3	匹配滤波器的冲激响应 $h(t)$	(189)
7.1.4	匹配滤波器的输出波形 $s_0(t)$	(190)
7.1.5	最大输出信噪比接收	(191)
7.2	最小均方误差接收机	(192)
7.3	最小错误概率接收	(194)
7.4	最大后验概率接收	(195)
	本章小结	(196)
	习题7	(196)
第8章	同步原理	(199)
8.1	载波同步	(199)
8.1.1	直接法	(200)
8.1.2	插入导频法	(209)
8.1.3	载波同步系统的性能	(213)
8.2	位同步	(214)
8.2.1	外同步法	(215)
8.2.2	直接法	(217)
8.2.3	位同步系统的性能	(223)
8.3	群同步	(225)
8.3.1	连贯插入法	(225)
8.3.2	间隔式插入法	(228)
8.3.3	群同步系统的性能	(230)
8.3.4	群同步的保护	(232)
8.4	网同步	(232)
8.4.1	网同步原理	(232)
8.4.2	数字同步网中的时钟及其应用	(235)
	本章小结	(239)
	习题8	(240)
	部分参考答案	(245)
	参考文献	(252)

方向，可以把通信方式分为单工通信、半双工通信和全双工通信；按照通信双方传输信息的路数，通信方式又可分为串行通信和并行通信；按照信息在信道中传输的控制方式，通信方式可分为同步传输和异步传输；根据信源、信宿之间不同线路连接与信号的交互方式，通信又可以分为点到点的通信、点到多点通信以及多点到多点的通信；按照信息在通信网中的传递方式，可以将信息传输方式分为两点间直通传输、分支传输和交换传输等，不一而足。下面就这些传输方式进行简单介绍。

1. 单工传输、半双工传输和全双工传输

如果通信仅在两点之间进行，根据信号的传输方向与时间的关系，信号的传输方式可分为单工传输、半双工传输和全双工传输三类。

(1) 单工传输。信号只能单方向传送，在任何时候都不能进行反向传输的通信方式叫做单工传输，如图 1.1 (a) 所示。广播、电视系统就是典型的单工传输系统，收音机、电视机都只能接收信号，而不能向电台、电视台发送信号。

(2) 半双工传输。半双工传输方式中，信号可以在两个方向上传输，但时间上不能重叠，即通信双方不能同时既发送信号又接收信号而只能交替进行。即同一时间内一方不允许向两个方向传送，即只能有一个发送方，一个接收方，如对讲机。这种方式使用的是双向信道，如图 1.1 (b) 所示。

(3) 全双工传输。全双工传输方式中，信号可以同时两个方向上传输，如图 1.1 (c) 所示。这种方案使用的也是双向信道，这种通信方式使用最多。

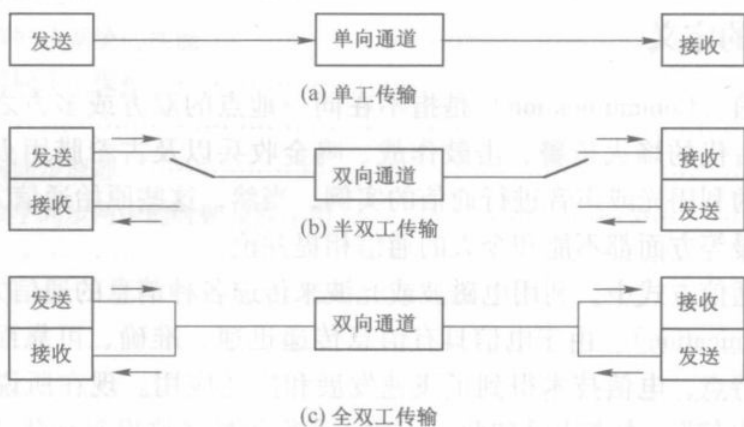


图 1.1 单工、半双工、全双工传输

2. 串行传输和并行传输

按照数字信息数据码元在信道中传递时是一个码元一个码元地依次传送还是一次同时并列地一起传几个码元，可将信号的传输方式分为串行传输和并行传输两类。

(1) 串行传输。在串行传输中，数据流的各个码元是一位接一位地在一条信道上传输的，如图 1.2 (a) 所示。对采用这种通信方式的系统而言，同步极为重要，收发双方必须保持位同步和字同步，才能在接收端正确恢复原始信息。串行传输中，收发双方只需要一条传输通道。因此，该传输方式实现容易，也是实际系统中比较常用的一种传输方式。

(2) 并行传输。并行传输中，构成一个编码的所有码元都是同时传送的，码组中的每一

位都单独使用一条通道，如图 1.2 (b) 所示。并行传输通常用于现场通信或计算机与外设之间的数据传输。

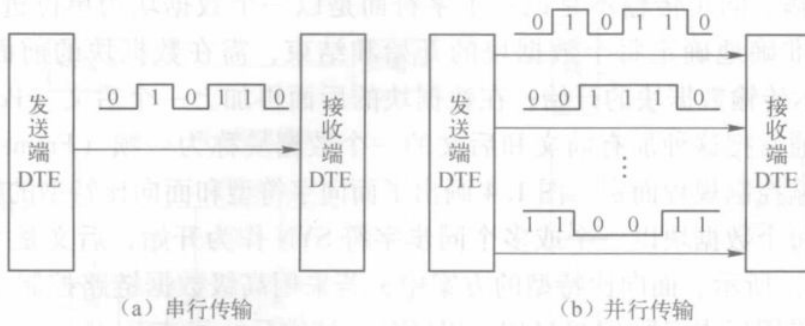


图 1.2 串行传输和并行传输

并行传输一次传送一个字符，收发之间不存在字同步问题。由于并行信道成本高，主要用于设备内部或近距离传输，长距离传输时一般多采用串行信道。所以串行传输存在着并/串、串/并变换问题，即发送端要将输入的字符通过并/串变换，形成一连串的单个字符才能进入串行信道；接收端再通过串/并变换，将收到的串行码元还原成原来的并行字符结构后输出。显然，并行传输的速率高于串行传输。

3. 同步传输和异步传输

按照信息传输过程中，收、发两端采取的不同同步原理，可将信号的传输方式分为异步传输和同步传输两类。

(1) 异步传输。异步传输也称起止式传输，它是利用起止法来达到收发同步的。异步传输每次只传送一个字符，用起始位和停止位来指示被传输字符的开始和结束。

在异步传输中，字符的传输由起始位（如逻辑电平 1）引导，表示一个新字符的开始，占一位码元时间。在每个传送的信息码之后加一个停止位（如逻辑电平 0），表示一个字符的结束，通常取停止位的宽度为 1、1.5 或 2 位码元宽度，可根据不同的需要选择。这样，接收端在收到下一个字符的起始位前，线路一直处于逻辑 0 状态，接收方就可根据特定宽度的逻辑电平从 0 到 1 的跳变来识别一个新字符的开始，如图 1.3 所示。

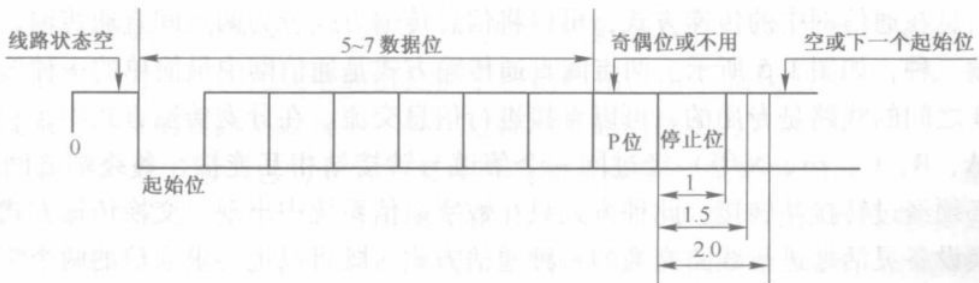


图 1.3 异步传输

异步传输方式中每个字符的发送都是独立和随机的，以不均匀的速率发送，所以这种方式被称为异步传输。该传输方法简单，但每传输一个信码都要增加 2~3 位的附加位，故传输效率较低。例如，传输一个 ASCII 码字符，每个 ASCII 码有 7 位，若停止位用 2 位，再加

上 1 位奇偶校验位和 1 位起始位，共计 11 位。11 位传输码中只有 7 位是有用信息，其传输效率只有 64%。

(2) 同步传输。同步传输不是以一个字符而是以一个数据块为单位进行信息传输的。为了使接收方能准确地确定每个数据块的开始和结束，需在数据块的前面加上一个前文 (Preamble)，表示传输数据块的开始；在数据块的后面再加上一个后文 (Postamble)，表示数据块的结束，通常把这种加有前文和后文的一个数据块称为一帧 (Frame)。前文和后文的具体格式视传输控制规程而定。图 1.4 画出了面向字符型和面向比特型的帧结构。面向字符型的方案中，每个数据块以一个或多个同步字符 SYN 作为开始，后文是一确定的控制字符，如图 1.4 (a) 所示。面向比特型的方案中，若采用高级数据链路控制 (HDLC) 规程，则前文和后文都采用标志字段 01111110，以区分一帧的开始和结束。



图 1.4 同步传输

在同步传输方式中，数据的传输是由定时信号控制的。定时信号可由终端设备产生，也可由通信设备（如调制解调器、多路复用器等）提供。在接收端，通常由通信设备从接收信号中提取定时信号。

在实际通信过程中，常将同步传输称为同步通信，异步传输称为异步通信。显然，同步通信的效率要比异步通信的效率，因此同步通信方式更适用于高速数据传输的场合。

4. 两点间直通传输、分支传输和交换传输

按照信息在通信网中的传递方式，可以将信息传输方式分为两点间直通传输、分支传输和交换传输三种，如图 1.5 所示。两点间直通传输方式是通信网中最简单的一种形式，终端 A 与终端 B 之间的线路是专用的，可以直接进行信息交流。在分支传输方式中，它的每一个终端（如 A、B、C、…、N 等）经过同一个信道与转接站相互连接，各终端之间不能直通信息，而必须经过转接站转接，此种方式只在数字通信系统中出现。交换传输方式是终端之间通过交换设备灵活地进行线路交换的一种通信方式，既可以把要求通信的两个终端之间的线路（自动）接通，也可以通过程序控制，先把发来的消息储存起来，然后再转发至收方。这种消息转发可以是实时的，也可是延时的。

分支传输方式及交换传输方式均属于网络通信的范畴。和两点间直通传输方式相比，这两种网络通信方式既存在信息控制问题，也有网络同步的问题。尽管如此，网络通信的基础仍是点到点的通信，因此，本书主要讲述点到点的通信方式。

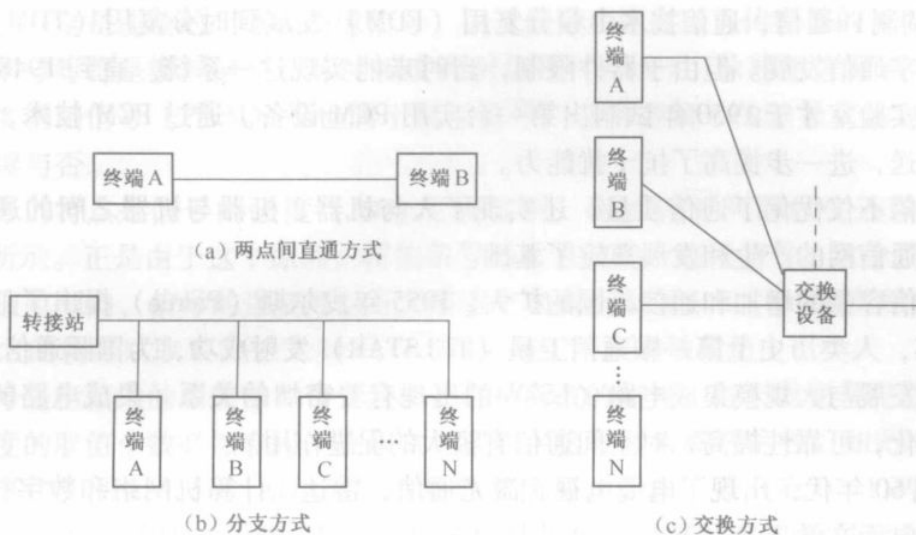


图 1.5 按网络形式划分的通信方式

1.1.3 通信发展史

人类自存在以来，为了生存从未停止过劳动和斗争，而这一过程是必须进行思想交流和信息传递的。所以说，有人类就有通信。最初人类利用表情和动作进行信息交换，这就是最原始的通信。在漫长的生活和劳动进化中，人类创造了语言和文字，进而用它们进行消息的传递，并一直沿用至今。

在电信号出现之前，人们还创造了许多种消息传递的方式，如古代的烽火台、击鼓、旌旗，航行用的信号灯等。所有这些都无法在较远的两地之间及时而准确地完成消息的传递。

从 1800 年伏打 (Votta) 发明电源以来，人们就开始努力试图利用电来进行通信了。

1837 年，莫尔斯 (Morse) 发明有线电报。这种电报通信通过导线中电流的有无来区别传号和空号，并利用传号和空号的长短进行电报符号的编码，这给远距离的消息传递揭开了崭新的一页。

1876 年，贝尔 (A. G. Bell) 利用电磁感应原理发明了电话机，直接利用导线上电流的强弱来传送语音信号，使通信技术的发展又进了一步。这种有线通信方式一直保留到现在，但这种系统的线路建设和维修花费很大，而且在有些环境情况下是难以实现的。

1864 年，麦克斯韦 (Maxwell) 预言了电磁波辐射的存在，1887 年，赫兹 (Hertz) 通过实验加以证实，为现代的无线电通信提供了理论根据。由于无线电波可以在空气中传播，避免了有线系统昂贵的线路建设投资，极大地推动了通信技术的发展。

20 世纪初，出现了用消息的电信号去控制高频正弦信号振幅的调制方式，这就是最早的幅度调制 AM。它的产生大大扩展了通信的内容，由原来单一的语音传送变为语音、音乐、图像等多种信号的传送，使点对点通信发展到点对面通信（如广播、电视等），促进了人类社会文化交流和宣传教育的发展，对人类的生活具有深刻的影响。

1936 年，频率调制 FM 技术出现了。FM 信号克服了 AM 信号在传送过程中容易受到干扰而失真的缺点，不仅改善了通信的质量，还推动了移动通信的发展。AM 制和 FM 制的应用，标志着 20 世纪 30 年代是世界上模拟通信的鼎盛时期。

从 1928 年奈奎斯特 (Nyquist) 定理被提出到 1937 年瑞维斯 (A. H. Reeves) 发明 PCM

(脉冲编码调制)通信,通信技术由频分复用(FDM)发展到时分复用(TDM),开始由模拟通信向数字通信发展。但由于器件限制,当时未能实现这一系统。直到1948年晶体管出现后,贝尔实验室才于1950年试制出第一台实用PCM设备。通过PCM技术,使模拟信号被数字化传送,进一步提高了抗干扰能力。

数字通信不仅优化了通信质量,还实现了人与机器、机器与机器之间的通信和数据交换,为现代通信网的产生和发展奠定了基础。

随着通信容量的增加和通信范围的扩大,1955年皮尔斯(Pierce)提出了卫星通信的思想。1960年,人类历史上第一颗通信卫星(TELSTAR)发射成功,为国际通信开辟了通道。这一技术的发展与大规模集成电路(LSI)的出现有着密切的关系。集成电路的出现,使通信设备小型化,可靠性提高,对空间通信有极大的促进作用。

20世纪60年代,出现了有线电视、激光通信、雷达、计算机网络和数字技术,光电处理技术和射电天文学飞速发展。

20世纪70年代,大规模集成电路、商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信、微处理机迅猛发展。

20世纪80年代,超大规模集成电路、移动通信、光纤通信得到广泛应用,综合业务数字网迅速崛起。

1990年以后,卫星通信、移动通信和光纤通信进一步飞速发展,高清晰彩色数字电视技术不断成熟,全球定位系统(GPS)得到广泛应用。

当今社会是信息社会,人们要求通信系统能够更加迅速、有效、准确、可靠地传递信息,充分利用社会的现有财富,更好地发挥各种资源的效用。一个完整的、综合性的信息交换网已经形成并正在日趋完善。

20世纪40~50年代,出现了通信理论的发展高峰,现代通信中的主要理论如过滤和预测理论、香农公式和不失真编码原理、纠错编码原理、信号和噪声理论、调制的原理以及信号检测理论等都诞生于这一时期,它们使通信的有效性和可靠性研究出现了质的突破,使通信由一门新兴的实用技术跃变而成为一门成熟的学科,并且还在不断地朝着更高更新的目标进步。

1.2 通信系统的基本概念

1.2.1 信息、信号及分类

消息由信源产生,它具有与信源相应的特征及属性,常见的消息有语音、文字、数据和图像消息等。不同的信源要求有不同的通信系统与之对应,从而形成了多种多样的通信系统,如电话通信系统、图像通信系统等。信息是抽象的消息,一般是用数据来表示的。表示信息的数据通常都要经过适当的变换和处理,变成适合在信道上传输的信号(电或光信号)才可以传输。可以说,信号是信息的一种电磁表示方法,它利用某种可以被感知的物理参量——如电压、电流、光波强度或频率等来携带信息,即信号是信息的载体。

信号一般以时间为自变量,以表示信息的某个参量(如电信号的振幅、频率或相位等)为因变量。根据信号的因变量的取值是否连续,可以分为模拟信号和数字信号。模拟信号就是因变量完全连续地随信息的变化而变化的信号,其自变量可以是连续的,也可以是离散

的，但因变量一定是连续的。电视图像信号、语音信号、温度压力传感器的输出信号以及许多遥感遥测信号等都是模拟信号；脉冲幅度调制信号（PAM）、脉冲相位调制信号（PPM）以及脉冲宽度调制信号（PWM）等也属于模拟信号，这两类信号的差异只是在于它们的自变量取值连续与否。

模拟信号的特点是信号的强度（如电压或电流）取值随时间而发生连续的变化，如图 1.6（a）所示。正是由于这个原因，模拟信号通常也被称为连续信号。这个连续的含义是指在某一定取值范围内，信号的强度可以有无限多个取值。如图 1.6（a）中所示的信号电压，在 1~1.2V 之间就可以取 1.1V，1.11V，1.111V 等无限多个数量值。

数字信号是指信号的因变量和自变量取值都是离散的信号。由于因变量离散取值，其状态数量即强度的取值个数必然有限，故通常又把数字信号称为离散信号，如图 1.6 中（b）、（c）所示。其中，图 1.6（b）所示为二进制数字信号，即该信号只有 0、1 两种可能的取值，图 1.6（c）所示为四进制数字信号，即该信号共有 0、1、2、3 四种可能取值。计算机以及数字电话等系统中传输和处理的都是数字信号。

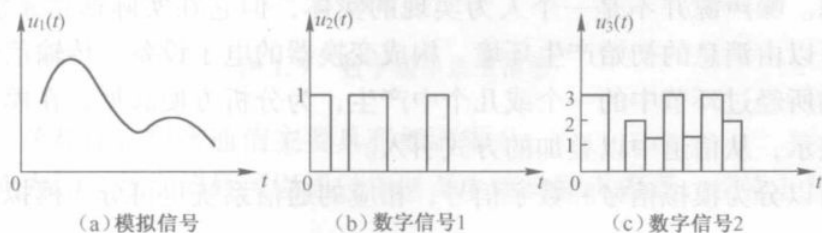


图 1.6 模拟信号、数字信号示例

由于模拟信号与数字信号物理特性不同，它们对信号传输通路的要求及其各自的信号传输处理过程也各不相同，但二者之间并非不可逾越，在一定条件下它们也可以相互转化。模拟信号可以通过抽样、编码等处理过程变成数字信号，而数字信号也可以通过解码、平滑变为模拟信号输出。

1.2.2 通信系统的构成

1. 通信系统模型

尽管通信系统种类繁多、形式各异，但其实质都是完成从一地到另一地的信息传递或交换。因此，可以把通信系统概括为一个统一的模型，如图 1.7 所示。



图 1.7 通信系统的基本模型

从图 1.7 中看到，一个通信系统最少应包括信源、变换器、信道、反变换器、信宿和噪声源六个部分。

(1) 信源和信宿。信源是信息的发出者，信宿是信息传送的终点，也就是信息接收者。

在两个人通信的情况下，信源是发出信息的人，信宿则是接收信息的人；收听广播时，收音机是信源，听收音机的人是信宿；反之，在收音机接收信号的过程中，信源是电台，而收音机却变成了信宿。

在双工通信中，信源同时也是信宿；而在半双工通信中，信源也是信宿，但通信中的同一方是不同时地充当信源和信宿的。

(2) 变换器。把信源发出的消息变换成适合在信道上传输的信号的设备就是变换器。电话通信系统中，送话器就是最简单的变换器，它把语音信号变换成电信号传送出去。在很多通信系统中为了更有效、可靠地传递信息，其变换处理装置更复杂但功能更完善。

(3) 信道。信道是所有信号传输媒介的总称，通常分有线和无线信道两种。双绞线、电缆、同轴电缆和光纤等就属于有线信道，而传输电磁信号的自由空间则是无线信道。

(4) 反变换器。反变换器具有与变换器相反的逆变换功能。变换器把不同形式的消息变换处理成适合在信道上传输的信号，但这些信号形式一般情况下是不能被信息接收者直接接收的，故接收端必须通过反变换器，把从信道上接收的信号还原成原来的消息形式。

(5) 噪声源。噪声源并不是一个人为实现的实体，但它在实际通信系统中是客观存在的。虽然噪声可以由消息的初始产生环境、构成变换器的电子设备、传输信道以及各种接收设备等信号传输所经过环节中的一个或几个中产生，为分析方便起见，在模型中把噪声集中由一个噪声源表示，从信道中以叠加的方式引入。

既然信号可以分为模拟信号和数字信号，相应的通信系统也可分为模拟通信系统和数字通信系统。

2. 模拟通信系统

信源发出的消息经变换器变换处理后，送往信道上传输的是模拟信号的通信系统就称为模拟通信系统，或者说，模拟通信系统传送和处理的都是模拟信号。如图 1.8 所示是根据早期模拟电话通信系统结构画出的模拟通信系统模型。图中的送话器和受话器相当于变换器和反变换器，分别完成语音/电信号和电信号/语音的转换，使通话双方的语音信号得以以电信号的形式传送，不再受到距离的约束和限制。

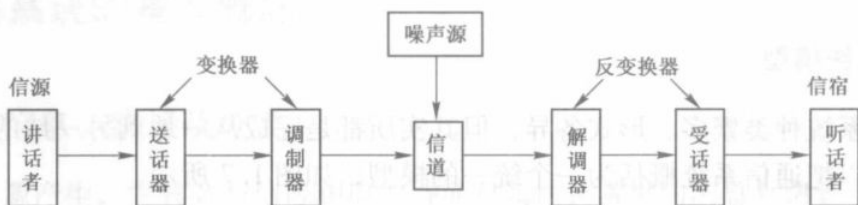


图 1.8 模拟通信系统模型

由于模拟信号的频谱较窄，模拟通信系统的信道利用率较高。但因为连续信号中混入噪声后很难清除，使得输出的还原信号产生波形失真，系统抗干扰能力差，且不易实现保密通信。

3. 数字通信系统

信源发出的信息经变换处理后，送往信道上传输的是数字信号的通信系统就是数字通信

系统，即传送和处理数字信号的系统就是数字通信系统，如图 1.9 所示就是根据数字电话传输系统的结构画出的数字通信系统模型。在发送端，声/电变换设备将语音变换为模拟电信号，再由模/数变换设备将该模拟电信号转换成二进制数字信号，经编码、加密后送至信道传输。在接收端，该数字信号经解码、解密及数/模变换和电/声变换，最后还原成声音信号送给听话者。

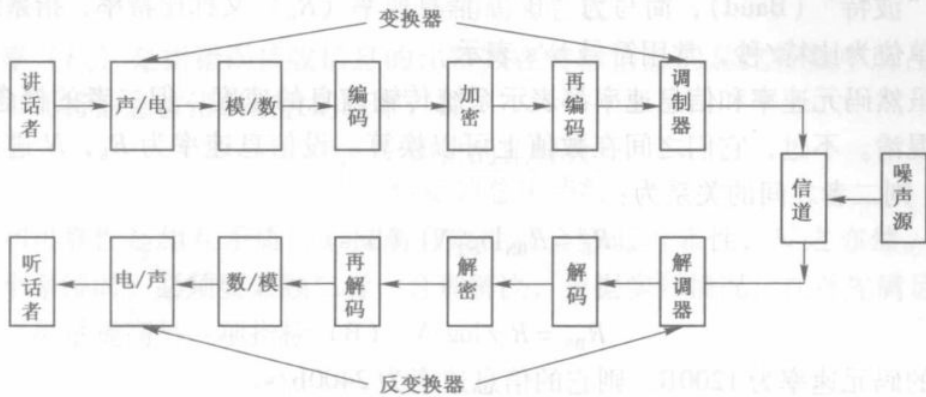


图 1.9 数字通信系统模型

和模拟通信系统相比，数字通信主要具有如下优点：

- (1) 抗干扰能力强，数字信号可以通过中继再生消除噪声积累，理论上其传输距离可以无限远。
- (2) 可以通过差错控制编码，在接收端发现甚至纠正错误，提高了通信的可靠性。
- (3) 数字信号传输一般采用二进制，故可以使用计算机进行信号处理，实现复杂系统的远距离控制，如由雷达、数字通信设备、计算机及导弹系统组成的自动化空防系统。
- (4) 由于数字信号易于加密处理，所以数字通信保密性强。
- (5) 数字通信系统易于集成化，体积小、重量轻、可靠性高。

但是，数字通信最突出的缺点就是占用频带宽，如一路模拟电话信号占用 4kHz 带宽，而一路数字电话信号却要占用 20 ~ 64kHz 的带宽。当然，随着高频率、短波长通信技术的不断发展和完善，带宽问题已基本得到缓解和解决。

1.2.3 通信系统的主要性能指标

通信系统的性能指标是衡量一个通信系统好坏与否的标准。没有这些指标，就无法评价一个系统，也无法设计一个系统。因此，了解通信系统的性能指标是很重要的。

通信系统的性能指标是一个十分复杂的问题，它涉及到系统的各个方面，诸如有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性以及维护使用等。通信的目的是为了迅速、准确地传输信息，通信系统的指标主要应从信息传输的有效性和可靠性两方面来考虑。

1. 有效性

有效性是指信息传输的效率问题，即衡量一个系统传输信息的多少和快慢。可靠性则是指系统接收信息的准确程度。两个指标对系统的要求常常相互矛盾，但可以彼此互换。

在模拟通信系统中，有效性一般用系统的有效传输频带来表示。采用不同的调制方式传

输同样的信息，所需要的频带宽度和系统的性能都是不一样的。调频（FM）信号的频带宽度高于调幅（AM）信号，但它的抗噪声性能却优于 AM 信号。采用多路复用技术可以提高系统的有效性，显然，信道复用程度越高，则信号传输所用的频带越窄，系统的有效性就越好。

在数字通信系统中，一般用信息传输速率来衡量有效性。传输速率有码元速率和信息速率之分。码元速率（ R_B ）又称传码率，是指系统每秒传送的码元个数，而不管码元是何进制，单位为“波特”（Baud），简称为“B”。信息速率（ R_b ）又称比特率，指系统每秒传送的信息量，单位为比特/秒，常用符号 b/s 表示。

注意，虽然码元速率和信息速率都表示系统传输信息的速度，但二者的概念是不同的，使用时不可混淆。不过，它们之间在数值上可以换算。设信息速率为 R_b ， N 进制码的码元速率为 R_{BN} ，则二者之间的关系为：

$$R_b = R_{BN} \log_2 N \quad (\text{b/s}) \quad (1-1)$$

或者

$$R_{BN} = R_b / \log_2 N \quad (\text{B}) \quad (1-2)$$

若四进制码的码元速率为 1200B，则它的信息速率为 2400b/s。

在二进制码的传输过程中，如果信源发送 0、1 的概率相等，则其码元速率和信息速率在数值上也相等，只是单位不同。

$$R_b = R_{B2} \quad (1-3)$$

即这时每个二进制码元含 1bit 的信息量（详见第 6 章）。

比较两个通信系统的有效性时，有的情况下单看传输速率是不够的，因为两个传输速率相同的系统可能具有不同的频带宽度，这时，带宽窄的系统有效性显然应该更高一些。所以，衡量有效性更全面的指标应是系统的频带利用率 η ，即系统在单位时间、单位频带上传输的信息量，它的单位是比特/秒/赫兹（bit/s/Hz 即 bit/(s·Hz)）。二进制基带系统中，最大的频带利用率为 $\eta = 2\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ，多进制基带系统中的最大频带利用率大于 $2\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

在频带调制系统中，不同调制方式的频带利用率可能不同。二进制调幅系统的频带利用率仅为 $0.5\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ ，而多进制调幅或调相系统的频带利用率却可以达到 $6\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。总而言之，单位频带利用率越高，则系统的有效性就越好。

2. 可靠性

可靠性是关于消息传输质量的指标，它衡量收、发信息之间的相似程度，取决于系统的抗干扰能力。

在模拟通信中，可靠性通常用系统的输出信噪比来衡量。通常，接收端恢复的信号与发送端发送的原始信号是有差别的，这种差别受两个方面的影响：

- (1) 信号传输时叠加噪声，即产生加性干扰。
- (2) 信道传输特性不理想导致的影响，即形成乘性干扰。

加性干扰无论信号的有无始终存在，而乘性干扰却只有当信号存在时才存在。由于加性干扰不可克服，一般在噪声分析过程中，主要考虑加性干扰的影响。这种影响造成的误差可以用输出信噪比来衡量，输出信噪比越高，通信的质量就越好。输出信噪比除了与信号功率和噪声功率的大小有关以外，还与信号的调制方式有关，所以改变调制方式，也可以改善系