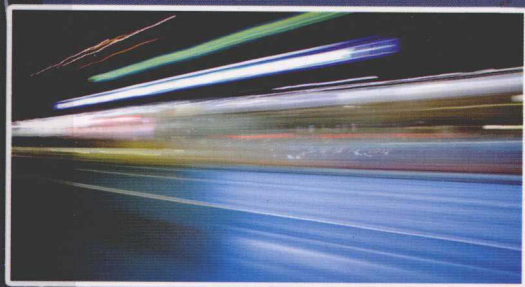




普通高等教育“十二五”规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

现代通信原理与技术 (第2版)

陶亚雄 主编 王 坚 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电子信息科学与工程类专业规划教材

现代通信原理与技术

(第2版)

陶亚雄 主编 王 坚 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本教材根据教育部关于高等院校通信工程专业教学大纲编写。全书可分为通信基础知识、现代通信基本理论、现代通信技术和通信协议4个部分,共11章。第1、2章是全书的基础,主要介绍现代通信的基本概念、体系、频道划分、信息的度量、信道及噪声的概念与分类、常用信号处理器件等。第3~6章主要介绍现代通信系统的基本原理,包括模拟调制系统原理、数字基带调制系统原理及其抗干扰技术、模拟信号的数字化调制与传输原理、数字频带调制系统原理。第7~10章主要介绍提高现代通信系统质量的技术原理,包括信道复用与多址技术,最佳接收准则及确知信号/随相信号/起伏信号的最佳接收技术,载波同步、位同步、群同步和网同步技术,以及信源编码和信道编码技术。第11章主要介绍现代通信协议的基本概念和作用,包括OSI模型、TCP/IP模型、网络交换协议、无线传输协议WAP等。

本书极力淡化枯燥的理论分析和公式推导,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。每章最后都有小结和大量形式多样的习题,并在书尾给出了习题答案,以便学生自学、复习和教师教学备课之用。配套的相关教学课件中加入了部分课程实验指示内容。

本教材既可作为通信、电子类本科专业的教材,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

现代通信原理与技术 / 陶亚雄主编. —2版. —北京:电子工业出版社,2012.8

ISBN 978-7-121-17643-2

I. ①现… II. ①陶… III. ①通信理论—高等学校—教材②通信技术—高等学校—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第158624号

责任编辑:陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订:

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:787×1 092 1/16 印张:21 字数:589千字

印 次:2012年8月第1次印刷

定 价:39.00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。

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

服务热线:(010)88258888。

前 言

本教材根据教育部关于高等院校通信专业教学大纲编写。鉴于教育部关于强化高校学生的实际动手能力训练、培养新一代综合应用型人才的精神,以及“通信原理”课程在通信、电子类专业的重要地位,教材在编写过程中以“内容实用、理论简练”为基本原则,在提供学生足够的专业基础理论和知识的同时,不过多强调理论推导和数学分析,而着眼于对知识的理解与应用,使其具有“通俗易懂、注重实用”的特点。

该书在内容选取、章节安排和编写上,具有如下特点:

(1) 内容选取上一方面强调“够用即可”,不追求多而全;另一方面注重实用,加入了大量专业相关技术的最新动态和发展趋势介绍,增加学生对专业应用的了解和专业自豪感,为后续课程学习进行铺垫。

(2) 编写行文中注重简练、准确。对重要的理论除进行详细公式推导外,还辅以过程图解或例题来加以阐述说明;其他理论的推导证明则着重介绍推导思路,仅对关键步骤进行推证,强调理论的实际意义及其应用价值。

(3) 习题形式多样化,以填空、单项/多项选择、判断题来部分取代常见的问答思考题,利于教师更好地引导学生复习、理解基本理论和概念,力求通过课后练习环节查缺补漏,保证学生全面掌握相关知识;思考题更偏向理论知识的实际综合应用,强调学生理论联系实际能力的训练。

(4) 免费提供配套的相关教学课件,并在课件中加入部分课程实验指导等内容,以便更好地协助、方便教师制作教学软件,提高教学质量,保证教学效果。

本书共 11 章,分为现代通信基础知识、基本通信理论、实用通信技术和通信协议四个部分。主要介绍现代通信的基本概念、体系和术语,现代通信系统的基本原理(如模拟调制原理、数字基带调制原理、模拟信号的数字化调制与传输原理、数字频带调制原理,以及提高通信质量的主流技术(如信道复用与多址技术、最佳接收技术、同步技术、编码技术等)。第 11 章则主要介绍了现代通信协议的基本概念及其作用。

该书参考学时 72~90(含实验),是通信、电子类专业的本科教学用书,还可作为相关技术工程人员的参考用书。

该书由上海师范大学天华学院陶亚雄教授主编、同济大学王坚教授主审,天津大学戴居丰教授、河北工业大学夏克文教授、天津师范大学刘南平教授、同济大学凌卫青老师、天津电子信息职业技术学院刘松老师、上海师范大学天华学院朱国权、王永明、徐振、刘伟、徐会彬老师,以及西南大学刘博琴老师参与了该书的指导和编写工作。

本教材在编写过程中,得到了上述各位老师及其所在院校的大力支持和帮助,在此表示由衷的感谢;同时也对为本书付出辛苦劳动的电子工业出版社的编审人员,以及提供大量文献参考资料的专家学者表示深深的敬意。

由于能力与时间限制,疏漏甚至错误在所难免,欢迎各位读者批评指正。

编 者

2012 年 5 月

• III •

目 录

第1章 绪论	1	2.5 通信系统的噪声	47
1.1 通信的概念及其发展简史	1	2.5.1 噪声来源及其分类	47
1.1.1 通信的定义	1	2.5.2 加性噪声及其特性	49
1.1.2 通信的方式	1	2.5.3 噪声的数学模型	49
1.1.3 通信发展史	4	2.6 常用信号处理器件	50
1.2 通信系统的概念	6	2.6.1 滤波器	50
1.2.1 通信信号及分类	6	2.6.2 乘法器	52
1.2.2 通信系统构成	7	习题二	52
1.2.3 通信系统的主要性能指标	9	第3章 模拟调制系统	57
1.3 通信频段划分	11	3.1 调制的功能及其分类	57
1.4 通信的发展方向	13	3.1.1 调制的功能	57
1.4.1 光纤通信	13	3.1.2 调制方式分类	58
1.4.2 移动通信	14	3.2 线性调制系统	58
1.4.3 卫星通信	14	3.2.1 双边带调制与解调	59
1.4.4 IP 通信	15	3.2.2 单边带调制与解调	64
习题一	16	3.2.3 残留边带调制与解调	66
第2章 现代通信系统基础	18	3.3 非线性调制与解调	67
2.1 信息的度量	18	3.3.1 非线性调制一般概念	67
2.2 信道容量与香农公式	19	3.3.2 频率调制系统	68
2.2.1 离散信源的平均信息量	19	3.3.3 相位调制系统	73
2.2.2 连续信源的熵	22	3.4 模拟调制系统的抗噪声性能	74
2.2.3 离散信道的熵速率与信道容量	23	3.4.1 线性调制系统的抗噪声性能分析	
2.2.4 连续信道的熵速率与信道容量	26	与比较	75
2.2.5 香农公式	28	3.4.2 非线性调制系统的抗噪声性能	
2.3 通信信道	29	分析与比较	76
2.3.1 信道的定义及其分类	29	3.4.3 线性调制与非线性调制系统的	
2.3.2 信道数学模型	30	抗噪声性能比较	77
2.3.3 恒参信道	31	3.5 复合调制与多级调制	79
2.3.4 随参信道	36	习题三	79
2.4 随机变量与随机过程	39	第4章 数字基带调制与传输	85
2.4.1 随机变量与随机过程	39	4.1 数字基带信号	85
2.4.2 随机过程的统计平均与功率谱		4.1.1 基带信号的概念及特点	85
密度	40	4.1.2 常用数字基带信号码型	85
2.4.3 线性时不变系统对随机输入		4.2 数字基带信号的功率谱密度分析	89
信号的响应	45	4.3 基带传输与码间干扰	91

4.3.1 数字基带传输系统结构	91	6.3.2 相对相移键控 2DPSK 的调制 与解调	149
4.3.2 无码间干扰的基带传输特性	92	6.4 多进制调制	152
4.3.3 部分响应系统	95	6.4.1 多进制数字调幅(MASK)	152
4.3.4 眼图	98	6.4.2 多进制数字调频(MFSK)	153
4.4 均衡技术	99	6.4.3 多进制数字调相(MPSK)	154
4.4.1 线性横向均衡滤波器	101	6.5 正交频分复用(OFDM)	159
4.4.2 峰值失真准则	101	6.5.1 OFDM 概述及其特点	160
4.4.3 均方误差(MSE)准则	102	6.5.2 OFDM 的实现方法	163
4.4.4 基带和带通线性均衡器	103	6.5.3 OFDM 的保护间隔与循环 前缀	164
习题四	104	习题六	165
第 5 章 模拟信号数字化传输	108	第 7 章 信道复用与多址技术	172
5.1 脉冲幅度调制(PAM)	108	7.1 多用户通信系统	172
5.1.1 抽样与抽样定理	108	7.2 频分复用(FDM)	173
5.1.2 脉冲幅度调制 PAM	111	7.3 时分复用(TDM)	174
5.2 脉冲编码调制(PCM)	113	7.4 多址技术	176
5.2.1 抽样信号的量化	113	7.4.1 频分多址(FDMA)	177
5.2.2 编码	118	7.4.2 时分多址(TDMA)	179
5.2.3 PCM 系统的噪声	122	7.4.3 码分多址(CDMA)	180
5.3 差分脉冲编码调制(DPCM)	124	7.4.4 空分多址及混合多址	186
5.3.1 DPCM 原理	124	习题七	188
5.3.2 DPCM 系统的噪声	125	第 8 章 最佳接收机	191
5.4 增量调制 ΔM	125	8.1 最佳接收准则	191
5.4.1 增量调制原理	125	8.1.1 最大输出信噪比准则	191
5.4.2 增量调制系统的噪声	127	8.1.2 最小均方误差准则	194
5.5 时分复用和多路数字电话系统	128	8.1.3 最大后验概率准则	196
5.5.1 PCM 时分多路复用信号帧 结构	128	8.2 确知信号的最佳接收	198
5.5.2 30/32 路 PCM 基群终端机及其 定时与同步	130	8.3 随机信号的最佳接收	199
5.5.3 数字复接技术	131	8.4 起伏信号的最佳接收	201
习题五	136	8.5 普通接收机与最佳接收机的性能 比较	201
第 6 章 数字频带调制	141	习题八	203
6.1 二进制幅度键控 2ASK 系统	141	第 9 章 同步原理	206
6.2 二进制频移键控 2FSK 系统	142	9.1 载波同步	206
6.2.1 一般频移键控 2FSK 的调制与 解调	142	9.1.1 直接载波同步法	206
6.2.2 相位连续的频移键控 2CPFSK	145	9.1.2 插入导频载波同步法	212
6.3 二进制相移键控 2PSK 系统	147	9.1.3 载波同步的性能	216
6.3.1 绝对相移键控 2PSK 的调制与 解调	147	9.2 位同步	217
		9.2.1 外同步法	218

9.2.2 直接位同步法	219	习题十	272
9.2.3 位同步的性能	224	第 11 章 通信协议	277
9.3 群同步	225	11.1 通信网概述	277
9.3.1 连贯插入群同步法	226	11.1.1 通信网的种类及拓扑结构	277
9.3.2 间隔式插入群同步法	228	11.1.2 通信网的组成和信令	279
9.3.3 群同步的性能与保护	229	11.2 协议的概念及其必要性	281
9.4 网同步	231	11.2.1 通信协议的产生及必要性	281
9.4.1 网同步原理	231	11.2.2 通信协议	282
9.4.2 数字同步网	232	11.3 OSI 协议	283
9.4.3 北斗双星导航在数字同步网中 的应用	236	11.3.1 OSI 标准协议体系结构与 概念	283
习题九	240	11.3.2 OSI 的数据传输过程	287
第 10 章 编码技术	245	11.4 TCP/IP	288
10.1 信源编码	245	11.4.1 TCP/IP 体系结构与概念	288
10.1.1 信源编码基本原理	245	11.4.2 TCP/IP 的数据传输过程	289
10.1.2 最佳信源编码	246	11.4.3 TCP/IP 族	290
10.2 信道编码	249	11.5 网络交换协议	291
10.2.1 信道编码原理	249	11.5.1 网络交换技术	291
10.2.2 几种简单差错控制码	253	11.5.2 X.25 协议	292
10.3 常见线性码	255	11.5.3 帧中继协议	295
10.3.1 线性分组码	255	11.5.4 ATM 协议	296
10.3.2 循环码	259	11.6 无线传输协议 WAP	298
10.4 卷积码	264	11.6.1 WAP 的产生	298
10.4.1 卷积码概念与原理	264	11.6.2 WAP 协议体系	299
10.4.2 卷积码的编码	266	11.6.3 WAP 发展趋势	302
10.4.3 卷积码的译码	267	习题十一	302
10.5 编码交织	268	习题答案	307
10.5.1 编码交织原理	268	附录 贝塞尔函数数值表	327
10.5.2 交织方式改进与应用	269	参考文献	328
小结	272		

第 1 章 绪 论

在科学技术迅速发展的 21 世纪,随着人们对通信、信息量越来越大的需求,以及计算机技术、网络技术、自动化技术的迅猛发展,通信尤其是数字通信技术的发展非常迅速,应用领域也越来越广,与社会的联系越来越密切,在社会中的地位也越来越重要。从最初社会的补充到现在社会的基础设施,通信已逐渐成为经济发展、社会进步的支柱和先导产业。

本章主要介绍通信的概念及其发展史,通信系统的概念,通信的频段划分以及通信的发展方向和趋势等,为学习、理解和掌握现代通信系统的原理与技术奠定基础。

1.1 通信的概念及其发展简史

从远古时代到现在高度文明发达的信息社会,人类的各种活动都与通信密切相关。进入信息时代,技术的进步极大地扩展了通信的功能,使人们可以随时随地通过各种通信技术与手段获取、交换各种信息。

1.1.1 通信的定义

一般地说,通信(communication)是指不在同一地点的双方或多方之间进行迅速有效的信息传递。我国古代的烽火传警、击鼓作战、鸣金收兵,以及古希腊用火炬位置表示字母等,就是人类最早利用光或声音进行通信的实例。当然,这些原始通信方式在传输距离的远近,以及速度的快慢等方面都不能和今天的通信相提并论。

各种各样的通信方式中,利用电磁波或光波来传递各种消息的通信方法就是我们通常所说的电信(telecommunication)。由于电信具有信息传递迅速、准确、可靠,而且几乎不受时间和空间距离限制等特点,电信技术得到了飞速发展和广泛应用。现在所说的“通信”在通常意义上都是指的“电信”,本书也是如此。因此,我们不妨在这里对现代通信的概念进行重新定义:利用光、电技术手段,借助光波或电磁波,实现从一地向另一地迅速而准确的信息传递和交换。

通信从本质上讲就是实现信息传递的一门科学技术。随着社会的发展,人们对信息的需求量日益增加,要求通信传递的信息内容已从单一的语音或文字转换为集声音、文字、数据、图像等多种信息融合在一起的多媒体信息,对传递速度的要求也越来越高。当今的通信网不仅能有效地传递信息,还可以存储、处理、采集及显示信息,实现了可视图文、电子信箱、可视电话、会议电视等多种信息业务功能。通信已经成为信息科学技术的一个重要组成部分。

1.1.2 通信的方式

信号在信道中的传输方式从不同的角度考虑,可以有多种。按照信息在信道中的传输方向,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,通信的方式可分为同步传输和异步传输;根据信源、信宿之间不同的线路连接与信号交互方式,通信又可以分为点到点的通信、点到多点的通信,以及多点到多点的通信等,不一而足。下面就这些传输方式进行简单介绍。

1. 1. 2. 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称作单工传输,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。

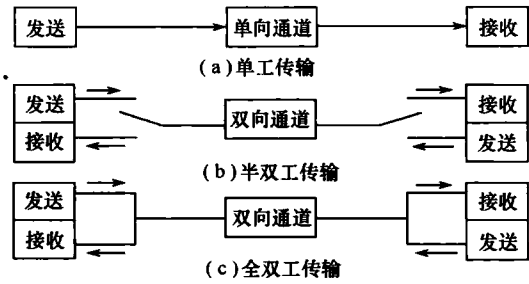


图 1-1 单工、半双工、全双工传输

2. 半双工传输

半双工传输时,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通道,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。这种方式使用的也是双向通道,这种通信方式使用最多。

1. 1. 2. 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通道上传输的,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

在并行传输中,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。

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。

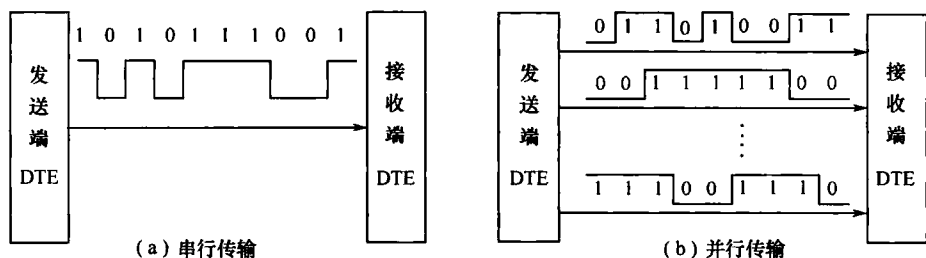


图 1-2 串行传输和并行传输

1.1.2.3 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 1-3 所示。直通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,也可以是延时的。

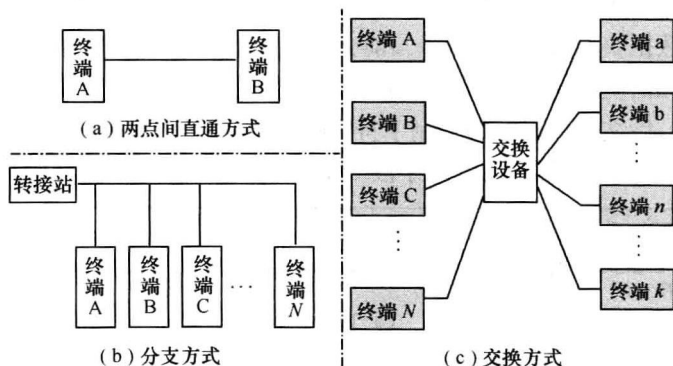


图 1-3 按网络形式划分的通信方式

分支方式及交换方式均属于网络通信的范畴。和点到点的直通方式相比,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,本篇主要讲述点到点的通信方式。

1.1.2.4 异步传输和同步传输

按照信息传输过程中,采取不同的同步方式,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

异步传输也叫起止式传输,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,接收方就可以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 1-4 所示。

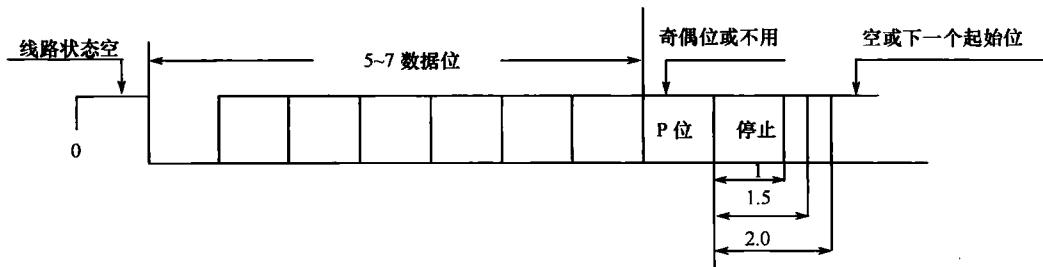


图 1-4 异步传输

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 1-5 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。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。

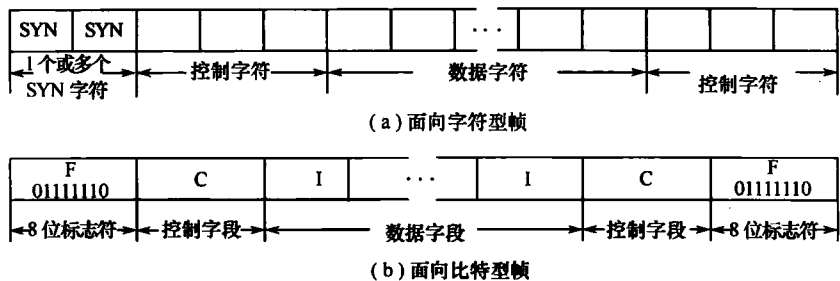


图 1-5 同步传输

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。

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。

1. 1. 3 通信发展史

人类进行通信的历史由来已久,从远古时代的人类利用表情和动作进行信息交换,到现在的卫星通信、4G 通信,可以说自从有了人类,就开始有通信。

在漫长的劳动进化过程中,人类创造了语言和文字,进而用它们进行消息传递,如古代的烽火狼烟、飞鸽传信、驿马邮递等。这一方式一直保留至今,如现代社会中的交警指挥手语、航海旗语等。这些通信方式所依靠的是人的视觉与听觉,都无法完成较远的两地间及时、准确的消息传递。

1800 年伏特(Volta)发明了电源,开启了利用电磁波进行通信的历史,用电信号作为信息传递的载体,人类的通信终于开始脱离对视觉、听觉的依赖,传说中的“顺风耳”、“千里眼”都成为了现实,进入一个新的通信时代——现代通信时代。

下面我们从两个方面介绍现代通信的发展历程。

1.1.3.1 有线通信发展史

1837 年,美国人塞缪尔·莫尔斯(Samuel Morse)成功研制出世界上第一台电磁式电报机,通过导线中电流的有无来代表区别传号和空号(即点、划、空格),并利用这些点、划、空格编码成英文字母和数字,从而实现了长途电报通信,揭开了远距离有线传输的新篇章。

1850 年,世界上第一条海缆由约翰和雅各布·布雷特兄弟俩在法国的格里斯—奈兹海角和英国的李塞兰海角之间的公海里铺设,并成功实现了电报拍发。

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,用电信号进行语音传输,并于 1876 年获得专利。1878 年,在相距 300 公里的波士顿和纽约两个城市之间,人类首次进行了长途电话实验并获得成功。

电磁波的发现促使了图像传播技术的诞生。1907 年 11 月 8 日,法国发明家爱德华·贝兰在法国摄影协会大楼里表演了他的研制成果——相片传真。

1922 年美国中学生菲罗·法恩斯沃斯设计出第一幅电视传真原理图,被裁定为电视机发明第一人。1928 年美国的兹沃尔金发明了光电显像管,并与人合作实现了电视信号的扫描、发送和传输。1935 年,美国纽约帝国大厦设立了一座电视台,次年就成功地把电视节目发送到 70 公里以外的地方。1946 年,美国人罗斯·威玛发明了高灵敏度摄像管,同年日本八本教授解决了家用电视机接收天线问题,电视技术就迅速普及开来。

1956 年,在英国和加拿大之间的大西洋海底铺设完成了电话电缆,使远距离的大陆之间电话通信成为现实。

1965 年,第一部由计算机控制的程控电话交换机在美国问世,标志了程控电话通信时代的开始。随着世界上第一部程控数字交换机于 1970 年在巴黎开通,数字电话通信技术开始了全面投入使用的垄断时期。

1969 年,美国国防部高级研究计划署(ARPA)提出了研制 ARPA 网的计划,并于同年建成投入运行,计算机通信开始进入人类的生活。

1.1.3.2 无线通信发展史

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。

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,导致了无线电的诞生和电子技术的发展。

电磁波的发现导致了无线通信的产生,其后不到 6 年,俄国的波波夫、意大利的马可尼分别发明了无线电报,实现了信息的无线传播。1904 年英国电气工程师弗莱明发明了二极管,

1906 年美国物理学家费森登成功地研究出无线电广播技术。1920 年,美国无线电专家康拉德在匹兹堡建立了世界上第一家商业无线电广播电台,广播事业从此在世界各地蓬勃发展。

20 世纪初,幅度调制(AM) 技术出现,它用消息的电信号控制高频正弦信号的振幅,使通信内容由单一的语音变为集语音、文字、图像于一体的多媒体信号,点对点通信发展为点对面通信(如广播、电视等)。

1936 年,频率调制(FM) 技术诞生,它克服了 AM 信号易受干扰的缺点,不仅改善了通信的质量,还推动了移动通信的发展。AM 和 FM 技术的应用,标志着 20 世纪 30 年代是模拟通信的鼎盛时期。

1937 年,瑞维斯(A. H. Reeves) 发明脉冲编码调制(PCM) 技术,使信号传输由频分复用(FDM) 发展到时分复用(TDM),模拟通信开始向数字通信发展。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,模拟信号被数字化传送,进一步提高了抗干扰能力,并实现了人与机器、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。

1954 年 7 月,美国海军利用月球表面对无线电波的反射进行了地球上两地电话的传输试验。并于 1956 年在华盛顿和夏威夷之间建立了通信业务。

随着通信容量的增加和通信范围的扩大,1955 年皮尔斯(Pierce) 提出了卫星通信的设想。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 年代起,有线电视、激光通信和雷达的产生,推动了计算机网络技术、光电处理技术和射电天文学的飞速发展;大规模/超大规模集成电路、商用卫星通信和程控数字交换机、微处理技术的出现,极大地促进了移动通信、光纤通信的迅猛发展和应用;综合业务数字网迅速崛起,高清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。

早期的移动通信系统由于采用大区制,容量极为有限,完全不能满足商用的需求。1978 年,贝尔实验室研制成功先进移动电话系统(AMPS),建成了蜂窝状移动通信网,实现了频率再用,大大提高了系统容量,解决了公用移动通信系统要求容量大与频率资源有限的矛盾。随着蜂窝移动通信网于 1983 年在芝加哥的商用,蜂窝移动通信系统迅速成为全球范围的实用系统,开始了移动通信大发展的时期。

无论有线还是无线,现代通信技术的发展与相关基础理论的发展是密不可分的。19 世纪提出的傅里叶级数、Z 变换、拉普拉斯变换、线性系统理论、状态空间方法等定理,为现代通信技术奠定了数学理论基础。20 世纪 40 年代至 50 年代,诞生了滤波和预测理论、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、调制原理,以及信号检测理论等,使通信的有效性和可靠性研究出现了质的突破,推动通信技术跃变为一门成熟学科,并不断地朝着更高更新的目标进步。

1.2 通信系统的概念

1.2.1 通信信号及分类

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（电信号或光信号）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、光波或频率等来携带信息，即信号是信息的载体。

信号一般都以时间为自变量，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，信号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。正是因为这个原因，模拟信号通常也被称作为连续信号。这个连续的含义是指在某一取值范围内，信号的强度可以有无限多个取值。如图 1-6 中所示的信号电压，在 $1 \sim 1.2\text{V}$ 之间就可以取 $1.1\text{V}, 1.11\text{V}, 1.111\text{V} \dots$ 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作离散信号，如图 1-6 中的图(b)、图(c) 所示。其中，图(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(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。

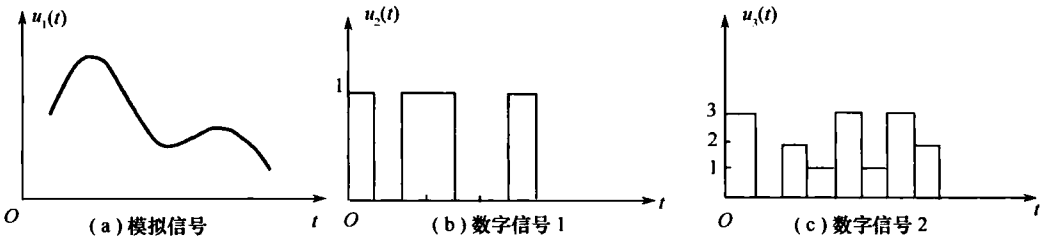


图 1-6 模拟信号、数字信号示例

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、平滑作为模拟信号输出。

1.2.2 通信系统构成

1.2.2.1 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，包括信源、发送设备、信道、接收设备、信宿和噪声源 6 个部分，如图 1-7 所示。

1. 信源和信宿

信源是信息的出发点，即发出信息的一端；信宿则是接收信息的终点，也就是信息接收者。若有两个人正在进行通信，则信源指的就是发信息的人，信宿则是收信息的人。当某人收听广

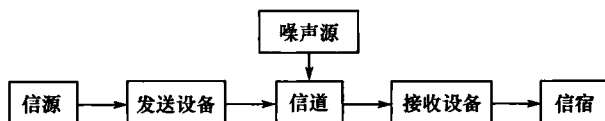


图 1-7 通信系统模型

播时,对收听者而言,收音机是信源,听收音机的人是信宿;但收音机发出的声音信号实际上源于广播电台,所以对收音机和广播电台来说,收音机是信宿,而电台则是信源。

双工通信中,信源同时也是信宿;而半双工通信中,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. 发送设备

由于语音、图像等信号无法以电磁波的形式传送,所以需要首先通过变换器将其转换成电信号,再对这种电信号进一步转换,使其适于在信道中传输后再输送到信道中。

电话通信系统中,送话器就是最简单的变换器,它把语音信号转换成电信号传送出去。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

信道是传输信号的通道,是所有信号传输媒介的总称,通常分为有线信道和无线信道两种。有线信道和无线信道均有多种传输媒质,如双绞线、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属于无线信道。信道既给信号以通路,也在信号的传输过程中产生各种干扰,对通信的质量产生直接影响。

4. 接收设备

接收设备从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始信号,它对接收信号的处理过程与发送端相反(也被称为反变换),包括信号的解调、译码、解码等。对于多路复用信号,接收设备还具有解除多路复用和实现正确分路的功能。

5. 噪声源

噪声源是信道中的噪声以及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。噪声源并非实体,但它在实际通信系统中客观存在。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。

1.2.2.2 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。

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,使通话双方的话音信号得以用电信号的形式传送,不再受到距离的约束和限制。

由于模拟信号频谱较窄,模拟通信系统可通过多路复用获得较高的信道利用率,但因为连续信号中叠加了噪声以后很难清除,使解调输出的信号产生波形失真,系统抗干扰能力差。此外,模拟通信系统不易实现保密,设备器件很难被大规模集成化,不能满足飞速发展的计算机通信的要求。

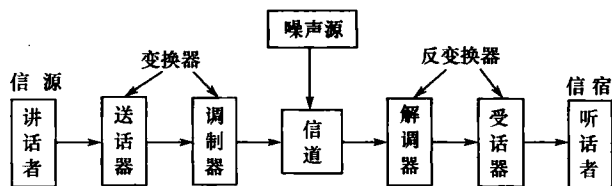


图 1-8 模拟通信系统模型

1.2.2.3 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。

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。

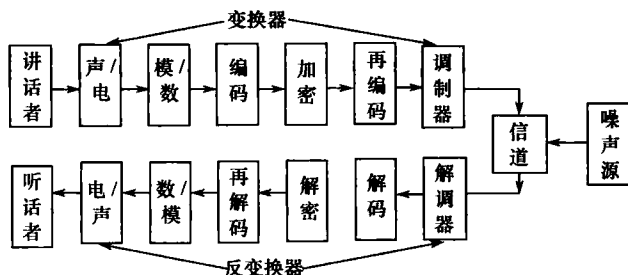


图 1-9 数字通信系统模型

和模拟通信系统相比,数字通信系统主要具有如下优点:

- (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,实现以计算机为中心的远距离、大规模、复杂、自动控制和自动数据处理系统,如由雷达、数字通信设备、计算机、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) 在数字通信中,各种消息(模拟的和离散的)都可变成统一的数字信号进行传输。在系统中对数字信号传输情况的监视信号、控制信号及业务信号都可采用数字信号。数字传输和数字交换技术结合起来组成的 ISDN 对于来自不同信源的信号自动地进行变换、综合、传输、处理、存储和分离,实现各种综合业务。
- (6) 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,随着毫米波、光纤等高频率、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。鉴于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。

1.2.3.1 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度。两个指标对系统的要求常常相互矛盾,通常只能依据实际要求取得相对统一。例如,在满足一定的可靠性指标下,尽量提高消息的传输速度,或者在维持一定的有效性条件下,使消息传输质量尽可能地提高。

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),简写为“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 bit/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

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

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

若四进制码的码元速率为 1200B,则它的信息速率为 2400bit/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。

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

即表示每个二进制码元含 1bit 的信息量。(详见第 2 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 $2\text{bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$ 。

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。

1.2.3.2 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。

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: