



高等职业教育“十一五”精品课程规划教材

TONGXIN YUANLI

通信原理

徐文燕 主 编
伍振国 副主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等职业教育“十一五”精品课程规划教材

通 信 原 理

徐文燕 主 编
伍振国 副主编

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书是针对高等职业教育的要求,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。以通信系统必不可少的基本组成开始,按信号在通信系统的流程顺序进行编写,着重介绍数字通信的基本原理,并围绕原理介绍最新的通信技术与实现方法。

全书共分为9章:第1章绪论;第2章模拟调制系统;第3章模拟信号的数字化传输;第4章数字信号的基带传输系统;第5章数字信号的频带传输;第6章信道复用和多址方式;第7章同步技术;第8章差错控制;第9章通信系统的应用举例。

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。在编写上力求通俗易懂,除必要的数学推导外,注意讲述物理概念和直观的图形分析,强调应用。

为使读者能更好地理解基本概念和掌握通信系统的分析方法,每章都精选了一些例题和习题,以供学习时参考。

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,也可供其他学习通信技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/徐文燕主编. —北京:北京邮电大学出版社,2008

ISBN 978-7-5635-1749-7

I. 通… II. 徐… III. 通信理论—高等学校:技术学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第076573号

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京忠信诚胶印厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.25

字 数:351千字

印 数:1—3 000册

版 次:2008年6月第1版 2008年6月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-1749-7

定 价:25.00元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

编者的话

通信是人类社会传递信息、交流思想、传播知识的重要手段。当前,人类已进入信息化社会,通信技术正以惊人的速度向前发展。通信与计算机的结合,更为通信技术的飞跃注入了新的生机和活力。现代通信技术和通信网正向数字化、智能化、宽带化、综合化、个人化方向发展,全球一网是现代通信发展的总趋势。

《通信原理》是一门专业基础课的教材,其任务是介绍通信系统的基本原理、基本技术、基本性能和基本分析方法。本书主要介绍现代通信系统所涉及的基本理论和技术,以数字通信为主,按系统的原理框架分章讲解,重点放在与通信系统有关的基本理论和基本方法上,考虑到内容的实用性和系统性,该教材对模拟通信的相关内容也作了介绍。为跟踪当前通信发展趋势,适当介绍了通信领域的新技术和新的发展方向。

根据高职高专院校的特点,本教材注重实践能力的培养,培养学生独立分析问题、解决问题和设计创新的能力。教材中强调加强基本概念的掌握,加强基本运算和分析问题、解决问题方法的训练。内容力求简练,重点突出,深入浅出,通俗易懂。在内容选取上注重基础性、先进性、实用性、系统性和方向性,理论联系实际,努力反映现代通信技术的最新发展。在文字表达上力求条理清楚、深入浅出、通俗易懂、循序渐进。除必要的数学分析外,尽量回避繁琐的数学推导,突出重点,强调物理概念,用直观的图解方法解释物理问题,以便于对讨论内容的理解。

本书共9章:第1章主要介绍通信的基本概念、通信系统模型、性能指标、信道及容量;第2章主要介绍了模拟调制系统的调制方法及其抗噪性能;第3章着重介绍了几种主要的模拟信号的数字编码方法,并分析了其性能;第4章主要介绍数字信号的基带传输的特性;第5章主要介绍数字信号的基本调制系统性能,并介绍部分现代数字调制系统;第6章分别介绍了目前广泛采用的几种信道复用和多址方式;第7章着重分析了载波同步、位同步、帧同步及网同步的实现方法;第8章内容包括差错控制的基本原理、常用几种检错码、线性分组码、循环码

和卷积码;第9章应用举例,以建立完整的数字通信系统的概念。为了便于读者理解和复习,每章后面均附有小结和习题。

本书参考学时数为60~90,选用本书作为教材可根据课程设置的具体情况、专业特点和教学要求的侧重点不同进行适当的取舍讲授,灵活掌握。

本书自成系统,便于自学,可作为高职院校计算机、通信工程、信息技术和其他相近专业的高职生教材,也可供从事这方面工作的广大科技工作者阅读和参考。

本书由武汉铁路职业技术学院徐文燕老师编写了第2~7章,武汉铁路职业技术学院伍振国老师编写第1、8、9章。

徐文燕负责全书的统稿工作。

由于编者水平有限,加之时间紧迫,书中难免存在问题或错误,敬请各位读者批评指正。

本教材精品课程教学资源网站地址:<http://www.wru.com.cn/JPKC/txyl/zcr-1.htm>。

编者

2008年5月

目 录

第 1 章 绪论

1.1 通信系统的组成	1
1.1.1 通信的基本概念	1
1.1.2 通信系统模型	1
1.1.3 模拟通信系统和数字通信系统模型	2
1.2 通信系统的分类及通信方式	4
1.2.1 通信系统的分类	4
1.2.2 通信方式	4
1.3 通信系统的主要性能指标	6
1.3.1 模拟通信系统的性能指标	6
1.3.2 数字通信系统的性能指标	6
1.4 信号、信道与噪声	7
1.4.1 信号	8
1.4.2 信道的定义与分类	9
1.4.3 信道噪声	10
1.5 信道容量	11
小结	12
思考题	12

第 2 章 模拟调制系统

2.1 调制的作用和分类	13
2.1.1 调制的作用	13
2.1.2 调制的基本特征和分类	14
2.2 幅度调制	14
2.2.1 常规双边带调幅	15
2.2.2 抑载双边带调制	17
2.2.3 单边带调制	18
2.2.4 残留边带调制	19
2.3 线性调幅信号的解调	21
2.3.1 常规调幅信号的相干解调	21
2.3.2 抑载双边带信号的相干解调	22
2.3.3 单边带信号的相干解调	22

2.3.4 残留边带信号的相干解调	23
2.4 线性调幅信号的非相干解调	23
2.4.1 常规调幅信号的包络解调	23
2.4.2 均值检波器解调 AM 信号	24
2.4.3 抑载已调信号载波重新插入法解调	25
2.4.4 线性调制系统的抗噪声性能	25
2.5 模拟角调制	26
2.5.1 角调制的基本概念	26
2.5.2 调频信号的产生	27
2.5.3 调频信号的解调	27
小结	28
思考题	28

第 3 章 模拟信号的数字化传输

3.1 抽样定理	30
3.1.1 样值信号的频谱	30
3.1.2 低通型抽样定理	32
3.1.3 带通型抽样定理	33
3.1.4 信号的重建	34
3.2 脉冲编码调制	34
3.2.1 量化	36
3.2.2 编码和译码	45
3.2.3 PCM 系统的噪声性能	55
3.2.4 PCM 编解码器芯片	56
3.3 增量调制	57
3.3.1 增量调制的基本原理	57
3.3.2 量化噪声和过载噪声	59
3.3.3 增量调制系统的抗噪声性能	60
3.3.4 PCM 与 ΔM 系统的比较	61
3.4 改进型增量调制	62
3.4.1 增量总和调制	62
3.4.2 数字压扩自适应增量调制	64
3.5 自适应差分脉冲编码调制	65
3.5.1 差分脉冲编码调制	65
3.5.2 自适应差分脉冲编码调制	66
3.6 语音与图像压缩编码简介	66
3.6.1 语音压缩编码简介	66
3.6.2 图像压缩编码简介	68

小结	70
思考题	71
第 4 章 数字信号的基带传输系统	
4.1 数字基带信号的特点	73
4.1.1 码型选择	73
4.1.2 常用码型	74
4.2 数字基带信号的频谱分析	79
4.3 基带传输中的码间串扰与无码间串扰的基带传输	81
4.3.1 数字基带信号传输系统模型	81
4.3.2 基带传输中的码间串扰	82
4.3.3 无码间串扰的基带传输特性	83
4.3.4 无码间串扰的理想低通滤波器	84
4.3.5 无码间串扰的滚降系统	85
4.4 部分响应系统	87
4.4.1 第 I 类部分响应	87
4.4.2 差错传播和预编码	88
4.4.3 第 IV 类部分响应波形	89
4.5 眼图与均衡	91
4.5.1 眼图	91
4.5.2 均衡	92
小结	94
思考题	94
第 5 章 数字信号的频带传输	
5.1 二进制数字调制原理	95
5.1.1 二进制数字调制信号的产生	95
5.1.2 二进制数字调制信号的解调	97
5.2 二进制数字调制信号的频谱特性	101
5.2.1 ASK 信号的功率谱	101
5.2.2 FSK 信号的功率谱	102
5.2.3 PSK 信号的功率谱	102
5.3 二进制数字载波传输系统的抗噪声性能	102
5.4 二进制数字调制系统的性能比较	103
5.5 多进制数字调制系统	104
5.5.1 MASK 系统	104
5.5.2 MFSK 系统	105
5.5.3 MPSK 系统	106

5.6 现代数字调制技术	110
5.6.1 正交振幅调制	111
5.6.2 交错正交相移键控	112
5.6.3 $\pi/4$ -QPSK	114
5.6.4 最小频移键控	115
5.6.5 其他恒包络调制	118
小结	120
思考题	120

第6章 信道复用和多址方式

6.1 频分复用	122
6.2 时分复用	124
6.2.1 时分多路通信原理	124
6.2.2 PCM 30/32 路基群帧结构	125
6.2.3 数字通信系统的高次群	127
6.2.4 同步数字系列简介	128
6.3 码分复用	131
6.3.1 码分复用原理	131
6.3.2 伪随机序列	132
6.4 多址通信方式	135
6.4.1 频分多址方式	135
6.4.2 时分多址方式	136
6.4.3 码分多址方式	137
小结	141
思考题	141

第7章 同步技术

7.1 引言	142
7.1.1 同步的分类	142
7.1.2 同步信号的获取方式	143
7.2 载波同步技术	143
7.2.1 插入导频法(外同步法)	144
7.2.2 直接法(自同步法)	148
7.2.3 载波同步系统的性能指标	150
7.3 位同步技术	151
7.3.1 插入导频法(外同步法)	151
7.3.2 自同步法	153
7.3.3 位同步系统的性能指标	156
7.4 群同步(帧同步)技术	156
7.4.1 外同步法(插入特殊码组)	157

7.4.2 群同步系统的性能	160
7.4.3 群同步的保护	160
7.4.4 PCM30/32 路帧同步系统	161
7.5 网同步技术	163
7.5.1 全网同步系统	163
7.5.2 准同步系统	164
小结	165
思考题	166

第 8 章 差错控制

8.1 差错控制编码的基本原理	167
8.1.1 差错控制的基本原理	167
8.1.2 纠错码的码距	168
8.2 差错控制的基本方式	169
8.2.1 自动请求重发	169
8.2.2 前向纠错	170
8.2.3 混合纠错	170
8.3 常用的检错编码方式	170
8.3.1 奇偶校验码	171
8.3.2 汉明码	172
8.3.3 恒比码	174
8.4 循环码	175
8.4.1 循环码的特性	175
8.4.2 码的多项式	176
8.4.3 生成多项式	176
8.4.4 循环码的编码方法	177
8.4.5 循环码的译码方法	178
8.5 卷积码	178
8.5.1 卷积码编码原理	178
8.5.2 卷积码的树状图	179
8.5.3 卷积码译码	180
小结	180
思考题	181

第 9 章 通信系统的应用举例

9.1 数字光纤通信系统	182
9.1.1 光发送机组成	182
9.1.2 光接收机的组成	185
9.1.3 光中继器	187

9.1.4	线路码型	188
9.1.5	光端机的主要指标	191
9.2	电话交换技术	192
9.2.1	电话机组成	193
9.2.2	数字程控电话交换机组组成	194
9.2.3	时隙交换原理	196
9.2.4	T型接线器	197
9.2.5	S型接线器	201
9.2.6	数字交换网络	202
9.2.7	信令系统	205
9.3	GSM 数字蜂窝移动通信系统	206
9.3.1	GSM 系统结构	206
9.3.2	GSM 网络接口	208
9.3.3	GSM 系统的无线接口	210
9.3.4	GSM 系统的 GSM 移动台	212
	小结	213
	思考题	214
	参考文献	215

1.1 通信系统的组成

1.1.1 通信的基本概念

何谓通信？通信就是把信息从一地有效地传递到另一地，即消息传递的全过程。在人类社会的各项活动中，通信无处不在。古代的消息树、烽火台，当今的语音、音乐、文字、数据、图像、视频等都是利用不同方式传递信息的，均属于通信的范畴。自 1837 年莫尔斯发明了电码和有线电报、1876 年贝尔发明了电话，通信进入了“电”通信时代，即用电信号来传递信息。近 20 年来，数字处理技术、计算机技术、光纤通信技术进入通信领域，使通信得到飞跃式的发展。本书讲述的通信是指电通信。

1.1.2 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递的传输介质和全部设备。以最简单的通信方式——两个人之间的对话为例，点对点通信系统的模型如图 1-1 所示。

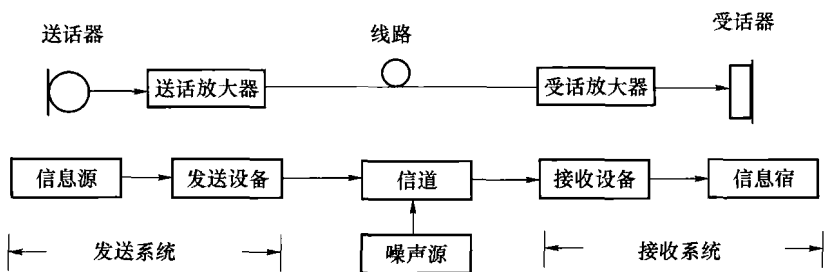


图 1-1 通信系统模型

图 1-1 是由音频电话通信抽象出来的通信模型。音频信号由送话器转化为话音电流，经放大后送线路传输，受话器将话音电流再转化为话音信号，完成双方通话。电话频带约为 0~4 kHz，这种具有从零频率或接近于零频率开始的低频频谱的信号称为基带信号。通常将信息转化为基带信号的电路称为信息源，而将基带信号转化为信息的电路称为信息宿。发送放大器称为发送设备，接收放大器称为接收设备。通信线路称为信道，信道的噪声、通信设备的噪声、电源噪声、干扰统称为噪声。

上述的基带通信系统存在诸多缺点:该系统只是一个单向通信系统,不能实现信息的交互;其通信线路利用率低,一条线路只供一对用户通信;很容易受到噪声干扰和形成噪声积累。因此图 1-1 称之为通信系统的一般模型。

1.1.3 模拟通信系统和数字通信系统模型

在图 1-1 中,信息源发出的信息可以分为两类:一类是连续信息;另一类是离散信息。连续信息的状态连续变化或是不可数的,如语音、活动图片等,连续信息也称为模拟信息。离散信息则是指信息的状态是可数的或离散的,如符号、数据等,离散信息也称为数字信息。

为了传递信息,需将各种信息转换成电信号。由图 1-1 的通信过程可知,信息与电信号之间必须建立单一的对应关系,否则在接收端就无法恢复出原来的信息。通常把信息寄托在电信号的某一参量上。按信号参量的取值方式不同可把信号分为两类,即模拟信号和数字信号。

若电信号的参量携带着模拟信息,则该参量必将是连续取值的,称这样的信号为模拟信号。若电信号的参量携带着数字信息,则该参量必将是离散取值的,这样的信号就称为数字信号。

按信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可相应地将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1. 模拟通信系统模型

模拟通信系统的模型如图 1-2 所示。在该系统中,发送设备是调制器,接收设备是解调器。传输模拟信号的通信系统需要两种变换。第一种变换是在发送端信源和接收端信宿进行的。发送端的信源要将连续信息变换成原始的电信号;接收端的信宿要将收到的信号反变换成原来的连续信息。由于原始电信号通常具有很低的频率分量,一般不宜直接传输,因此常常需要有第二种变换。第二种变换是在发送端将原始电信号变换成适合信道传输的信号,并在接收端再进行反变换。这种变换和反变换的过程称作调制和解调。经过调制器调制后的信号称为已调信号或频带信号,而将发送端调制前和接收端解调后的信号称为基带信号。

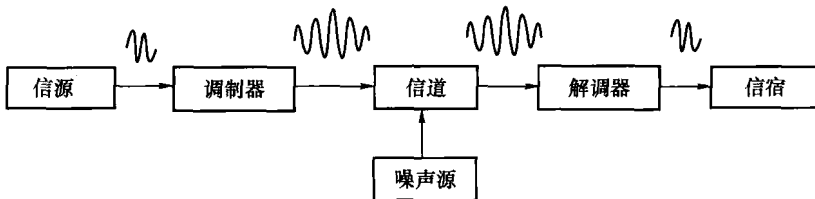


图 1-2 模拟通信系统模型

已调信号有 3 个基本特征:一是携带有信息;二是适合在信道中传输;三是信号的频谱具有通带形式且中心频率远离零频。基带信号的基本特征是:频谱从零频附近开始,如语音信号为 300~3 400 Hz,图像信号为 0~6 MHz。

模拟通信系统除了调制器、解调器之外,还有滤波器、放大器、二/四线转换电路等其他功能电路。

模拟通信研究的基本问题是:发端信源、接收端信宿对信息、基带信号的转换过程及基带信号的特性;调制与解调器原理;信道特性与噪声对信号传输的影响;在有噪声条件下的系统性能等。

2. 数字通信系统模型

数字通信系统的模型如图 1-3 所示。

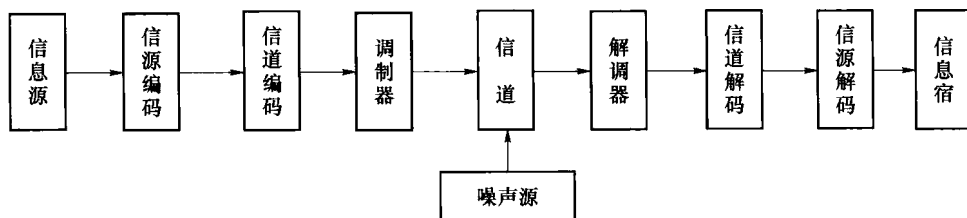


图 1-3 数字通信系统模型

(1) 信源和信宿:信源的作用是将信息转化为原始电信号,完成非电/电的转换;信宿的作用是将原始的电信号还原为信息,完成电/非电的转换。

(2) 信源编码和信源解码:信源编码器对原始电信号进行数字化编码(A/D变换)、数据压缩,以减少数据的冗余量。信源解码是信源编码的逆过程。

(3) 信道编码和信道解码:数字信号在信道中传输时,受到噪声干扰,会引起差错。为使数字信号适应信道所进行的变换称为信道编码。信道编码的目的就是提高通信系统的抗干扰能力,尽量控制差错,保证通信质量。信道解码是信道编码的反变换。

(4) 调制和解调:调制器和解调器的作用与模拟通信系统作用相同,不同的是这里的调制与解调是数字的。

(5) 信道:信道是信号传输的通道。信道分为有线信道和无线信道。在某些有线信道中,若传输距离不远,通信容量不大时,数字基带信号可以直接传送,称为基带传输;而在无线信道和光缆信道中,数字基带信号必须经过调制,即把信号频谱搬移到高频处才能传输,这种传输称为频带传输。

3. 数字通信系统与模拟通信系统的性能比较

数字通信系统最大的优点是使现代通信技术与计算机技术相互交融。与模拟通信系统相比较,数字通信系统更能适应信息社会对通信技术越来越高的要求。数字通信系统与模拟通信系统相比,具有如下突出优点:

(1) 数字传输的抗干扰能力强,特别是在中继传输时,可以对数字信号再生放大,而噪声不积累。

(2) 可采用差错控制编码改善传输质量。数字信号在传输过程受到干扰可能出错,可利用差错编码技术纠正错误。

(3) 在数字通信中便于使用现代数字信号处理技术对数字信息做加密处理。

(4) 数字通信系统适合传输、交换多种信息。数字通信系统便于利用计算机技术、数字存储技术、数字交换技术以及数字处理技术等现代技术,对信息进行处理、存储、交换。通常数据终端的接口是标准数字接口,便于与数字通信系统连接。

(5) 便于集成化,使通信设备微型化。

数字通信系统相对于模拟通信系统来说,主要有以下两个缺点:

(1) 数字信号占用的频带宽。以电话为例,一路数字电话一般要占据约 20~64 kHz 的频带带宽,而一路模拟电话仅占用约 4 kHz 带宽。如果系统传输带宽一定,模拟电话的频带利用率要高出数字电话的 5~15 倍。

(2) 数字通信系统对同步要求高,系统设备比较复杂。数字通信中,要准确地恢复信号,必须要求收端和发端保持严格同步,因此数字通信系统及设备一般都比较复杂。

随着科学技术的不断发展,数字通信的两个缺点也越来越显得不重要了。实践表明,数字通信是现代通信的发展方向。

1.2 通信系统的分类及通信方式

1.2.1 通信系统的分类

通信系统有多种分类方法,下面介绍常用的几种通信系统的分类方法。

1. 按提供的业务类型分类

按业务类型分类,通信系统可以分为电话通信系统、电报通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。

2. 按传输媒介分类

按传输媒介分类,通信系统可分为有线和无线通信系统。有线通信系统包括光纤通信、电缆通信等;无线通信包括移动通信、微波接力通信、卫星通信等。

3. 按信号特征分类

按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。

4. 按调制方式分类

按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系统和频带传输系统。基带传输系统是将未调制的信号直接传输;频带传输是将基带信号经调制后送入信道传输。

5. 按信号复用方式分类

按通信复用方式分类,通信系统有频分复用(FDM)通信系统、时分复用(TDM)通信系统、码分复用(CDMA)通信系统。

1.2.2 通信方式

通信系统中有多种通信方式,可按不同的方法划分如下:

1. 按传输信息的方向与时间关系划分

相邻的点对点通信按传输信息的方向与时间关系划分,可分单工通信、半双工通信、全双工通信。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式,例如电台广播、电视广播等都是单工通

信方式,如图 1-4(a)所示。

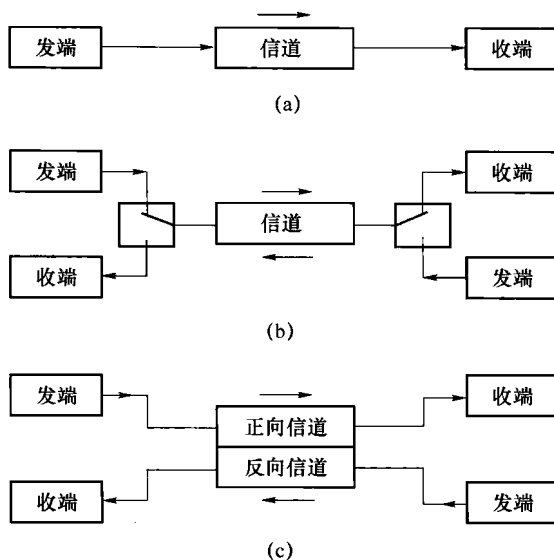


图 1-4 通信方式

半双工通信是指通信的双方都能收发信息,但不能同时进行收发信息的通信方式,如图 1-4(b)所示。例如无线对讲机和普通无线电收发报机等是半双工通信方式。在光纤接入到户中,用一根光纤分时完成计算机数据、电视、电话的双向传输。

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、交换式以太网的计算机通信等均采用全双工通信方式。

2. 按数字信号码元排列方法划分的通信方式

在数字通信中按数字信号码元排列方法不同,可划分为串行传输和并行传输的通信方式。

串行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,例如计算机网络通信。

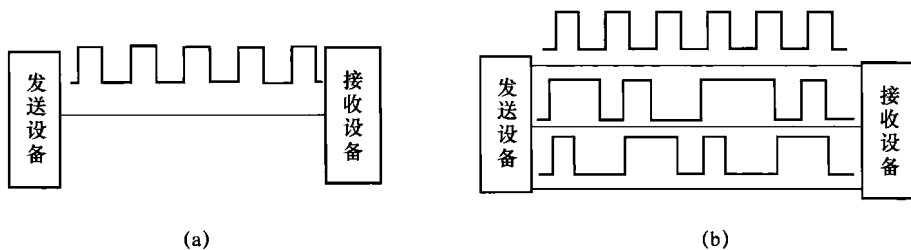


图 1-5 串行和并行传输

并行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多个信道中传输,如图 1-5(b)所示,例如计算机和打印机之间数据的传输。

串行传输方式只需一条通路,线路成本低,适合于长距离的通信;而并行传输方法需要多条通路,线路成本高,传输速率高,适合于短距离的通信。

1.3 通信系统的主要性能指标

评价一个通信系统,往往要涉及到许多性能指标。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。有效性和可靠性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。

1.3.1 模拟通信系统的性能指标

1. 有效性

在模拟通信系统中,有效性是利用信息传输速度或者有效传输频带来衡量。同样的消息采用不同的调制方式,则需要不同的频带宽度。频带宽度越窄,则对频带的有效(利用)性越好。如传输一路模拟电话,单边带调幅信号只需要 4 kHz 带宽,而双边带调幅信号需要 8 kHz 的带宽,因此在一定频带内用单边带调幅信号传输的路数比双边带调幅信号获得的话路多一倍,显然,单边带调幅系统的有效性比双边带调幅系统要好。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性用接收端输出的信噪比(输出信号平均功率与噪声平均功率的比值)来衡量,信噪比越高,通信质量越好。例如通常电话要求信噪比为 20~40 dB,电视则要求 40 dB 以上。信噪比除了与信号功率、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优于调幅信号,但调频信号所需传输频带要大于调幅信号。

1.3.2 数字通信系统的性能指标

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、信息速率及系统频带利用率这 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,常用符号 Baud 表示。

(2) 信息速率 R_b

信息速率 R_b 又称信息传输速率或数据传输率。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。

由于每位二进制码元携带 1 比特的信息量,因此信息速率等于码元速率,但两者单位不同。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 M 进制码元的传输来说,由于每一位 N 进制码元可用 $\log_2 M$ ($M=2^K$, K 为每个 M 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 M 进制码元相当于传输了 $\log_2 M$ 个二进制码元,其信息速率与码元速率的关系是

$$R_b = R_B \log_2 M \text{ bit/s}$$