



21世纪 高等职业教育通用教材

# 通信原理

43

● 沈瑞琴 主编  
● 邓 琛 主审

上海交通大学出版社

21 世纪高等职业教育通用教材

# 通信原理

沈瑞琴 主编  
邓 琛 主审

上海交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍现代通信系统的基本原理、基本性能及基本分析方法。内容包括模拟通信和数字通信,以数字通信为主。全书共10章,内容有:通信系统的基本概念;确知信号和随机信号的分析方法;模拟调制系统;模拟信号的数字化;数字信号的基带传输;数字调制系统;数字信号的最佳接收;差错控制编码和同步原理。

本书注重体现高等职业教育的特色,力求物理概念清楚,数学推导简化,通俗易懂,重点突出。各章均有小结、思考题与习题,便于教学与自学。

本书既可作为高等职业技术学院通信类、计算机类专业的教材,又可作为从事通信工作人员及相关科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

通信原理 / 沈瑞琴主编. -上海: 上海交通大学出版社, 2003

21世纪高等职业教育通用教材

ISBN 7-313-03302-8

I. 通... II. 沈... 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 (2003) 第 007259 号

### 通信原理

沈瑞琴 主编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

太仓市印刷厂有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:17.75 字数:431千字

2003年3月第1版 2003年3月第1次印刷

印数:1—3 050

ISBN 7-313-03302-8/TN·093 定价:27.00元

---

版权所有 侵权必究

# 21 世纪高等职业技术教育通用教材

## 编审委员会

### 主任名单

(以姓氏笔划为序)

#### 编审委员会顾问

白同朔 詹平华

#### 编审委员会名誉主任

王式正 叶春生

#### 编审委员会主任

闵光太 潘立本

#### 编审委员会常务副主任

东鲁红

#### 编审委员会副主任

王永祥	王俊堂	王继东	牛宝林
东鲁红	冯伟国	朱家建	朱懿心
吴惠荣	房世荣	郑桂富	赵祥大
秦士嘉	黄 斌	黄永刚	常立学
薛志信			

## 序

发展高等职业技术教育,是实施科教兴国战略、贯彻《高等教育法》与《职业教育法》、实现《中国教育改革与发展纲要》及其《实施意见》所确定的目标和任务的重要环节;也是建立健全职业教育体系、调整高等教育结构的重要举措。

近年来,年青的高等职业教育以自己鲜明的特色,独树一帜,打破了高等教育界传统大学一统天下的局面,在适应现代社会人才的多样化需求、实施高等教育大众化等方面,做出了重大贡献。从而在世界范围内日益受到重视,得到迅速发展。

我国改革开放不久,从1980年开始,在一些经济发展较快的中心城市就先后开办了一批职业大学。1985年,中共中央、国务院在关于教育体制改革的决定中提出,要建立从初级到高级的职业教育体系,并与普通教育相沟通。1996年《中华人民共和国职业教育法》的颁布,从法律上规定了高等职业教育的地位和作用。目前,我国高等职业教育的发展与改革正面临着很好的形势和机遇:职业大学、高等专科学校和成人高校正在积极发展专科层次的高等职业教育;部分民办高校也在试办高等职业教育;一些本科院校也建立了高等职业技术学院,为发展本科层次的高等职业教育进行探索。国家学位委员会1997年会议决定,设立工程硕士、医疗专业硕士、教育专业硕士等学位,并指出,上述学位与工程学硕士、医学科学硕士、教育学硕士等学位是不同类型的同一层次。这就为培养更高层次的一线岗位人才开了先河。

高等职业教育本身具有鲜明的职业特征,这就要求我们在改革课程体系的基础上,认真研究和改革课程教学内容及教学方法,努力加强教材建设。但迄今为止,符合职业特点和需求的教材却还不多。由泰州职业技术学院、上海第二工业大学、金陵职业大学、扬州职业大学、彭城职业大学、沙洲职业工学院、上海交通高等职业技术学院、上海交通大学技术学院、上海汽车工业总公司职工大学、立信会计高等专科学校、江阴职工大学、江南学院、常州技术师范学院、苏州职业大学、锡山职业教育中心、上海商业职业技术学院、潍坊学院、上海工程技术大学等百余所院校长期从事高等职业教育、有丰富教学经验的资深教师共同编写的《21世纪高等职业技术教育通用教材》,将由上海交通大学出版社等陆续向读者朋友推出,这是一件值得庆贺的大好事,在此,我们表示衷心的祝贺。并向参加编写的全体教师表示敬意。

高职教育的教材面广量大,花色品种甚多,是一项浩繁而艰巨的工程,除了高职院校和出版社的继续努力外,还要靠国家教育部和省(市)教委加强领导,并设立高等职业教育教材基金,以资助教材编写工作,促进高职教育的发展和改革。高职教育以培养一线人才岗位与岗位群能力为中心,理论教学与实践训练并重,二者密切结合。我们在这方面的改革实践还不充分。在肯定现已编写的高职教材所取得的成绩的同时,有关学校和教师要结合各校的实际情况和实训计划,加以灵活运用,并随着教学改革的深入,进行必要的充实、修改,使之日臻完善。

阳春三月,莺歌燕舞,百花齐放,愿我国高等职业教育及其教材建设如春天里的花园,群芳争妍,为我国的经济建设和社会发展作出应有的贡献!

叶春生

# 前 言

本书是 21 世纪高职高专信息类专业系列教材之一。

“通信原理”是通信、信息类专业的一门专业基础课。目前已经出版的国内外同类教材已有不少,但大多是本科教材。针对高职高专院校的教学特点,我们编写了本书。在内容的选取上,本书注重基础性、实用性、系统性、职业性以及通信技术的最新发展;在文字上力求条理清晰、通俗易懂;对于需要的数学公式,除简单的数学分析,尽量避免繁琐的数学推导,以突出重点;对于一些难点,则尽量用直观的图示解释其物理现象,以便于对物理概念的理解。

本书主要介绍现代通信系统所涉及到的基本理论,内容包括模拟通信和数字通信,以数字通信为主,重点介绍其系统构成、工作原理和主要性能指标。全书共分 10 章,可分为四个部分:第一部分(第 1~3 章)是全书的基础,主要讲述通信系统的基本模型、基本性能指标,确定信号及随机信号的分析方法;第二部分(第 4 章)为模拟调制的基本原理和频分复用原理;第三部分(第 5~8 章)介绍模拟信号数字化方法和时分复用原理、数字信号的基带传输和频带传输、数字信号的最佳接收;第四部分(第 9、10 章)是差错控制编码和同步原理。各章均有小结和习题,以帮助读者掌握各章重点。书后有 5 个附录,介绍书中涉及到的有关公式、函数、数表和计算方法。

本书的参考学时数为 80,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不同进行适当的取舍,灵活掌握。

参加本书编写的作者都是在一线长期从事“通信原理”课程教学的老师。本书是在“通信原理”课程教学的基础上编写而成的,适合作为高职高专等院校的教材,也适合在通信领域工作的工程技术人员参考,同时也适应国内实施继续教育的需要。

本书由沈瑞琴主编,全书由上海工程技术大学邓琛教授主审。靳丽君、何琳娜、邓琛、王书杰、毛志凤参编。

在本书的编写过程中,得到了 21 世纪高等职业技术教育通用教材编审委员会和上海交通大学出版社的领导及编辑们的热情关心和帮助,在此表示深切的谢意。由于编者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2003 年 1 月

# 目 录

<b>1 通信系统概述</b> .....	1
1.1 通信的基本概念 .....	1
1.2 通信系统的分类及通信方式 .....	2
1.3 通信系统的主要性能指标 .....	7
1.4 通信发展简史 .....	10
本章小结 .....	11
思考与习题 .....	11
<b>2 确知信号的分析与变换</b> .....	12
2.1 傅氏变换 .....	12
2.2 常用信号函数 .....	13
2.3 卷积和相关 .....	16
2.4 信号的能量谱和功率谱 .....	20
2.5 信号通过线性系统 .....	23
本章小结 .....	27
思考与习题 .....	28
<b>3 随机信号分析</b> .....	30
3.1 随机变量和随机过程 .....	30
3.2 平稳随机过程和各态历经性 .....	36
3.3 平稳随机过程的相关函数与功率谱密度 .....	37
3.4 高斯型随机过程 .....	39
3.5 正弦波加窄带高斯过程 .....	45
3.6 随机过程通过线性系统 .....	46
本章小结 .....	48
思考与习题 .....	49
<b>4 模拟调制系统</b> .....	51
4.1 模拟调制概述 .....	51
4.2 幅度调制系统 .....	52
4.3 调幅信号的解调 .....	60
4.4 线性调制系统的抗噪声性能 .....	66
4.5 非线性角度调制系统 .....	72

4.6	调频系统的解调	80
4.7	调频系统的抗噪声性能	82
4.8	频分复用原理	87
	本章小结	88
	思考与习题	90
<b>5</b>	<b>模拟信号数字化传输</b>	<b>93</b>
5.1	脉冲编码调制(PCM)	93
5.2	增量调制	114
5.3	差分脉冲编码调制(DPCM)系统	119
5.4	时分复用原理和多路 PCM 系统	121
5.5	数字复接技术	125
	本章小结	133
	思考与习题	134
<b>6</b>	<b>数字信号的基带传输</b>	<b>136</b>
6.1	数字基带传输系统	136
6.2	数字基带信号传输码型及频谱特性	138
6.3	无码间干扰的基带传输特性	147
6.4	无码间干扰基带传输系统的抗噪声性能	152
6.5	数字基带传输性能的改善措施	158
	本章小结	165
	思考与习题	167
<b>7</b>	<b>数字调制系统</b>	<b>172</b>
7.1	概述	172
7.2	数字幅度调制	173
7.3	数字频率调制	178
7.4	数字相位调制	186
7.5	ASK、FSK、PSK 性能比较	193
7.6	多进制数字调制	195
	本章小结	200
	思考与习题	201
<b>8</b>	<b>数字信号的最佳接收</b>	<b>203</b>
8.1	最佳接收准则	203
8.2	匹配滤波器法接收	204
8.3	相关接收	210
8.4	理想接收机	212



8.5 各类系统最佳接收机与实际接收机比较 .....	213
本章小结 .....	214
思考与习题 .....	215
<b>9 差错控制编码和伪随机序列 .....</b>	<b>216</b>
9.1 差错控制编码的基本概念 .....	216
9.2 线性分组码 .....	220
9.3 循环码 .....	223
9.4 伪随机序列 .....	226
本章小结 .....	232
思考与习题 .....	233
<b>10 同步原理 .....</b>	<b>235</b>
10.1 载波同步 .....	235
10.2 位同步 .....	240
10.3 群同步 .....	246
10.4 网同步 .....	252
本章小结 .....	255
思考与习题 .....	257
<b>附录 1 傅氏变换性质和常见的傅氏变换对 .....</b>	<b>259</b>
<b>附录 2 卷积的图解法计算 .....</b>	<b>261</b>
<b>附录 3 误差函数表 .....</b>	<b>263</b>
<b>附录 4 贝塞尔函数表 .....</b>	<b>264</b>
<b>附录 5 数字基带信号功率谱密度推导 .....</b>	<b>265</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>269</b>

# 1 通信系统概述

## 1.1 通信的基本概念

通信是指信息的传输与交换。

社会生产力的发展、科学技术的进步和人类生活水平的提高与通信水平是相互依赖、相互制约的关系。不同的时代要求与之相适应的通信水平。随着社会现代化、文明化程度的提高,通信业务已经深入到人类生活的每个方面。可以毫不夸张地说:离开了通信,人类将寸步难行。

尽管通信的方式及业务种类越来越多,但通信系统的基本模型未变,通信的基本原理未变,衡量通信质量的手段、指标也未变。因此,掌握现代通信技术并能够适应将来通信发展的关键是掌握通信原理的基本分析方法。

任何一种点对点的通信,其系统模型都可以用图 1.1 来概括。

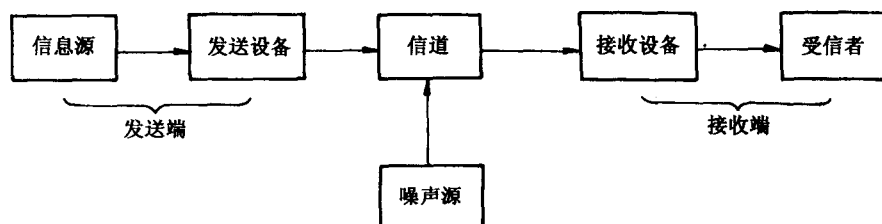


图 1.1 通信系统模型

发送端由信息源和发送设备组成。信息源即原始信息的来源,它的作用是把各种如语声、音乐、文字、数据、图片、活动画面等消息转换成相应的电信号。常见的信息源设备有电话机、摄像机、传真机、计算机和各种数字终端设备等。为了使这些电信号能在信道中传输,由发送设备对原始信号进行调制、放大和滤波等处理,然后再送入信道。

信道是指信号的传输媒质,可以是无线的,也可以是有线的(包括光纤)。有线和无线均有多种传输媒介。传输过程中必然引入干扰,如热噪声、脉冲干扰、衰落等;通信系统的其他各处也存在干扰,这些干扰通常集中表示,以方便对通信系统的分析。

接收端由接收设备和受信者组成。接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换,即进行滤波、放大和解调等,并将有用信号与噪声区分开来,恢复出原始的电信号;受信者则将复原的原始电信号转换成原始消息。

上述模型概括地反映了通信系统的共性。当原始消息不同、使用的信道不同、研究的方面不同时,将会使用不同形式的较具体的通信系统模型。通信原理的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

此外,通信系统除了完成信息传递之外,还必须进行信息的交换,终端系统、传输系统和交

换系统共同组成一个完整的通信系统。通信原理侧重于传输系统的讨论。

## 1.2 通信系统的分类及通信方式

### 1.2.1 通信系统的分类

通信系统的分类方法有很多种,下面就通信系统模型引出五种分类。

#### 1.2.1.1 消息的物理特征分类

根据消息的物理特征不同,有电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等各种通信系统。这些通信系统可以是专用的,也可以是兼容的。由于电话通信最为发达,因而其他通信常常借助于公共的电话通信系统进行。例如,电报常通过电话信道传送;数据也利用电话信道传送。而在综合业务通信网中,各种类型的消息都在统一的通信网中传送。

#### 1.2.1.2 调制方式分类

根据是否采用调制,可将通信系统分为基带传输和频带传输。

一般地,信息源将各种形式的消息转换成的电信号频率大都从低频开始,这种信号称为基带信号,如话音信号频率为 $20\sim 20000\text{Hz}$ ,但主要能量集中在 $300\sim 3400\text{Hz}$ ;电视图像信号的频率在 $0\sim 6\text{MHz}$ 范围内;数据信号的频率虽然与传输速率有关,但还是基带信号。直接将基带信号经过放大器送到信道上传输称为基带传输。

基带信号通过调制后,其频谱搬移到比较高的频率范围,经过调制频谱变高的信号称为频带信号。传输频带信号则称为频带传输。

调制的目的是:

(1) 将消息变换为便于传送的形式。如无线传输时必须将消息载荷在高频上才能在自由空间发射出去。

(2) 提高性能,特别是抗干扰性能。

(3) 有效地利用频带。如将多个话音信号搬移到不同的高频频段上,以提高信道的利用率。

调制的方式很多,有模拟信号调制,如幅度调制 AM、频率调制 FM、相位调制 PM 等;还有数字信号调制,如幅移键控 ASK、频移键控 FSK、相移键控 PSK 等。

#### 1.2.1.3 按传输信号的特征分类

根据信道中传输的是模拟信号还是数字信号,可以将通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

当信号的某一参量随相应信息的变化而变化,其参量的取值为无限多个数值的称为模拟信号。如话音信号的电压或电流大小随声音的强弱而连续变化;调幅波或调频波信号其幅度或频率随话音或音乐作相应连续的变化等,这些都是随时间连续变化的模拟信号,如图 1.2 所示;而对于脉幅调制(PAM)、脉宽调制(PWM)信号,尽管在时间上是不连续的(离散的),但其脉冲的幅度、宽度随调制信号变化取连续值,因此仍属于模拟信号,如图 1.3 所示。

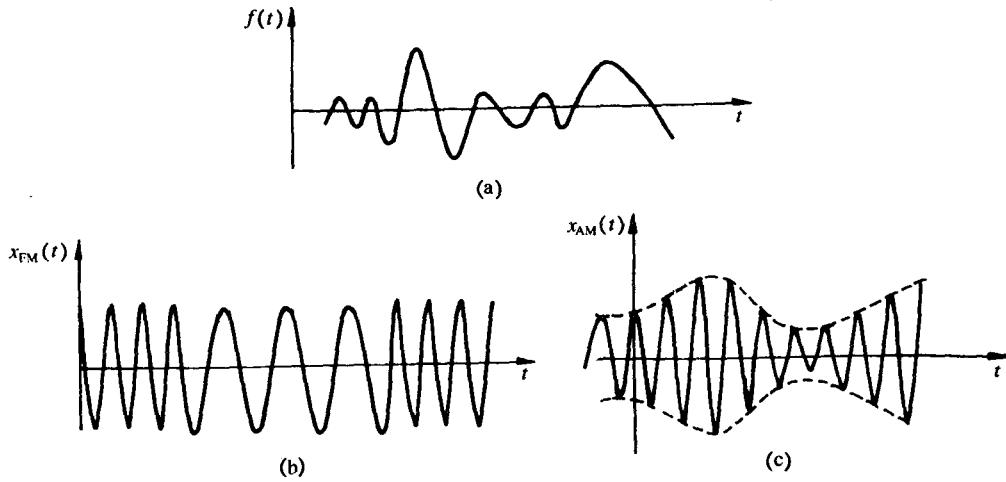


图 1.2 时间连续的模拟信号  
(a) 话音信号; (b) 调频波信号; (c) 调幅波信号

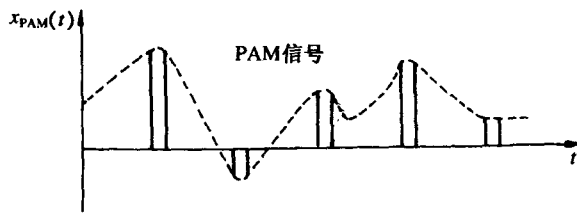


图 1.3 时间离散的模拟信号

当信号的某一参量随相应信息的变化而变化,其参量的取值为有限的,参量与信息之间的变化关系为非直观的数字形式称为数字信号。如脉冲编码调制(PCM)信号是用有限个数值来表示信息的变化,一般的数字信号不仅在幅度上的取值是离散的,而且在时间上也是离散的,但数字信号并非在时间上都是离散的,普通移频电报在时间上就是连续的,但反映信息的瞬时频率仅有  $f_1$  与  $f_2$ ,所以仍属于数字信号,如图 1.4 所示。

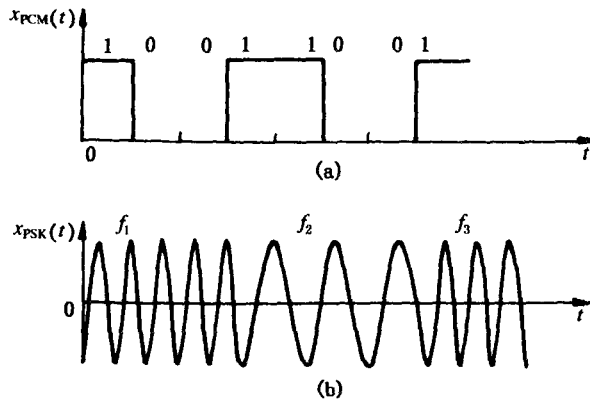


图 1.4 数字信号  
(a) 一般的数字信号; (b) 移频电报数字信号

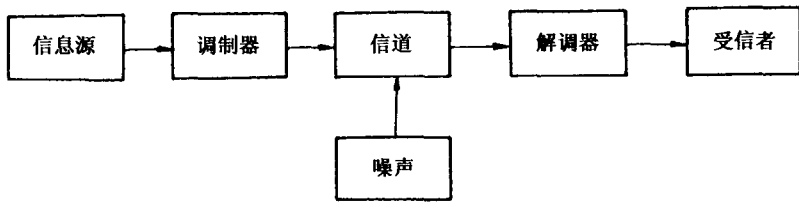


图 1.5 模拟通信系统模型

图 1.5 为模拟通信系统模型。由于信源发出的原始电信号通常具有频率很低的频谱分量，一般不宜直接传输，因此需要调制器将其变换成适合信道传输要求的已调信号送到信道中传输。接收端经解调器把已调信号还原为原始信号。与图 1.1 相比，这里的调制器与解调器代表了发送设备和接收设备。

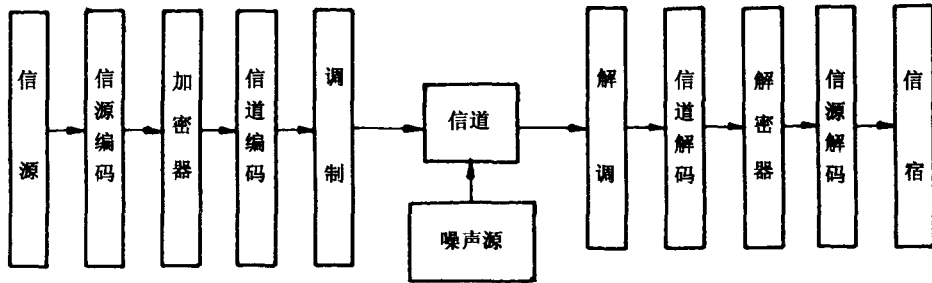


图 1.6 数字通信系统模型

数字通信系统模型如图 1.6 所示。当信源发送出来的电信号是模拟信号时，需要经过信源编码变换成数字基带信号；加密器可以很方便地对传输信号进行加密处理；信道编码通常包括纠错编码和线路编码；由于信道噪声的干扰而使传输的数字信号产生差错，必须在接收端能自动检出错码并纠正错码，即纠错编码，线路编码的目的是为了信源编码后的数字信号适合于在信道上传输；调制器是为了实现数字信号的频带传输。接收端达到解调、信道解码、解密器、信源解码等的功能，与发送端的调制、信道编码、加密器、信源编码等功能是一一对应的反变换。

数字通信发展非常迅速，主要原因是它与模拟通信相比有着独特的优点：

1) 抗干扰能力强

信号在传输过程中必然会受到各种噪声的干扰。在模拟通信中，为了实现远距离传输，需要及时地把已经受到衰减的信号进行放大（增音）。但在信号放大的同时，串扰进来的噪声也被放大，如图 1.7(a)所示。由于模拟信号是用信号幅度载荷信息的，而噪声又是直接干扰信号幅度，因此，难以把信号与干扰噪声分开。随着传输距离增加，噪声累加越来越大，信噪比越来越小。所以模拟通信的通信距离越远，通信质量越差。

在数字通信中，信息不是包含在脉冲的波形上，而是包含在脉冲的有无之中。为了实现远距离传输，可以通过再生的方法对已经失真的信号波形进行判决，从而消除噪声积累，如图 1.7(b)所示。由于无噪声积累，所以数字通信抗干扰能力强，易于实现高质量的远距离传输。这是数字通信的重要优点之一。

2) 灵活性强，能适应各种业务要求

在数字通信中，各种消息（电报、电话、图像和数据等）都可以变换成统一的二进制数字信

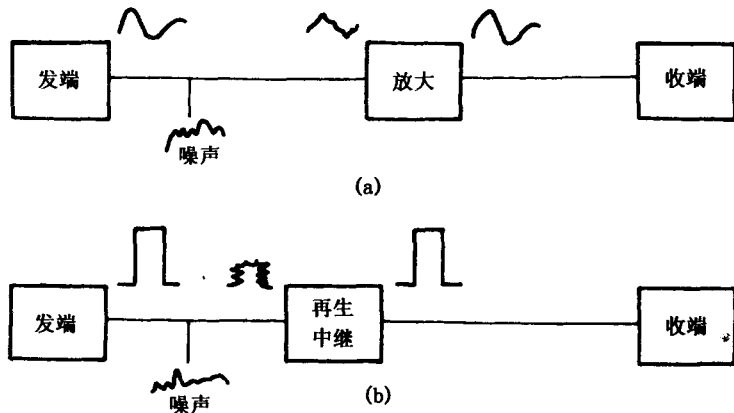


图 1.7 数字通信和模拟通信抗干扰性能比较

号进行传输。数字信号的传输可以与数字信号时分交换结合起来,组成统一的综合业务数字网(ISDN)。综合业务数字网对来自不同信源的信号自动地交换、综合、传输、处理、存储和分离,这给实际应用带来极大的便利。

### 3) 便于与计算机连接

由于数字通信中的二进制数字信号与电子计算机所采用的信号完全一致,所以数字通信线路可以很方便地与计算机接口,使复杂的远距离大规模自动控制系统和自动数据处理系统,实现以计算机为中心的自动交换通信网,通过计算机对整个数字通信网络进行高度智能化的监测。

### 4) 便于加密处理

信息传输的安全性和保密性都显得越来越重要,数字通信的加密处理比模拟通信容易得多。加密经过一些简单的逻辑运算即可实现,如图 1.8 所示。

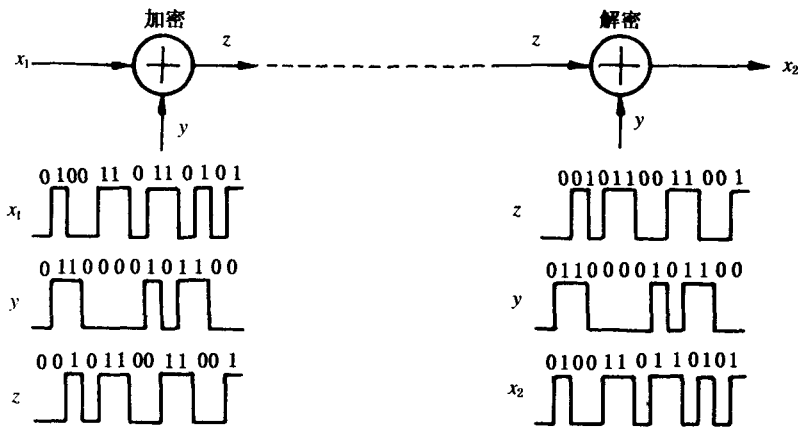


图 1.8 加密

$x_1$  为原数字信号,设为 0100110110101...,  $y$  为密码,设为 0110000101100 的周期性信号。将二者送入由模 2 加组成的加密电路,则输出的信号  $z = x_1 \oplus y = 0010110011001\dots$ 。显然,  $z$  和  $x_1$  不同。到了接收端,将  $z$  和  $y$  再送入由模 2 加组成的解密电路,输出的信号  $x_2 = z \oplus y = 0100110110101\dots$ ,即还原为原数字信号。只要双方约定密码,且密码周期足够长,则第三者就很难破译,而且密码还可以随时变换。

以上介绍的只是简单的加密原理,实际的加密方案要复杂得多,但由此可看出,数字通信容易加密。

5) 设备便于集成化、小型化

数字通信通常采用时分多路复用,不需要昂贵的、体积较大的滤波器。由于设备中大部分电路都是数字电路,可以用大规模和超大规模集成电路实现,这样设备体积小,功耗也较低。

但是,它也有不足之处,如占用频带宽,这是数字通信的最大缺点。一路模拟电话约占4kHz带宽,而一路数字电话大约需64kHz带宽。随着编码技术的不断发展,虽然一路数字电话的带宽可降到32kHz,甚至16kHz,但仍然远大于模拟通信。当然,随着光纤等宽带传输信道的逐步采用,数字通信和光纤传媒的优点得到了最好的结合,数字通信也就得到了广泛的应用。

1.2.1.4 传送信号的复用方式分类

传送多路信号有三种复用方式,即频分复用、时分复用、码分复用。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;时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间;码分复用则是用一组包含互相正交的码字的码组携带多路信号。

传统的模拟通信中都采用频分复用。随着数字通信的发展,时分复用通信系统的应用愈来愈广泛。码分复用多用于卫星通信的扩频通信系统中;目前又开始用于移动通信系统中。

1.2.1.5 按传输媒介分类

按传输媒介,通信系统可分为有线(包括光纤)和无线两类。

1.2.2 通信方式

对于点与点之间的通信,按信息传送的方向与时间关系,通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种。

单工通信,是指信息只能单方向传输的工作方式,如图1.9(a)所示。例如遥测、遥控,就是单工通信方式。

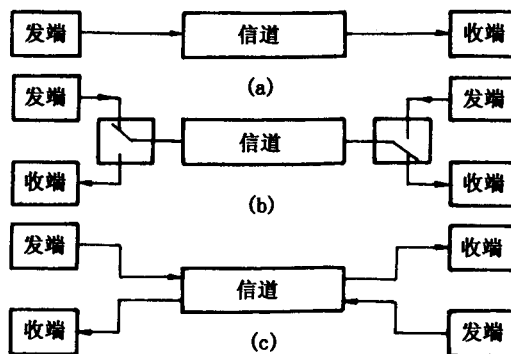


图 1.9 通信方式示意图

(a) 单工通信; (b) 半双工通信; (c) 全双工通信

半双工通信,是指通信双方都能收发信息,但不能同时进行收发的工作方式,如图1.9(b)

所示。例如,使用同一载频工作的无线电对讲机,就是按这种通信方式工作的。

全双工通信,是指通信双方可同时进行收发信息的工作方式,如图 1.9(c)所示。例如,普通电话就是一种最常见的全双工通信方式。

在数字通信中,按照数字信号码元排列方法不同,有串行传输与并行传输之分。

所谓串行传输,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 1.10(a)所示。如果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,则称为并行传输,如图 1.10(b)所示。

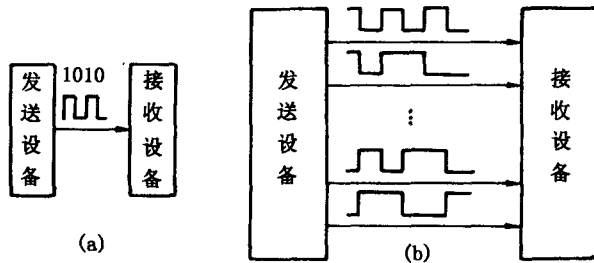


图 1.10 串行和并行传输方式  
(a) 串行传输;(b) 并行传输

一般的远距离数字通信大都采用串序传输方式,因为这种方式只需占用一条通路。并行传输在近距离数字通信中有时也会遇到,它需要占用两条或两条以上的通路,比如,使用多条导线传输。

### 1.3 通信系统的主要性能指标

#### 1.3.1 信息及其度量

通信的目的是传递信息。为了对通信系统的主要性能作定量的分析,先对信息这个术语的含义以及它的定量描述作简要的讨论。

信息一词在概念上与消息的意义相似,但它的含义却更普遍化、抽象化。信息可以被理解为消息中包含接收者所需要知道的有意义的内容。消息以具体信号形式表现出来,而信息则是抽象的、本质的内容。消息的出现是随机的、无法预知的。一个预先确知的消息因不给接收者带来任何信息而失去传递的必要。不同形式的消息,可以包含相同的信息。例如,分别用语音和文字发送的天气预报,所含信息内容相同。在本课程中对消息和信息不作严格的区分,两者可以混用。如同运输货物多少采用“货运量”来衡量一样,传输信息的多少使用“信息量”去衡量。

概率论告诉我们,事件的不确定程度,可以用其出现的概率来描述,亦即事件出现的可能性愈小,则概率就愈小;反之,则概率就愈大。根据这种认识,我们得到:消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关,消息出现的概率愈小,则消息中包含的信息量就愈大。如果事件是必然的(概率为 1),则它传递的信息量应为零;如果事件是不可能的(概率为 0),则它将有无穷的信息量。如果我们得到不是由一个事件构成而是由若干个独立事件构成的消息,那么这时我



们得到的总的信息量,就是若干个独立事件的信息量的总和。

消息中所含的信息量  $I$  与消息出现的概率  $P(x)$  间的关系式为

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (1.1)$$

信息量的单位为比特(bit)。

下面我们来讨论等概率出现的数字信号的信息量。

在数字信道中传送的数字信号单元,可以是二进制的,也可以是多进制的,不同进制的信号单元所携带信息量是不同的,我们称这种信号单元为码元。

一位二进制数,不是 0 就是 1,当 0,1 等概出现时[即  $P(0) = P(1) = 1/2$ ],一码元所携带的信息量为

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{P}\right) = \log_2 \left(\frac{1}{1/2}\right) = 1(\text{bit}) \quad (1.2)$$

对于  $M$  进制,当  $M$  个数等概率出现时(概率为  $1/M$ ),一个码元所携带的信息量为

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{P}\right) = \log_2 (M) \quad (\text{bit}) \quad (1.3)$$

**[例 1.1]** 在四进制系统中,求等概率出现的一个码元所携带的信息量。

**解** 0,1,2,3 等概率出现,概率均为  $1/4$ ,故一个码元所携带的信息量是

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{P}\right) = \log_2 (M) = 2(\text{bit}) \quad (1.4)$$

### 1.3.2 主要性能指标

在设计或评估通信系统时,往往要涉及通信系统的主要性能指标,否则将无法衡量其质量的优劣。性能指标即是质量指标,它们是对整个系统综合规定的。

通信系统最主要的质量指标是传输信息的有效性和可靠性。有效性指单位时间内传送的信息量的多少,是一个“速度”的问题,而可靠性指接收信息的准确程度,是一个“质量”的问题。显然,有效性和可靠性是互相矛盾的:要求传输速率高,质量就差一些;要求传输质量好,则速度就要受到限制。通常只能依据实际要求取得相对的统一。

#### 1.3.2.1 模拟通信系统的有效性和可靠性

在模拟通信系统中,信号传输的有效性通常是用有效传输频带来衡量的。当给定信道的容许传输带宽后,它被每路信号的有效传输带宽去除,就可确定信道容许同时传输的最大通路数目,表示多路频率复用程度。显然,信道复用的程度越高,则信号传输的有效性就越好。例如,在频分制多路载波通信系统内使用同轴电缆作为传输线路,则它允许传输带宽可以容纳 10800 路话音信号的有效传输频带(通常每路话音占用带宽用 4kHz 来计算),因此它的传输有效性就要比使用架空明线高得多。另外,信号的传输带宽还与调制方式有关,例如,调频波的频带比调幅波宽得多,因此在同样的传输线路上传输调频波的有效性就不如调幅波。

模拟通信系统的传输可靠性通常用整个通信系统的输出信噪比来衡量。

模拟通信系统内的噪声根据其来源可分为加性噪声和乘性噪声两种。加性噪声是外界干扰叠加在信道上的,是不随传输信号的有无而始终存在的;乘性噪声则是通信设备或器件的特性不理想而产生的,它随传输信号的消失而消失。对于乘性噪声的影响,常常还用更具体的性