

高等学校通信教材

gaodeng xuexiao tongxin jiaocai

◎ 李白萍 吴冬梅 编

TONGXIN YUANLI  
YU JISHU

# 通信原理 与技术

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

封面设计：董志植

高等学校通信教材

gaodeng xuexiao tongxin jiaocai

TONGXIN YUANLI  
YU JISHU

通信原理  
与技术

ISBN 7-115-11294-0



9 787115 112941 >

ISBN7-115-11294-0/TN·2082

定价:26.00 元

人民邮电出版社网址 [www.ptpress.com.cn](http://www.ptpress.com.cn)

高等学校通信教材

# 通信原理与技术

李白萍 吴冬梅 编

人民邮电出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

通信原理与技术/李白萍,吴冬梅编. —北京:人民邮电出版社,2003.8

高等学校通信教材

ISBN 7-115-11294-0

I. 通... II. ①李... ②吴... III. ①通信理论—高等学校—教材 ②通信技术—高等学校—教材 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 040222 号

### 内 容 提 要

本教材着重介绍了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 9 章,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。内容包括:通信系统组成和各部件功能、信息的基本概念和建立通信系统的概念;信道和噪声;数字终端技术;数字信号的基带传输和频带传输;最佳接收准则;同步技术的原理;差错控制编码工作方式、概念及一些编码方式等等。

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。

本书可作为大学通信专业本科学生的教材,也可供其他学习通信技术的人员参考。

### 高等学校通信教材

### 通信原理与技术

◆ 编 李白萍 吴冬梅

责任编辑 滑 玉

◆ 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 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

读者热线 010-67194042

北京汉魂图文设计有限公司制作

北京隆昌伟业印刷有限公司印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 19.5

字数: 473 千字

2003 年 8 月第 1 版

印数: 1-5 000 册

2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-115-11294-0/TN · 2082

定价: 26.00 元

本书如有印装质量问题,请与本社联系 电话:(010)67129223

## 编者的话

现代通信技术的发展日新月异,正在迅速地向社会各个领域渗透。特别是通信技术与计算机技术的结合,更是以前所未有的力度促进了通信网、计算机网和综合业务网的发展。学习和掌握现代通信原理和技术,是信息社会的全体成员,特别是通信工作者的迫切需要,以应对信息传输无处不在的环境。为了适应这一要求,我们编写了本书,力求以信息传输为核心,把原理的理解和掌握贯穿于技术实现中。

本教材的参考学时为 72 学时,着重介绍了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 9 章,以通信系统的基本组成开始,按信号在通信系统的流程顺序进行编写。

第一章介绍通信系统组成和各部件功能及信息的基本概念,建立通信系统的概念。

第二章介绍通信系统中不可缺少的组成部分信道和噪声,为分析基带传输和系统抗噪声性能打下基础。

第三章讲述数字终端技术,以 PCM 系统为主,介绍基本理论和基本技术。

第四章讨论数字信号的基带传输,包括传输方式、无码间干扰条件、 $P$  计算及均衡技术。

第五章讨论数字信号的频带传输,主要介绍二进制数字调制、解调原理及其他调制方式。

第六章介绍几种最佳接收准则,分析性能并与实际比较。

第七章了解几种同步技术的原理、实现方法,并进行性能分析。

第八章介绍信道差错控制编码工作方式、概念及一些编码方式。

第九章应用举例,以建立完整的数字通信系统的概念。

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。

本书第一、三、四、六、八、九章由李白萍老师编写,第二、五、七章由吴冬梅老师编写。全书由李白萍老师统稿。参与本书编写工作的还有:娄莉、殷晓虎、张丽、崔星、李明明等。对本书所列文献作者,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,殷切希望广大读者指正。

编者  
2003 年 4 月

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	1
1.1 通信的基本概念和通信系统基本模型 .....	1
1.2 通信系统的分类和数字通信系统 .....	2
1.3 信息及其度量 .....	5
1.4 数字通信系统的主要性能指标 .....	7
1.5 数字通信涉及的主要技术 .....	9
1.6 小结.....	10
思考题与练习题 .....	10
<b>第二章 信道和噪声</b> .....	12
2.1 信道的定义和数学模型.....	12
2.2 恒参信道及其对信号传输的影响.....	15
2.3 随参信道及其对信号传输的影响.....	19
2.4 信道内的噪声(干扰).....	25
2.5 随机信号分析.....	26
2.6 通信中常见的几种噪声.....	33
2.7 随机过程通过线性系统.....	38
2.8 信道容量及香农公式.....	40
2.9 小结.....	43
思考题与练习题 .....	45
<b>第三章 模拟信号的数字化传输</b> .....	48
3.1 模拟信号数字化的基本原理.....	48
3.2 脉冲编码调制(PCM) .....	60
3.3 增量调制( $\Delta M$ ) .....	73
3.4 语音压缩编码技术简介.....	87
3.5 时分复用原理.....	95
3.6 数字复接技术 .....	100
3.7 小结 .....	107
思考题与练习题.....	108
<b>第四章 数字基带传输系统</b> .....	111
4.1 数字基带信号 .....	111
4.2 基带脉冲传输过程与码间串扰 .....	119
4.3 无码间串扰的基带传输系统特性 .....	122
4.4 部分响应技术 .....	126

4.5	无码间串扰时噪声对传输性能的影响 .....	130
4.6	眼图 .....	132
4.7	均衡技术 .....	133
4.8	小结 .....	137
	思考题与练习题 .....	137
<b>第五章</b>	<b>数字信号的频带传输 .....</b>	<b>141</b>
5.1	调制与解调原理 .....	141
5.2	二进制数字调制 .....	145
5.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能 .....	161
5.4	多进制数字调制 .....	172
5.5	改进的数字调制技术 .....	185
5.6	小结 .....	191
	思考题与练习题 .....	192
<b>第六章</b>	<b>数字信号的最佳接收 .....</b>	<b>195</b>
6.1	数字信号接收的统计表述 .....	195
6.2	最小差错概率接收 .....	196
6.3	最小均方误差接收 .....	199
6.4	最大输出信噪比接收 .....	200
6.5	最大后验概率接收 .....	207
6.6	实际接收机与最佳接收机的性能比较 .....	208
6.7	基带系统最佳化 .....	214
6.8	小结 .....	216
	思考题与练习题 .....	216
<b>第七章</b>	<b>同步技术 .....</b>	<b>219</b>
7.1	引言 .....	219
7.2	载波同步技术 .....	221
7.3	位同步技术 .....	231
7.4	群同步(帧同步)技术 .....	238
7.5	网同步技术 .....	246
7.6	小结 .....	251
	思考题与练习题 .....	252
<b>第八章</b>	<b>差错控制编码技术 .....</b>	<b>254</b>
8.1	差错控制编码的基本概念 .....	254
8.2	线性分组码 .....	258
8.3	循环码 .....	262
8.4	卷积码 .....	266
8.5	网格编码调制(TCM) .....	270
8.6	Turbo 码 .....	272
8.7	差错控制编码对系统性能的改善 .....	273

---

8.8 小结 .....	275
思考题与练习题 .....	276
<b>第九章 数字通信系统的应用举例 .....</b>	<b>279</b>
9.1 短波高速数字通信系统组成 .....	279
9.2 TCT-301 短波高速调制解调器的基本原理 .....	280
9.3 TCT-301 短波高速调制解调器的主要性能指标 .....	281
9.4 关键技术 .....	282
9.5 软硬件设计及框图 .....	288
9.6 小结 .....	289
<b>附录</b>	
附录一 常用三角公式 .....	290
附录二 Q 函数表和误差函数表 .....	291
附录三 缩写词表 .....	295
附录四 部分习题答案 .....	297
<b>参考文献 .....</b>	<b>302</b>



# 第一章 绪 论

通信是一门古老而又年青的学科。说它古老,是因为进入人类社会以来就有通信;说它年青,是因为它至今仍在蓬勃发展,而且展现出无限的前景。当今世界已进入信息时代,通信已渗透到社会各个领域,通信产品随处可见,将对人们日常生活和社会活动及发展起到更加重要的作用。

通信按照传统的理解就是信息的传输和交换。通信学科就是研究如何有效、可靠地把消息从一地传递到另一地的一门科学。

本章主要介绍通信和通信系统的基本概念,通信系统的组成及分类,衡量通信系统的主要性能指标和数字通信涉及的主要技术等。

## 1.1 通信的基本概念和通信系统基本模型

通信(Communication)是把消息从一地有效地传递到另一地,即消息传递的全过程。例如把地点 A 的消息传送到地点 B,或者把地点 A 和地点 B 的消息双向传输。消息的表达形式有语言、文字、图像、数据等。古代“消息树”、“烽火台”和现代仍使用的“信号灯”等是利用不同方式传递消息的,属通信之列。如果从广义的角度看,广播、电视、雷达、导航、遥测遥控等技术也可列入通信的范畴,但由于广播、电视、雷达、导航等技术的不断发展,目前它们已从通信中派生出来,形成了独立的学科。

实现通信的方式很多,目前使用最广泛的是电通信方式,即用电信号携带所要传递的消息,经过各种电信道进行传输,达到通信的目的。这种通信具有迅速、准确、可靠等特点,而且几乎不受时间、地点、空间、距离的限制。如今,自然科学领域涉及“通信”这一术语时,一般指的就是电通信(包括光通信)。

以最简单的通信方式——两个人之间的对话为例,讲话是利用声音来传递消息的一种方式。发话人是消息的来源,称为信源;话音通过空气传到对方,传递消息的媒质(如空气)称为信道;听话者听到后获得消息,是消息的归宿,称为信宿。这样就完成了消息的传递,也就构成了最简单的通信系统,这个过程如图 1-1 所示。

实际上,基本的点对点通信,均是把发送端的消息传递到接收端。因而,这种通信系统可由图 1-2 所示的模型加以概括。图中,信息源(也作发终端)的作用是把各种消息转换成原始电信号。发送设备对原始信号完成某种变换,使原始电信号适合在信道中传输。信道是指信

号传输的通道,提供了信源与信宿之间在电气上的联系。在接收端,接收设备的功能与发送设备的相反,它来自信道的各种传输信号和噪声中恢复出相应的原始电信号。信宿(也称收终端)是将复原的原始电信号转换成相应的消息。图 1-2 中的噪声源

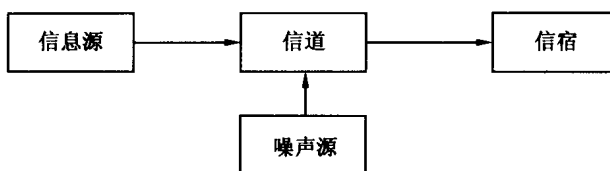


图 1-1 简单通信系统框图

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,它不是人们有意加入的设备。通信系统设计的主要任务就是同噪声做斗争。

上述模型概括地反映了通信系统的共性。根据我们的研究对象及所关心的问题不同,将会使用不同形式的较具体的通信系统模型。通信原理与技术的讨论就是围绕通信系统的模型而展开的。

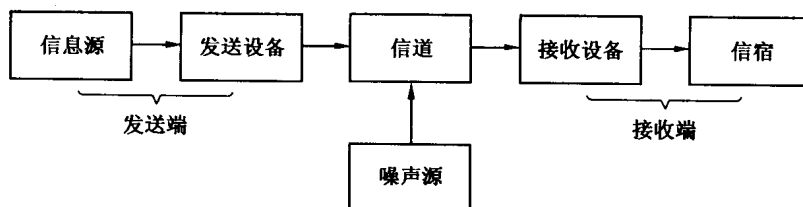


图 1-2 通信系统的基本模型

## 1.2 通信系统的分类和数字通信系统

### 1. 通信系统分类

随着通信技术的发展,通信的内容和形式不断丰富。因此通信的种类层出不穷,常见的分类法如下。

按通信业务的不同可分为:电报、电话、传真、数据传输、可视电话、无线寻呼等。另外从广义的角度来看,广播、电视、雷达、导航、遥控、遥测等也应列入通信的范畴,因为他们都满足通信的定义。

按调制方式可分为:基带传输和频带传输。基带传输是指信号没有经过调制而直接送到信道中去传输的一种方式,而频带传输是指信号经过调制后再送到信道中传输,收端有相应解调措施的通信系统。

按信道中所传信号的不同分:通常信道中传送的信号可分为数字信号和模拟信号,因此通信可分为数字通信和模拟通信。

凡信号的某一参量(如连续波的振幅、频率、相位,脉冲波的振幅、宽度、位置等)可以取无限多个数值,且直接与消息相对应的,称为模拟信号。模拟信号有时也称连续信号,是指信号的某一参量可以连续变化(即可以取无限多个值),而不一定在时间上也连续,如强弱连续变化

的语言信号、亮度连续变化的电视图像信号等都是模拟信号。

凡信号的某一参量只能取有限个数值,并且常常不直接与消息相对应的,称为数字信号。数字信号有时也称离散信号。这个离散是指信号的某参量是离散(不连续)变化的,而不一定在时间上也离散。

按传输媒质分:通信可分为有线通信和无线通信。有线通信,是指传输媒质为导线、电缆、光缆、波导等形式的通信,其特点是媒质能看得见、摸得着。有线通信亦可进一步再分类,如明线通信、电缆通信、光缆通信等。无线通信,是指传输消息的媒质看不见、摸不着的(如电磁波)的一种通信形式。无线通信常见的形式有微波通信、短波通信、移动通信、卫星通信、散射通信等。

按工作频段分:根据通信设备的工作频率不同,通信通常可分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。

另外,通信还有其他一些分类方法,如按信号复用方式可分为频分复用方式(FDM)、时分复用方式(TDM)和码分复用方式(CDM)等;按通信网络可分为专线通信和网通信等;按收信者是否运动分为移动通信和固定通信;按通信方式可分为单工、单双工、双工通信等。

## 2. 数字通信系统

按照信道中所传信号的不同,通信系统可分为模拟通信系统和数字通信系统。

在信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统。它包含两种重要变换,一是把原始消息变为电信号,二是把不适合传输的基带信号通过调制器转换成频带信号;同时两种变换在收端都要经过反变换。另外,在通信系统中对信号进行的其他处理过程,暂且认为是理想的,其组成模型如图 1-3 所示。

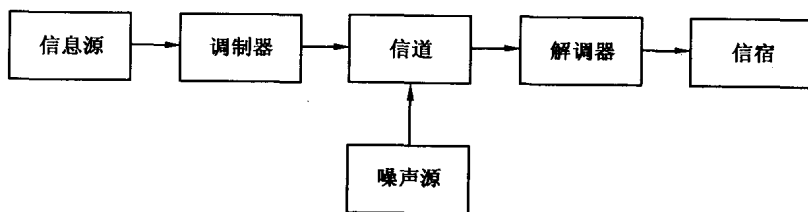


图 1-3 模拟通信系统组成模型

在信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统,它的基本组成模型如图 1-4 所示。

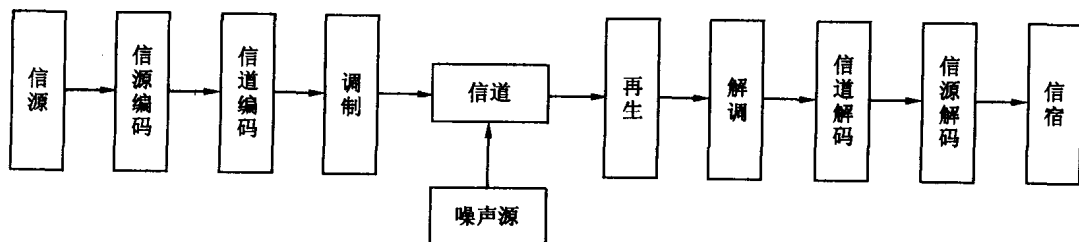


图 1-4 数字通信系统组成模型

(1) 信源和信宿:信源的作用是把消息转换成原始的电信号,完成非电/电的转换;信宿的

作用是把复原的电信号转换成相应的消息,就是完成电/非电的转换。

(2) 信源编码和信源解码:信源编码有两个作用,其一,进行模/数转换;其二,数据压缩,即设法降低数字信号的数码率。信源解码是信源编码的逆过程。

(3) 信道编码与信道解码:数字信号在信道中传输时,由于噪声影响,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:数字调制的任务是把各种数字基带信号转换成适应于信道传输的数字频带信号。经变换后已调信号有两个基本特征:一是携带信息,二是适应在信道中传输。数字解调是数字调制的逆变换。

(5) 信道:信道是信号传输的通道(媒质)。信道分为有线信道、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。

(6) 最佳接收和同步:依据最小差错准则进行接收,可以合理设计接收机达到最佳。同步是使收发两端信号在时间上保持步调一致。按照同步的作用不同,分为载波同步、位同步、群同步和网同步。同步是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提条件。

在图 1-4 中,同步环节没有表示出,因为它的位置往往不固定。

按照框图所包含组成部分的取舍可进一步细分为模拟信号数字化传输通信系统、数字基带传输通信系统和数字频带传输通信系统;也可按照信号的流程和系统进行细分,我们会在第三、四、五章中分别介绍。

### 3. 数字通信的特点

相对于模拟通信系统而言,数字通信系统有如下优点。

(1) 抗干扰、抗噪声能力强,无噪声积累。在数字通信系统中,传输的信号是数字信号,以二进制为例,信号的取值只有两个,这样发端传输的和接收端需要接收和判决的电平也只有两个值。若“1”码时取值为 A,“0”码时取值为 0,传输过程中由于信道噪声的影响,必然会使波形失真。在接收端恢复信号时,首先对其进行抽样判决,才能确定是“1”码还是“0”码,并再生“1”、“0”码的波形。因此只要不影响判决的正确性,即使波形有失真也不会影响再生后的信号波形。而在模拟通信中,如果模拟信号叠加上噪声后,即使噪声很小,也很难消除它。

数字通信抗噪声性能好,还表现在微波中继(接力)通信时,它可以消除噪声积累。这是因为数字信号在每次再生后,只要不发生错码,它仍然像信源中发出的信号一样,没有噪声叠加在上面。因此中继站再多,数字通信仍具有良好的通信质量。而模拟通信中继时,只能增加信号能量(对信号放大),而不能消除噪声。

(2) 便于加密处理,保密性强。数字信号与模拟信号相比,它容易加密和解密。因此,数字通信保密性好。

(3) 差错可控。数字信号在传输过程中出现的错误(差错),可通过纠错编码技术来控制。

(4) 利用现代技术,便于对信息进行处理、存储、交换。由于计算机技术,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飞速发展,许多设备、终端接口均是数字信号,因

此极易与数字通信系统相连接。正因为如此,数字通信才得以高速发展。

(5) 便于集成化,使通信设备微型化。

数字通信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 20~64kHz 的带宽,而一路模拟电话仅占用约 4kHz 带宽。如果系统传输带宽一定的话,模拟电话的频带利用率要高出数字电话的 5~15 倍。

(2) 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,体积较大。随着数字集成技术的发展,各种中、大规模集成器件的体积不断减小,加上数字压缩技术的不断完善,数字通信设备的体积将会越来越小。

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。

### 1.3 信息及其度量

“信息”(Information)一词在概念上与消息(Message)的意义相似,但它的含义却更具普遍性、抽象性。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容;消息可以有各种各样的形式,但消息的内容可统一用信息来表述。传输信息的多少可直观地使用“信息量”进行衡量。

传递的消息都有其量值的概念。在一切有意义的通信中,虽然消息的传递意味着信息的传递,但对接收者而言,某些消息比另外一些消息的传递具有更多的信息。例如,甲方告诉乙方一件非常可能发生的事情,“8月1日温度高达 42℃”,那么比起告诉乙方一件极不可能发生的事情,“8月1日要下雪”来说,前一消息包含的信息显然要比后者少些。因为对乙方(接收者)来说,前一事情很可能(必然)发生,不足为奇,而后一事情却极难发生,听后会使人惊奇。这表明消息确实有量值的意义。而且,可以看出,对接收者来说,事件愈不可能发生,愈会使人感到意外和惊奇,则信息量就愈大。正如已经指出的,消息是多种多样的,因此,量度消息中所含的信息量值,必须能够用来估计任何消息的信息量,且与消息种类无关。另外,消息中所含信息的多少也应和消息的重要程度无关。

由概率论可知,事件的不确定程度,可用事件出现的概率来描述,事件出现(发生)的可能性愈小,则概率愈小;反之,概率愈大。基于这种认识,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,且概率为 0 时(不可能发生事件)信息量为无穷大;概率为 1 时(必然事件)信息量为 0。

综上所述,可以得出消息中所含信息量与消息出现的概率之间的关系反映如下规律。

(1) 消息中所含信息量  $I$  是消息出现的概率  $P(x)$  的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1-1)$$

(2) 消息出现的概率愈小,它所包含信息量愈大;反之信息量愈小。且

$$P(x) = 1 \text{ 时} \quad I = 0$$

$$P(x) = 0 \text{ 时} \quad I = \infty$$

(3) 若干个互相独立事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[P_1(x) \cdot P_2(x) \cdots] = I[P_1(x)] + I[P_2(x)] + \cdots$$

可以看出  $I$  与  $P(x)$  间应满足以上三点, 则它们有如下关系式:

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1-2)$$

信息量  $I$  的单位与对数的底  $a$  有关: 当  $a$  取 2 时, 单位为比特 (bit); 当  $a$  取  $e$  时, 单位为奈特 (nit); 当  $a$  取 10 时, 单位为哈特 (hart)。通常使用的单位为比特。

对于由一连串符号所构成的消息, 可根据信息相加性概念计算整个消息的信息量, 即用平均信息量的概念。平均信息量是指信源中每个符号所含信息量的统计平均值, 因为概率不等, 所含信息量是不同的。

设各符号出现的概率为

$$\left[ \begin{array}{cccc} x_1, & x_2 & \cdots, & x_n, \\ P(x_1), & P(x_2), & \cdots, & P(x_n), \end{array} \right] \quad \text{且} \quad \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则每个符号所含平均信息量为

$$\begin{aligned} H &= P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \cdots + P(x_n)[- \log_2 P(x_n)] \\ &= \sum_{i=1}^n P(x_i)[- \log_2 P(x_i)] \end{aligned} \quad (1-3)$$

由于  $H$  同热力学中的熵形式一样, 故通常称之为信息源的熵, 单位为比特/符号。可以证明, 信息源的最大熵发生在信息源中每个符号等概独立出现时, 此时最大熵为

$$H = \log_2 N \quad (\text{比特 / 符号}) \quad (1-4)$$

下面举例说明平均信息量的计算。

**【例 1-1】** 一信息源由 4 个符号  $a, b, c, d$  组成, 他们出现的概率为  $\frac{3}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}$ , 且每个符号的出现都是独立的。试求信息源输出为  $cabacabdacbdacbdacbdabaaadcbabaaacdbacaacabadbcadcbbaabcaacba$  的信息量。

**解** 信源输出的信息序列中,  $a$  出现 23 次,  $b$  出现 14 次,  $c$  出现 13 次,  $d$  出现 7 次, 共有 57 个信息量, 则

$$\text{出现 } a \text{ 的信息量为 } 23 \log_2 \frac{57}{23} \approx 30.11 \quad (\text{bit})$$

$$\text{出现 } b \text{ 的信息量为 } 14 \log_2 \frac{57}{14} \approx 28.35 \quad (\text{bit})$$

$$\text{出现 } c \text{ 的信息量为 } 13 \log_2 \frac{57}{13} \approx 27.72 \quad (\text{bit})$$

$$\text{出现 } d \text{ 的信息量为 } 7 \log_2 \frac{57}{7} \approx 21.28 \quad (\text{bit})$$

该信息源总的信息量为

$$I = 30.11 + 28.35 + 27.72 + 21.18 = 107.36 \quad (\text{bit})$$

则每一个符号的平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{\text{总信息量}}{\text{符号总数}} = \frac{107.36}{57} \approx 1.86 \quad (\text{比特 / 符号})$$

上面计算中, 我们没有利用每个符号出现的概率来计算, 而是用每个符号在 57 个符号中

出现的次数(频度)来计算的。

实际上,用平均信息量公式(1-3)直接计算可得

$$H = \frac{3}{8} \log_2 \frac{8}{3} + \frac{1}{4} \times 2 \times \log_2 4 + \frac{1}{8} \log_2 8 \approx 1.906 \quad (\text{比特 / 符号})$$

总的信息量

$$I = 57 \times 1.906 = 111 \quad (\text{bit})$$

可以看出,本例中两种方法的计算结果是有差异的,原因就是前一种方法中把频度视为概率来计算。当信源中符号出现的数目  $m \rightarrow \infty$  时,则上两种计算方法结果一样。

## 1.4 数字通信系统的主要性能指标

衡量、比较和评价一个通信系统的好坏,必然要涉及系统的主要性能指标问题,否则就无法衡量通信系统的好坏与优劣。通信系统的主要性能指标也称为主要质量指标,它们是从整个系统上综合提出或规定的。

一般通信系统的性能指标归纳起来有以下几个方面。

- (1) 有效性:指通信系统传输消息的“速率”问题,即快慢问题。
- (2) 可靠性:指通信系统传输消息的“质量”问题,即好坏问题。
- (3) 适应性:指通信系统使用时的环境条件。
- (4) 经济性:指系统的成本问题。
- (5) 保密性:指系统对所传信号的加密措施,这点对军用系统显得更加重要。
- (6) 标准性:指系统的接口、各种结构及协议是否合乎国家、国际标准。
- (7) 维修性:指系统是否维修方便。
- (8) 工艺性:指通信系统各种工艺要求。

对一个通信系统,从研究消息的传输来说,有效性和可靠性将是主要的两个指标,这也是通信技术讨论的重点。

通信系统的有效性和可靠性,是一对矛盾。一般情况下,要增加系统的有效性,就得降低可靠性,反之亦然。在实际中,常常依据实际系统要求采取相对统一的办法,即在满足一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速率,即有效性;或者,在维持一定有效性条件下,尽可能提高系统的可靠性。

对于模拟通信来说,系统的有效性和可靠性具体可用系统有效带宽和输出信噪比(或均方误差)来衡量。模拟系统的有效传输带宽  $B_w$  越大,系统同时传输的话路数也就越多,有效性就越好。

对于数字通信系统而言,系统的有效性和可靠性可用传输速率和误码率来具体衡量。

### 1. 有效性指标

数字通信系统的有效性可用传输速率来衡量,传输速率越高,则系统的有效性越好。通常可从以下三个不同的角度来定义传输速率。

## (1) 码元传输速率

码元传输速率通常又可称为码元速率、数码率、传码率,用符号  $R_B$  来表示。码元速率是指单位时间(每秒钟)内传输码元的数目,单位为波特(Baud),常用符号“B”表示(注意,不能用小写)。例如,某系统在 2s 内传送 4800 个码元,则系统的传码率为 2400B。

数字信号一般有二进制与多进制之分,但码元速率  $(R)_B$  与信号的进制数无关,只与码元宽度  $(T)_B$  有关。

$$R_B = \frac{1}{T_B} \quad (1-5)$$

通常在给出系统码元速率时,有必要说明码元的进制,多进制  $(N)$  码元速率  $R_{BN}$  与二进制码元速率  $R_{B2}$  之间,在保证系统信息速率不变的情况下,相互可转换,转换关系式为

$$R_{B2} = R_{BN} \cdot \log_2 N \quad (B) \quad N \text{ 应为 } 2^k, k = 2, 3, 4, \dots$$

## (2) 信息传输速率

信息传输速率简称信息速率,又可称为传信率、比特率等。信息传输速率用符号  $R_b$  表示。 $R_b$  是指单位时间(每秒钟)内传送的信息量。单位为比特/秒(bit/s)。例如,若某信源在 1 秒钟内传送 1200 个符号,且每一个符号的平均信息量为 1bit,则该信源的  $R_b = 1200\text{bit/s}$ 。

因为信息量与信号进制数  $N$  有关,因此,  $R_b$  也与  $N$  有关。

(3)  $R_b$  与  $R_B$  之间的互换

在二进制中,码元速率  $R_{B2}$  同信息速率  $R_{b2}$  的关系在数值上相等,但单位不同。

在多进制中,  $R_{BN}$  与  $R_{bN}$  之间数值不同,单位亦不同。它们之间在数值上有如下关系式

$$R_{bN} = R_{BN} \cdot \log_2 N \quad (1-6)$$

在码元速率保持不变条件下,二进制信息速率  $R_{b2}$  与多进制信息速率  $R_{bN}$  之间的关系为

$$R_{b2} = \frac{R_{bN}}{\log_2 N} \quad (1-7)$$

## (4) 频带利用率

在比较不同通信系统的效率时,只看它们的传输速率是不够的,还应看有这样传输速率下所占的信道的频带宽度。因为传输速率越高,所占用的信道频带越宽。因此,能够真正体现出信息的传输效率的指标应该是频带利用率  $(\eta)$ ,即单位频带内的传输速率。

$$\eta = R_B / B \quad (\text{Baud/Hz}) \quad (1-8)$$

对二进制传输可表示为

$$\eta = R_b / B \quad (\text{bit/s/Hz}) \quad (1-9)$$

## 2. 可靠性指标

衡量数字通信系统可靠性的指标,具体可用信号在传输过程中出错的概率来表述,即用差错率来衡量。差错率越大,表明系统可靠性愈差。差错率通常有两种表示方法。

(1) 码元差错率  $P$ 。

码元差错率  $P$ 。简称误码率,它是指接收错误的码元数在传送总码元数中所占的比例,更确切地说,误码率就是码元在传输系统中被传错的概率。用表达式可表示成



$$P_e = \frac{\text{单位时间错误接收的码元数}}{\text{单位时间内系统传输的总码元数}} \quad (1-10)$$

(2) 信息差错率  $P_b$

信息差错率  $P_b$  简称误信率,或误比特率,它是指接收错误的信息量在传送信息总量中所占的比例,或者说,它是码元的信息量在传输系统中被丢失的概率。用表达式可表示成

$$P_b = \frac{\text{单位时间内错误接收的比特数}}{\text{单位时间内系统传输的总比特数}} \quad (1-11)$$

## 1.5 数字通信涉及的主要技术

如图 1-4 所示的数字通信系统的组成可以看出,数字通信涉及的技术问题很多,其中主要有信道与噪声、数字终端技术,数字基带传输技术,数字频带传输技术,数字同步技术和差错控制编码技术等。

(1) 信道与噪声

对通信来说,信道和噪声都是必须涉及的基本问题。在第二章中简单介绍信道的概念、常用信道的特性及对所传信号的影响,克服不良信道特性的办法;同时还将介绍通信中常见的几种噪声的统计特性和一般分析方法,得出随机信号通过线性系统后的结论。

(2) 数字终端技术

数字终端技术包括发端、收端对信号进行处理过程中所涉及到的技术。模拟信号数字化问题中的信源编码/译码,数据压缩处理,即语音压缩编码技术,多路复用、数字复接技术,在第三章中主要讨论。

(3) 数字基带传输技术

数字基带传输技术涉及一系列技术问题,如信号传输码型,码间串扰问题,实现无码间串扰传输的理想条件及减少码间串扰的部分响应系统和均衡技术,在第四章中主要讨论。

(4) 数字频带传输技术

数字频带传输技术主要是指数字通信系统的核心技术之一——数字调制/解调技术,是将输入的数字信号(基带数字信号)变换为适合于信道传输的频带信号。常见的基本数字调制方式有振幅键控(ASK)、频移键控(FSK)、绝对相移键控(PSK)、相对(差分)相移键控(DPSK)等四种。

数字调制/解调内容将在第五章专门讨论,除讨论上述基本调制/解调方式外,还将讨论一些其他类型的调制方式。

(5) 数字同步技术

同步是数字通信系统的基本组成部分。数字通信离不开同步,同步系统性能的好坏,直接影响着通信系统性能的优劣。同步就是使系统的收发两端在时间上保持步调一致。同步的主要内容有载波同步、位同步、帧同步以及网同步。第七章将介绍各种同步的基本概念和实现的基本方法及技术。