



21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

数字通信原理 与实践

北京希望电子出版社 总策划
徐素妍 朱诗兵 李艳霞 孙陆青 编 著



 科学出版社
www.sciencep.com

内容简介

本书主要讲述现代通信的基本理论,重点是数字通信原理与实践。全书共7章,主要内容包括绪论、信号与噪声分析、数字基带传输系统、调制技术、数字电话通信系统、纠错编码与伪随机序列、同步原理。每章内容包括基本通信理论、例题及练习题等内容,并对每章的部分练习题作了参考答案。第3章、第4章、第5章还安排了实验内容。每章均设有例题及练习题,并给出部分练习题的参考答案。全书内容丰富,概念清楚,重点突出,便于教学与参考。

本书适合作为高等院校计算机、通信及相关专业的研究生、本科生的教材,同时也可供相关科技人员和工程人员参考。

需要本书或技术支持的读者,请与北京清河6号信箱(邮编100085)发行部联系。电话:010-82702660 010-82702658 010-62978181 转103或238,传真:010-82702698, E-mail: tbd@bhp.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

数字通信原理与实践/徐素妍等编著. —北京: 科学出版社,

2005.10

21世纪高等院校计算机网络与通信教材

ISBN 7-03-016189-0

I. 数... II. 徐... III. 数字通信—高等学校—教材

IV. TN914.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第096466号

责任编辑: 曾 华 / 责任校对: 马 君

责任印刷: 媛 明 / 封面设计: 梁运丽

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京市媛明印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年10月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2005年10月第一次印刷 印张: 23 1/2

印数: 1-3 000 册 字数: 545376

定价: 29.00 元

21 世纪高等院校计算机网络与通信教材

编委会

主 任 曲 炜

副主任 陆卫民 卢 昱 赵洪利 李新明

委 员 (以姓氏笔画为序)

马彦恒	万定生	王擎天	王成友	王向阳
朱诗兵	刘作学	吴善培	何新华	何忠龙
张 文	周 辉	郑明红	罗建华	杨喜权
赵立军	姚秀芳	徐建华	徐远超	郭德纯
梁计春	韩素华	葛洪华	樊秀梅	穆道生

序

目前,中国固定和移动两大网络的规模都已位居世界第2位,上网用户2004年总数达9400万,中国的信息通信制造业也得到很大的发展。今后5年中国信息产业预计将仍会以高于20%的速度增长。中国将加快建设新一代信息通信网络,全面振兴信息通信产品制造业和软件业,建立能够支撑信息通信业发展的技术、生产体系。在向数字化、集成化、网络化转变的过程中,简单服务要向个性化服务发展,低带宽要向高带宽发展,电路交换要向分组交换发展。无线网络、网络多媒体、多媒体计算、人机自然语音通信是网络与通信专业重点建设的四大方向。

面对潜力巨大的中国市场,我国大学的相关专业需要培养具有知识创新能力的高素质人才,在通信高新技术的研究上争创国际先进水平,为我国在信息领域达到国际一流的目标作出贡献。

科技的发展使得教育要跟上时代发展的步伐,但是目前市面上还没有一套系统、完整的关于计算机网络与通信方面的教材。现有的教材有些偏重理论,有些则偏重实用,不太适合于课堂教学。而对于学习网络与通信的学生来说,不仅要懂得原理,还必须学会技术,这样才能符合“培养人才、创造知识、转化成果、服务社会”的教学宗旨,在人才培养、科学研究和技术应用等方面有所成就,为我国通信与信息领域的发展做出贡献。

为了获得与国际接轨的教学内容,达到提高整体教学水平的目的,北京希望电子出版社组织国内各大高校相关专业的教授、专家、学者,共同编选本套丛书。本套丛书强化学生实践能力和创新意识的培养,定位准确、内容创新、结构合理。在选材上主要采用了成熟的理论,并通过对目前研究现状的跟踪,补充了最新的研究成果;充分考虑了内容组织的系统性和完整性,从学生的认知规律出发,力求做到简明和便于教学的特色;以培养学生分析问题和解决问题的能力为目标,着重基本概念、基本原理和基本分析方法的论述。本套丛书特别突出了各项技术的实用性,可作为计算机网络和通信专业或相近专业本科生、研究生的教科书,同时,还可以作为从事网络系统开发的科研人员和相关行业技术人员、管理人员有用的参考资料。

在撰写过程中参阅了大量的参考书、论文和资料,这里谨向所有的作者致以崇高的敬意!

我们欢迎更多的优秀教师参与到教材建设中来,真诚希望广大教师、学生与读者朋友在使用本丛书过程中提出宝贵的意见和建议。若有投稿或建议,请发至本丛书出版者电子邮件: textbook@bhp.com.cn

21世纪高等院校计算机网络与通信教材编委会

前 言

“通信原理”作为通信学科的专业理论基础，在高校专业课程系列中具有重要作用。作者根据“通信原理”课程的教学实际，结合国内优秀教材——樊昌信教授的《通信原理》（第五版）和曹志刚教授的《现代通信原理》，在1999年编著的自己学院内使用的《数字通信原理习题集》、2003年编著的本学院内使用的《通信工程实验》的基础上，编写了这本《数字通信原理与实践》。它旨在帮助学生全面理解与深入钻研“数字通信原理”理论，为学习其他专业课程，分析和解决通信技术问题奠定良好的理论基础，同时，对“数字通信原理”课程考试和“数字通信原理实验”教学起到指导作用。

全书分为7章，第1章绪论部分，介绍通信系统的组成、信息论初步知识以及通信系统的质量指标；第2章信号与噪声分析部分，介绍对确知信号、随机信号以及噪声的分析方法；第3章数字基带传输系统，主要讨论数字信号的基带预处理技术，重点解决码间干扰及噪声对基带传输信号的影响问题，并提供了实验内容；第4章调制技术部分，简要介绍模拟调制的基本原理，着重讨论数字调制的基本理论，并通过实验手段加深对调制理论的理解；第5章数字电话通信系统，主要讨论模拟信号（语音信号）数字传输理论与实验；第6章纠错编码与伪随机序列部分，介绍了几种常用的纠错编码方法，并简要介绍了伪随机序列；第7章同步原理，主要讲述载波同步、位同步、群同步和网同步的实现过程。每章后面都有习题以帮助学生巩固所学知识。

本书由徐素妍、朱诗兵、李艳霞和孙陆青4人共同完成。徐素妍对全部初稿作了修改与定稿，统编了全书内容。

在本书的编写过程中，王擎天、穆道生、刘作学、蒋太杰、杜刚等老师给予了大量的帮助指导，孔静、陈倩、徐超和贺伯雄4位同学做了部分文字录入与画图工作，在此一并表示衷心感谢。

本书适合作为高等院校计算机、通信及相关专业的研究生、本科生的教材，同时也可供相关科技人员和工程人员参考。

限于编著者的水平，书中难免有错误和遗漏之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论.....	1	3.7 部分响应系统.....	66
1.1 通信系统的组成.....	1	3.8 基带系统的抗噪声性能.....	71
1.1.1 通信系统模型.....	1	3.9 眼图.....	73
1.1.2 模拟通信与数字通信.....	2	3.10 时域均衡.....	74
1.2 通信系统分类及通信方式.....	3	3.11 最佳基带传输系统.....	77
1.2.1 通信系统分类.....	3	3.12 基带信号传输实验.....	80
1.2.2 通信方式.....	4	3.13 习题.....	85
1.3 通信系统的质量指标.....	5	第4章 调制技术.....	93
1.3.1 信息及其度量.....	5	4.1 模拟线性调制.....	93
1.3.2 通信系统的主要质量指标.....	9	4.2 模拟非线性调制.....	105
1.4 信道容量.....	11	4.3 频分复用(FDM).....	108
1.4.1 有扰离散信道的信道容量.....	11	4.4 二进制数字调制.....	110
1.4.2 有扰连续信道的信道容量.....	12	4.4.1 二进制振幅键控(2ASK).....	111
1.5 习题.....	13	4.4.2 二进制移频键控(2FSK).....	114
第2章 信号与噪声分析.....	15	4.4.3 二进制移相键控(2PSK).....	119
2.1 确知信号分析.....	15	4.4.4 二进制差分移相键控(2DPSK).....	122
2.1.1 信号通过线性系统的分析方法.....	15	4.4.5 二进制数字调制系统的性能比较.....	125
2.1.2 功率谱密度与能量谱密度.....	25	4.5 多进制数字调制系统.....	130
2.2 随机信号分析.....	29	4.5.1 多进制数字振幅调制(MASK).....	130
2.2.1 随机过程及其统计特性.....	29	4.5.2 多进制数字频率调制(MFSK).....	131
2.2.2 平稳随机过程.....	31	4.5.3 多进制数字相位调制.....	132
2.2.3 高斯随机过程.....	37	4.5.4 正交振幅调制(MQAM).....	146
2.2.4 随机过程通过线性系统.....	38	4.6 数字调制实验.....	150
2.3 通信系统中的噪声.....	41	4.6.1 2DPSK系统和2FSK调制电路实验.....	151
2.3.1 白噪声.....	41	4.6.2 2FSK集成芯片实验.....	156
2.3.2 窄带高斯噪声.....	42	4.7 习题.....	160
2.4 习题.....	45	第5章 数字电话通信系统.....	164
第3章 数字基带传输系统.....	48	5.1 抽样定理.....	165
3.1 数字基带传输系统的组成.....	48	5.1.1 低通型连续信号的抽样.....	165
3.2 数字基带信号的波形.....	49	5.1.2 带通型连续信号的抽样.....	168
3.3 基带信号的频谱分析.....	51	5.1.3 抽样的分类.....	170
3.4 常用的基带传输码型.....	55	5.2 PAM、PDM、PPM.....	171
3.5 基带传输中的码间干扰.....	59	5.3 模拟信号的量化.....	173
3.6 无码间干扰的基带传输特性.....	61	5.3.1 均匀量化.....	175

5.3.2 非均匀量化	177	7.1 载波同步的方法	263
5.4 脉冲编码调制 (PCM)	180	7.1.1 插入导频法	264
5.4.1 PCM 原理	180	7.1.2 直接法	267
5.4.2 PCM 信号的码元速率和带宽	187	7.2 载波同步系统的性能	271
5.4.3 PCM 系统的抗噪声性能	187	7.2.1 稳态相差	271
5.5 简单增量调制 (ΔM)	189	7.2.2 随机相差	272
5.5.1 简单增量调制原理	189	7.2.3 同步建立时间和保持时间	273
5.5.2 ΔM 系统中的量化噪声	191	7.3 位同步的方法	274
5.6 DPCM 与 ADPCM	193	7.3.1 插入导频法	274
5.6.1 DPCM	193	7.3.2 直接法	276
5.6.2 ADPCM	194	7.4 位同步系统的性能	278
5.7 模拟信号数字传输系统性能比较	195	7.5 群同步	280
5.8 时分复用与多路数字电话系统	196	7.5.1 起止式同步法	281
5.8.1 TDM	196	7.5.2 连贯式插入法	281
5.8.2 时分多路数字电话系统	197	7.5.3 间隔式插入法	284
5.8.3 数字复接系列	198	7.5.4 群同步系统的性能	286
5.9 模拟信号数字传输实验	199	7.5.5 群同步保护	288
5.9.1 PAM、PDM、PPM 和 PCM 电路实验	199	7.6 网同步的基本概念	288
5.9.2 PCM 集成芯片实验	208	7.7 习题	291
5.9.3 ADPCM 编解码集成芯片实验	216	附录 I 欧拉公式与常用三角公式	293
5.9.4 DTMF 发号与收号系统集成 芯片实验	222	附录 II 通信系统中的增益和衰耗	295
5.9.5 数字电话通信系统仿真实验	231	附录 III 英文缩写名词对照表	296
5.10 习题	234	附录 IV Q 函数与误差函数	299
第 6 章 纠错编码与伪随机序列	237	附录 V 部分集成电路引脚排列图	304
6.1 纠错编码的基本概念	237	附录 VI 部分练习题参考答案	309
6.2 纠错编码分类和差错控制方式	240	第 1 章 部分练习题参考答案	309
6.3 几种常用的简单编码	241	第 2 章 部分练习题参考答案	310
6.4 线性分组码	244	第 3 章 部分练习题参考答案	314
6.5 循环码	250	第 4 章 部分练习题参考答案	333
6.6 卷积码	255	第 5 章 部分练习题参考答案	346
6.7 伪随机序列	256	第 6 章 部分练习题参考答案	354
6.8 习题	259	第 7 章 部分练习题参考答案	363
第 7 章 同步原理	263	参考文献	368

第1章 绪 论

通信就是信息的传输与交换。当前，数字通信已成为现代信息传输的重要手段，数字通信技术是现代通信技术的基础。本教材的着重点是针对各种类型通信系统的特点，以数字基带传输理论、调制与编码技术为核心，着重介绍数字信号的发送、接收和同步过程，即信息传输原理，并对其进行理论分析与性能评价。

本章主要介绍通信系统的组成及各部分的作用、通信系统的分类及通信方式、通信系统的质量指标以及信道容量的概念。

1.1 通信系统的组成

通信是将消息从发信者传送到收信者。消息具有不同的表现形式，如符号、文字、语音、音乐、数据、图像、视频等。传输消息也称为传输信息，按照信息论的观点，在进行有意义的通信时，传输消息就是传输了信息。消息（信息）的传送方式分为非电方式和电方式。

通信的任务是克服距离上的障碍，迅速而准确地传递信息，而通信的根本目的是传输代表消息的电信号。这种传输是利用通信系统来实现的。

1.1.1 通信系统模型

通信系统是指完成通信过程的全部设备和传输媒介。点对点的通信系统可由图1-1所示模型加以概括。

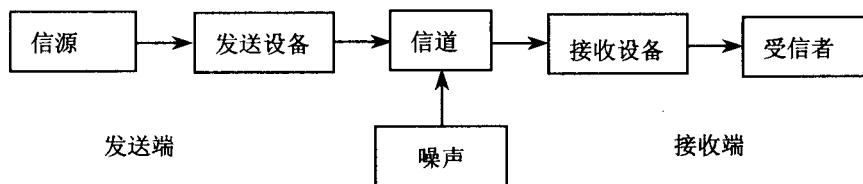


图 1-1 通信系统的一般模型

图 1-1 中，在发送端，信源（也称为发终端）的作用是把各种可能消息转换为电信号。根据信息源输出信号的性质不同，可将其分为连续信源和离散信源。例如，电话机、电视摄像机等输出的连续幅度信号为连续信源，电传机、计算机等输出的离散符号序列或文字为离散信源。发送设备的基本功能是将电信号变换为信道信号，也就是将信源和传输媒介匹配起来，即将信源产生的消息信号变换为便于传送的信号形式，送往传输媒质，如基带处理、编码、加密、调制等。

信道是指从发送设备到接收设备之间信号传递所经过的媒介。信号在信道中传输时，一方面由于信道特性不好，引起信号波形失真，另一方面不可避免地受到噪声的影响。图

1-1 中将信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声集中用“噪声”表示。

在接收端，接收设备完成输出转换，也就是完成发送设备的反变换，即进行解调、译码、解密等，它的任务是从带有干扰的信号中正确恢复出原始电信号；受信者（也称为信宿或收终端）是将已恢复的电信号转换成相应的消息。

以上所述是单向通信系统。一个完整的通信系统由传输系统和交换系统共同组成。图 1-1 所示的通信系统模型是一个高度概括的模型，在实际应用中，可以从不同的角度进行不同的分类，得出不同的通信系统模型。

1.1.2 模拟通信与数字通信

模拟信号指的是信号的某一参量（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，如语音信号。数字信号指的是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，如电报信号、电传机输出的脉冲信号等。

模拟信号有时也称为连续信号。这里的连续信号是指信号的某一参量可以连续变化，而不一定在时间上都是连续的。例如，脉冲幅度调制（PAM）信号，其幅度值是连续变化的（可以取无限多个值），但在时间上是不连续的。数字信号有时也称为离散信号。离散信号是指信号的某一参量是离散（不连续）变化的。

通常把传输模拟信号的通信方式称为模拟通信，把传输数字信号的通信方式称数字通信。模拟信号经过模/数转换（把模拟信号变换成数字信号，简写成 A/D 变换）后，也可以在数字通信系统中传输，即模拟信号的数字传输系统，如数字电话。在模拟通信系统中加装数字终端设备，就可以使用已存在的模拟通信系统传输数字信号。

点对点的模拟通信系统模型如图 1-2 所示。在该系统中完成通信过程需要进行两个重要变换。首先，发送端将连续消息变换成原始电信号，接收端需将收到的信号恢复成原连续消息。原始电信号通常具有直流和频率很低的频谱分量，一般不宜直接传输，需要将其变换成适合于信道传输的信号（这个过程称为调制），并在接收端进行反变换（即解调）。这就是模拟通信系统中的第二种变换。通常将发送端调制前和接收端解调后的信号称为基带信号。因此，这里的原始电信号又称为基带信号。通过调制，把基带信号的频谱搬移到比较高的频带范围后再传输，这种经过调制后的信号（也叫已调信号）称为频带信号。

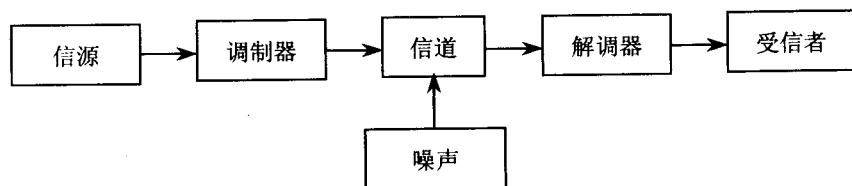


图 1-2 模拟通信系统模型

点对点的数字通信系统模型如图 1-3 所示。

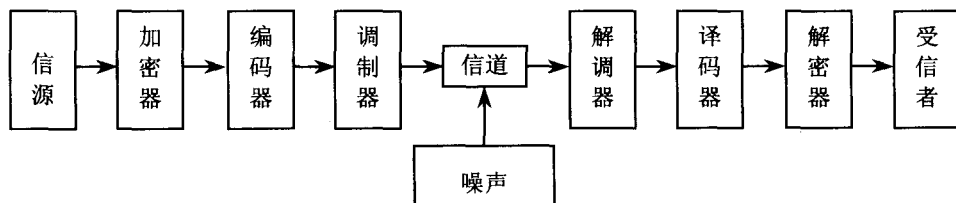


图 1-3 数字通信系统模型

数字通信系统同样存在两个变换。把离散消息变换成原始电信号，并使其适合于信道传输。编码部分包括信源编码和信道纠错编码。对数字信号进行编码是为了使数字信号与信道匹配起来，以提高传输的可靠性和有效性。加密的主要目的是提高通信保密性。调制的作用是将数字基带信号变换为适合于信道传输的已调信号。数字通信系统还应该同步部分，用以决定数字信号的起止时刻及提供相干载波，因为它的位置往往不是固定的，所以图中没有画出。

如果数字信号直接以基带信号方式传输，则不需要图 1-3 中的调制与解调装置。点对点的数字基带通信系统模型如图 1-4 所示。

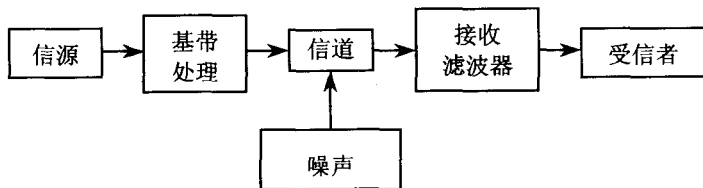


图 1-4 数字基带通信系统模型

数字通信在 20 世纪 60 年代以后得到了迅速发展，一方面是因为计算机的广泛应用需要传输大量的数字信息，另一方面是因为它与模拟通信相比主要有以下几方面的优点：数字通信抗干扰能力强，尤其在中继时，数字信号可以再生而消除噪声的积累；数字信号传输时，由于信道噪声或干扰所造成的差错可以通过差错控制编码等手段加以控制，从而提高了传输质量；便于使用现代数字信号处理技术对数字信息进行处理；数字通信保密性能好；数字通信可以综合传递各种消息，使通信系统功能增强。

数字通信的缺点是占用系统频带宽。例如，一路模拟话音通常只占据 4kHz 带宽，而一路传输质量相同的采用 PCM 方式的数字话音带宽是 64kHz。在系统频带资源比较紧张时，数字通信的这一缺点显得尤其突出，但是在系统频带资源比较宽裕时，例如，毫米波通信、光纤通信时，数字通信则是惟一的选择。

1.2 通信系统分类及通信方式

1.2.1 通信系统分类

通信系统有不同的分类方法。

按消息的物理特征分类。可分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。由于电话通信网最为发达普及，因而其他消息常常通过公共电话通信网传输。

按是否采用调制分类。可分为基带传输系统和频带传输系统。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如音频市内电话、数字信号基带传输等。频带传输（或调制传输）是对各种信号进行调制后传输的总称。调制的目的是将消息变换为便于传送的形式，提高抗干扰能力，有效地利用频带资源。常用调制方式及用途见表 1-1。

表 1-1 常用调制方式及应用

调制方式		应用举例	
载波调制	线性调制	常规双边带调幅AM	广播
		单边带调制SSB	载波通信、短波无线电通信
		抑制载波的双边带调制DSB-SC	立体声广播
		残留边带调制VSB	电视广播、传真
	非线性调制	频率调制FM	微波中继、卫星通信
		相位调制PM	中间调制方式
	数字调制	振幅键控ASK	数据传输
		频移键控FSK	数据传输
		相位键控PSK、DPSK	数据传输
		其它高效率数字调制QAM、MSK	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉冲幅度调制PAM	中间调制方式、遥测
		脉冲宽度调制PDM	中间调制方式
		脉冲位置调制PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉冲编码调制PCM	市话中继、卫星、空间通信
		增量调制 ΔM	军用、民用数字电话
		差分脉冲编码调制DPCM	电视电话、图像编码
		自适应差分脉冲编码调制ADPCM	中速数字电话

按传输信号的特征分类。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

按传输媒介分类。通信系统可分为有线（包括光纤）和无线两类。

按传送信号的复用方式分类。在一个信道上同时传输多路消息信号的技术称复用技术。复用技术可分为频分复用、时分复用和码分复用 3 种。频分复用是利用频谱搬移使不同信号占据不同的频率范围；时分复用是用抽样或脉冲调制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码字的码组携带多路信号。相应地，通信系统分为频分复用通信系统、时分复用通信系统和码分复用通信系统。传统的模拟通信采用频分复用，时分复用主要应用在数字通信系统中，码分复用多用于空间扩频通信系统和移动通信系统中。

1.2.2 通信方式

对于点对点通信，按消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

通信和全双工通信 3 种。单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式，如遥测、遥控；半双工通信是指通信双方都能收发消息，但不能同时进行收发的工作方式，如使用同一载频工作的无线电对讲机；全双工通信是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式，例如普通电话。

在数字通信中，按照所传输的数字信号码元排列方法不同，分为串行传输和并行传输。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，也称为串序传输，如图 1-5 (a) 所示。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，同时在信道中传输，也称为并序传输，例如，将图 1-5 (a) 中所示的串行序列变成两路序列进行并行传输的情况如图 1-5 (b) 所示。

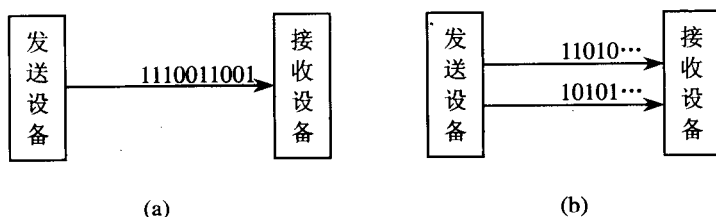


图 1-5 串行传输和并行传输示意图

(a) 串行传输；(b) 并行传输

远距离数字通信一般都采用串行传输方式，因为这种方式只需占用一条通路。近距离通信中有时也采用并行传输方式，需要占用两条或两条以上的通路。

1.3 通信系统的质量指标

在研究、设计或者评价一个通信系统时，必然涉及通信系统的质量指标（也称性能指标）。通信系统的质量指标很多，归纳起来主要有以下几方面：有效性，指消息的传输速率；可靠性，指消息传输的质量；适应性，指环境使用条件；标准性，指元件的标准互换性；经济性，指成本是否低，性能价格比是否优；保密性，指是否便于加密；此外，还有使用维护是否方便。

其中，通信系统最主要的质量指标是有效性和可靠性，因为这两个指标基本上体现了对通信“正确、迅速和不间断”的要求。

有效性和可靠性这两个指标通常是矛盾的，只能根据实际需要尽可能地取得满意结果。例如，在一定可靠性指标下，尽量提高消息的传输速度；又如，在一定有效性条件下，尽可能地提高消息的传输质量。

模拟通信系统和数字通信系统对这两个指标要求的具体内容有很大差别，要分别加以讨论。

为了便于对通信系统的主要质量指标做定量分析，下面先介绍一下信息量的概念。

1.3.1 信息及其度量

信息与消息的区别与联系。信息指的是消息中包含的对受信者有意义的内容；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。为了衡量通信系统的传输能力,首先要对被传输的信息进行定量测度。

衡量各种不同的消息中包含信息多少的标准称为信息量(信息度量,一般用 I 表示)。

假设离散信源是包括 N 种符号 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 的集合,每个符号出现的概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_N)$, 则可用符号集(或称概率场)表示为:

$$[X, P(x)] = \begin{pmatrix} x_1, & x_2, & \dots, & x_N \\ P(x_1), & P(x_2), & \dots, & P(x_N) \end{pmatrix} \quad (1-1)$$

其中, $x \in \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 为离散随机变量,且统计独立; $P(x_i) = P(x=x_i)$, 为元素 x_i ($i=1, 2, \dots, N$) 的概率,且应满足 $\sum_{i=1}^N P(x_i) = 1$ 。

消息中所含的信息量 I 是出现该消息的概率 $P(x)$ 的函数,且消息出现的概率越小,它所含的信息量越大;反之,若消息出现的概率越大,则它所含的信息量越小;当 $P(x)=1$ 时, $I=0$ 。若干个互相独立事件构成的消息所含的信息量等于各独立事件的信息量之和,这就是信息相加性原理。

因此,对于(1-1)式给定的离散概率空间 $[X, P(x)]$ 表示的信源称

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

为信源消息 $x \in X$ 的自信息量,简称为 x 的信息量。

根据信息相加性概念,整个消息的信息量为

$$I = -\sum_{i=1}^N n_i \log_a P(x_i) \quad (1-3)$$

式中, n_i 为第 i 个符号出现的次数, $P(x_i)$ 为第 i 个符号出现的概率, N 为离散消息源的符号数目。

在(1-2)式及(1-3)式中,若对数的底 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit);如果取 e 为对数的底,则信息量的单位为奈特(nat);如果取 10 为对数的底,则信息量的单位称为十进制单位,或叫哈特(hart)。通常广泛使用的单位是比特(bit)。

不同进制的消息,包含的信息量不同。对于 N ($N=2^k, k=1, 2, 3, \dots$) 进制消息,若消息符号独立且等概,则每个 N 进制消息符号的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/N} = \log_2 N = k \text{ (bit)}$$

例 1.1 计算 $N=2$ 时单个符号所包含的信息量。

解: $N=2$, 即二进制,当“0”、“1”等概出现时,单个二进制符号的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \text{ (bit)}$$

由此可知,当“0”、“1”等概出现时,单个二进制数字信息的信息量为 1bit。

当存在两个离散信源 X 和 Y 时,它们在某时刻出现的符号分别为 x_i 和 y_j , 则定义

$$I(x_i | y_j) = -\log_a P(x_i | y_j) \quad (1-4)$$

此式为条件信息量。它表示了在 y_j 条件下对 x_i 的不确定程度。如果用 X 、 Y 分别表示数字通信系统的输入和输出, 则 $I(x_i|y_j)$ 表示收到 y_j 后对发送 x_i 的不确定程度。这种不确定程度是由系统中的干扰和噪声引起的。

对于以上两个离散信源, 将其互信息量定义为

$$I(x_i, y_j) = \log_a \frac{P(x_i|y_j)}{P(x_i)} = -\log_a P(x_i) - [-\log_a P(x_i|y_j)] \quad (1-5)$$

式中, $P(x_i)$ 表示先验概率, $P(x_i|y_j)$ 表示条件概率。 $I(x_i, y_j)$ 的物理意义是, 收到 y_j 后获得的关于 x_i 的信息量。由式(1-5)可知, 该信息量等于 x_i 的信息量减去在信道中丢失的信息量。

互信息量反映了两个随机事件 x_i 与 y_j 之间的统计关联程度, 如果 x_i 与 y_j 统计独立, 则它们的互信息量为零。

对于(1-1)式给定的离散概率空间 $[X, P(x)]$, 将信源所定义的随机变量 $I(x)$ 的数学期望

$$H(x) = E[I(x)] = -\sum_{i=1}^N P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (1-6)$$

称为该信源输出消息的平均信息量, 也叫做信源的信息熵或简称为熵。平均信息量表示了每个符号所含信息量的统计平均值, 其单位通常用 (bit/符号) 表示。

例 1.2 设有 4 个消息 A、B、C、D, 每一消息的出现是相互独立的, 分别以概率 1/4、1/8、1/8 和 1/2 传送。计算其平均信息量。

解: 由(1-6)得

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log P(x_i) \\ &= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} \\ &= 1.75 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

若消息中各符号的出现统计相关, 则必须用条件概率来计算平均信息量。若只考虑相邻两符号间的统计关联性, 则前一个符号为 x_i 而后一符号为 x_j 时的条件平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x_j|x_i) &= \sum_{i=1}^N P(x_i) \sum_{j=1}^N [-P(x_j|x_i) \log_2 P(x_j|x_i)] \\ &= -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(x_i) P(x_j|x_i) \log_2 P(x_j|x_i) \\ &= -\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P(x_i, x_j) \log_2 P(x_j|x_i) \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中, $P(x_i)$ 为符号 x_i 出现的概率, $P(x_i, x_j)$ 为 x_i 与 x_j 的联合概率, $P(x_j|x_i)$ 是前一个符号为 x_i 而后一符号为 x_j 时的条件概率。

例 1.3 某离散信源由 A、B、C 3 种符号组成, 相邻两符号的出现统计相关, 其转移概率矩阵为

$$\begin{bmatrix} P(A|A) & P(A|B) & P(A|C) \\ P(B|A) & P(B|B) & P(B|C) \\ P(C|A) & P(C|B) & P(C|C) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 9/11 & 1/8 & 0 \\ 2/11 & 3/4 & 2/9 \\ 0 & 1/8 & 7/9 \end{bmatrix}$$

且已知 $P(A)=11/36$, $P(B)=4/9$, $P(C)=1/4$, 求该信源的条件平均信息量。

解: 由式(1-7)得该信源的条件平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x_j|x_i) &= - \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 P(x_i) P(x_j|x_i) \log_2 P(x_j|x_i) \\ &= -P(A)[P(A|A)\log P(A|A)+P(B|A)\log P(B|A)+P(C|A)\log P(C|A)] \\ &\quad -P(B)[P(A|B)\log P(A|B)+P(B|B)\log P(B|B)+P(C|B)\log P(C|B)] \\ &\quad -P(C)[P(A|C)\log P(A|C)+P(B|C)\log P(B|C)+P(C|C)\log P(C|C)] \\ &= 0.872 \text{ (bit/符号)} \end{aligned}$$

若此例中 A、B、C 符号统计独立, 则可求得平均信息量为 $H=1.543$ bit/符号。这一结果说明, 符号间统计独立时的信源熵高于统计相关时的信源熵, 也就是说, 符号间的相互关联使平均信息量减小。

当离散信源中每个符号等概出现且统计独立时, 该信源具有最大的平均信息量 (即最大熵)。此时, 最大熵为

$$H_{\max} = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \log_2 \frac{1}{N} = \log_2 N \quad (1-8)$$

以上讨论了离散信源的信息度量。连续信源的信息量可以用概率密度来描述。连续信源的平均信息量为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log_2 p(x) dx \quad (1-9)$$

式中, $p(x)$ 为连续信源出现的概率密度函数。上式中的 $H(x)$ 又称为连续信源的相对熵, 是连续信源信息量的相对度量, 其值随所选取的坐标系变化, 但连续信源的绝对熵是保持不变的。

当信源输出的均方值受限时, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} x^2 \log p(x) dx = \sigma^2$$

其中, $p(x)$ 为一维分布, σ^2 为连续信源 x 的均方值。并且

$$\int_{-\infty}^{\infty} \log p(x) dx = 1$$

则, 当

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}$$

时, 即正态分布时, 存在最大熵

$$H_{\max}(x) = \log_2 \sigma\sqrt{2\pi e} \text{ (bit/符号)}$$

当信源输出的峰值受限时, 令 A 为连续信源输出的峰值, 即 $-A < x < A$, 则当

$$p(x) = \frac{1}{2A}$$

时, 即均匀分布时, 存在最大熵

$$H_{\max}(x) = \log_2(2A) \quad (\text{bit/符号})$$

例 1.4 有一连续消息源, 其输出信号在 $[-1, +1]$ 取值范围内具有均匀的概率密度函数, 求该连续消息的平均信息量。

解: 由已知, 得出该信号的概率密度函数为 $p(x)=1/2$, 则平均信息量为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \log_a p(x) dx = - \int_{-1}^{+1} \frac{1}{2} \log_2 \left(\frac{1}{2} \right) dx = 1 \quad (\text{bit})$$

对于两个连续信源 X 和 Y , 其平均互信息量定义为

$$I(X, Y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} p(x, y) \log_a \frac{p(x, y)}{P(x)p(y)} dx dy = H(x) - H(X|Y) \quad (1-10)$$

式中, $p(x, y)$ 为 x, y 的联合概率密度函数, $p(x), p(y)$ 分别为 x, y 的概率密度函数, $H(X)$ 表示连续信源 X 的平均信息量, $H(X|Y)$ 表示平均条件信息量。如果把 X, Y 分别看成是一个模拟通信系统的输入和输出, 则 $I(X, Y)$ 的物理意义是收到 Y 而对发送为 X 的平均不确定程度。

以上介绍了信息及其度量的初步知识。限于篇幅, 关于信息量的进一步讨论, 读者可参考信息论有关专著。

1.3.2 通信系统的主要质量指标

下面分别讨论模拟通信系统的主要质量指标和数字通信系统的主要质量指标。

1. 模拟通信系统的主要质量指标

(1) 有效性。指的是在给定的信道中, 单位时间内传输的信息量大小, 即消息的传输速度。消息传输速度主要取决于消息所含的信息量和对连续信息源的处理, 处理的目的在于使单位时间内传送更多的消息, 或者在一定的频带范围内传输更多的消息。例如, 对于单路话音信号, 采用单边带 (SSB) 调制方式时所占用的信道带宽是采用普通调幅 (AM) 方式时的一半, 也就是说在相同的频带范围内, 采用 SSB 调制方式能够传输的信号路数是 AM 方式的两倍, 即可以传输更多的消息, 因此, 在有效性方面, SSB 调制优于 AM。

(2) 可靠性。指的是在给定的信道中, 传输信息的准确可靠程度。模拟通信系统的可靠性用信号与噪声的功率比 (简称信噪比) S/N 来表示。不同的模拟通信系统对 S/N 的要求不同, 例如, 一般无线通信系统要求 S/N 不小于 26dB, 听清 95% 以上时要求 S/N 不小于 40dB。总之, S/N 越大, 可靠性越高, 通信质量越高。

在实际的模拟通信中, 信号功率和信号传输过程中引起的失真和各种干扰、噪声决定了 S/N 的大小。信号在系统中传输时, 一方面由于信道特性不理想引起信号波形畸变, 这种干扰称为乘性干扰; 另一方面必然会叠加上噪声, 影响信号的准确恢复, 称之为加性干扰; 乘性干扰会随信号的消失而消失, 而加性干扰不管信号有无始终存在。因此, 信号功率和信道中的加性干扰是决定 S/N 大小的最主要因素。

另一个决定 S/N 的因素是调制和解调方式。当信号功率一定, 信道噪声一定, 即接收

机的输入信噪比一定时,不同解调方式的输出信噪比不同。因此,在以后的学习中要特别注意比较不同调制解调方式的抗噪声性能,使用时注意选择抗噪声性能好的调制解调方式以提高通信系统的可靠性。

2. 数字通信系统的主要质量指标

数字通信系统的有效性通常用码元速率 R_B 和信息速率 R_b 表示,可靠性通常用误码率 P_e 和误信率 P_b 表示。

(1) 有效性指标的讨论。码元速率(或称传码率、数码率、波形速率等)指的是每秒钟传输码元的数目,用 R_B 表示,单位是“波特(Baud)”,简称为“B”,有时也写为“B_d”。1 波特=1 个码元/秒。令数字信号的码元宽度为 T 秒,则不管是何种进制,都有

$$R_B = \frac{1}{T} \quad (\text{B}_d) \quad (1-11)$$

设二进制码元速率为 R_{B2} , N 进制码元速率为 R_{BN} , 其中 $N=2^k$ ($k=1,2,3,\dots$), 则二进制码元速率与 N 进制码元速率的关系是

$$R_{B2} = R_{BN} \log_2 N \quad (\text{B}_d) \quad (1-12)$$

信息速率(或称传信率)指的是每秒钟传输的信息量,用 R_b 表示,单位是比特/秒,简称为 bit/s (或 bps)。在无特殊声明的情况下,每个二进制码元规定含有 1bit 的信息量。

因为信息量与进制有关,所以信息速率也和进制有关。下面讨论一下二进制与多进制的码元速率与信息速率的相互关系。

二进制时,信息速率与码元速率在数值上相等,只是单位不同。

N 进制时,设 N 进制信息速率为 R_{bN} , 在码元速率 R_B 一定的情况下,有

$$R_{bN} = R_B \log_2 N \quad (\text{bit/s}) \quad (1-13)$$

设 N 进制码元速率为 R_{BN} , 在信息速率 R_b 一定的情况下,有

$$R_{BN} = \frac{R_b}{\log_2 N} \quad (\text{B}_d) \quad (1-14)$$

例 1.5 已知二进制数字信号每个码元占有的时间为 1ms,“1”、“0”码等概出现。

①求码元速率,每秒钟的信息量,信息速率;

②如果码元速率不变,改用八进制传输,且各种码元等概出现,求每个码元的信息量,信息速率。

解:

①码元速率 $R_B = 1/T = 1/1\text{ms} = 1000 \text{ B}_d$

每秒钟的信息量: $I = 1000 \text{ bit}$

信息速率: $R_b = 1000 \text{ bit/s}$

②二进制“1”、“0”码等概出现时,每个码元的信息量为 1bit,则八进制时每个码元的信息量为 $I_8 = \log_2 8 = 3 \text{ bit}$

信息速率为 $R_{b8} = R_B \log_2 8 = 1000 \times 3 = 3000 \text{ bit/s}$

(2) 可靠性指标的讨论。差错率是衡量数字通信系统正常工作时,传输消息可靠程度的重要质量指标,通常用误码率 P_e 和误信率 P_b 来表述。