



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

◎ 电子信息科学与工程专业 规划教材

通信原理

(第2版)

◎ 韩庆文 叶蕾 蒲秀娟 蒋颖 编著



本书作为主讲教材的
《数字通信原理》精品课程网站
信息可扫描二维码获取



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业规划教材

通信原理

(第2版)

韩庆文 叶 蕾 蒲秀娟 蒋 颖 编著

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材《通信原理》的第2版。本书重点介绍了通信的基本原理和相关理论,并在此基础上介绍了一些现代通信技术。本书共8章,主要内容包括:通信系统概述、信息论初步、信道与干扰、模拟调制技术、模拟信号的数字化传输、基带传输、数字调制与解调、同步原理。本书的特点是:以通信系统的整体框架为依托,结合工程实践,力求做到深入浅出、理论联系实际、阐述透彻、基本概念准确。各章结尾都附有适当的习题,本书为任课教师提供免费电子教学课件。

本书可作为高等学校工科无线电技术、通信和电子系统等专业的高年级本科生教材或研究生参考书,也可供通信工程技术人员和科研人员参考。

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

通信原理 / 韩庆文等编著. — 2版. — 北京:电子工业出版社,2014.8

电子信息科学与工程专业规划教材

ISBN 978-7-121-23824-6

I. ①通… II. ①韩… III. ①通信原理—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第156896号

策划编辑:冯小贝

责任编辑:冯小贝

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:787×1092 1/16 印张:22.5 字数:576千字

版 次:2008年3月第1版

2014年8月第2版

印 次:2014年8月第1次印刷

定 价:49.00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。

第 2 版前言

本教材讲解了模拟通信和数字通信的基本原理，但侧重于数字通信原理。本教材参考了大量国内外同类教材并结合作者多年讲授这门课程的经验编写而成，重点介绍通信的基本原理和相关理论，并在此基础上介绍一些现代通信技术，希望适应当前社会对通信专业本科生的要求。作者在编写中力求基本概念准确，阐述透彻，由浅入深，让读者易学易懂。

本教材共分 8 章：第 1 章“概述”，介绍通信系统的基本组成、分类及系统模型，重点介绍数字通信系统及其性能指标；第 2 章“信息论初步”，介绍信息论的相关知识；第 3 章介绍信道与干扰；第 4 章讨论模拟调制技术；第 5 章“模拟信号的数字化传输”，介绍模拟信号数字化的基本原理、脉冲编码调制(PCM)、增量调制(ΔM)等现代语音压缩编码技术及复接技术；第 6 章“基带传输”，全面介绍基带信号传输的基本原理，从基带信号的码型、频率特性，基带系统的组成，基带信号通过基带系统传输受到的主要影响，码间干扰和噪声干扰及克服和减小它们的方法等几方面进行理论分析；第 7 章“数字调制与解调”，介绍三种数字调制与解调技术的基本原理，并对其性能进行分析和比较，在此基础上讨论了宽带通信中最新的调制解调技术；第 8 章“同步原理”，主要介绍数字通信中的载波同步、位同步及群同步技术的基本原理。各章末尾都附有习题。

本教材的参考学时为 100 ~ 120 学时，任课教师可根据实际情况酌情取舍。本教材还为任课教师提供免费电子教学课件，请登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册下载。

本教材的第 1、3、6、8 章由韩庆文编写，第 2、4、5 章由叶蕾编写，第 7 章由蒲秀娟和蒋颖编写。韩庆文负责统编全稿，蒋阳负责全书审稿。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2014 年 8 月

目 录

第 1 章 概述	1	2.5.4 香农公式	34
1.1 通信的基本概念	1	2.6 信道编码	36
1.2 通信发展简史	1	2.6.1 香农第二定理	37
1.3 通信系统的基本组成	3	2.6.2 编码方法	37
1.4 信源	4	2.6.3 检错与纠错	38
1.5 通信信道	6	习题 2	41
1.5.1 常用通信信道	6	第 3 章 信道与干扰	42
1.5.2 通信信道的基本模型	10	3.1 概述	42
1.6 模拟通信与数字通信	10	3.1.1 狭义信道和广义信道	42
1.6.1 模拟通信与数字通信的概念	10	3.1.2 信道模型	43
1.6.2 模拟通信系统模型	11	3.2 信号通过线性时不变系统	45
1.6.3 数字通信系统模型	12	3.2.1 随机信号	45
1.7 信息的传输方式	14	3.2.2 信号的无失真传播条件	50
1.8 数字通信系统的主要性能指标	15	3.2.3 平稳随机过程通过系统	52
1.8.1 传输速率	15	3.3 白噪声	53
1.8.2 差错概率	16	3.3.1 白噪声	53
习题 1	16	3.3.2 高斯噪声	54
第 2 章 信息论初步	17	3.3.3 高斯白噪声	55
2.1 信息论的两条发展途径	17	3.3.4 窄带高斯噪声	56
2.2 信息论研究的基本内容	17	3.4 变参信道及其对信号传输	
2.3 信息的对数量度	18	的影响	58
2.3.1 互信息量	18	3.4.1 变参信道	58
2.3.2 通信熵	20	3.4.2 变参信道对信号传输的影响	59
2.3.3 各种熵的性质	21	3.4.3 变参信道特性的改善(分集	
2.3.4 平均互信息量	23	接收)	64
2.4 离散信源与连续信源	25	习题 3	68
2.4.1 离散信源	25	第 4 章 模拟调制技术	70
2.4.2 连续信源	26	4.1 概述	70
2.4.3 信源编码	29	4.2 幅度调制	70
2.5 信道容量与香农公式	30	4.2.1 双边带调幅	71
2.5.1 无扰离散信道的信道容量	30	4.2.2 单边带(SSB)调制	74
2.5.2 有扰离散信道的信道容量	31	4.2.3 残留边带(VSB)调制	77
2.5.3 有扰连续信道的信道容量	33	4.3 非线性调制技术	78

4.3.1	角度调制的基本概念	79	5.6.4	准同步数字序列	145
4.3.2	窄带调频与宽带调频	80	5.6.5	同步数字序列	146
4.3.3	调频信号的产生与解调	85	5.6.6	SDH 复用的基本原理	148
4.4	模拟调制系统的抗噪性能	87	5.6.7	SDH 组网技术	151
4.4.1	线性调制系统的抗噪性能	87	习题 5		152
4.4.2	非线性调制系统的抗噪性能	94	第 6 章	基带传输	155
4.5	各种模拟调制系统的比较	97	6.1	概述	155
4.5.1	各种模拟调制方式的性能	97	6.2	基带信号及其频谱特性	156
4.5.2	各种模拟调制方式的特点 与应用	98	6.2.1	矩形脉冲波形	156
习题 4		99	6.2.2	线路码型	157
第 5 章	模拟信号的数字化传输	101	6.2.3	波形序列的功率谱密度	162
5.1	引言	101	6.3	基带信号的传输与码间干扰	169
5.2	模拟信号的抽样	101	6.3.1	基带系统模型	170
5.2.1	模拟信号的抽样	101	6.3.2	基带信号传输中的码间干扰	171
5.2.2	实际抽样	104	6.4	基带传输中码间干扰的消除	172
5.2.3	带通信号的抽样	106	6.4.1	奈奎斯特第一准则	172
附实验一: 低通信号的抽样定理 实验		109	6.4.2	奈奎斯特第二准则	179
5.3	信号的量化	110	6.4.3	奈奎斯特第三准则	182
5.3.1	量化的基本原理	110	6.4.4	部分响应技术	183
5.3.2	均匀量化	112	6.5	基带信号的最佳接收	188
5.3.3	最佳量化器与非均匀量化	116	6.5.1	引言	188
5.3.4	语音信号的量化	118	6.5.2	数字信号接收的统计表示	189
5.4	脉冲编码调制 (PCM)	124	6.5.3	最佳接收准则	192
5.4.1	PCM 的基本原理	124	6.5.4	二元信号的最佳接收机	196
5.4.2	编码规则	125	6.5.5	二元信号最佳接收机的性能	199
5.4.3	PCM 编码器与译码器	127	6.5.6	二元信号的最佳形式	202
附实验二: PCM 编码的压缩与扩张		130	6.5.7	匹配滤波器	204
5.4.4	PCM 系统的噪声性能	130	6.6	基带系统的最佳化	208
5.5	差分脉冲编码调制和增量调制	132	6.6.1	最佳基带系统的概念	208
5.5.1	语音压缩编码	132	6.6.2	理想信道的最佳基带系统	208
5.5.2	差分脉冲编码调制 (DPCM)	134	6.6.3	非理想信道的最佳基带系统	216
5.5.3	增量调制 (ΔM)	135	6.6.4	眼图	219
5.6	时分复用及数字复接	142	6.7	基带系统的均衡	221
5.6.1	时分复用的基本原理	142	6.7.1	频域均衡	222
5.6.2	PCM 一次群	143	6.7.2	时域均衡	222
5.6.3	数字复接技术	144	习题 6		229
			第 7 章	数字调制与解调	233
			7.1	引言	233

7.2	移幅键控(ASK)	233	7.7.1	正交幅度调制(QAM)	290
7.2.1	二进制移幅键控(2ASK)	233	7.7.2	正交频分复用(OFDM)	294
7.2.2	2ASK 系统的性能	236	习题 7	301
7.2.3	多进制振幅调制	241	第 8 章	同步原理	302
7.3	移相键控(PSK)	243	8.1	引言	302
7.3.1	二进制移相键控(2PSK)	243	8.2	载波同步	302
7.3.2	系统性能	247	8.2.1	插入导频法	302
7.3.3	多进制移相键控	251	8.2.2	直接提取法	305
	附实验一: 2PSK 和 2DPSK 调制		8.2.3	载波同步系统的性能	313
	解调系统	260	8.2.4	载波相位误差对解调性能	
7.4	移频键控(FSK)	261		的影响	321
7.4.1	二进制移频键控(2FSK) 信号		8.3	位同步	322
	的产生	261	8.3.1	外同步法	322
7.4.2	2FSK 信号的频谱特性	262	8.3.2	自同步法	324
7.4.3	2FSK 信号的解调	266	8.3.3	位同步系统的性能及其相位	
7.4.4	2FSK 系统的性能	271		误差对性能的影响	335
7.4.5	MSK 方式	275	8.4	群同步	338
7.4.6	多进制移频键控	279	8.4.1	起止式同步法	338
	附实验二: 2FSK 调制解调系统	282	8.4.2	加高式或加宽式同步法	338
7.5	数字调制系统的性能比较	284	8.4.3	连贯式插入法	339
7.6	键控信号的复包络法	285	8.4.4	间隔式插入法	343
7.6.1	键控信号的复包络	285	8.4.5	群同步系统的性能	344
7.6.2	利用复包络法求键控信号和		8.4.6	群同步的保护	350
	窄带噪声的功率谱密度	287	习题 8	352
7.6.3	键控信号通过带通信道	289	参考文献	354
7.6.4	键控信号的正交相干解调	290			
7.7	宽带通信中的调制技术简介	290			

第1章 概述

1.1 通信的基本概念

自然界的生物利用各种各样的方式交流着，人类最初的交流方式是利用声音和肢体语言进行的。随着人类智慧的进步，产生了远距离信息交流的需求，驿马传递方式应运而生，烽火台则用于满足紧急信息的交互需求。当人们意识到自然界中存在着更加先进的通信方式——如鲸鱼的超声波感知能力，便开始研究是否能利用更加先进的方式实现远距离的信息交互。1837年，最早的电通信——摩尔斯(Morse)电报系统出现，拉开了电通信的序幕。在此后的180年中，电通信飞速发展，通信已经不再限于语言的交流，各种数据、图像和文本均成为通信交互的内容，人们对通信质量的要求也越来越高，通信的方式也越来越多。随着网络时代的到来，通信也从过去的点到点的通信发展为网络通信，并且已与计算机技术有机地结合，其发展会给人类进步带来更大的影响。

通信原理涉及通信及通信系统的基本理论、关键技术及其分析方法，是现代通信从业人员必须掌握的基础知识。

1.2 通信发展简史

自1837年有线电报系统出现至今，通信技术的发展已经经历了三个重要的历史时期，如表1.1所示，我们可以从理论与应用两个方面发现通信技术的演进过程。

从某种意义上来看，古老的烽火台就是用符号来传递信息的，即用点燃和熄灭表示是否发生了紧急状况，这说明用码字表示信息是人类思维方式的体现，这种思维方式是自然界赋予的天性，即符合自然规律。通信的发展正是沿着这样一条自然赋予的合理路线演进着。

于是，当人类开始以电信号传送消息时，最早的电通信系统——摩尔斯电报系统，是一种数字通信系统。这个看似原始的系统是人类朴素哲学思想的体现，它采用的电报码是可变长度信源编码的先驱。1875年，随着定义了传号和空号的博多码的问世，二进制码字时代逐渐拉开了序幕，但是真正的数字通信时代还远未到来。

摆脱线的束缚，是人类信息交换的另一个追求，麦克斯韦(Maxwell)电磁学的推出，使得人们开始专注于无线通信方式的研究。随着无线电报技术的出现，模拟无线通信得到了长足发展。相比于单调的摩尔斯码电报，模拟语音通信将语音信号通过模拟通信系统传输，并将人类的交流提升到了远距离的对话阶段。尽管如此，研究者们始终无法偏离自然赋予的本源思维方式，即数字化趋向。

表 1.1 通信技术发展历史

阶段	时间	重大事件
第一阶段	1837年	摩尔斯发明有线电报，开始电通信阶段
	1843年	亚历山大·本取得电传打字电报的专利
	1864年	麦克斯韦创立了电磁辐射理论，并被当时的赫兹证明，促使了后来无线通信的出现

续表

阶段	时间	重大事件
初级通信阶段	1875年	博多码问世
	1876年	贝尔利用电磁感应原理发明了电话
	1879年	第一个专用人工电话交换系统投入运行
	1880年	第一个付费电话系统运营
	1892年	加拿大政府开始规定电话频率
	1896年	马可尼发明无线电报
	1924年	奈奎斯特提出无码间干扰数字传输技术
	1942年	维纳提出最佳线性滤波器理论
第二阶段近代通信阶段	1948年	香农提出了信息论,建立了通信统计理论
	1950年	时分多路通信应用于电话系统
	1951年	直拨长途电话开通
	1956年	铺设越洋通信电缆
	1957年	发射第一颗人造地球卫星
	1958年	发射第一颗通信卫星
	1962年	发射第一颗同步通信卫星,开通国际卫星电话;脉冲编码调制进入实用阶段
	1969年	电视电话业务开通
	20世纪70年代	商用卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统投入使用;一些公司制定计算机网络体系结构
第三阶段现代通信阶段	1978年	贝尔实验室建立首个蜂窝移动通信网
	20世纪80年代	开通数字网络的公用业务;个人计算机和计算机局域网出现;网络体系结构国际标准陆续制定
	1991年	GSM移动通信系统投入商用
	1995年	互联网开始普及
	1997年	68个国家签订国际协定,互相开放电信市场
	1998年	数字电视业务在美国开通
1999年	ITU决定发展第三代移动通信系统	

在语音通信需求巨大的时代,数字通信研究者们需要解决的首要问题是,如何用数字信号表示语音,并经过传输后能正常恢复;1924年奈奎斯特(Nyquist)提出了无码间干扰数字传输技术,现代数字通信起源于此。奈奎斯特研究了给定带宽的电报信道上无码间干扰的最大信号传输速率,并给出了发送信号的一般形式:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n g(t - nT_s) \quad (1.1)$$

式中, $g(t)$ 表示基本的脉冲形状, $\{a_n\}$ 是以速率 $1/T$ b/s (比特/秒) 发送的 $\{\pm 1\}$ 二进制数据序列。奈奎斯特提出了带宽为 B 的最佳脉冲形状和在脉冲抽样时刻 kT 无码间干扰条件下的最大比特速率,并定义该比特速率—— $2B$ 脉冲/s 为奈奎斯特速率,以该速率的抽样脉冲 $g(t) = \frac{\sin[2\pi Bt]}{2\pi Bt}$

对模拟语音信号进行抽样,能够实现对无码间干扰的数据的恢复。奈奎斯特的研究成果等价于带限信号抽样定理的一种形式。1948年,香农(Shannon)准确地阐述了该定理,抽样定理指出,带宽为 B 的信号可以由抽样速率为 $2B$ 样值/s 的抽样样值通过以下插值公式重构:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} f\left(\frac{n}{2B}\right) \frac{\sin[2\pi B(t - n/2B)]}{2\pi B(t - n/2B)} \quad (1.2)$$

奈奎斯特的研究成果说明,模拟信号可以利用数字方式传输,并实现无失真恢复,这为数字通信系统的出现提供了必要的理论基础。基于奈奎斯特的研究成果,哈特莱(Haitely)提

出, 当最大信号幅度小于一个给定最大值 A_{\max} 、接收机精度为 A_{δ} 时, 存在一个能在带限信道实现可靠传输的最大数据速率, 哈特莱的研究为数字通信系统提供了速率选择依据。

哈特莱和奈奎斯特的研究成果为近代通信阶段的开启提供了理论准备。1948 年, 香农信息论面世, 标志着近代通信时代的来临。香农奠定了信息传输的数学基础, 采用了信源和通信信道的概率模型, 以统计术语将可靠的信息传输基本问题表示成公式, 并对信源的信息含量采用了对数的度量; 同时证明了发射机功率限制、带宽限制和加性噪声的影响与信道的关联, 提出了信道容量的概念, 定义在加性高斯白噪声干扰下, 一个带宽为 B 的理想带限信道的容量为

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P}{Bn_0} \right) \quad (\text{b/s}) \quad (1.3)$$

式中, P 为平均发射功率, n_0 为加性噪声的功率谱密度。信道容量的定义说明, 如果信源的信息传输速率 R 小于 C , 则可以通过采用适当的编码而达到在信道上可靠传输的目的; 反之, 无论在发射机和接收机采用何种信号处理方式, 都不可能实现可靠传输。香农理论的意义在于, 提出了对信息通信的基本限制, 此后的数字通信均基于这个限制展开研究, 并演进至今。

随着现代通信时代的来临, 通信系统已经全面进入数字化时代。数字化时代面临的主要问题是, 信道的拥挤与人们对传输带宽无止境的追求之间的矛盾, 这一基本矛盾催生了大批的新技术, 并将再次考验人类的智慧, 即如何将这种追求限制起来。

1.3 通信系统的基本组成

通信的目的就是克服距离的障碍、迅速准确地传递消息, 所有通信都是将消息变成与之对应的信号来传递的, 信号实际上就是消息的转载者。

现代通信以电信号来传递消息, 这是最好的传递方法之一, 不仅传得快, 而且准确可靠, 几乎不受时间、地点、距离等方面的限制, 因而获得了飞速的发展和广泛的应用。如今在自然科学中, “通信” 一词几乎是“电通信” 的同义词了, 本教材所讲的通信就是电通信, 简称为电信。

通信系统一般由传输设备和线路组成。具体的通信系统种类繁多, 例如模拟电话载波系统、微波通信系统、卫星通信系统、数字电话系统、数据传输系统等, 它们虽然有着不同的用途和具体的电路结构, 但是都可由图 1.1 所示的基本模型加以概括。

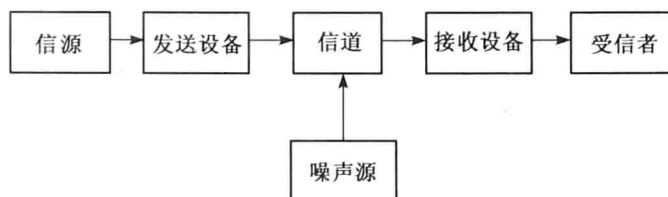


图 1.1 通信系统的基本模型

如图 1.1 所示, 通信系统的基本组成部分包括:

- 发送端信源的作用是把各种消息转换成原始的电信号。
- 发送设备则对原始信号完成某种变换, 以适应信道传输。
- 信道是信号传输的通道。

- 接收端的接收设备的功能与发送设备相反,完成发送设备的反变换,使接收信号恢复为原始的电信号。
- 受信者(又称信宿或收终端)则将复原的原始电信号转换成相应的消息。
- 噪声源是信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示。

信源与受信者之间的信息传输可能是单向的,也可能是双向的。

最典型的单向方式是电台的广播方式。在广播方式中,受信者只能被动地接收信息,而无法将信息反馈给信源,即在单向方式中,信源与受信者不能发生角色互换。

双向方式是能实现信息交互的通信方式,一般的双向方式可能是点对点的,也可能是一点对多点的。典型的电话通信是点对点的,无线局域网中客户端与接入点之间的通信则是一点对多点的。

在点对点之间的通信系统中,信息的传输方式按照消息传送的方向与时间关系,分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种。

所谓单工通信,是指消息只能单方向传输的工作方式,如图 1.2(a)所示。遥测、遥控采用的就是单工通信方式。

所谓半双工通信,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,如图 1.2(b)所示。使用同一载频的无线电对讲机就是按这种通信方式工作的。

所谓全双工通信,是指通信双方可同时收发消息的工作方式,如图 1.2(c)所示。普通电话就是一种最常见的全双工通信。

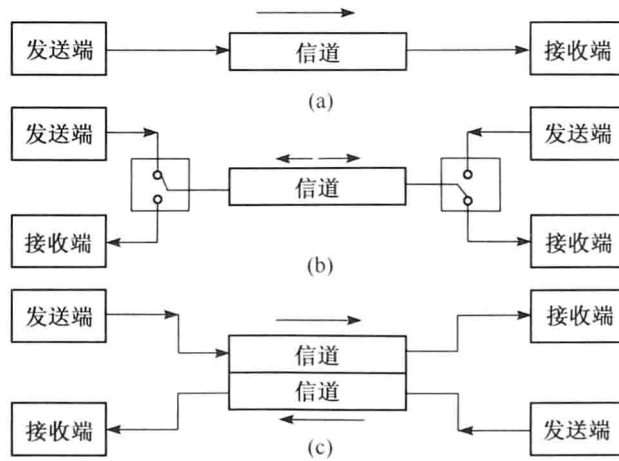


图 1.2 通信方式示意图: (a)单工通信; (b)半双工通信; (c)全双工通信

1.4 信源

信源就是信息的来源,可以是人、机器、自然界的物体等,常见的信源有语音信源、图像信源、文字信源、遥感信源,以及各种计算机数据信源等。信源是产生消息(符号)、消息序列和连续消息的源,并通过消息提供信息。

信息是消息内包含的新的、有意义的且可被理解的东西。信息具有不可压缩性,存在于消息内,是消息的内涵,消息中包含信息的多少决定了消息的有效程度。信息是抽象的,而信源是具体的,消息信号则是通过数学上的随机变量、随机序列和随机过程,将抽象的信息用具体的方式表示出来。信道中传输的是消息信号,消息信号是消息的载体,即消息的具体表现形式,信源与信宿通过消息信号实现信息交流。

一条消息中信息的多少取决于消息的新奇程度,如何定义这种新奇程度,成为学术界争论的焦点。香农提出了基于概率模型的度量方法,即把信息定义为“不确定性多少”,下面将详细说明。

假定单个消息用随机变量 X 及其概率分布 P 来表示,记为 (X, P) ; X 有 n 种可能取值,记为 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, X 取 x_i 的概率为 $P(x_i)$, 则第 i 个可能值 x_i 蕴含的信息量为

$$I(x_i) = \log_a [1/P(x_i)] = -\log_a P(x_i) \quad 1 \leq i \leq n \quad (1.4)$$

由此可知,信息发生的概率 $P(x_i)$ 越小,蕴含的信息量越大,信息量只与消息出现的可能性有关,而与消息的内容及内容的质量无关, $I(x_i)$ 定义为消息 x_i 的自信息量。

自信息量的单位与所用的对数的底 a 有关;取对数的底为 2 时,信息量的单位为比特(bit);如取自然对数 e 计算信息量,信息量的单位是奈特(nat);以 10 为底的信息量的单位为哈特莱(Haitely)。这三个信息量单位之间的换算关系为

$$1 \text{ 奈特} = \ln e \text{ 比特} \approx 1.443 \text{ 比特}$$

$$1 \text{ 哈特莱} = \ln 10 \text{ 比特} \approx 3.322 \text{ 比特}$$

信源包含多个消息,即 X 有 n 种可能取值,当各个消息的出现相互独立时,该信源称为无记忆信源。无记忆信源的平均自信息量是各消息自信息量的概率加权平均值(统计平均值),即平均自信息量 $H(X)$ 定义为

$$H(X) = \sum_x P(x)I(x) = -\sum_x P(x)\log P(x) \quad (1.5)$$

式(1.5)是信息论的一个基本的重要公式, $H(X)$ 表示 X 的各种可能取值所蕴含的信息量的平均值, X 本身具有内在不确定性,该特性与热力学中分子运动不规则性具有相似之处,因此又把平均自信息量 $H(X)$ 称为信源 X 的熵, $H(X)$ 是 $P(x)$ 的函数。

假定数字信源每隔时间 T 产生一个熵为 $H(X)$ 的符号,则该信源的熵率为

$$R = H(X)/T \quad (1.6)$$

从信息的角度来看,熵与熵率是信源的基本指标。

例 1.1 已知二元离散信源只有“0”、“1”两种符号,若“0”出现的概率为 $1/3$, 求出现“1”的信息量。

解: 全概率为 1, 则出现“1”的概率为 $2/3$ 。由式(1.4)可知,出现“1”的信息量为

$$I(1) = -\log_2 2/3 = 0.58 \text{ 比特}$$

如果离散信源是一个由 n 个符号组成的符号集,每个符号的出现次数为 X_i , 消息中包含的总的符号数为 N , 每个符号的出现概率为 $P(x_i)$, 并且有 $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$, 则每个符号所含信息量的统计平均值(平均信息量)为

$$I = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \log P(x_i) \quad (1.7)$$

例 1.2 离散信源由 0、1、2、3 这四个符号组成,出现概率分别为 $3/8$ 、 $1/4$ 、 $1/4$ 、 $1/8$, 每个符号的出现都是独立的。

求消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解: 分析消息:

消息	消息“0”	消息“1”	消息“2”	消息“3”
发生次数	23次	14次	13次	7次
总消息数	57次			

该消息的信息量:

$$I = -\sum_{i=1}^4 X_i \log P(x_i) = 23 \log_2 8/3 + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108 \text{ 比特}$$

每个符号的算术平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号数}} = \frac{108}{57} = 1.89 \text{ 比特/符号}$$

同样, 该消息的信息量也可以用熵的概念来计算, 则有

$$\begin{aligned} H &= -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\ &= 1.906 \text{ 比特/符号} \end{aligned}$$

信息量 $I = 57 \times 1.906 = 108.64$ 比特。

这两种算法的结果有一定误差, 当消息很长时, 用熵的概念来计算比较方便。随着消息序列长度的增加, 两种计算误差也将趋于零。

1.5 通信信道

如图 1.1 所示, 通信信道连接了发送设备和接收设备, 物理信道可以是有线的, 也可以是无线的。

1.5.1 常用通信信道

1. 有线信道

典型的有线信道包括同轴电缆、双绞线、架空明线等; 双绞线和同轴电缆是基本的导向电磁信道, 能提供比较合适的带宽。通常, 连接用户和中心机房的电话线带宽为几百千赫兹(kHz), 同轴电缆的可用带宽可达几兆赫兹(MHz)。

图 1.3 给出了导向电磁信道的频率范围(含光纤和波导)。

同轴电缆和双绞线结构如图 1.4 所示。

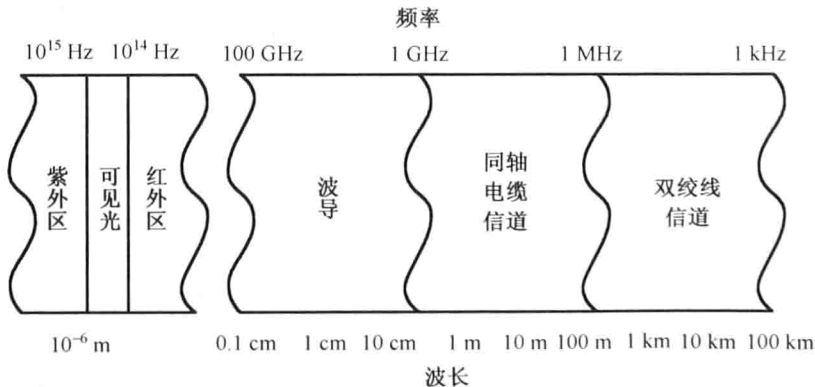


图 1.3 导向电磁信道频率

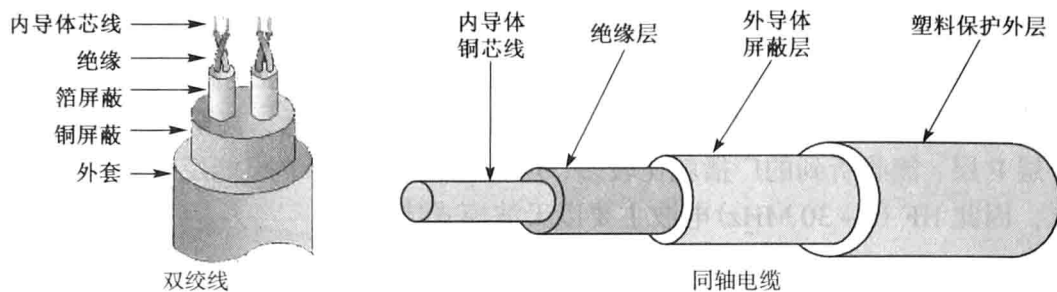


图 1.4 同轴电缆和双绞线

2. 光纤信道

光纤能够提供比同轴电缆大几个数量级的信道带宽，目前已经成为干线通信的主要信道。光纤信道能承载大容量数据业务，具有传输频带宽、通信容量大、损耗低、不受电磁干扰等一系列的优点，是网络时代的重要传输信道。

光纤通常由非常透明的石英玻璃拉成细丝而成，主要由纤芯和包层构成双层通信圆柱体，纤芯用来传导光波。与纤芯相比，包层折射率较低。当光线从高折射率的媒质折向低折射率的媒质时，其折射角将大于入射角，如果入射角足够大，就会出现全反射，即光线碰到包层时就会折回纤芯(如图 1.5(a)所示)。这个过程不断重复，光也就沿着光纤传输下去；图 1.5(b)画出了光波在纤芯中传播的示意图。

由于光纤非常细，直径不到 0.2 mm，因此必须将光纤做成很结实的光缆。一根光缆可以包括数百根光纤，采用加强芯和填充物以提高机械强度，从而满足工程施工的要求。图 1.6 为四芯光缆的剖面示意图。

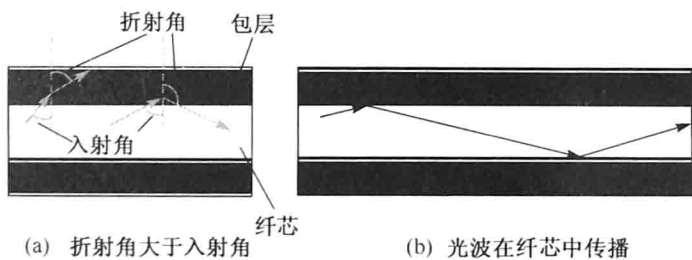


图 1.5 光线到达纤芯和包层界面时的情况

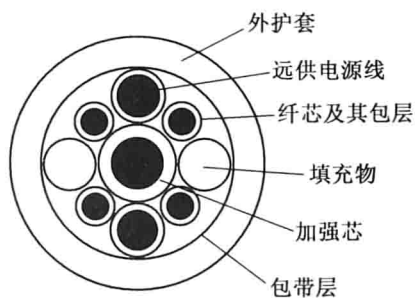


图 1.6 四芯光缆的剖面示意图

3. 无线电磁信道

无线通信系统利用电磁场传播信号，电磁能通过天线耦合到无线媒质。

图 1.7 给出了不同频段的电磁频谱。电磁波在大气中的传播方式包括三种类型，即地波传播、天波传播和视距传播。

地波传播: 甚低频(VLF)和音频段波长超过 10km 的条件下，地球与电离层对电磁波的传播作用如同波导，信号环绕地球传播，主要用于海洋船舶导航。由于频率低，可用带宽小，因此传输的信息速率较低，并且一般为数字传输。这些频段的噪声主要来源于地球雷暴，干扰则大多为同频干扰。地波传播如图 1.8 所示。

天波传播: 如图 1.9 所示，天波传播是利用电离层对信号的反射实现的；天波在地面和电离层之间多次反射，传播距离可达 10 000 km 以上。所谓电离层，是位于地面上空 40 ~ 800 km

处的电离气体层, 含 D、E、F1、F2 子层。电离层在一年四季和昼夜的不同时间表现出的特性都不同, 最基本的规律是昼夜变化。白天(尤其正午时分)D 层浓度高, 能大量吸收 2 MHz 以下的电波, 因此难以收到远地中波电台广播; 夜间 D 层浓度低, 甚至可能消失, 此时电波将直达外层 F 层, 能收听到的广播就比较多, 声音也比较清晰。F 层能反射频率为 30 MHz 以下的电波, 因此 HF (3 ~ 30 MHz) 电波主要以天波模式传播。

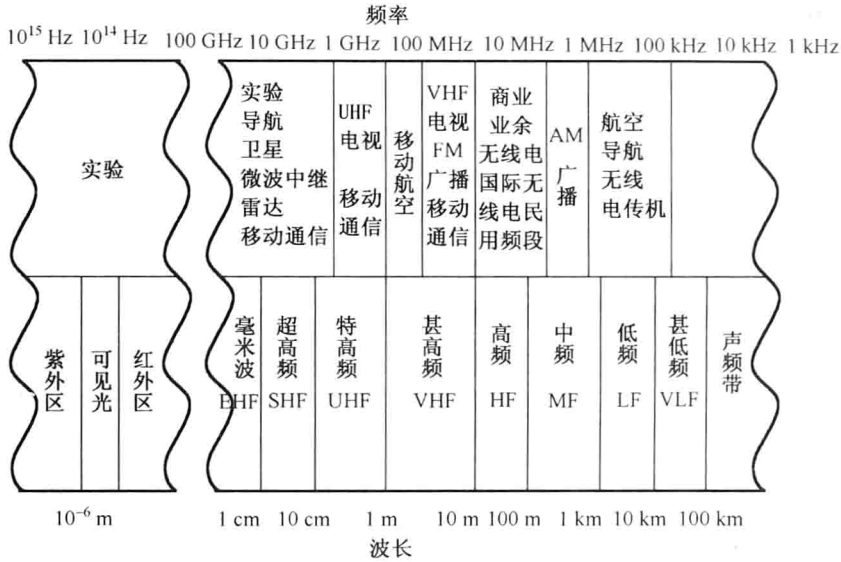


图 1.7 导向电磁信道频率

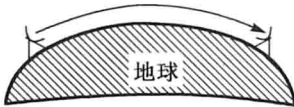


图 1.8 地波传播

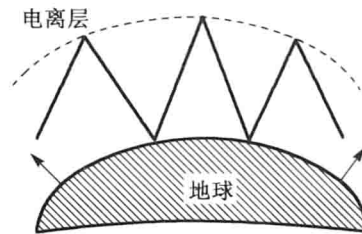


图 1.9 天波传播

由于电离层总处在变化之中, 反射到地面的电波有强有弱, 所以用短波收音时会出现忽大忽小的衰落现象。太阳黑子爆发会引起电离层的骚动, 增加对电波的吸收, 甚至会造成短波通信的暂时中断。

视距传播: 视距传播是指无线电波像光波那样做直线传播的方式, 是甚高频及其以上频率(30 MHz)电波传播的主要方式。这类电波能穿透电离层, 可用于卫星及外太空通信; 地面应用时无法穿透阻挡障碍物, 即收发两端必须可视, 因此称为视距传播。

视距传播的距离有限, 即使在没有阻挡障碍物的平原地区, 地球曲率带来的弯曲也会阻挡信号的传输, 如图 1.10 所示。

在图 1.11 中, h_1 和 h_2 为保证 A、B 两点间视距传播的最小天线高度。令此视距为 d , 则

$$d = d_1 + d_2 = 3.57(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (1.8)$$

式中, h_1 、 h_2 的单位为米(m), d 的单位是千米(km)。这就是视距距离与天线高度的关系式。若 $h_1 = h_2 = h$, 可将式(1.8)写成

$$d = 7.14\sqrt{h} \quad (1.9)$$

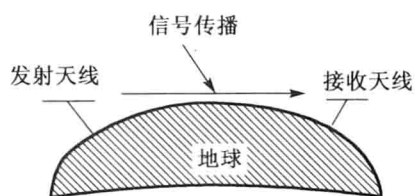


图 1.10 视距传播

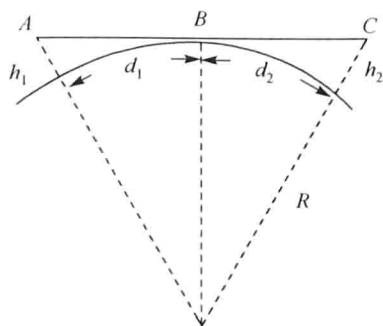


图 1.11 视距传播的理想化几何模型

卫星中继通信: 卫星通信是在地球站之间利用位于 36 000 km 高空的人造地球同步卫星作为中继器的一种微波接力通信。图 1.12 画出了卫星中继信道的概貌，卫星就是在太空的无人值守的微波通信中继站。

卫星通信的主要优、缺点大体上和地面微波通信的差不多。卫星通信的主要特点如下：

(1) 通信距离远，且通信费用与通信距离无关。

同步卫星发射出的电磁波能辐射到地球上的广阔地区，其通信覆盖区的跨度达 18 000 km 以上。只要在地球赤道上空的同步轨道上等距离地放置三颗相隔 120° 的卫星，就能基本上实现全球的通信。

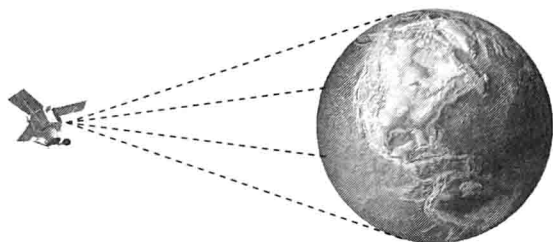


图 1.12 卫星通信

(2) 卫星通信的频带很宽，通信容量很大，信号所受的干扰也小，通信比较稳定。

目前常用的频段为 6/4 GHz，即上行(从地球站发往卫星)频率为 5.925 ~ 6.425 GHz，下行(从卫星发到地球站)频率为 3.7 ~ 4.2 GHz，频段的带宽都是 500 MHz。由于这个频段已经非常拥挤，现在也使用频率更高的 14/12 GHz 的频段。目前，一个典型的卫星通常拥有 12 个转发器，每个转发器的频宽为 36 MHz，可用来传输 50 Mb/s 的数据。

(3) 卫星通信有较大的传播时延。

不管两个地球站的距离是多少，从一个地球站经卫星到另一个地球站的传播时延在 250 ~ 300 ms 之间，一般可取为 270 ms。这一点和其他的通信有较大的差别。例如，对于地面微波接力通信链路，其传播时延约为 $3 \mu\text{s}/\text{km}$ ；而对于同轴电缆链路，一般为 $5 \mu\text{s}/\text{km}$ 。

由于卫星通信的速率高、数据的发送时延小，卫星通信的总时延比使用其他信道时的时延要小。

通信卫星本身和发射卫星的火箭的造价都较高，受电源和元器件寿命的限制，同步卫星的使用寿命一般只有 7 ~ 8 年。同时，卫星地球站的技术较为复杂，价格还比较昂贵，这些都是选择传输媒质时应全面考虑的因素。

4. 存储信道

通信还可以引申到存储的层面，在某种意义上，磁带、光盘、磁盘等数据存储媒质也可以看成是一种通信信道。将数据写入存储媒质的过程即等效于发射机将信号传输到信道的过程，将数据从存储媒质读出的过程即等效于接收机从信道接收信号的过程。

推而广之,可将存储-读取过程视为一个完整的通信过程,并把存储-读取系统视为一个通信系统。

1.5.2 通信信道的基本模型

所有类型的信道都具有一个共性,即信号在通过信道时总会或多或少地遭受不良影响,这些不良影响的来源各不相同。首先,信道输出的信号中总是混有加性噪声;其次,可能叠加各种干扰;再者,也可能由于信道特性不理想而造成信号畸变。

加性噪声存在于各种信道中,通信信道最简单的数学模型是加性噪声信道模型。所谓加性噪声,是指以相加的形式混入信号的噪声,假设信号 $s(t)$ 被信道中的加性噪声随机过程 $n(t)$ 恶化,则经过信道后的信号为

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (1.10)$$

如果引入信道衰减,则式(1.10)可改写为

$$r(t) = \alpha s(t) + n(t) \quad (1.11)$$

其中, α 为衰减因子。

1.6 模拟通信与数字通信

1.6.1 模拟通信与数字通信的概念

电通信中所传递的消息有各种不同的形式,例如符号、文字、语言、音乐、数据、图片、动画等。我们可以把各种类型的消息归结成两大类:一类称为离散消息,另一类称为连续消息。所谓“离散”或“连续”是针对消息的状态而言的。

离散消息指消息的状态是离散可数的,比如符号、数据等;连续消息则指消息的状态是连续的,例如强弱连续变化的语音、亮度连续变化的图像等,连续消息又称为模拟消息。

消息的传递是借助于电信号来实现的,消息和信号有着一一对应的关系。通常消息是寄托在电信号的某一参量上,如果电信号的参量携带着离散消息,则该参量必将是离散取值的。这样的信号就称为离散信号。

简单信源输出两种可能的信号:一种信号是模拟信号,另一种信号是数字信号。

时间和状态都是离散的信号称为数字信号,例如电报、数字、数据、遥控指令等,它们不是时间的连续函数,而且其取值也仅为有限可数的离散值,故为数字信号。

如果电信号的参量携带着连续消息,则该参量必为连续取值。随时间变化而连续取值的信号称为连续信号或模拟信号。例如,普通电话机输出的信号就是模拟信号。模拟信号的频率一般都比较低,模拟语音信号的频率范围为 300 ~ 3400 Hz。

通常,根据系统中传递的信号不同,可以将通信系统分为两类,传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统,传输数字信号的通信系统称为数字通信系统。

目前,无论是模拟通信,还是数字通信,都是已经获得广泛应用的通信方式。尽管从通信的发展进程来看,低级的电报通信(可视为数字通信的一种方式)出现得最早,但在一个很长的时期中,它却比模拟通信的发展要缓慢得多。

20 世纪中叶以后,数字通信日益兴旺,尤其是微电子技术的飞跃发展、大规模集成电路的出现,使数字通信技术得到了飞速发展。与模拟通信相比,数字通信更能适应人类对通信的更高要求,其主要优势包括以下几点。