



新一代信息通信规划教材

通信原理基本教程

TONGXIN YUANLI JIBEN JIAOCHENG

王秉钧 王少勇 王彦杰 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

内 容 简 介

本书系统扼要地讲述现代通信系统的基本原理、基本性能、基本分析方法和应用。对于近年来出现的新技术、新发展也给予了充分的重视。全书共分9章,包括绪论、模拟调制系统、模拟信号的编码传输、数字信号的基带传输、数字信号的载波传输、随机信号与噪声分析、通信系统的抗噪声性能、多路复用和多址技术、信道编码等。为了便于学习,各章均有小结和习题,并附有习题答案。

本书可用作高等学校工科电子信息类相关专业本科生教材,也可供专科生选作教材,并可供科技工作者、工程技术人员参考或用作培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理基本教程/王秉钧等编著. —北京:北京邮电大学出版社,2005

ISBN 7-5635-1053-2

I. 通... II. 王... III. 通信理论—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 120048 号

出 版 者:北京邮电大学出版社(北京市海淀区西土城路 10 号) 邮编:100876

发行部电话:(010)62282185 62283578(传真)

电子信箱:publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京通州皇家印刷厂

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:19.25

字 数:479 千字

印 数:1—3 000 册

版 次:2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1053-2/TN·371

定价:28.00 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·

前 言

当前,通信技术的发展日新月异,门类众多,要对通信系统进行深入研究,首先需要掌握最基本的通信理论,理解通信系统的基本原理,弄清其内在的机理。“通信原理”是通信与信息类专业的一门重要的专业基础课。该课程的基本任务是讲述通信系统的基本原理、基本性能和基本分析方法。其中心内容是讲解各种调制方式和编码方式的基本原理、基本性能以及如何可靠而有效地实现信息传输,以便为研究设计新的通信系统,掌握通信系统的发展方向 and 具体技术奠定基础。该课程既要为后续专业课提供必要的基础知识和理论依据,又要为提高学生的专业素质和将来继续学习、更新知识打好基础。

近些年来,现代通信技术有了许多新的重大发展,尤其在移动通信和接入网等领域出现了很多新的调制、编码和信息传输方式,例如,网格编码调制(TCM)、正交频分复用调制(OFDM)、无载波幅相调制(CAP)、多址技术、扩频调制技术和 Turbo 码等。本书在取材上充分注意了这些新发展,充实了新内容。

“通信原理”这门课普遍存在着理论性强、信息量大、内容抽象、教材越来越厚,不能适应当前高校课程门类增多、课时压缩的教学特点等问题。因此,如何突出重点,既通俗易懂又兼顾理论的系统性和完整性是编写本教材时认真考虑的问题。所以本教材在内容选取上力求基本理论、基本概念、基本方法和技术应用相结合,简化了部分繁琐的理论推导,突出了对知识的理解和应用。结合本课程的基本任务,信道、同步、最佳接收等内容不单独列章,而是将其基本内容分散在有关章节介绍,以便精简教材内容。在内容编排上进行优化组合,目的是体现教学的科学性、适应性、可接受性和循序渐进性,以先易后难、先简后繁的次序安排各章的先后顺序。

本教材参考学时数为 60 学时,为了适应不同专业、不同层次、不同教学要求和在职读者的需要,各章保持相对独立性,每章讨论一个课题,例如,将原理和性能分析分别列章,这样可以根据不同学校课程设置的具体情况和教学要求的侧重点不同进行取舍,选学其中部分章节,同样也能构成一门完整的课程,也适合在职人员作为参考书选读所需内容。

由于作者水平所限,书中难免存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

作者

2006 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论

1.1 通信与通信系统	1
1.1.1 通信的基本含义	1
1.1.2 通信系统模型	1
1.1.3 通信系统的分类	3
1.2 信息及其度量	6
1.3 信道	7
1.3.1 信道的分类	7
1.3.2 有线信道和无线信道	7
1.3.3 信道模型	10
1.3.4 恒参信道和变参信道特征	12
1.4 信道容量	17
1.5 通信系统的主要性能指标	20
1.5.1 通信系统的有效性	21
1.5.2 通信系统的可靠性	22
1.6 小结	23
1.7 习题	23

第 2 章 模拟调制系统

2.1 调制的作用与分类	25
2.1.1 调制在通信系统中的作用	25
2.1.2 调制的分类	26
2.2 调幅	27
2.2.1 调幅的波形及频谱	27
2.2.2 调幅波(AM)的产生	29
2.2.3 调幅波(AM)的功率分布和效率	30
2.3 抑制载波双边带调幅(DSB)	31
2.3.1 DSB 的波形及其频谱	31
2.3.2 DSB 调幅波的产生	32
2.4 单边带调幅(SSB)	32
2.4.1 滤波法产生单边带信号	33
2.4.2 相移法产生单边带信号	34
2.5 残留边带调幅(VSB)	35
2.6 调幅信号的相干解调	37
2.6.1 调幅和双边带信号的解调	37
2.6.2 单边带和残留边带信号的解调	38

2.7 调幅信号的非相干解调	39
2.7.1 调幅(AM)信号的包络检波	39
2.7.2 具有大载波单边带和残留边带信号 的非相干解调	40
2.7.3 载波插入法解调抑制载波信号	40
2.8 载波同步	41
2.8.1 直接提取法	41
2.8.2 插入导频法	41
2.8.3 非线性变换——滤波法	42
2.8.4 同相正交环法(科斯塔斯环)	43
2.9 角度调制	44
2.9.1 角度调制的一般概念	44
2.9.2 频率调制(FM)	47
2.9.3 宽带调频波的产生	52
2.9.4 调频信号的解调	54
2.10 小结	57
2.11 习题	58
2.12 附录	60

第 3 章 模拟信号的编码传输

3.1 抽样定理	63
3.1.1 低通信号的抽样定理	63
3.1.2 带通信号的抽样	66
3.1.3 模拟脉冲调制	67
3.2 脉冲编码调制(PCM)	68
3.2.1 脉码调制的基本原理	68
3.2.2 量化	70
3.2.3 压缩与扩张	72
3.2.4 编码	77
3.2.5 逐次比较型编译码原理	78
3.3 增量调制(ΔM 或DM)	81
3.3.1 预测编码的概念	81
3.3.2 增量调制	82
3.3.3 ΔM 与PCM系统的比较	85
3.4 差分脉码调制(DPCM)	86
3.5 自适应差分脉码调制(ADPCM)	87

3.6 小结	89	5.5.1 交错正交相移键控(OQPSK)	145
3.7 习题	89	5.5.2 $\pi/4$ 差分正交相移键控 ($\pi/4$ DQPSK)	146
第4章 数字信号的基带传输		5.5.3 最小频移键控(MSK)	148
4.1 数字基带信号的常用码型	92	5.5.4 高斯最小频移键控(GMSK)	150
4.2 数字基带信号的功率谱分析	98	5.6 正交频分复用(OFDM)	151
4.3 无码间串扰的基带传输特性	101	5.7 扩频调制	154
4.4 部分响应系统	106	5.7.1 直接序列扩频(DS)	154
4.4.1 部分响应波形	106	5.7.2 跳频(FH)	156
4.4.2 差错传播	107	5.8 小结	157
4.4.3 部分相应基带传输系统的 相关编码和预编码	108	5.9 习题	158
4.5 眼图	110	5.10 附录	159
4.6 均衡	111	第6章 随机信号与噪声分析	
4.6.1 时域均衡原理	111	6.1 概率与随机变量	161
4.6.2 时域均衡器的实现	112	6.1.1 概率	161
4.7 位同步	114	6.1.2 随机变量	162
4.7.1 插入导频法	114	6.1.3 通信系统中常见的概率分布	163
4.7.2 自同步法	115	6.2 随机过程	165
4.8 小结	116	6.2.1 随机过程的概念	165
4.9 习题	117	6.2.2 随机过程的分布函数 和概率密度	165
第5章 数字信号的载波传输		6.2.3 平稳随机过程	166
5.1 二进制数字振幅键控(2ASK)	121	6.2.4 随机过程的数字特征	166
5.1.1 2ASK 信号的产生	121	6.2.5 平稳随机过程的 遍历性(ergodicity)	168
5.1.2 2ASK 信号的频谱特性	122	6.2.6 平稳随机过程的功率谱密度 和自相关函数	169
5.1.3 2ASK 信号的解调	123	6.3 通信系统中的噪声	171
5.2 二进制频移键控(2FSK)	124	6.3.1 噪声及其分类	171
5.2.1 2FSK 信号的产生	124	6.3.2 白噪声	172
5.2.2 2FSK 信号的频谱特性	125	6.4 窄带噪声	173
5.2.3 2FSK 信号的解调	126	6.5 正弦波加窄带高斯噪声	174
5.3 二进制相移键控	128	6.6 噪声通过乘法器的响应	177
5.3.1 二进制相移键控 (2PSK 或 BPSK)	128	6.7 小结	178
5.3.2 二进制差分相移键控(2DPSK)	129	6.8 习题	178
5.3.3 2PSK 及 2DPSK 信号的 频谱特性	131	6.9 附录	180
5.4 多进制数字调制系统	132	第7章 通信系统的抗噪声性能	
5.4.1 MASK 系统	132	7.1 调幅系统的抗噪声性能	183
5.4.2 MFSK 系统	134	7.1.1 相干解调的抗噪声性能	183
5.4.3 MPSK/MDPSK 系统	136	7.1.2 AM 系统包络检波的抗噪声 性能	186
5.4.4 MQAM 系统	141	7.2 调频系统的抗噪声性能	189
5.4.5 CAP 调制系统	142		
5.5 恒包络调制系统	144		

7.2.1 宽带调频系统的抗噪声性能	189	8.5 卫星通信中的多址技术	240
7.2.2 调频(FM)的门限效应	193	8.5.1 频分多址(FDMA)方式	241
7.2.3 环路解调器	194	8.5.2 时分多址(TDMA)方式	242
7.2.4 调频中的预加重和去加重	195	8.5.3 码分多址(CDMA)方式	243
7.3 二进制 PCM 系统的抗噪声性能	197	8.5.4 ALOHA 方式	244
7.4 无码间串扰基带传输系统的抗噪声性能	198	8.6 蜂窝移动通信中的多址技术	246
7.5 二进制数字调制系统的抗噪声性能 ..	201	8.7 光纤接入网中的多址技术和双向传输技术	247
7.5.1 二进制振幅键控(2ASK)系统	201	8.8 局域网中的多址技术	251
7.5.2 二进制频移键控(2FSK)系统	203	8.8.1 载波侦听多路访问(CSMA)方法	251
7.5.3 二进制相移键控(2PSK)和差分相移键控(2DPSK)	205	8.8.2 带冲突检测的载波侦听多路访问(CSMA/CD)方法	251
7.5.4 二进制频带传输系统的简单比较	206	8.8.3 令牌环(Token Ring)介质访问方式	252
7.6 多进制数字调制系统的抗噪声性能 ..	208	8.9 小结	253
7.7 数字信号的最佳接收	209	8.10 习题	253
7.7.1 最佳接收的一般概念和最佳接收准则	209	第 9 章 信道编码	
7.7.2 匹配滤波器与相关器	211	9.1 差错控制的基本概念	255
7.8 二进制最佳接收的误码性能	215	9.1.1 差错控制方式	255
7.8.1 二进制最佳接收的误码性能分析	215	9.1.2 差错控制编码的分类	256
7.8.2 二进制确知信号最佳接收的误码性能	217	9.1.3 码长、码重、码距、码率和编码增益	257
7.9 最佳基带传输系统	220	9.1.4 检/纠错能力与最小码距的关系	258
7.10 小结	221	9.2 常用检错码	258
7.11 习题	223	9.3 线性分组码	259
7.12 附录	225	9.3.1 基本概念	259
第 8 章 多路复用和多址技术		9.3.2 监督矩阵 H	261
8.1 多路复用和多址技术的基本概念	227	9.3.3 生成矩阵 G	262
8.2 频分多路复用	228	9.3.4 伴随式	262
8.2.1 频分多路复用系统基本原理	228	9.3.5 汉明码	264
8.2.2 光纤通信系统中的波分复用	230	9.4 循环码	265
8.3 时分复用	231	9.4.1 生成多项式	265
8.3.1 时分复用基本原理	231	9.4.2 生成矩阵	267
8.3.2 准同步数字系列(PDH)	233	9.4.3 监督多项式与监督矩阵	268
8.3.3 PCM 基群帧结构	234	9.4.4 伴随式的计算	268
8.3.4 帧同步	235	9.4.5 系统循环码的编译码方法	268
8.3.5 同步数字系列(SDH)	236	9.4.6 截短循环码	271
8.3.6 异步转移模式(ATM)的概念	239	9.4.7 CRC 码	273
8.4 码分复用和空分复用	239	9.4.8 BCH 码	273
		9.4.9 RS 码	275
		9.5 卷积码	275

9.5.1 卷积码的编码	276	9.7 Turbo 码	282
9.5.2 卷积码的表示方法	277	9.8 网格编码调制(TCM)	284
9.5.3 卷积码的译码	279	9.9 小结	287
9.6 交织码与级联码	279	9.10 习题	288
9.6.1 交织码	279	部分习题参考答案	291
9.6.2 级联码	282	参考文献	299

本章讨论与通信有关的基本概念、术语和基础知识,为全书提供共同的基础。

1.1 通信与通信系统

1.1.1 通信的基本含义

人类在生活、生产和社会活动中总是伴随着消息(或信息)的传递,这种传递消息(或信息)的过程叫做通信(Communication)。在远古时代,人类就用金鼓、旌旗、烽火台、驿站等进行简单的消息(或信息)传递,这是远古时代的通信。

在人类开始认识和使用电能的同时,便开始利用电信号进行消息的传递。1837年,莫尔斯发明电报机,并设计了莫尔斯电码;1876年,贝尔发明电话机。这样,利用电磁波不仅可以传输文字,还可以传输语音,由此大大加快了通信的发展进程。1895年,马可尼发明无线电设备,从而开创了无线电通信发展的道路。如今,电信已经把人类带入了信息化时代。

电信就是借助“电”来传递消息的通信方式。这种通信方式具有迅速、准确、可靠的特点,几乎不受时间、地点、距离的限制。因此,在自然科学中涉及“通信”这一术语时,通常就是指电信而言。当然,因为光也是一种电磁波,因此光通信也属于电信一类。

1973年,有关国际电信公约及规定将“电信”这一基本术语定义为:利用有线电、无线电、光学或其他电磁系统对符号、信号、文字、影像、声音或任何信息的传输、发射或接收。《中华人民共和国电信管理条例》对“电信”也作出了类似的定义:所谓电信是指利用有线、无线的电磁系统或光学系统,传递、发射或接收语音、文字、数据、图像以及其他任何形式的信息的活动。

上面所谈的电信,就是本书所讲的“通信”。简言之,通信就是互通信息,就是信息的传输和交换。需要指出的是,通信是不但包括了空间,而且还包括了时间在内的信息转移。在采用诸如磁带、磁盘、光盘等存储设备的系统中,有可能存储很长的时间,因此,在某种意义上可以将存储系统看成是从现在向将来传递消息的通信系统。

总之,现代通信技术是研究传递各种消息(或信息)的学科。根据传递消息的不同,目前通信在业务上可分为电报、电话、传真、数据传输、计算机通信和可视电话等。从广义来说,广播、电视、雷达、导航、遥测、遥控等均可列入通信这个范畴。

1.1.2 通信系统模型

通信系统(Communication System)是指完成通信这一过程的全部设备和传输媒介

(Transmission medium),一般可概括为如图 1.1.1 所示的模型。

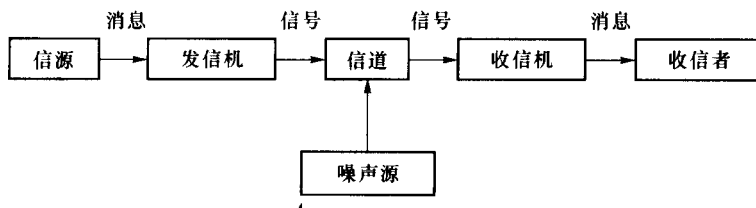


图 1.1.1 通信系统模型

其中,信源(Information Source)的作用是产生(形成)消息(Message)。

消息有许多种形式,如符号、文字、语言、音乐、数据、图片、活动图像等。消息带有需要送给收信者的信息。因此,消息是用以载荷信息的有次序的符号序列(包括状态、字母、数字等)或连续的时间函数。前者称为离散消息,如书信、电报、数据等;后者称为连续消息,如语言、静止图片、活动图像等。这里“离散”或“连续”是指时间上的离散或连续。

发信机(Transmitter)的作用是将消息转换为适于在信道中传输的信号(Signal)。信号是消息的直接反映,是与消息一一对应的。因此,信号是消息的载荷者。在电信系统里,它可以由电压、电流或电波等物理量来体现。在通信系统内传输的信号,当它为时间的连续函数时,称为“连续信号”,亦称为“模拟信号”。而当载荷信息的物理量(如电信号的幅度、频率、相位等)的改变在时间上是离散的,则称为离散信号。如果不仅在时间上离散,而且取值也离散,则称之为数字信号。

消息转换为信号,一般要经过三个步骤:变换、编码、调制。它们可以分别进行,也可以混合在一起进行。

所谓变换,简单地说就是将表达消息的非电量的变化变换为电量的变化。例如电话就是利用送话器把说话时声音压力的变化变换为相应的电流变化。对于这类变换设备的一般特性,通常只要求它们是线性的,即作用与响应成正比。

所谓编码(Coding),是指在数字通信系统里,为了某种目的而对数字信号进行的某种变换。例如用来提高传输有效性的信源编码(Source Encoding),用来提高传输抗干扰性的信道编码(Channel Encoding)以及用来保密的保密编码(Encryption)等。进行编码的设备称为编码器(Encoder)。

调制(Modulation)在通信系统中主要用来变换信号。从消息变换过来的原始信号通常称为基带信号(Baseband Signal)(或低通信号(Low-pass Signal)),它的特点是其频谱由零频附近开始延伸到某个通常小于几兆赫的有限值。在某些系统中,如直流电报、实线电话和有线广播等,基带信号可以直接在信道内传输,并称之为基带传输系统。但大量的通信系统需要通过调制将基带信号变换为更适合于在信道中传输的形式。例如无线系统中,基带信号必须变换到射频波段才能进行有效的传输。即使在有线信道,有时也需经过调制使信号频率和信道有效传输频带相适应。因此,调制的主要作用是进行频率搬移,即将基带信号的频率范围搬移到足够高的频段,使之能在信道中传输。经过载波调制后的信号称为已调信号(Modulated Signal),已调信号为带通信号(Band Pass Signal)。还有一种情况,即使基带信号有时也需要对其波形进行适当改变,使之与信道特性相适应。对基带信号的这种处理,也称为调制。所以广义的调制可分为带通调制(载波调制)和基带调制。与此对应,信道也可分为带通信道和基带信道。但是,多数情况下,人们所说的调制往往是指带通调制。

信道(Channel)在此是指将信号由发信机传输到收信机的媒介或途径(通道)。信道的种类很多,概括起来有两种,即有线信道与无线信道。信道的传输性能直接影响到通信的质量。

在通信系统中,噪声(Noise)来源很多,它散布在系统各点,为了分析方便,在图 1.1.1 中将噪声源集中表示在一个方框里。

收信机(Receiver)的作用与发信机相反,它完成解调(Demodulation)、解码(Decoding)等任务,将信号转换为消息。

收信者也称信宿(Destination),是消息传输的对象,它的作用与信源相反。信源和收信者可以是人或设备。因此,有时也叫做发终端和收终端。

图 1.1.1 所示的通信系统模型是对各种通信系统的简化概括,它可反映通信系统的共性。根据所研究的对象或关心的问题不同,还会出现一些不同形式的具体的通信系统模型。例如,结合模拟通信系统的要求,可将图 1.1.1 具体化为图 1.1.2。

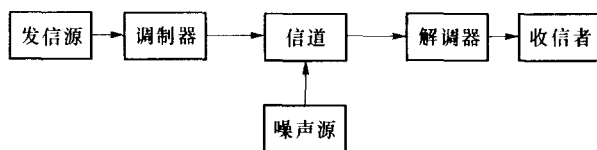


图 1.1.2 模拟通信系统模型

可见,在模拟通信系统中,发信机简化为调制器,收信机简化为解调器,主要是强调在模拟通信系统中调制的重要作用。从原则上讲,调制和解调对信号的变换起着决定性的作用,它们是保证通信质量的关键。至于放大、滤波、变频等过程都可以看作是理想线性的,并将它们合并到信道中去。

对于数字通信系统,图 1.1.1 可以具体化为图 1.1.3。其中信源编码包括用来提高传输有效性而采取的信号处理功能。前面提到的数字加密在此也归并到信源编码器内。信道编码是实现自动检错和纠错目的的纠错编码。

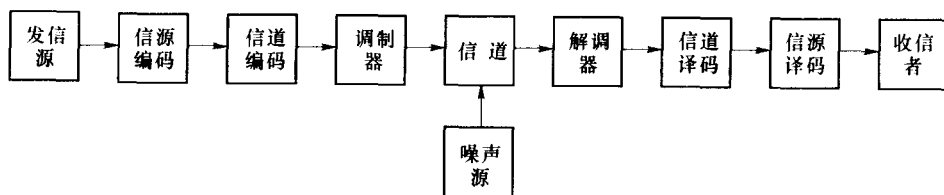


图 1.1.3 数字通信系统模型

应当指出,实际数字通信系统并非必须包括图 1.1.3 中的所有环节,如基带传输系统就不包括调制与解调环节。至于采用哪些环节,取决于具体的设计条件和要求。此外,在数字通信系统中同步系统是不可缺少的。但因它的位置往往不是固定的,因此图中没有画出。

最后应该指出,虽然本节提供的都是通信系统最简化的模型,但是它们往往决定着通信系统的质量。本课程主要是讨论通信系统的基本原理、技术和性能,解决通信系统中的一些共性问题。因此,本课程的讨论可以说是围绕通信系统模型进行的。

1.1.3 通信系统的分类

通信系统可以从不同角度来分类。

1. 根据通信业务分类

根据不同的通信业务,通信系统可以分为多种类型:

- 单媒体通信系统,如电话、传真等;
- 多媒体通信系统,如电视、可视电话、会议电话、远程教育等;
- 实时通信系统,如电话、电视等;
- 非实时通信系统,如电报、传真、数据通信等;
- 单向传输通信系统,如广播、电视等;
- 交互传输通信系统,如电话、交互电视(VOD)等;
- 窄带通信系统,如电话、电报、低速数据等;
- 宽带通信系统,如点播电视、会议电视、远程教育、远程医疗、高速数据等。

2. 根据传输信号的性质分类

根据传输信号的性质,通信系统可分为:

- 模拟通信系统;
- 数字通信系统。

3. 根据信道的不同进行分类

通信系统按信道分类如表 1.1.1 所示。

4. 根据调制方式分类

表 1.1.2 列出了一些常见的调制方式及其用途。

表 1.1.1 按信道分类的通信系统

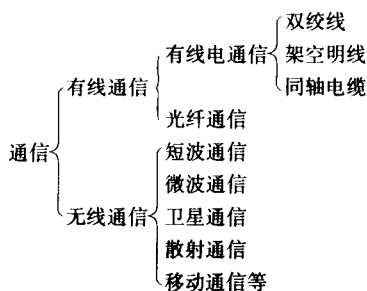


表 1.1.2 常见的调制方式

调制方式			用途
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅(AM)	广播
		抑制载波双边带调幅(DSB)	立体声广播
		单边带调幅(SSB)	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅(VSB)	电视广播、数传、传真
	非线性调制	频率调制(FM)	微波中继、卫星通信、广播、数传
		相位调制(PM)	中间调制方式
	数字调制	幅度键控(ASK)	数据传输
		频率键控(FSK)	数据传输
		相位键控(PSK、DPSK、QPSK 等)	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制(QAM、MSK 等)	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制(PAM)	中间调制方式、遥测
		脉宽调制(PDM)(PWM)	中间调制方式
		脉位调制(PPM)	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制(PCM)	市话、卫星、空间通信
		增量调制(DM)(ΔM)	军用、民用电话
		差分脉码调制(DPCM)	电视电话、图像编码
		其他语言编码方式(ADPCM、APC、LPC)	中低速数字电话

5. 根据工作方式分类

根据不同的工作方式,通信系统可分为

- 单工通信(Simplex),如广播、寻呼、遥测、遥控等;
- 半双工通信(Half-duplex),如无线对讲机以及询问、检索、科学计算等数据通信;
- 全双工通信(Full-duplex),如电话;
- 并行传输(Parallel Transmission),如近距离数字通信、设备机内的码元传输;
- 单行传输(Serial Transmission),如远距离传输。

6. 根据工作波段分类

按通信设备的工作频率不同可分为长波通信、中波通信、短波通信、远红外线通信等。

表 1.1.3 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1.1.3 通信波段与常用传输媒质

频率范围	波长	符号	传输媒质	用途
3 Hz~30 kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	甚低频 VLF	有线线对、长波无线电	音频、电话、数据终端长距离导航、时标、水下通信、声呐
30~300 kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 LF	有线线对、长波无线电	导航、信标、电力线通信、越洋通信、水下通信、地下岩层通信
300 kHz~3 MHz	$10^2 \sim 10^3$ m	中频 MF	同轴电缆、短波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电、海事通信、测向、遇险求救、海岸警卫
3~30 MHz	$10 \sim 10^2$ m	高频 HF	同轴电缆、短波无线电	移动无线电话、短波广播、军用通信、业余无线电、气象、石油、地质、航海、救灾、移动通信
30~300 MHz	1~10 m	甚高频 VHF	同轴电缆、米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航、雷达、警察、飞机通信
300 MHz~3 GHz	10~100 cm	特高频 UHF	波导、分米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达、电视、无线探空仪、导航、GPS、无线电高度计
3~30 GHz	1~10 cm	超高频 SHF	波导、厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达、公用陆地移动通信、无线电测高计
30~300 GHz	1~10 mm	极高频 EHF	波导、毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学、卫星通信、移动通信、铁路业务
$10^7 \sim 10^8$ GHz	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$ cm	紫外可见光 红外	光纤、激光空间传播	光通信

7. 根据传输媒质分类

根据不同的传输媒质,通信系统可分为:

- 有线通信系统;
- 无线通信系统。

8. 按受信者是否在运动中完成通信分类

根据接收信者是否在运动中完成通信,通信系统可分为:

- 移动通信系统;
- 固定通信系统。

9. 根据信号复用方式分类

根据信号复用方式不同,通信系统可分为:

- 频分复用;
- 时分复用;
- 码分复用;
- 空分复用等。

1.2 信息及其度量

综上所述,通信系统中传输的具体对象是消息,但是通信的最终目的在于传递信息(Information)。因此,在研究具体通信系统之前需要明确信息的含义。

在日常生活中,往往把“信息”的概念和“数据”、“情报”、“资料”、“情况”、“知识”等概念混为一谈,当然也就谈不上定量的测度了。

长期以来,信息的概念有许多种说法。据不完全统计,古今中外,关于信息的成文定义就不下百余种,而且这些定义之间存在许多矛盾。

科学技术上“信息”的概念,就是要把实际生活中原始的、含糊不清的概念加以提炼、概括、抽象和深化。如前所述,通常把文字、语言、数据、图像等等都看成是“消息”的“集合”。这些消息的集合具有一定的统计特性或概率特性。因而将“信息”定义为对消息的统计特性的一种定量描述。更具体地说,当人们得到消息之前,对它的内容有一种“不确定性”,信息就是对这种不确定性的定量描述。

当人们得到消息后,若事前认为消息中所描述事件发生的可能性越小,就认为这个消息带给他的信息量越大。可见,信息的量值必然与消息所代表事件的随机性,或事件发生的概率有关。从这点出发,信息论利用统计学概念对信息提出了一个度量方法,把度量信息量的物理量称为信息量,也称信息。

设消息所代表的事件出现的概率为 $P(x)$,则该消息所含有的信息量

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.2.1)$$

式中,若对数底 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit);若 $a=e$,则单位为奈特(nit),1 奈特 = $\log_2 e \approx 1.443$ 比特;若 $a=10$,则单位为哈特莱。

上述三种度量单位中应用最广泛的单位是比特。它代表出现概率为 $1/2$ 的消息所含有的信息量。在通信系统中,当所传送的消息是两个等概的消息之一时,任一消息所含有的信息量为 1 bit。二进制数字通信系统中,经常遇到的就是这种情况。在实际场合,常把一位二进制数字称为 1 bit,而不管这两个符号的出现概率是否相等。

除了上述单个消息所含有的信息量外,实际上信源(或消息源)总是由若干个可能发生的消息所组成。设有 n 个消息,其概率分别为 $P_1(x), P_2(x), \dots, P_r(x)$,那么可以证明每一消息的平均信息量

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(x) \log_2 P_i(x) \quad (1.2.2)$$

式(1.2.2)与统计热力学中熵的定义式相类似,故在信息论中,通常称为信源的熵(Entropy),其单位为 bit/符号。

1.3 信道

1.3.1 信道的分类

信道可以分为狭义信道和广义信道。狭义信道是某些物理通信信道,如有线信道和无线信道;也可以是物理存储介质,如光盘、磁盘等。

广义信道是一种逻辑信道,它与传输介质无关。

广义信道可分为调制信道和编码信道。调制信道又可分为恒参信道和变参信道;而编码信道又可分为无记忆编码信道和有记忆编码信道。因此,可对信道进行简单归纳,如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 信道的分类

信道	狭义信道	有线信道(如明线、电缆、光纤等)
		无线信道(如短波、微波等)
	广义信道	调制信道
		编码信道

恒参信道
变参(随参)信道
无记忆信道
有记忆信道

1.3.2 有线信道和无线信道

狭义信道定义为发信机和收信机之间用以传输信号的物理通道或媒介,如明线、电缆、光纤、无线电波等。具有通信信道特性的某些其他媒介还包括数据存储介质,如磁带、磁盘、光盘等。下面介绍有线信道和无线信道。

1. 有线信道

一般的有线信道均可看作是恒参信道。常见的有线信道有明线、双绞线、同轴电缆和光纤等。

(1) 明线

明线是平行而相互绝缘的架空线路,其传输损耗较小,通频带在 0.3 kHz~27 kHz 之间;如图 1.3.1 所示。由明线构成的线路中,串扰现象非常严重。

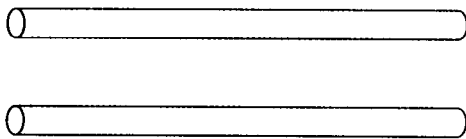


图 1.3.1 明线

(2) 双绞线

双绞线(Twisted-pair)是由两根各自封装在彩色塑料皮内的铜线互相扭绞而成的,扭绞的目的是使它们之间的干扰最小。多对双绞线外套一保护套构成双绞线电缆,通过相邻线对间变换的扭距,可使同一电缆内各线对间干扰最小。双绞线分为屏蔽型(STP)和非屏蔽型(UTP)。其结构如图 1.3.2 所示。STP 是在 UTP 外面再加上一个由金属丝编织而成的屏蔽层,以提高其抗电磁干扰能力。因此,STP 抗外界干扰性能优于 UTP。但 UTP 要比 STP 价格便宜。相互扭绞的一对双绞线可作为一条通路,其输入阻抗有 100 Ω 和 150 Ω 两种。

双绞线既可用于传输模拟信号,也可用于传输数字信号。双绞线常用于声音的模拟传输。其频谱在 20 Hz~20 000 Hz 之间,在一根双绞线上,可使用频分多路复用实现多个音频通道,每个通道的带宽为 4 kHz。双绞线的最高带宽可达 268 kHz,具有 24 条音频通道的容量。

在双绞线上传输数字信号,数据传输率可达 1.5 Mbit/s,最高上限为 10 Mbit/s,采用特殊技术可达 100 Mbit/s。

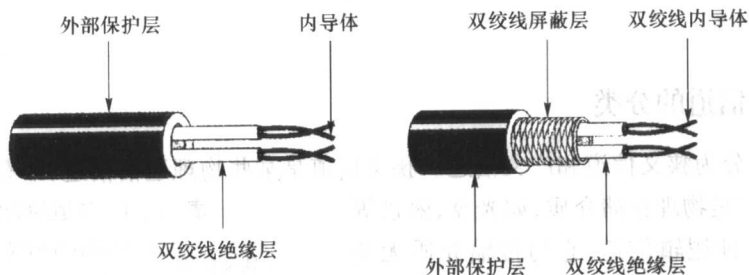


图 1.3.2 双绞线结构

双绞线一般用于点到点的连线,在低频传输时,抗干扰性能相当于或高于同轴电缆。但频率超过 10 kHz~100 kHz 时,同轴电缆性能明显优越。

双绞线的带宽取决于铜线的粗细和传输距离。用于传输模拟信号,每隔 5 km~6 km 需要一级放大;用于传输数字信号每隔 2 km~3 km 就要用转发器转发一次。双绞线用于远程中继线时,最大传输距离为 15 km,用于局域网时,与集线器间的最大距离为 100 m。双绞线的抗干扰性能取决于双绞线电缆中相邻线对的扭曲长度及适当的屏蔽。

(3) 同轴电缆

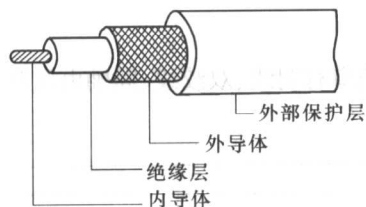


图 1.3.3 同轴电缆结构图

同轴电缆(Coaxial Cable)由单股实心或多股绞合的铜质芯线(内导体)、绝缘层、网状编织的屏蔽层(外导体)以及保护外层所组成,如图 1.3.3 所示。由于外导体的作用,外来的电磁干扰被有效地屏蔽了,因此同轴电缆具有很好的抗干扰特性,并且因趋肤效应所引起的功率损失也大大减小。同时,与双绞线相比,同轴电缆具有更宽的带宽和更快的传输速率。

(4) 光纤

光纤信道是以光导纤维(简称光纤(Optical Fiber))为传输媒质、以光波为载波的信道,具有极宽的通频带,能够提供极大的传输容量。光纤的特点是:损耗低、通频带宽、重量轻、不怕腐蚀以及不受电磁干扰等。利用光纤代替电缆可节省大量有色金属。目前的技术可使光纤的损耗低于 0.2 dB/km,随着科学技术的发展,这个数字还会下降。

由于光纤的物理性质非常稳定,而且不受电磁干扰,因此光纤信道的性能非常稳定,可以看作是典型的恒参信道。

光导纤维的横截面为圆形,内由纤芯、包层两部分组成。其中,纤芯为光通路;包层由多层反射玻璃纤维构成,用来反射光信号到纤芯上。实用的光缆外部还有一个保护层,如图 1.3.4 所示。

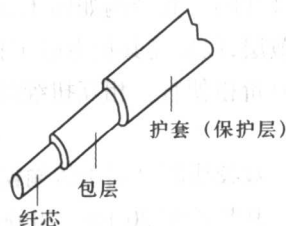


图 1.3.4 光纤的构成

光纤的传输距离与波长有关,它的衰减率极低。为了有

效地增大传输距离,一般都采用 $1.55\ \mu\text{m}$ 波长的光纤,同时利用掺铒光纤放大器作为接收机的前置放大器或在光纤中作为中继器,可使光纤的传输距离达到数百千米。

2. 无线信道

无线信道是利用电磁波在空间的传播来传输信号的。图 1.3.5 为各种无线通信方式的示意图。

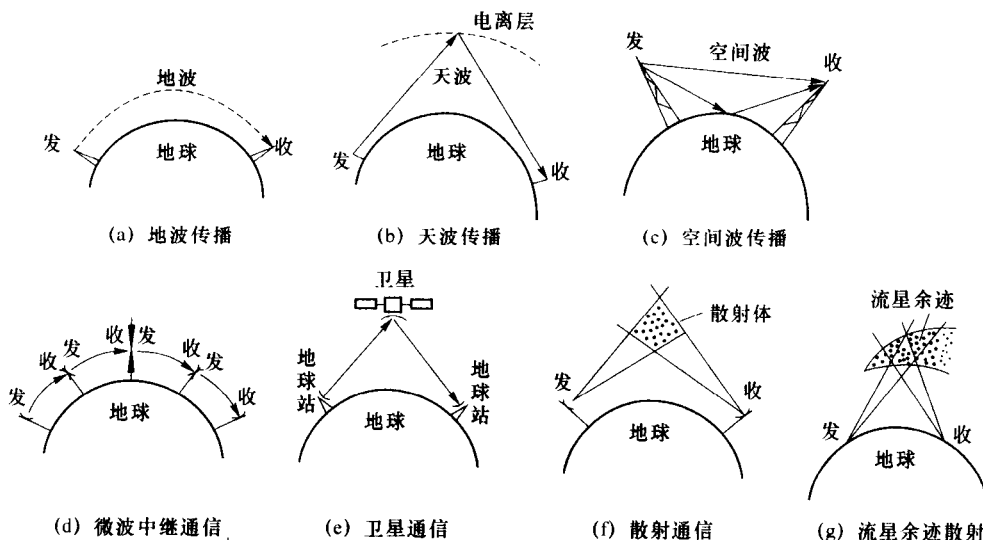


图 1.3.5 无线通信方式示意图

(1) 地波传播。频率在约 $2\ \text{MHz}$ 以下的无线电波沿着地球表面的传播称为地波传播,如图 1.3.5(a)所示。主要用于低频及甚低频远距离无线电导航、标准频率和时间信号广播、对潜通信等。其主要传播特点是:传播损耗小,作用距离远;受电离层扰动小,传输稳定;有较强的穿透海水和土壤的能力;但大气噪声电平高,工作频带窄。

(2) 天波传播。天波传播是经由电离层反射的一种传播方式,如图 1.3.5(b)所示。长波、中波、短波都可以利用天波通信。但短波是电离层反射的最佳波段,可利用电离层的多次反射进行远距离通信(一次反射最远距离可达 $4\ 000\ \text{km}$)。天波传播的主要优点是传输损耗小、设备简单、可利用较小功率进行远距离通信。但由于电离层是一种随机的、色散及各向异性的有耗媒质,电波在其中传播会产生各种效应,如多径传输、衰落、极化面旋转等,有时还会因电离层骚动和暴变极不稳定,甚至完全中断通信。近年来,高频自适应通信系统的使用,大大提高了短波通信的可靠性。因此,天波通信仍然是一种重要的通信手段。

(3) 视距(空间波)传播。视距传播是指在发射天线和接收天线间能相互“看见”的距离内,电波直接从发射点传到接收点(不排除地面反射波的存在)的一种传播方式,又称为直射波或空间波传播。根据收、发天线所处空间位置的不同,视距传播大致可分为 3 种类型:①地面上的视距传播,如中继通信、电视、广播及地面移动通信等;②地面与空中目标(如飞机、飞艇、通信卫星)之间的视距传播;③空间飞行体之间的视距传播,如飞机间、宇宙飞行器间的电波传播等。

无论是地面视距传播还是地对空视距传播,其传播途径至少有一部分是在对流层中,因此必然要受到对流层这一传输媒质的影响。因此,当电波在低空大气层中传播时,还可能受到地表面自然或人为障碍物的影响,引起电波的反射、散射或绕射现象。图 1.3.6(c)为地面上空间波传播的示意图。接收点除了空间直射波外,还会收到地面或其他障碍物的反射波。地面移动通信就属于这种传播方式。

(4) 无线电视距中继信道。无线电视距中继通信工作在超短波和微波波段,利用定向天线实现视距直线传播。由于直线视距一般在 $40\text{ km} \sim 50\text{ km}$,因此需要中继方式实现远距离通信,如图 1.3.5(d)所示。相邻中继站相距 $40\text{ km} \sim 50\text{ km}$ 。由于中继站间采用定向天线实现点对点传输,并且距离较近,因此,传播条件较稳定。这种系统具有传输容量大、发射功率小、通信可靠稳定等特点。

(5) 卫星中继信道。卫星信道是利用人造地球卫星作为中继站转发无线电信号实现地球站之间的通信,如图 1.3.5(e)所示。当卫星的运行轨道在赤道上空,距地面 $35\,860\text{ km}$ 时,其绕地球一周的运行时间为 24 h ,在地球上看上去卫星是相对静止的,称为静止(或同步)卫星。利用它作为中继站可以实现地球上 $18\,000\text{ km}$ 范围内的多点通信。利用 3 颗适当配置同步卫星可以实现全球(南北极盲区除外)通信。同步卫星通信的电磁波直线传播,大部分在真空状态的自由空间传播,传播特性稳定可靠、传输距离远、容量大、覆盖地域广,广泛用于传输多路电话、电报、图像、数据和电视节目。

近年来发展起来的中、低轨道卫星移动通信通常利用多颗卫星组成的星座实现全球通信。由于卫星距地球较近,且相对于地球处于高速运动状态,传播条件相对要复杂一些。

(6) 对流层散射信道。对流层散射传播如图 1.3.5(f)所示。图中发射天线射束与接收天线射束相交于对流层上层,两波束相交的空间为有效散射区域。对流层散射通信频率范围主要在 $100\text{ MHz} \sim 4\text{ GHz}$,可以达到的有效散射传播距离最大约 600 km 。对流层散射是由于大气不均匀性产生的,而且电磁波散射现象具有较强的方向性,散射能量主要集中于前方,故称“前向散射”。由于散射的随机性,这种信道属于变参信道。

(7) 流星余迹散射信道。流星余迹散射是由于流星经过大气层时产生很强的电离余迹使电磁波散射的现象,如图 1.3.5(g)所示。流星余迹高度约 $80\text{ km} \sim 120\text{ km}$,余迹长度约 $15\text{ km} \sim 40\text{ km}$,散射频率范围为 $30\text{ MHz} \sim 100\text{ MHz}$,传播距离达 $1\,000\text{ km}$ 以上。一条余迹的存留时间在零点几秒到几分钟之间,但空中随时都有大量肉眼看不见的流星余迹存在,能随时保证信号断续地通信。所以流星余迹散射通信只能用于低速存储和高速突发的断续方式传输数据。

1.3.3 信道模型

1. 广义信道

前面把信道定义为发信机和收信机之间用以传输信号的传输媒介或途径。但是,在通信系统的分析研究中,为了简化系统的模型和突出重点,常常根据所研究的问题,把信道范围适当扩大,除了传输媒介外,还包括有关的部件和电路,如天线与馈线、功率放大器、放大器与滤波器、混频器、调制器与解调器等。这种范围扩大的信道称为广义信道,相应地把仅指传输媒介的信道称为狭义信道。

对通信系统进行分析时常用的一种广义信道是所谓调制信道。调制信道是从研究调制