

通信原理实践教程

王旭东 何荣希 主编



大连海事大学出版社

通信原理实践教程

王旭东 何荣希 主编

大连海事大学出版社

©王旭东, 何荣希 2011

图书在版编目(CIP)数据

通信原理实践教程 / 王旭东, 何荣希主编. —大连: 大连海事大学出版社, 2011. 1
ISBN 978-7-5632-2531-6

I. ①通… II. ①王… ②何… III. ①通信理论—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 000732 号

大连海事大学出版社出版

地址: 大连市凌海路 1 号 邮编: 116026 电话: 0411-84728394 传真: 0411-84727996

<http://www.dmupress.com>

E-mail: cbs@dmupress.com

大连印刷三厂印装

大连海事大学出版社发行

2011 年 1 月第 1 版

2011 年 1 月第 1 次印刷

幅面尺寸: 185 mm×260 mm 印数: 1~1000 册

字数: 459 千

印张: 18.5

责任编辑: 苏炳魁

版式设计: 诚 峰

封面设计: 王 艳

责任校对: 王桂云

ISBN 978-7-5632-2531-6

定价: 36.00 元

前 言

通信原理是我校信息学科通信工程、电子工程和电子信息科学与技术三个本科专业的一门主干专业课。这门课程的理论性较强,主要讲述通信的基本原理,内容涵盖通信系统中信息传输的共性问题以及一些现代通信技术和理论,特别是数字通信方面的知识。目前,涉及该课程的教材不少,但是大多存在内容庞杂、过分注重理论性、有关知识点抽象难理解等问题。因此,我们在吸取同类教材精华的基础上,结合多年从事该课程的教学经验,在授课教案的基础上整理成本书。该书的宗旨就是要系统、清晰地阐述现代通信系统的基本概念、基本原理和基本技术以及设计与分析的方法,通过概念的建立到给出定量分析,注重理论联系实际,培养学生的应用能力。

全书共分 10 章。内容包括通信系统概论,随机信号分析,模拟调制系统,数字基带传输系统,模拟信号的数字化,数字信号的频带传输,数字信号的最佳接收,多路复用和伪随机序列,差错控制编码及同步原理。

为了帮助读者更好地掌握通信的基本原理及分析方法,提高实际应用能力,本书在每章开始都给出了具体的知识点,在正文中还配备大量例题,而且在每章结尾都给出一基本的概念题并列举一些典型的题解,同时为了方便课堂教学,每章末尾还给出一些课堂小测题。

本书可作为通信工程、电子信息工程、电子信息科学与技术等电子信息类高年级本科生的学习和实验教材,亦可供从事相关专业工作的教师和技术人员参考。

本书参考和引用了目前出版的多本同类优秀教材的部分内容,在此对原书作者表示衷心的感谢!

限于作者的水平,本书难免存在一些错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

对本书的意见和建议欢迎发邮件至: wxd@dlmu.edu.cn, hxr@dlmu.edu.cn。

编 者

2010 年 9 月

目 录

1 通信系统概论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 通信系统的组成.....	2
1.3 通信系统分类与通信方式.....	6
1.4 信息及其度量.....	8
1.5 通信系统的性能指标.....	10
1.6 信道.....	11
1.7 信道容量.....	24
1.8 复习与巩固.....	26
2 随机信号分析.....	29
2.1 随机过程.....	29
2.2 随机过程的统计特性.....	30
2.3 随机过程的数字特征.....	31
2.4 平稳随机过程.....	32
2.5 高斯随机过程.....	37
2.6 窄带随机过程.....	40
2.7 正弦波加窄带高斯噪声.....	43
2.8 随机过程通过线性系统.....	45
2.9 复习与巩固.....	48
3 模拟调制系统.....	52
3.1 引言.....	52
3.2 幅度调制.....	54
3.3 非线性调制(角度调制).....	63
3.4 各种模拟调制系统的性能比较.....	67
3.5 复习与巩固.....	69
4 数字基带传输系统.....	72
4.1 引言.....	72
4.2 数字基带信号及其频谱特性.....	73
4.3 基带传输的常用码型.....	81
4.4 数字基带信号传输与码间串扰.....	84
4.5 无码间串扰的基带传输特性.....	85
4.6 部分响应系统.....	90
4.7 无码间串扰基带系统的抗噪声性能.....	95

4.8	眼图.....	98
4.9	时域均衡基本原理	100
4.10	复习与巩固.....	104
5	模拟信号的数字化.....	107
5.1	引言	107
5.2	低通抽样定理.....	108
5.3	脉冲振幅调制(PAM)	111
5.4	脉冲编码调制(PCM)	115
5.5	差分脉冲编码调制(DPCM)	132
5.6	增量调制(ΔM).....	134
5.7	复习与巩固.....	139
6	数字信号的频带传输.....	144
6.1	引言	144
6.2	二进制数字调制与解调原理	145
6.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能	156
6.4	二进制数字调制系统的性能比较	164
6.5	多进制数字调制系统	166
6.6	改进的数字调制方式	176
6.7	复习与巩固.....	184
7	数字信号的最佳接收.....	191
7.1	引言	191
7.2	最小差错概率接收准则	191
7.3	确知信号的最佳接收	196
7.4	随相数字信号的最佳接收	203
7.5	起伏数字信号的最佳接收	204
7.6	普通接收机与最佳接收机性能比较	205
7.7	数字信号的匹配滤波接收原理	207
7.8	最佳基带传输系统	211
7.9	复习与巩固.....	213
8	多路复用和伪随机序列	220
8.1	引言	220
8.2	频分复用(FDM).....	222
8.3	时分复用(TDM).....	224
8.4	码分复用(CDM).....	230
8.5	复习与巩固.....	239
9	差错控制编码.....	242
9.1	引言	242
9.2	差错控制编码的基本原理	243

目 录

9.3	简单分组码.....	245
9.4	线性分组码.....	246
9.5	循环码.....	250
9.6	卷积码.....	253
9.7	复习与巩固.....	259
10	同步原理.....	265
10.1	引言.....	265
10.2	载波同步.....	266
10.3	位同步.....	273
10.4	群同步.....	279
10.5	复习与巩固.....	283
	参考文献.....	288

1 通信系统概论

知识点

- 通信系统模型
- 基带信号和频带信号的区别
- 模拟通信系统和数字通信系统比较
- 通信系统的分类以及不同的通信方式
- 信息量的概念及其计算
- 码元速率与信息速率的概念及其计算
- 误码率、误信率、误字率的概念及其计算
- 信道的定义、分类及其模型
- 群延迟—频率特性
- 频率弥散
- 频率选择性衰落与相关带宽
- 信道容量的概念
- 香农公式及其应用

1.1 引言

通信按照传统的理解就是“信息的传输与交换”。从古到今，人类的社会活动总离不开消息的传递和交换。古代的消息树、烽火台、驿马传令；现代的文字、书信、电报、电话、广播、电视、遥控、遥测等，这些都是消息传递的方式或信息交流的手段。人们可以用语言、文字、数据或图像等不同的形式来表达信息。但是这些语言、文字、数据或图像本身不是信息而是消息。消息是有待传输的具体内容，具有不同的形式，如符号、文字、话音、音乐、数据、图片、活动图像等。消息可分为离散(数字)消息和连续(模拟)消息。信息是消息中所包含的人们原来不知而待知的内容。通信的根本目的在于传递消息中包含的信息；否则，就失去了通信的意义。为了传递消息，各种消息需要转换成电信号。消息与电信号是一一对应的关系。

实现通信的方式很多，随着社会的需求、生产力的发展和科学技术的进步，目前通信越来越依赖利用“电”来传递消息的电通信方式。由于电通信迅速、准确、可靠且不受时间、地

点、距离的限制,因而近百年来得到了迅速的发展和广泛的应用。当今,在自然科学领域涉及“通信”这一术语时,一般均是指“电通信”。广义来讲,“光通信”也属于“电通信”,因为光也是一种电磁波。本书中的通信均指“电通信”。本课程主要讨论信息的传输和交换的基本原理。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统模型

通信是从一地向另一地传递和交换信息。实现信息传递所需的一切技术设备和传输媒质的总和称为通信系统。

图 1-1 概括地描述了基于点与点之间的通信系统的组成,它反映了通信系统的共性,因此称之为通信系统的一般模型。

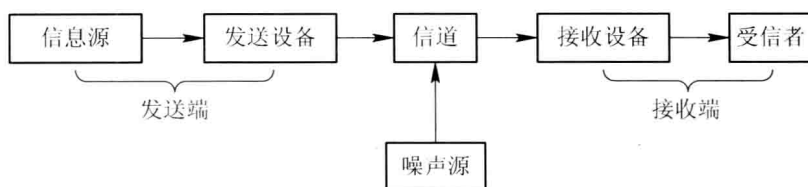


图 1-1 通信系统的一种简化模型

(1) 信息源

信息源是消息的产生地,把各种消息转换成原始电信号,称之为消息信号或基带信号,可分为模拟信息源和数字信息源。模拟信息源输出的是模拟信号,如电话机和电视摄像机。数字信息源输出离散的数字信号,如电传机和计算机等各种数字终端设备。

(2) 发送设备

发送设备将信息源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号,将信息源和信道匹配起来。变换方式是多种多样的,在需要频谱搬移的场合,调制是最常见的变换方式。对数字通信系统来说,发送设备通常又可分为信源编码与信道编码。

(3) 信道

信道是传输信号的物理媒质。在无线信道中,信道可以是大气(自由空间)。在有线信道中,信道可以是明线、电缆或光纤。有线和无线信道均有多种物理媒质。媒质的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。根据研究对象的不同,需要对实际的物理媒质建立不同的数学模型,以反映传输媒质对信号的影响。

(4) 噪声源

噪声源不是人为加入的设备,而是通信系统中各种设备以及信道中所固有的各种噪声的集中表示。噪声的来源是多样的,它可分为内部噪声和外部噪声,而且外部噪声往往是从信道引入的。

(5) 接收设备

接收设备完成与发送设备相反的变换,从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始

基带信号。

(6) 受信者(信宿)

受信者(信宿)是传输信息的归宿点,其作用是将复原的原始信号转换成相应的消息。根据研究的对象以及所关注的问题不同,图 1-1 模型中的各小方框的内容和作用将有所不同,因而相应有不同形式的更具体的通信模型。今后的讨论就是围绕着通信系统的模型而展开的。

1.2.2 模拟信号和数字信号

图 1-1 中,信源发出的消息虽然有多种形式,但可分为两大类:

(1) 连续消息

消息的状态连续变化或是不可数的,如语音、活动图片等。

(2) 离散消息

消息的状态是可数的或离散的,如符号、数据等。

消息的传递是通过它的载体——电信号来实现的,即把消息寄托在电信号的某一参量上(如连续波的幅度、频率或相位;脉冲波的幅度、宽度或位置)。按信号参量的取值方式不同,可把信号分为模拟信号和数字信号两类,如图 1-2 所示。

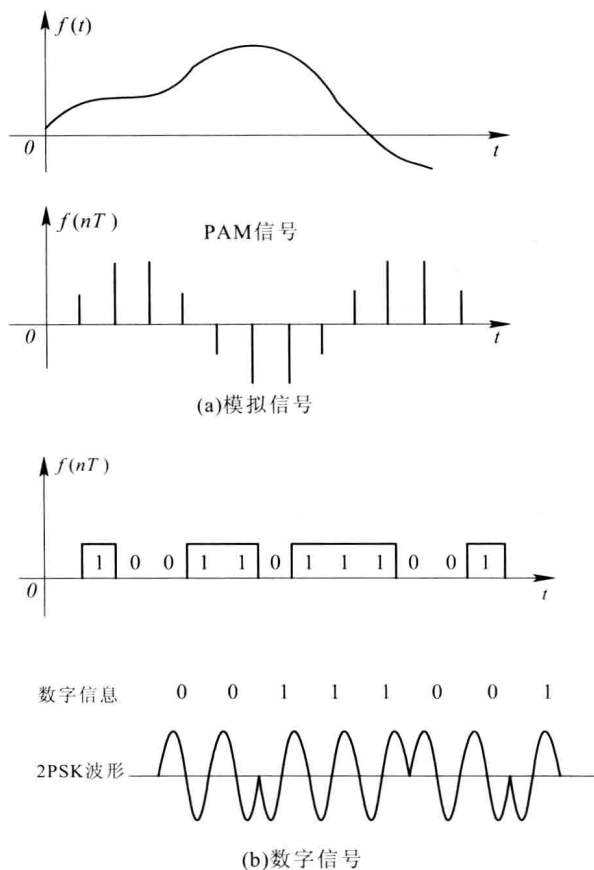


图 1-2 信号的分类

凡信号参量的取值是连续的或取无穷多个值的,且直接与消息相对应的信号,均称为模

拟信号,如电话机送出的语音信号、电视摄像机输出的图像信号等。模拟信号有时也称连续信号,这个连续是指信号的某一参量可以连续变化,或者说在某一取值范围内可以取无穷多个值,而不一定在时间上也连续。

凡信号参量只能取有限个值,并且常常不直接与消息相对应的信号,均称为数字信号,如电报信号、计算机输入/输出信号、PCM 信号等。数字信号有时也称离散信号,这个离散是指信号的某一参量是离散变化的,而不一定在时间上也离散。

1.2.3 模拟通信系统和数字通信系统

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

1.2.3.1 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统。信源发出的原始电信号是基带信号。基带的含义是指信号的频谱从零频附近开始,如语音信号为 300~3 400 Hz,图像信号为 0~6 MHz。

基带信号具有以下特点:(1)具有频率很低的频谱分量,一般不宜直接传输;(2)需要把基带信号变换成其频带适合在信道中传输的信号,并可在接收端进行反变换。完成这种变换和反变换作用的通常是调制器和解调器。

经过调制以后的信号称为已调信号(又称频带信号)。已调信号具有以下特点:(1)携带有信息;(2)适合在信道中传输;(3)信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频。

模拟通信系统中需要进行连续消息与基带信号和基带信号与频带信号之间的两种变换。消息从发送端到接收端的传递过程中,不仅仅只有连续消息与基带信号和基带信号与频带信号之间的两种变换,实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。由于调制与解调两种变换对信号的变化起决定性作用,而其他过程对信号不会发生质的变化,只是对信号进行了放大或改善了信号特性,因而被认为是理想的而不予讨论。

模拟通信系统模型可由图 1-1 演变而成,如图 1-3 所示。图中的调制器和解调器就代表图 1-1 中的发送设备和接收设备。

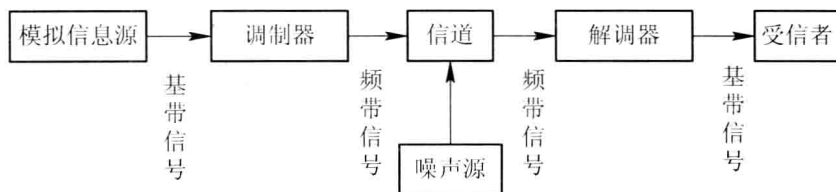


图 1-3 模拟通信系统模型

1.2.3.2 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统,如图 1-4 所示。

数字通信涉及的技术问题很多,其中主要有编码/译码、调制/解调、数字复接、同步以及加密等。

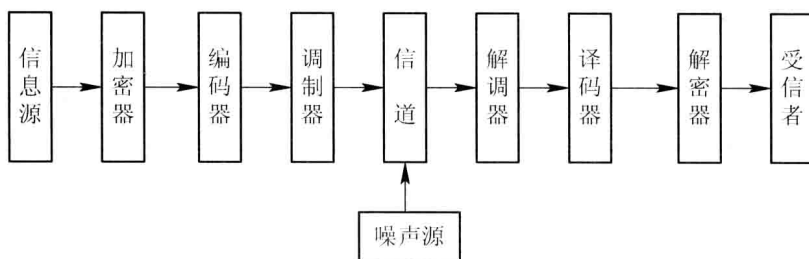


图 1-4 数字通信系统模型

➤ 编码与译码

数字信号在信道传输时, 由于噪声、衰落以及人为干扰等, 将会引起差错。为了减少差错, 编码器对传输的信息码元按一定的规则加入保护成分(监督元), 组成所谓“抗干扰编码”。

接收端的译码器按一定规则进行解码, 从解码过程中发现错误或纠正错误, 从而提高通信系统抗干扰能力, 实现可靠通信。

➤ 加密与解密

在需要实现保密通信的场合, 为了保证所传信息的安全, 人为将被传输的数字序列扰乱, 即加上密码, 这种处理过程叫加密。在接收端利用与发送端相同的密码复制品对收到的数字序列进行解密, 恢复原来信息, 叫解密。

➤ 数字调制与解调

数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处, 形成适合在信道中传输的频带信号。

➤ 同步与数字复接

同步是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的不可缺少的前提条件。同步使收、发两端的信号在时间上保持步调一致。按照同步的功用不同, 可分为载波同步、位同步、群同步和网同步。

数字复接就是依据时分复用的基本原理把若干个低速数字信号合并成一个高速的数字信号, 以扩大传输容量和提高传输效率。

图 1-4 是数字通信系统的一般化模型, 实际的数字通信系统不一定包括图中的所有环节。例如, 在某些有线信道中, 若传输距离不太远且通信容量不太大时, 数字基带信号无需调制, 可以直接传送, 称之为数字信号的基带传输, 其模型中就不包括调制与解调环节。

1.2.3.3 数字通信的优点

与模拟通信系统相比, 数字通信系统具有如下优点:

- (1) 抗干扰能力强, 在中继时可通过再生消除噪声的积累。
- (2) 传输差错可以控制。
- (3) 便于用现代数字信号处理技术来对数字信息进行处理。
- (4) 易于集成化, 从而使通信设备微型化。
- (5) 易于进行加密处理, 保密强度高。

数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价而换取的。例如, 一路模拟电话通常只占据 4 kHz 带宽, 而一路相同传输质量的数字电话则要占据几十 kHz 带宽。另外, 因为数字通信对同步要求高, 因而系统设备复杂。

【例 1-1】模拟信号能否在数字通信系统中传输？数字信号能否在模拟通信系统中传输？

解：模拟信号经过数字编码后可以在数字通信系统中传输，此时需要引入模一数数和数一模转换器。数字电话系统就是以数字方式传输模拟语音信号的例子。数字信号也可以在模拟通信系统中传输。计算机数据可以通过模拟电话线路传输，但这时必须使用调制解调器将数字基带信号进行正弦调制，以适应模拟信道的传输特性。模拟通信与数字通信的区别仅在于信道中传输的信号种类。

1.3 通信系统分类与通信方式

1.3.1 通信系统的分类

(1) 按通信业务分类

按通信业务分，通信系统有话务通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位，它属于人与人之间的通信。近年来，非话务通信发展迅速，非话务通信主要是分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子信箱、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。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。未来的综合业务数字通信网中各种用途的消息都能在一个统一的通信网中传输。

(2) 按调制方式分类

根据是否采用调制，可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如音频市内电话。频带传输是对各种信号调制后传输的总称。

(3) 按信号特征分类

按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。

(4) 按传输媒质分类

按传输媒质分，通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的，如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线通信是依靠电磁波在空间传播达到传递消息的目的，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

(5) 按信号复用方式分类

传送多路信号有三种复用方式：频分复用、时分复用和码分复用。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。时分复用是用抽样或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，码分复用主要用于空间通信的扩频通信中。

1.3.2 通信方式

(1) 按消息传递的方向与时间关系分

对于点与点之间的通信,按消息传递的方向与时间关系,通信方式可分为单工、半双工及全双工通信三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式,因此只占用一个信道,如图 1-5 (a)所示。广播、遥测、遥控、无线寻呼等就是单工通信方式的例子。

半双工通信是指通信双方都能收发消息,但不能同时进行收和发的工作方式,如图 1-5 (b)所示。例如,使用同一载频的对讲机,收发报机以及问询、检索、科学计算等数据通信都是半双工通信方式。

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。一般情况全双工通信的信道必须是双向信道,如图 1-5 (c)所示。普通电话、手机都是最常见的全双工通信方式,计算机之间的高速数据通信也是这种方式。

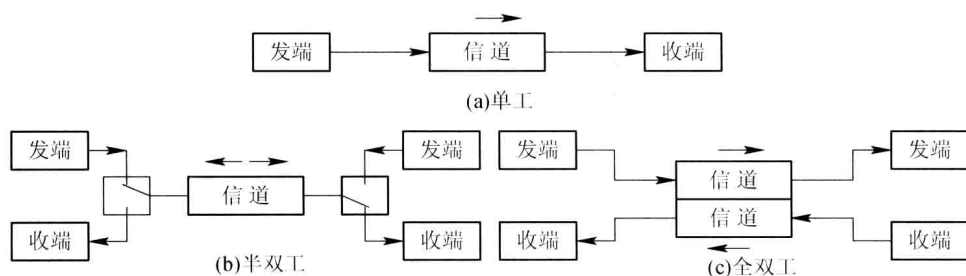


图 1-5 单工、半双工和全双工通信方式示意图

(2) 按数字信号排列顺序分

在数字通信中,按数字信号代码排列的顺序可分为并行传输和串行传输。并行传输是将代表信息的数字序列以成组的方式在两条或两条以上的并行信道上同时传输,如图 1-6 (a)所示。并行传输可以节省传输时间,但是,由于它需要传输信道多,设备复杂,成本高,一般较少采用。它主要用于计算机和其他高速数字系统,特别适用于设备之间的近距离通信。串行传输是数字序列以串行方式一个接一个地在一条信道上传输,如图 1-6(b)所示。它只需要占用一条通路,一般的远距离数字通信都采用这种传输方式。

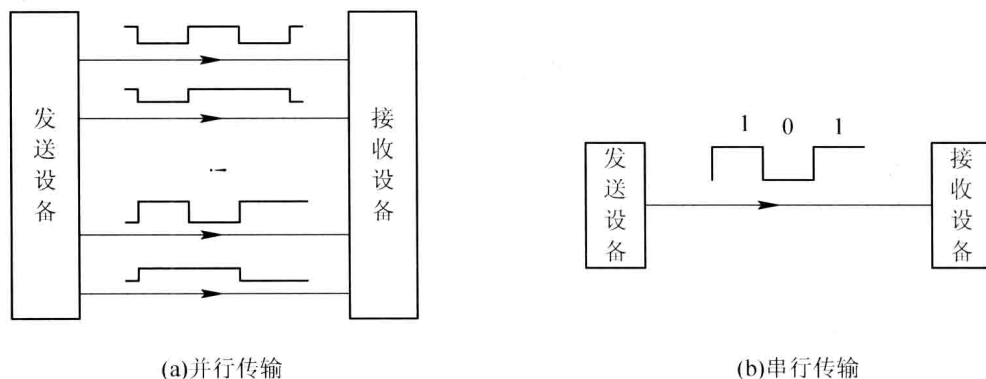


图 1-6 并行和串行通信方式示意图

1.4 信息及其度量

信息是消息中包含的有意义的内容,通信的目的就在于传输信息。任何信源产生的输出都是随机的,也就是说,信源输出是用统计方法来定性的。对接收者来说,只有消息中不确定的内容才构成信息;否则,信源输出已确切知晓,就没有必要再传输它了。信息含量就是对消息中这种不确定性的度量。

让我们从常识的角度来感觉三条消息:(1)太阳从东方升起;(2)太阳比往日大两倍;(3)太阳将从西方升起。第一条几乎没有带来任何信息,第二条带来了大量信息,第三条带来的信息多于第二条。原因:第一事件是一个必然事件,人们不足为奇;第三事件几乎不可能发生,它使人感到惊奇和意外,也就是说,它带来更多的信息。因此,信息含量是与惊奇这一因素相关联的,这是不确定性或不可预测性的结果。越是不可预测的事件,越会使人感到惊奇,带来的信息越多。

根据概率论知识,事件的不确定性可用事件出现的概率来描述。可能性越小,概率越小;反之,概率越大。因此,消息中包含的信息量与消息发生的概率密切相关。消息出现的概率越小,消息中包含的信息量就越大。假设 $P(x)$ 是一个消息发生的概率, I 是从该消息获悉的信息,根据上面的认知,显然 I 与 $P(x)$ 之间的关系反映为如下规律:

(1) 信息量是概率的函数,即

$$I=I[P(x)]$$

(2) $P(x)$ 越小, I 越大;反之, I 越小,并且当

$$P(x) \rightarrow 1 \text{ 时, } I \rightarrow 0$$

$$P(x) \rightarrow 0 \text{ 时, } I \rightarrow \infty$$

(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之和,也就是说,信息具有相加性,即

$$I[P(x_1)P(x_2)\cdots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \cdots$$

信息量 I 与消息出现的概率 $P(x)$ 之间的关系应为

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

信息量的单位与对数底数 a 有关。 $a=2$ 时,信息量的单位为比特(bit); $a=e$ 时,信息量的单位为奈特(nat); $a=10$ 时,信息量的单位为十进制单位,叫哈特莱(Hartley)。目前广泛使用的单位为比特。

1.4.1 等概情况

对于离散信源,假设信源每个符合出现的概率相等。

【例 1-2】设二进制离散信源,以相等的概率发送数字 0 或 1,求信源每个输出的信息含量。

解: $I(0) = I(1) = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \text{ (bit)}$

可见, 传送等概率的二进制波形之一($P=1/2$)的信息量为 1 bit。同理, 传送等概率的四进制波形之一($P=1/4$)的信息量为 2 bit, 这时每一个四进制波形需要用 2 个二进制脉冲表示; 传送等概率的八进制波形之一($P=1/8$)的信息量为 3 bit, 这时至少需要 3 个二进制脉冲。

【结论】对于离散信源, M 个波形等概率($P=1/M$)发送, 且每一个波形的出现是独立的, 即信源是无记忆的, 则传送 M 进制波形之一的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \quad (\text{bit})$$

式中, P 为每一个波形出现的概率, M 为传送的波形数。若 M 是 2 的整幂次, 比如 $M=2^K$ ($K=1, 2, 3, \dots$), 则上式可改写为

$$I = \log_2 M = \log_2 2^K = K \quad (\text{bit})$$

式中, K 是二进制脉冲数目。也就是说, 传送每一个 $M(M=2^K)$ 进制波形的信息量就等于用二进制脉冲表示该波形所需的脉冲数目 K 。

1.4.2 非等概情况

设离散信源是一个由 n 个符号组成的符号集, 其中每个符号 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) 出现的概率为 $P(x_i)$, 且有 $\sum_{i=1}^n P(x_i)=1$, 则 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 所包含的信息量分别为 $-\log_2 P(x_1)$, $-\log_2 P(x_2)$, $\dots$, $-\log_2 P(x_n)$ 。于是, 每个符号所含信息量的统计平均值, 即平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1)[- \log_2 P(x_1)] + P(x_2)[- \log_2 P(x_2)] + \dots + P(x_n)[- \log_2 P(x_n)] \\ &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \end{aligned}$$

由于 $H(x)$ 同热力学中的熵形式一样, 故通常又称它为信息源的熵, 其单位为 bit/符号。当信源中每个符号等概独立出现时, 此时信源的熵有最大值。

【例 1-3】一离散信源由 0, 1, 2, 3 四个符号组成, 它们出现的概率分别为 3/8, 1/4, 1/4, 1/8, 且每个符号的出现都是独立的, 试求某消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解: 此消息中, 0 出现 23 次, 1 出现 14 次, 2 出现 13 次, 3 出现 7 次, 共有 57 个符号, 故该消息的信息量为

$$I = 23 \log_2 \frac{8}{3} + 14 \log_2 4 + 13 \log_2 4 + 7 \log_2 8 = 108 \quad (\text{bit})$$

每个符号的平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号位}} = \frac{108}{57} = 1.89 \quad (\text{bit/符号位})$$

若用熵的概念来计算, 由信源熵公式可得

$$H = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.906 \quad (\text{bit/符号})$$

则该消息所含信息量为 $I = 57 \times 1.906 = 108.64 \quad (\text{bit})$

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

以上介绍了离散消息所含信息量的度量方法, 对于连续消息的信息量可以用概率密度来

描述。连续消息的平均信息量(相对熵)为

$$H_1(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \log_e f(x) dx$$

式中, $f(x)$ 表示连续消息出现的概率密度函数。

1.5 通信系统的性能指标

通信的任务是快速、准确地传递信息。因此, 评价一个通信系统优劣的主要性能指标是系统的有效性和可靠性。

有效性指在给定信道内所传输的信息内容的多少, 或者说是传输的“速度”问题。而可靠性指接收信息的准确程度, 也就是传输的“质量”问题。这两个问题相互矛盾而又相对统一, 通常还可以进行互换。

模拟通信系统的有效性可用有效传输频带来度量, 也就是传输一路信号所需最小带宽。同样的消息用不同的调制方式, 则需要不同的频带宽度。可靠性用接收端最终输出信噪比来度量。不同调制方式在同样信道信噪比下所得到的最终解调后的信噪比是不同的。如调频信号抗干扰能力比调幅好, 但调频信号所需传输频带却宽于调幅。

实际模拟通信系统中存在加性和乘性两种干扰。加性干扰是指信号在传输时叠加上的噪声引起的干扰, 而且始终存在。而乘性干扰指由于信道传输特性不理想引起的干扰, 它随信号消失而消失。

数字通信系统的有效性可用传输速率来衡量, 而可靠性可用差错率来衡量。

15.1 传输速率

可用码元传输速率或信息传输速率来衡量。

码元传输速率 R_B 简称传码率, 又称符号速率等。它表示单位时间内传输码元的数目, 单位是波特(Baud), 记为 B。例如, 若 1 秒内传 2 400 个码元, 则传码率为 2 400 B。数字信号有多进制和二进制之分, 但码元速率与进制数无关, 只与传输的码元长度 T 有关:

$$R_B = 1/T$$

通常在给出码元速率时, 有必要说明码元的进制。由于 M 进制的的一个码元可以用 $\log_2 M$ 个二进制码元去表示, 因而, M 进制的码元速率 R_{BM} 与二进制的码元速率 R_{B2} 之间有以下转换关系:

$$R_{B2} = R_{BM} \log_2 M \quad (\text{B})$$

信息传输速率 R_b 简称传信率, 又称比特率等。它表示单位时间内传递的平均信息量或比特数, 单位是比特/秒, 可记为 bit/s, 或 b/s, 或 bps。每个码元或符号通常都含有一定 bit 数的信息量, 因此码元速率和信息速率有确定的关系, 即

$$R_b = R_B \cdot H \quad (\text{b/s})$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 M} \quad (\text{B})$$

式中, M 为符号的进制数。例如码元速率为 1 200 B, 采用八进制($M=8$)时, 信息速率为 3 600 b/s; 采用二进制($M=2$)时, 信息速率为 1 200 b/s。