

信息与通信理论

XINXI YU TONGXIN LILUN

[英] A. M. 罗斯 著

钟义信 李道本 王继先 译

人 民 邮 电 出 版 社

73.6112
952

信息与通信理论

【英】A·M·罗斯 著
钟义信·李道本 王继先 译

人民邮电出版社

DT16/05
Information and

Communication Theory

A. M. Rose (1973)

内 容 提 要

本书前三章讲有关信息论的基础知识,包括信息、噪声、初等概率论、信号特性的基本概念;第四、五、六、七章讲信息论的基本内容,包括仙农理论、抗干扰编码理论及信号检测理论。第八章讨论信息论在通信系统中的应用。最后一章讲信息论在识模学、生物学、心理学等领域的应用。讲得简明扼要,便于自学,是一本较好的信息论入门读物。

信 息 与 通 信 理 论

[英] A. M. 罗斯 著

钟义信 李道本 王继先 译

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本: 787×1092 1/32 1979年8月 第一版

印张: 8.4/32 页数: 130 1979年8月 河北第一次印刷

字数: 184 千字 印数: 1—30,000 册

统一书号: 15045·总2309—无672

定 价: 0.85 元

译 者 序

信息，是人类认识世界和改造世界的知识源泉。人类社会发展的速度，在一定程度上取决于人们对信息利用的水平。信息科学就是适应这种需要最近迅速发展起来的一门新兴边缘科学。它的任务是研究信息的性质、信息的取得、传输、检测、存贮、处理和控制的原理和方法，而它的理论基础，则是从通信科学发展起来的信息论。

“信息与通信理论”是一本介绍信息论的教材，由英国贝尔法斯特大学电气与电子工程系毕业班和研究生课程的讲稿整理而成。前三章是学习信息论所必需的最低限度基础知识；四、五、六、七章介绍信息论的基本内容，包括仙农理论、抗干扰编码理论和信号检测理论；第八章讨论信息论在通信系统中的应用；最后一章简述信息论在识模学、心理学、生物学、神经生理学等领域的可能应用。前面八章深入浅出，着力于讲解信息论的基本概念，最后一章则着眼于展望信息论的广阔前景。

近几年来，无论在基本理论方面还是在实际应用方面，信息论都取得了巨大的进展。模糊信息、相对信息、主观信息以及智能信息处理、自动化信息控制等大量崭新的课题相继展开，使信息理论的面貌为之一新。本书原著出版于1973年，虽然未能反映这些新的进展，但是写得简明扼要、通俗易懂、自成体系，仍不失为一本较好的入门性读物。我们选译本书，意在向广大科学技术工作者普及信息论的基本知识，促进我国信

息科学的发展。

译文对原著中的错误尽可能作了更改和注释。由于译者水平有限，不当之处望读者批评指正。

译 者

原 序

自从有了人，就出现了人与人之间的相互通信，其所用通信方式，近百年来已有相当大的发展。但是，只是在最近二、三十年，人们才致力于建立一个完整、统一的通信理论，以便为研究与比较各种不同系统的性能提供一个普遍的参考标准。

这一理论，以研究一个特定系统所传输的信息量为起点，因而常被称为信息论。由于一个系统所传送的各种信息，对于人们究竟有多大价值是难以确切估计的，因此，“信息”一词只用来表示可能的信息量，而失去其日常使用的含义。这就是说，比如，信息论的观点认为，五分钟的无线电广播，不管是重大的新闻公告还是轻松的娱乐节目，它所传送的信息量都是相同的。

本书的目的是为信息论的研究者提供一本入门教科书，也为对信息论有兴趣的读者提供一本基础性读物。通过在贝尔法斯特大学电气与电子工程系对毕业班和研究生的多次讲授，本书的材料得到了精炼。

A·M·罗斯

一九七二年七月

目 录

第一章 引论	(1)
1. 信息论的范畴.....	(1)
2. 信息论的历史.....	(2)
3. 信道.....	(3)
4. 信息测度.....	(5)
5. 噪声.....	(10)
6. 本书内容和范围.....	(19)
参考资料.....	(21)
第二章 初等概率论	(22)
1. 概率概念.....	(22)
2. 概率分布.....	(25)
3. 连续概率密度分布.....	(30)
参考资料.....	(39)
第三章 信号的特性	(40)
1. 频域和时域.....	(40)
2. 富氏变换.....	(41)
3. 功率谱.....	(47)
4. 自相关函数.....	(50)
5. 功率谱和自相关函数之间的关系.....	(51)
6. 取样定理.....	(58)
第四章 信源与信道特性	(67)
1. 剩余度.....	(67)

2. 离散信源.....	(70)
3. 连续信源.....	(83)
4. 信息论与热力学中的熵.....	(90)
5. 熵和信息率.....	(92)
6. 使信道与信源匹配的编码.....	(94)
7. 有噪信道中的熵与信息.....	(102)
参考资料.....	(108)
第五章 理想通信系统	(109)
1. 多维空间.....	(109)
2. 通信系统的多维模型.....	(111)
3. 最大信息率.....	(114)
4. 理想信息率定理的意义.....	(117)
5. 相干系统.....	(123)
6. 正交信号.....	(131)
7. 正交信号集举例.....	(133)
8. 二元正交码.....	(135)
参考资料.....	(139)
第六章 抗干扰二元编码	(140)
1. 二元系统.....	(140)
2. 错误检测(检错).....	(142)
3. 错误纠正(纠错).....	(145)
4. 纠错码的一般特性.....	(146)
5. 纠一位错误的汉明码.....	(150)
6. ARQ(自动请求重发)系统.....	(154)
7. 单向电报信道的纠错码.....	(154)
8. 纠正突发错误的编码.....	(157)
9. BCH码.....	(168)

10. 纠正独立错误的卷积码.....	(168)
11. 编码.....	(169)
12. 序贯译码.....	(170)
13. 维特比译码.....	(172)
参考资料.....	(173)

第七章 判决和参量估计..... (174)

1. 基本检测理论 (假设检验)	(174)
2. 贝叶斯检测准则.....	(176)
3. 最小错误概率检测.....	(181)
4. 最大似然检测.....	(183)
5. 奈曼-皮尔逊准则	(183)
6. 最小最大检验.....	(184)
7. 序贯检测.....	(185)
8. 用匹配滤波器作最佳检测器.....	(185)
9. 连续参量的估计.....	(186)
10. 贝叶斯估计.....	(188)
11. 其它估计算子.....	(191)

参考资料.....	(191)
-----------	---------

第八章 以信息论为根据的通信系统..... (192)

1. 系统评价准则.....	(192)
2. 脉冲调制.....	(201)
3. 脉冲编码调制.....	(207)
4. 二元传输系统.....	(211)
5. 语声及图象信号的频带压缩.....	(214)

参考资料.....	(219)
-----------	---------

第九章 信息论在其它领域的应用..... (220)

1. 模式识别.....	(220)
--------------	---------

2. 信息论与心理学.....	(231)
3. 生物学.....	(233)
4. 神经生理学.....	(235)
参考资料.....	(237)
附录: 热噪声功率的理论推导.....	(238)
英汉名词对照表.....	(241)

第一章 引 论

1. 信息论的范畴

信息论的研究范围极为广阔，包括了许多看来似乎极不相关的领域。与它的故乡美国相比，英国倾向于在更为广泛的意义上理解信息论，即除了研究通信问题以外，还包含诸如心理学、语言学、神经生理学以及语义学方面的某些工作。

麦克米兰 (McMillan, B) 和斯列平 (Slepian, D) 曾在一篇总结性文章^[1]中指出，一般，对信息论有三种理解，即：

(1) 狭义信息论，主要研究消息的信息量、信道容量以及消息的编码问题。

(2) 一般信息论，主要也是研究通信问题，但还包括噪声理论、信号滤波与预测、调制与信息处理等问题。

(3) 广义信息论，不仅包括(1)和(2)的内容，而且包括所有与信息有关的领域，如心理学等等。

本书主要遵循第二种理解，只是最末一章涉及了一些更广泛的领域。我们试图以信息和通信理论作为统一的基础，来建立各种通信系统性能的度量准则，并比较各种系统的优劣。

2. 信息论的历史

切尔里 (Cherry, E. C) 写过一篇饶有兴味的早期信息理论史^[2], 他远溯石刻象形文字的古代, 然后沿流而下, 掠过中世纪的启蒙性语言学著作, 直到十六世纪左右吉尔伯特 (Gilbert, E. N) 等人在电报学方面的研究成果。

不过, 现代信息论实际是从本世纪廿年代奈奎斯特 (Nyquist, H)^[3] 和哈特莱 (Hartley, L. V. R)^[4] 的工作开始的。他们最早研究了通信系统传输信息的能力, 并试图度量系统的信息容量。

1948年, 仙农 (Shannon, C. E) 发表了一篇讨论信源和信道特性的长文^[5]。这篇权威性论文与后一年发表的另一篇论文^[6]一起, 奠定了现代信息论的基础, 而仙农也因此而成了信息论的奠基人。仙农的这些成就激起了人们对信息论的巨大热情。十五年来*, 这个领域的研究规模象滚雪球一样, 越来越大。至今, 国际电气和电子工程师学会一直出版信息论的双月刊, 许多大学的电气工程系都给毕业班介绍信息论的基础知识。

大约与仙农同时, 维纳 (Wiener, N) 发表了两部名著^{[7], [8]}。这是战时关于目标自动预测和武器火力控制方面的研究成果, 主要是以自动控制的观点来研究信号被噪声干扰时的信号处理理论。但是, 因为我们主要关心的是通信方面的问题, 因此, 本书将以仙农理论作为基本的课题。

* 指从 1948 年到本书初版的 1963 年; 1973 年再版时, 作者未加修正。——译者注

3. 信 道

为了避开具体的通信系统而能以一般的方法来讨论信息通信的过程,我们将利用图1.1示出的一般系统模型。

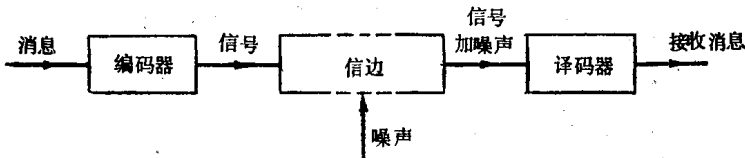


图 1.1 通信系统

通常,通信的主要目标之一是使接收端得到一个与发送端尽可能相同的复现消息。但是,在许多实际场合中,只要能够识别发送消息的主要特征,可以允许收、发信号之间有很大的差别。比如,我们从电话听筒听到的声音虽不是讲话人的准确声音,但只要能够听懂,而且能够辨别是谁在讲话,就可认为这个语声质量是可以接受的。收发消息之间的差别,可能是由于噪声干扰所造成,也可能是通信系统本身的工作特点所造成的。例如,当以脉冲编码调制方式发送某个连续电压波形 $f(t)$ 时,需要将它“量化”,这样,接收机的输出将是原发波形的阶梯式近似(图1.2)。初看起来,用这种复杂的方法得到的输出和输入信号大不相象,后面将会讨论采用这种系统的理由。

我们再来研究图1.1中的“噪声”。本章后面会讨论某些具体类型的干扰源。因为这些干扰在语声通信系统中的效果是在扬声器输出中产生嘶嘶声和喀喇声,因此常常把它们称为噪声。在其它通信形式中,噪声还会产生其它有害的影响。例

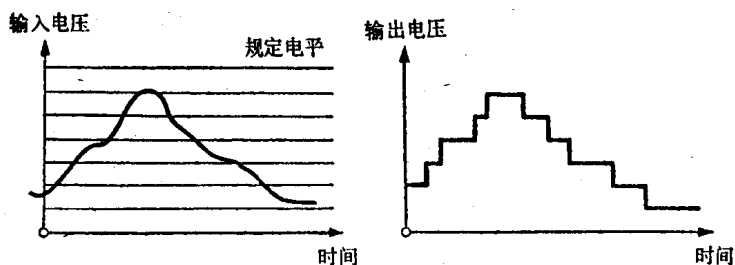


图 1.2 量化

如，在电视系统中，它使整个屏幕上出现许多闪烁着的白点，电视行话称之为“雪花”干扰，这是十分形象的。

对于任何通信系统，噪声总是系统性能的基本限制因素。后面将会看到，任何给定信道的最大理论信息传输速率都会随信噪比的提高而增加。一般，噪声电平我们无法控制，只能增加发送信号的电平。为了设备制造和使用的经济，我们希望信号电平尽可能低些，但若过低，接收的信号就可能被噪声淹没，以致无法识别信号，从而无法判断所发的是什么消息。

图中“编码器”的作用是把输入消息变换为在信道上传送的信号。在许多系统中，编码器要执行两项功能：(a)产生适于在信道上传输的信号，例如，在电视系统中，把光景象转换成对应的电压。(b)把消息编码成为在接收机中比较不易为干扰所弄错的形式。在日常生活中，过程(b)好比是把信封上地址中最重要的部分用粗体字写（例如收信地址，人名），而其它部分则用普通字体。在这个例子中，噪声干扰就好比是手写的普通字被弄得无法辨认，为了对付它，我们付出的代价是要用更多的时间把普通字体写成粗体字。后面将会看到，抗干扰能力的提高是可以使用时间或频带来换取的。这是通信理论的一条基本原理。

在系统的接收端，译码器必须执行与编码器相反的操作，从收到的信号与噪声的混合物中产生出与输入消息尽可能接近的复制品。

实际信道包括电缆、微波、水下超声波以及船只之间莫尔斯闪光的光路等等。在图 1.1 中，干扰是从信道上进来的。这对某些噪声（如无线传输中的大气干扰，使用烟火信号时从相邻篝火来的烟）确是如此。但在许多场合下，接收机（即图 1.1 中的译码器）前级的噪声是主要的噪声。不过，在一般的通信模型里，还是把所有噪声源集中在一起，并假定噪声是在传输信道上混入信号中的。

在习惯上，我们常把编码器的输入叫做“消息”，而把编码的输出叫做“信号”，但有些作者把信道的输入叫“消息”，而把信道的输出叫做“信号”。这样一来， $\text{信号} = \text{消息} + \text{噪声}$ 。我们将采用前一种说法。

4. 信 息 测 度

为了比较不同的通信系统，必须对某些共同的特性作出度量。可以作为信道性能标准的量有：电报系统在一定噪声电平下的错误概率、接收信噪比、相邻信道之间的串话电平、接收消息的可信度以及传信率等。我们称最后这个量为“信道容量”。为了度量它，需要对被传输的信息进行测度。信息一词一般好像是指某种不可度量的抽象量，因此我们打算具体研究消息的实际信息量，而只研究消息的可能的信息量。正是基于这种观点，我们认为五分钟广播所传送的信息量是一定的，不管收到什么样的节目都一样。但按它的日常含义来说，五分钟的新闻公报应比五分钟别的节目有多得多的信息量。

哈特莱^[4]首先指出,从逻辑上讲,应当选择对数单位来度量信息。一般认为,消息的持续时间延长一倍,其信息量也应加倍。据此,可以期望,两分钟电话传送的信息量是一分钟电话的2倍,或者, n 页电文包含的信息量是一页电文的 n 倍。不过,如果考虑可能消息的数目是任何消息基元的排列总数,那么,某个信源能够传送的离散消息数将随消息的长度按指数律增加。例如有 n 页书,其中每页有200字,作者使用的词汇是1000字,那么,在1000个字内每次选200字的总排列数是 $(1000)^{200}$,因此,一页的不同消息数是 $(1000)^{200}$ 。对于 n 页的消息,不同的消息数将增加到 $(1000)^{200n}$ 。假定消息的信息量是收到这个消息的概率 $\cdot$ 的某种反函数(若在传送之前,对于将要收到什么消息是完全肯定的,则这种传送就没有新的信息),且此概率随可能消息数的增加而减小。既然消息数随时间或长度按指数律增加,而信息按线性律增加,为了使这两方面协调一致,我们就应采用消息数或概率的对数测度来作为信息的度量单位。

在收到任何消息数据之前,接收端所了解的某消息发送的概率称为“先验概率”。收到某个消息之后,接收端所了解的该消息发送的概率叫做“后验概率”。在信号被噪声干扰的情况下,后验概率是很重要的。这是因为在有噪声系统中,接收机应当进行判决运算,即检验所收信号,并判定(或许可用最小平方差准则)它最可能是哪个发送信号。

后验概率的概念经常最容易搞混,为了说明它的概念,我们考虑传送三个消息 A 、 B 和 C 的系统。由于噪声的影响, A 平均有20%被错译为 B ,另20%错译为 C ;而 B 只有半数能正

*这里假定,读者已经熟悉,某个事件发生的概率可用从0(表示不可能)到1(表示肯定)的尺度来度量。本书第二章将稍为仔细地讨论概率的问题。

确接收，另一半被错译为 A ； C 有 $2/3$ 能正确接收， $1/3$ 被错译为 B 。这些转移概率可简明地表为

$$\begin{array}{ccc} \begin{array}{l} A \leftarrow \begin{array}{l} A-0.6 \\ B-0.2 \\ C-0.2 \end{array} \end{array} & \begin{array}{l} B \leftarrow \begin{array}{l} A-0.5 \\ B-0.5 \\ C-0 \end{array} \end{array} & \begin{array}{l} C \leftarrow \begin{array}{l} A-0 \\ B-0.333 \\ C-0.667 \end{array} \end{array} \end{array}$$

设发送 A 、 B 和 C 的相对频数（先验概率）分别为 0.5 、 0.2 和 0.3 。当传输序列 N 很长时，发送 A 、 B 和 C 的数目就分别趋于 $0.5N$ 、 $0.2N$ 和 $0.3N$ 。收到的 A 将大约为 $0.6 \times 0.5N + 0.5 \times 0.2N + 0.0 \times 0.3N = 0.3N + 0.1N + 0N = 0.4N$ 个。在这 $0.4N$ 个接收信号中，有 $0.3N$ 个对应于发 A ，有 $0.1N$ 个对应于发 B 。按照定义，当收到 A 时，发的信号为 A 、 B 或 C 的后验概率分别是 $0.3N/0.4N = 0.75$ ， $0.1N/0.4N = 0.25$ 和 0 。在任何特定的传输中，接收端的观察者是不知道后验概率的，因为他不了解实际传送了哪个消息。

可见通信所得的信息量，随先验概率的增加而减少，随后验概率的增加而增加，通常就定义为

$$\text{接收信息量} = \log \left(\frac{\text{后验概率}}{\text{先验概率}} \right)$$

如果不用后验概率，而用接收端所了解的收到的消息是某个发送消息的概率，似乎问题会更简单些。对于某个接收消息，不管是否因噪声干扰而出错，后验概率都一样，而后验概率则不同。但是，我们到第四章就可以看到，利用后验概率得到的通信速率的结果与用其它方法得到的结果是一致的。

若选对数的基底为 2 ，则信息单位是比特，这是最常用的单位。但有时也选用以 e 为基底的自然对数，这时信息单位是奈特。若用 10 为基底，信息单位则是哈特。

熟悉数字计算机术语的读者会发现，那里的“比特”含义