

Introduction to Information Optics



光信息

技术及应用

Introduction to
INFORMATION
OPTICS



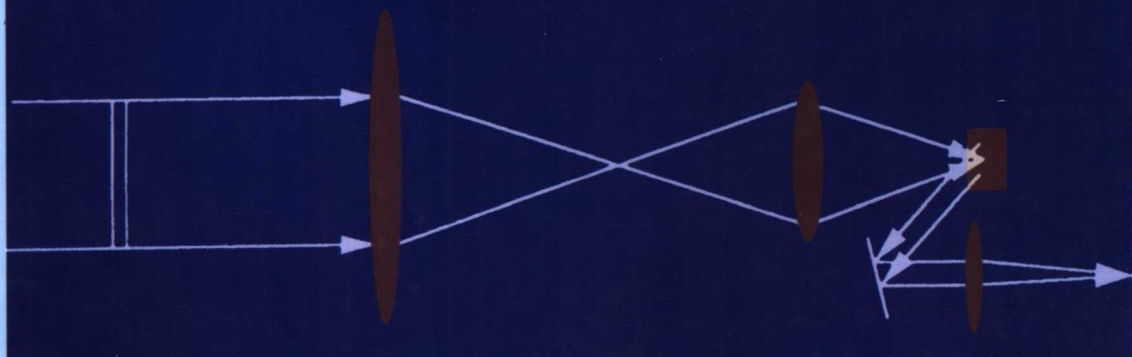
Francis T. S. Yu
Suganda Jutamulia
Shizhuo Yin

Francis T. S. Yu

[美] Suganda Jutamulia 等著

Shi Zhuo Yin

冯国英 陈建国 李大义 杨李茗 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

光信息技术及应用

Introduction to Information Optics

Francis T. S. Yu

[美] Suganda Jutamulia 等著

Shi Zhuo Yin

冯国英 陈建国 李大义 杨李茗 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书归纳和总结了信息光学的最新进展。全书内容涵盖面很广,包括光学和信息技术基本理论、并行光信号处理及计算、光学存储、光纤传感、光学显示和光通信。阅读本书,读者可以理解光学在当今信息技术革命中的关键作用;书中不仅给出了光存储和光通信的应用,还给出了其他物理和技术。

本书的写作以高年级本科生和一年级研究生为读者,是光信息处理和通信等课程的优秀教材,也适合自学使用。对于工作在光信息处理与通信领域的电子工程师、光学科研人员、应用物理科研人员等,本书是一本很有价值的资料。

Introduction to Information Optics

Francis T. S. Yu, Suganda Jutamulia and Shi Zhuo Yin.

ISBN: 0-12-774811-3, 978-0-12-774811-5.

Copyright ©2001 by Elsevier. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 981-2593-78-0, 978-981-259-378-8.

Copyright ©2006 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Printed in China by Publishing House of Electronics Industry under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由电子工业出版社与 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 在中国大陆境内合作出版。本版仅限在中国境内(不包括香港特别行政区及台湾)出版及标价销售。未经许可出口,视为违反著作权法,将受法律之制裁。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-1342

图书在版编目(CIP)数据

光信息技术及应用 / (美) 杨振寰 (Francis, T. S. Yu) 等著; 冯国英等译.

北京: 电子工业出版社, 2006.7

书名原文: Introduction to Information Optics

ISBN 7-121-02656-2

I. 光... II. ①杨... ②冯... III. 信息光学 IV. O438

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第070682号

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 王 崧

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 28.5 字数: 730千字

印 次: 2006年7月第1次印刷

定 价: 53.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

《光信息技术及应用》序

我们生活在一个信息爆炸的社会,信息技术正在改变着人类的生活。光学是人们获取信息的最基本和有效的手段之一,激光和全息的出现为记录和探测物体的信息提供了强有力的手段。与其他的信息处理手段相比,光信息处理具有并行性和大容量的特点。在信息的产生、采集、显示、传输、存储以及处理各个环节中,光信息技术的地位越来越重要,作用也越来越突出,越来越多的工程技术人员开始关心光信息技术的发展及工程应用。

光信息技术是近年来发展起来的一门新兴学科,其发展非常迅速。1948年全息术的提出,1955年光学传递函数的建立,1960激光的产生,以及傅里叶变换引入光学,新型光学材料的研制及应用,为光信息技术开辟了广阔的前景。光信息技术的理论体系日趋成熟和完善,并逐步渗透到国民经济各个领域,不断获得应用成果,并在一些领域逐渐进入实用阶段。

该书原作者 Francis T. S. Yu (杨振寰)教授是美国宾夕法尼亚州立大学电子工程系教授,本人曾有幸与他共事。杨振寰教授在光信息技术领域长期从事研究工作,在相关领域取得了许多重要的研究成果,在国际上有很高的学术地位,是公认的美国杰出学者。作为美籍华人科学家,杨振寰教授十分关注中国在光信息技术领域的发展,曾多次来华讲学,先后为我国培养了一批优秀的科技人才。这次,为了促进中国科学事业的发展,杨教授将他的新作委托给四川大学的科技工作者翻译,希望对中国在该领域的发展有所帮助和促进。

《光信息技术及应用》一书概括了近年来光信息技术方面的诸多研究方面的重要研究成果,有些就是作者领导的小组的科研成果。该书系统地阐述了光信息技术的基础理论和有关知识,讨论了数学处理方法,介绍了典型的应用,为读者展示了光信息技术今后的发展趋势。全书基本概念和物理图像清晰,内容深入浅出,循序渐进。各章精选了参考文献和习题,便于教学和自学,有益于培养学生的创新思维。该书涉及范围较广,所搜集的资料较多,有些技术资料可用做扩展视野的阅读材料,不同读者可以选择性地阅读。

目前,光信息技术尚处于蓬勃发展的阶段,新的构思和新的应用不断涌现,其进展可谓日新月异。面向未来的发展,很需要一本既对基本物理内涵有系统的、深入的、清晰的论述,又能及时总结前沿的发展成果和方向,并适当引入作者见解的著作,使读者在获得、巩固基础知识的同时,能够活跃思维,勇于创新。

中国科学院 院士
南开大学 教授

母国光

2006年6月20日

译者序

光哺育了世间的万物,照亮了五彩斑斓的现实空间,为人类世界带来了智慧和光明。光作为高速振荡和传播的电磁波,能以非常小的损耗在真空或光学介质中传输,也可以在光纤中传输;光比电子传输速度快、抗干扰能力强。光信息技术及应用方面的快速发展已经向人们展示了光子代替电子作为信息载体进行信息采集、传输、存储和处理的巨大优越性,尤其是光的巨大并行处理能力更是预示了其发展前景不可限量,促使人们利用和开发光的近乎无限的潜能和人的无穷无尽智能。20世纪理论物理科学领域出现的巨大突破为人类揭示了光学灿烂的前景和巨大的希望,点燃信息世界的大爆炸,并在新的世纪里开创人类文明和进步的新时代。光信息技术在光学工程、光学仪器检测、工业、农业、交通、医学、国防等各个领域有许多应用,并产生了深远的影响。

本书是杨振寰教授根据多年来从事光信息技术方面的教学和科研工作而写成的,全书内容十分丰富,在深度和广度上都超过了传统的光信息技术方面的教材。书中讲述了光的产生、衍射、处理、存储、显示等物理过程,把光学系统看成是信息的发射、传递、接收系统,引用通信和信息理论中的普遍概念和思想阐述光学现象,使光学和通信理论、信息科学相结合、相互渗透。在该书中对一些问题的分析和处理方法,反映了杨振寰教授以及合作者在光信息技术前沿研究领域所通常采用的分析和处理方法。全书对基本概念、定理和定律的讲解不仅生动清晰、通俗易懂,而且特别注重从物理上做出深刻的叙述。为了扩大学生的知识面,全书还列举了许多基本物理原理在各个方面的应用,以及物理学的一些最新成就。原书第一版发行后,深受广大读者欢迎。为此我们特将此书译成中文,以飨读者。承蒙杨振寰教授的信任和电子工业出版社马岚女士多方面的协调与大力支持,此书才能得以顺利出版。翻译本书的时候,正值 SPIE 第 50 届年会在美国圣地亚哥召开,本书原作者杨振寰教授和尹世琢教授是会议的主席,冯国英教授有幸参加了这次盛会,并就本书翻译中的一些问题与二位作者进行了探讨。对这本书的翻译、校对过程也是我们学习这本书的过程,欧群飞、马再如、韩敬华、邢德财、赵华君、李玮、高耀辉、王绍朋、施鹏程、杨华、王琼华、高勇、严斌宇等同志也参加了该书的翻译、校对工作。由于译者水平所限,错误疏漏之处在所难免,欢迎广大读者批评指正,电子邮件联系地址为 guoying_feng@yahoo.com.cn。

冯国英 陈建国 李大义 杨李茗

2006 年于成都

四川大学

作 者 序

随着通信、传感以及计算机科学技术的飞速发展,光信息技术作为一门专业学科,已大大超越传统傅里叶光学的范畴,而被赋予了更加广泛开阔的新使命。

我们编著此书的目的是希望为有志于物理、电机工程或其他相关光学领域的高年级本科生与研究生提供所需的相关资料,助其在严谨深刻地理解光信息技术基本概念与原理之外,还能够进一步把握这一学科最新前沿的工程与研究进展。我们也希望此书能够成为一本内容较新的参考书籍,对拓展在这一领域或相关方向工作的研究人员以及工程技术人员的眼界与思路有所裨益。

本书共分为 12 章。第 1 章讲述信息量的定义、熵的概念及其与光学的关系;第 2 章阐述光学信息处理的基本原理和应用;第 3 章描述通信领域中的光学信息处理;第 4 章介绍高速光开关的基本类型、工作原理以及在光学信息处理中的应用;第 5 章讲解常用的光学变换和相关应用;第 6 章探讨光学互连领域的最新进展,涉及垂直腔半导体激光器与有机薄膜光学波导的使用;第 7 章研究分析不同类型的光学模式识别系统;第 8 章参究大容量光学信息的存储;第 9 章诠释光计算的基本原理和工作方式;第 10 章概述光学信息在传感中的应用;在最后的第 11 章与第 12 章中,集中讨论实现光学信息高速显示的方法与光学神经网络的最新进展。

欣闻电子工业出版社准备将我们编著的此书介绍给中国科技界的同行们,特此向出版社以及本书的中文译者——四川大学冯国英教授,表示衷心的感谢,感谢他们的辛勤劳动和对国际学术交流的精诚支持,并愿借此机会向中国科技界学者致意。本书若能对中国光信息技术及应用领域的教学与科研有所助益,将是对我们莫大的鼓励。

本书势难免避免纰漏与不妥之处,我们对此深为战兢惶恐,敬冀勘正以臻完善为感。

杨振寰 陈树源 尹世琢

目 录

第 1 章 信息熵和光学	1
1.1 信息传输	1
1.2 信息熵	2
1.3 信道	5
1.4 带宽受限分析	11
1.5 信号分析	16
1.6 熵与信息交换	24
1.7 测量的准确性和可靠性	28
1.8 量子力学通道	32
参考文献	35
习题	36
第 2 章 光学信号处理	40
2.1 光的相干理论	40
2.2 相干和非相干照明下的处理	43
2.3 菲涅耳-基尔霍夫衍射积分和傅里叶变换	45
2.4 傅里叶变换处理器	47
2.5 图像的光学处理	53
2.6 处理过程的算法	61
2.7 光折变光学处理	68
2.8 非相干光处理	78
2.9 神经网络处理	85
参考文献	88
习题	89
第 3 章 光通信	100
3.1 采用光纤通信的出发点	100
3.2 光纤中的光传播	101
3.3 重要的元器件	113
3.4 光纤网络	119
参考文献	122
习题	123
第 4 章 光开关	125
4.1 光开关的性能指标	125

4.2 全光开关	126
4.3 高速电光开关:调制器	136
4.4 基于 MEMS 的光开关	146
4.5 小结	153
参考文献	154
习题	155
第 5 章 光学变换	158
5.1 惠更斯-菲涅耳衍射	158
5.2 菲涅耳变换	159
5.3 傅里叶变换	160
5.4 小波变换	160
5.5 物理小波变换	162
5.6 魏格纳分布函数	166
5.7 分数傅里叶变换	169
5.8 Hankel 变换	172
5.9 Radon 变换	173
5.10 几何变换	175
5.11 Hough 变换	180
参考文献	181
习题	182
第 6 章 光学互连	184
6.1 引言	184
6.2 聚合物波导	186
6.3 薄膜波导耦合器	192
6.4 薄膜光电探测器的集成	204
6.5 垂直腔表面发射激光器的集成	206
6.6 光时钟信号分布	209
6.7 聚合物波导光学总线结构	212
6.8 小结	214
参考文献	214
习题	216
第 7 章 光学模式识别	219
7.1 基本结构	219
7.2 用相关探测实现识别	225
7.3 多彩色模式识别	232
7.4 目标跟踪	234
7.5 用复合滤波器进行模式识别	238
7.6 模式分选	243

7.7 用光折变光学实现模式识别	248
7.8 神经模式识别	254
参考文献	261
习题	262
第8章 光学信息存储	270
8.1 数字信息存储	270
8.2 光学存储密度的上限	270
8.3 光学存储介质	271
8.4 位图光学存储	276
8.5 全息光学存储	280
8.6 近场光学存储	285
8.7 小结	287
参考文献	287
习题	289
第9章 光学计算	294
9.1 引言	294
9.2 并行光逻辑和结构	295
9.3 计数制与基本运算	302
9.4 并行带符号位运算	309
9.5 数值转换	337
9.6 光学实现	340
9.7 小结	347
参考文献	348
习题	353
第10章 光学传感	355
10.1 引言	355
10.2 光纤传感器分类概述	355
10.3 分布式光纤传感器	366
10.4 小结	380
参考文献	380
习题	382
第11章 光信息显示	384
11.1 引言	384
11.2 声光空间光调制器的信息显示	384
11.3 三维全息显示	393
11.4 电光空间光调制器的信息显示	399
11.5 小结	411
参考文献	411

习题	413
第 12 章 光网络	414
12.1 背景	414
12.2 光网络单元	416
12.3 光网络的设计	431
12.4 光网络的应用和未来发展	436
参考文献	441
习题	443

第1章 信息熵和光学

光不仅是支持生命的重要能量,也是生活中的重要信息源。可以想像,如果没有光,就不可能有我们现在的文明。更重要的是,人类不仅拥有发达的大脑,同时也拥有一双敏锐的眼睛(尽管称不上完美),这就是人类优于地球上其他物种的原因。毫无疑问,没有眼睛,人类不可能进化到现在的形式。有了光,人类才能够寻找食物、欣赏艺术和探索未知。因而,从抽象的艺术表现到有效的科学应用,光(light),更准确地讲是光学(optics),为我们提供了很有价值的信息资源。

本章讨论信息熵和光学的关系。我们的目的是概述可用于光学的一些基本原理,而不是进行详细探讨。信息熵(entropy information)这一概念并不是光学专家首先提出来的,而是由那些以数值计算为主要研究方向的电子工程师提出的。然而,从信息熵的最早发现开始,光学领域的应用兴趣就从来没有间断过。随着光通信、信号处理和计算机技术以及其他相关领域的发展,光学和信息熵之间的关系变得意义深远。

1.1 信息传输

从表面上看,似乎大家已掌握信息(information)一词的含义,事实上却未必如此。实际上,可以从如何使用信息的角度来定义信息。从数学形式上来讲,信息熵是建立在概率理论的基础上的,换句话说,没有概率理论,就没有信息熵。

一个信息传递系统可以用图 1.1 所示的方框图来描绘。例如,一条消息就是以一种编码书写字符的方式发送的信息源。将这组书写字符记录在一张纸上,这还不够,仅有使用可见光(发射器)照亮它,才能把信息发射出去,显然,在这里光是信息的载体。当光从书写字符反射进入你的眼睛(接收器),就产生了一个适当的解码(翻译)过程,即用户(大脑)对字符进行辨认(解码)。这个简单例子表明,只有适当的编码过程是不够的,还要有一个恰当的解码过程。例如,给你看一张外国的报纸,即使光学信道是完美的(即没有噪声),你也未必能对其语言进行解码,因为一个合适的解码过程需要提前知道编码表,例如关于外文字符的知识。可见,解码过程也可以认为是一个识别过程。实际上,可以用空间和时间信息来描绘信息传输。上面的书写字符传输的例子显然是空间信息传输。另一方面,如果书写的语言用编码光脉冲传输,那么这种语言必须进行特定(时间)的编码。例如,当通过光纤传输时,它代表了一个时间上的通信通道。显然,在时间上编码的语言发送到使用者之前,需要在接收端进行时域解码。电视节目演播就是一个单向时空传输的例子。在信息传输过程中,时空信息可以相互转化。电视信号传输是将空间信息转化为时间信息再进行传输的典型例子。电影的音轨则是将时间信息转化为空间信息再进行传输的一个例子。

信息传输有两条基本准则,一个是维纳(Wiener)^[1.1, 1.2]提出的,另一个则是香农(Shannon)^[1.3, 1.4]提出的。虽然维纳和香农研究同一个问题,但其思想有根本的区别。维纳工作的意义在于,如果一个信号(信息)被一些物理原因(如噪声、非线性畸变)扰动后,它还可能恢复为扰动前的样子。因此,维纳提出相关检测、预测优化及其他思想。香农则更进了一步,他指出,若对信号进行适当编码,则可优化其传输。这就是说,在信号传输之前和之后,对所传输的信号进行处理。

换句话说,对信号进行适当编码即可抵抗信道内的干扰。这正是香农提出信号的信息测量、信道容量和信号编码处理的原因。事实上,香农理论的核心是信道的有效使用。

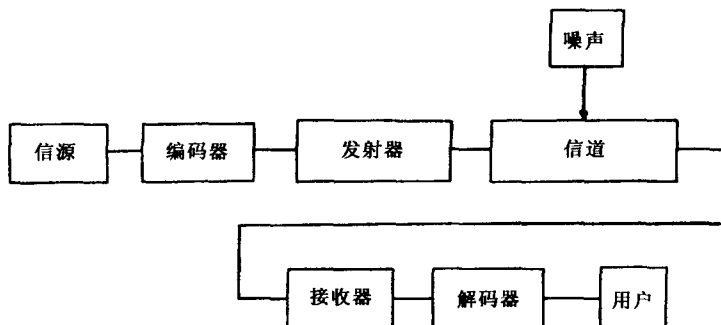


图 1.1 通信系统模块示意图

香农提出的基本定理是他在该领域工作中最出色的成果,这个定理可表述如下:给定一个稳定的、有限容量的信道,信息容量为 C ,如果这个信号的二进制信息传输速率 R (时空均可)小于 C ,则存在一个信道编码和解码过程,使得每个信息数据传输的误差率任意小。相反,若信息传输速率 R 大于 C ,则不存在一个能满足要求的编码和解码过程,即信息传输的误差率不能任意小。换句话说,信道中存在的随机扰动本身并不能限制传输的准确性。更准确地说,为了获得任意高的传输精度,传输速率就会受到限制。

作为本节的总结,我们再次指出两条通信准则之间的差别:维纳认为,要传输的信号在被噪声扰动后是可以通过信号处理来还原的;香农建议在信号通过信道传输之前和之后对信号进行处理。他们关注的基本目标相同,即忠实地再现原始信号。

1.2 信息熵

我们现在定义信息测度,它是香农信息理论发展中最重要方面。首先简单考察在一个信道上的离散输入消息集合 $A = \{a_i\}$ 和输出消息集合 $B = \{b_j\}$,如图 1.2 所示。如果 a_i 是信道的输入事件,而 b_j 是相应的输出事件,则接收事件 b_j 关于给定输入事件 a_i 的信息测度可以写成

$$I(a_i; b_j) \triangleq \lg \frac{P(a_i/b_j)}{P(a_i)} \text{ 位} \quad (1.1)$$

其中 $P(a_i/b_j)$ 是基于输出事件 b_j 的输入事件 a_i 的条件概率, $P(a_i)$ 是输入事件 a_i 的先验(priori)概率,这里 $i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N$ 。

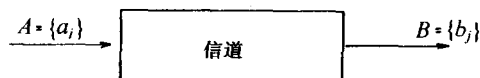


图 1.2 一个输入-输出信道

根据联合概率的对称性,可知

$$I(a_i; b_j) = I(b_j; a_i) \quad (1.2)$$

换言之,输出事件 b_j 关于输入事件 a_i 的信息传输总量等于输入事件 a_i 关于输出事件 b_j 的信息总量。显然,如果输入和输出事件是统计独立的,也就是说,如果 $P(a_i, b_j) = P(a_i)P(b_j)$,那么 $I(a_i; b_j) = 0$ 。

此外,如果 $I(a_i; b_j) > 0$, 则 $P(a_i, b_j) > P(a_i)P(b_j)$, 也就是说存在一个更大的关于 a_i 和 b_j 的联合概率。如果 $I(a_i; b_j) < 0$, 则 $P(a_i, b_j) < P(a_i)P(b_j)$, 这就是说存在一个更小的关于 a_i 和 b_j 的联合概率。

作为条件概率 $P(a_i/b_j) \leq 1$ 和 $P(b_j/a_i) \leq 1$ 的结果, 我们知道

$$I(a_i; b_j) \leq I(a_i) \quad (1.3)$$

和

$$I(a_i; b_j) \leq I(b_j) \quad (1.4)$$

其中,

$$I(a_i) \triangleq -\lg P(a_i)$$

$$I(b_j) \triangleq -\lg P(b_j)$$

$I(a_i)$ 和 $I(b_j)$ 被定义为事件 a_i 和事件 b_j 各自的输入和输出的自信息。换言之, $I(a_i)$ 和 $I(b_j)$ 分别代表了事件 a_i 和事件 b_j 的输入输出信道的信息量。由此得知, 当且仅当 $P(a_i/b_j) = 1$ 时事件 a_i 和事件 b_j 的互信息等于事件 a_i 的自信息, 那么

$$I(a_i; b_j) = I(a_i) \quad (1.5)$$

注意, 如果式(1.5)对所有的 i 都成立, 也就是对输入集合成立, 那么信道是无噪声的。然而, 如果 $P(b_j/a_i) = 1$, 那么

$$I(a_i; b_j) = I(b_j) \quad (1.6)$$

如果式(1.6)对所有的输出集合是成立的, 那么信道是确定的。

总结这一段, 我们注意到如前所定义的信息测度很容易延伸到更高阶的乘积空间, 例如

$$I(a_i; b_j/c_k) \triangleq \lg \frac{P(a_i/b_j c_k)}{P(a_i/c_k)} \quad (1.7)$$

既然信息测度可以由集合平均来描述, 在输入端提供的信息平均值可以写成

$$I(A) \triangleq -\sum_A P(a) \lg P(a) \triangleq H(A) \quad (1.8)$$

上式中的求和式是对输入集合 A 进行的。

类似地, 输出端给出的自信息平均值可以写成

$$I(B) \triangleq -\sum_B P(b) \lg P(b) \triangleq H(B) \quad (1.9)$$

这两个方程在本质上与统计热力学中的熵方程(entropy equation)具有相同的形式, $H(A)$ 和 $H(B)$ 经常用来描述信息熵。以后将会看到, 实际上 $H(A)$ 和 $H(B)$ 提供了信息熵和物理熵之间更深层次的联系。值得注意的是, 从通信理论的角度来看, 熵 H 是表示不确定性的值, 而从统计热力学的角度来看, 熵 H 是表示无序程度的值。

另外, 我们知道

$$H(A) \geq 0 \quad (1.10)$$

其中, $P(a)$ 总是一个恒为正的量。式(1.10)中等号成立的条件是 $P(a) = 1$ 或 $P(a) = 0$ 。因而, 可得出

$$H(A) \leq \lg M \quad (1.11)$$

其中 M 是输入事件的数量。该等式对等概率输入事件成立, 即 $P(a) = 1/M$ 。很容易将集合平均的概念推广到条件熵中:

$$I(B/A) \triangleq -\sum_B \sum_A p(a, b) \lg p(b/a) \triangleq H(B/A) \quad (1.12)$$

内积集合 AB 的熵可以写为

$$H(AB) = -\sum_A \sum_B p(a, b) \lg p(b/a) \quad (1.13)$$

因而, 可得到

$$H(AB) = H(A) + H(B/A) \quad (1.14)$$

$$H(A/B) = H(B) + H(A/B) \quad (1.15)$$

考虑到 $u \leq u-1$, 还可得到

$$H(B/a) \leq H(B) \quad (1.16)$$

$$H(A/B) \leq H(A) \quad (1.17)$$

其中, 当且仅当 a 和 b 统计独立时上式中的等号成立。

现在把注意力转到平均互信息的定义。首先考虑条件平均互信息:

$$I(A; b) \triangleq \sum_A p(a/b) I(a; b) \quad (1.18)$$

尽管输入事件和输出事件的互信息可以为负, 即 $I(a; b) < 0$, 但平均条件互信息绝对不可为负:

$$I(A; b) \geq 0 \quad (1.19)$$

当且仅当事件 A 与 b 统计无关时, 即对所有 a 有 $p(a/b) = p(a)$ 时, 上式中的等号成立。

对式(1.19)取集合平均, 平均互信息定义如下:

$$I(A; B) \triangleq \sum_B p(b) I(A; b) \quad (1.20)$$

式(1.20)可写为

$$\begin{aligned} I(A; B) &\triangleq \sum_B \sum_A p(a; b) \lg \frac{p(a/b)}{p(a)} \\ &= \sum_A \sum_B p(a; b) I(a; b) \end{aligned} \quad (1.21)$$

再一次可得到

$$I(A; B) \geq 0 \quad (1.22)$$

当且仅当 a 和 b 独立时, 上式中的等号成立。更进一步, 根据 $I(a; b)$ 的对称性, 可得到

$$I(A; B) = I(B; A) \quad (1.23)$$

从式(1.3)和式(1.4)同样可得到

$$I(A; B) \leq H(A) = I(A) \quad (1.24)$$

$$I(A; B) \leq H(B) = I(B) \quad (1.25)$$

这意味着互信息(信息的传输量)既不能大于输入端的信息熵, 也不能大于输出端的信息熵(提供的信息量)。可以看出, 如果式(1.24)取等号, 则信道为无噪声的信道; 另一方面, 如果式(1.25)取等号, 则信道是确定的。

因为式(1.13)可写为

$$H(AB) = H(A) + H(B) - I(A; B) \quad (1.26)$$

可得到

$$I(A; B) = H(A) - H(A/B) \quad (1.27)$$

$$I(A; B) = H(B) - H(B/A) \quad (1.28)$$

其中, $H(A/B)$ 代表信道中的信息损失量(如因噪声造成)或信道疑义度,它是用于确定信道内噪声扰动所需的信息平均量。 $H(B/A)$ 称为该信道的噪声熵。

作为本节的小结,信息熵能很容易地推广到连续乘积空间,如

$$H(A) \triangleq - \int_{-\infty}^{\infty} p(a) \lg p(a) da \quad (1.29)$$

$$H(B) \triangleq - \int_{-\infty}^{\infty} p(b) \lg p(b) db \quad (1.30)$$

$$H(B/A) \triangleq - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(a, b) \lg p(b/a) da db \quad (1.31)$$

$$H(A/B) \triangleq - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(a, b) \lg p(a/b) da db \quad (1.32)$$

和

$$H(AB) \triangleq - \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(a, b) \lg p(a, b) da db \quad (1.33)$$

其中, p 是概率密度分布。

1.3 信道

光通信信道可以由一个输入-输出框图来表示,输入事件 a 到输出事件 b 的转换可用信道条件概率 $p(b/a)$ 描述。因此,输入-输出条件概率 $P(B/A)$ 描述了信道中的随机噪声扰动。

通常根据输入-输出集合类型可将信道分为离散的或连续的。如果信道的输入和输出是离散事件(离散空间),则称该信道为离散信道。但是,如果信道的输入和输出都是用连续事件来代表的,则称该信道为连续信道。然而,一个信道可以是离散的输入和连续的输出,或正好相反。相应地,称该信道称为离散-连续信道或连续-离散信道。

同样,可以将离散和连续通信信道的术语推广到空间域和时间域中。对光通信的信道而言,这个概念尤为重要。

实际上,一个信道可以有多个输入和多个输出。如果一个信道只有1个输入端和1个输出端,则为单通信道。如果一个信道有两个输入端和两个输出端,则为双通信道。同样,一个信道可以有 n 个输入终端和 m 个输出终端。

由于一个信道是用输入-输出信道条件概率 $P(B/A)$ 来表征的,所以如果条件概率分布对所有顺序输入事件和输出事件都相同,则该信道为无记忆信道。如果条件概率分布随以前的(无论是在输入端或输出端)事件而改变,则该信道为有记忆信道。因此,若这种记忆是有限的,即条件概率依赖于之前的有限个事件,则该信道为有限记忆信道。如果条件概率分布依赖于一个随机过程,而该随机过程是非稳定的,则该信道为非稳定信道。类似地,如果条件概率依赖的随

机过程是稳定的,则该信道为**稳定信道**。简言之,一个信道可以完全由它的条件概率分布特性来表述,例如**离散非稳定记忆信道**。

由于对各种不同信道的详细讨论超出了本章的范围,下面将讨论两种最简单但很重要的信道。

1.3.1 无记忆离散信道

为简单起见,设信道的输入信号为

$$\alpha^n = \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_n$$

相应的输出信号为

$$\beta^n = \beta_1 \beta_2 \cdots \beta_n$$

其中, α_i 和 β_j 分别代表输入事件 A 和输出事件 B 中的任意一个。

由于无记忆信道的条件概率不依赖于先前的事件,复合条件概率可写为

$$P(\beta^n/\alpha^n) = P(\beta_1/\alpha_1)P(\beta_2/\alpha_2) \cdots P(\beta_n/\alpha_n)$$

这样,输出信号 β^n 的联合概率为

$$P(\beta^n) = \sum_{A^n} P(\alpha^n)P(\beta^n/\alpha^n)$$

这里的求和是对整个内积空间 A^n 进行的。

从信息熵测度的角度看,输入序列 α^n 和输出序列 β^n 之间的平均互信息可以写为

$$I(A^n; B^n) = H(B^n) - H(B^n/A^n) \quad (1.34)$$

其中, B^n 为输出内积空间, $H(B^n)$ 可以写为

$$H(B^n) = -\sum_{B^n} P(B^n) \lg P(B^n)$$

条件熵 $H(B^n/A^n)$ 可以写为

$$H(B^n/A^n) = -\sum_{A^n} \sum_{B^n} P(\alpha^n)P(\beta^n/\alpha^n) \lg P(\beta^n/\alpha^n) \quad (1.35)$$

由于 $I(A^n; B^n)$ 表示当给定 n 个输入事件时相应的 n 个输出事件提供的信息总量,所以 $I(A^n; B^n)/n$ 表示每个事件的互信息量。如果信道为无记忆信道,则 $I(A^n; B^n)/n$ 只是 $P(\alpha^n)$ 和 n 的函数。因此,对一个可能的概率分布 $P(\alpha^n)$ 和长度 n ,信道容量应为 $I(A^n; B^n)/n$ 的最大值,即

$$C \triangleq \max_{P(\alpha_n), n} \frac{I(A^n; B^n)}{n} \quad \text{比特/事件} \quad (1.36)$$

同样需要指出的是,如果输入事件是统计独立的(如来源于无记忆信息源),则式(1.36)的信道容量为

$$C \triangleq \max_{P(\alpha_n)} I(A; B) \quad \text{比特/事件} \quad (1.37)$$

需要强调的是,信道容量的评价并不是那么简单的问题,很可能相当麻烦。

1.3.2 连续通道

当且仅当输入集合和输出集合都用连续欧几里得空间表示时,信道才是连续的。为简单起见,我们仅讨论一维情况,很容易将其推广到高维空间中。

再次用 A 和 B 表示输入和输出集合,但这次 A 和 B 指连续的随机变量。同样值得注意的

是,一个连续信道既可以是时间离散的,也可以是时间连续的。我们先讨论时间离散的信道,然后再讨论时间连续的信道。

与离散信道一样,当且仅当连续信道的条件概率密度 $p(b/a)$ 对所有输入-输出事件序列对都相同时,该连续信道才能称为无记忆信道。当且仅当条件概率密度 $p(b/a)$ 依赖于输出与输入随机变量差 $b - a$ 时,无记忆连续信道受到加性噪声(additive noise)的扰动,即

$$p(b/a) = p(c) \quad (1.38)$$

其中, $c = b - a$ 。

这样,对加性信道噪声,条件熵 $H(B/a)$ 可表述为

$$\begin{aligned} H(B/a) &= - \int_{-\infty}^{\infty} p(b/a) \lg p(b/a) db \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} p(c) \lg p(c) dc \end{aligned} \quad (1.39)$$

可以看到, $H(B/a)$ 是独立于 a 的,类似于信道对所有输入都是等效一致的。平均的条件熵为

$$\begin{aligned} H(B/a) &= \int_{-\infty}^{\infty} p(a) H(B/a) da \\ &= - \int_{-\infty}^{\infty} p(c) \lg p(c) dc = H(B/a) \end{aligned} \quad (1.40)$$

在计算信道容量时,应先计算平均互信息 $I(A; B)$,然后在条件 $p(a)$ 的约束下计算 $I(A; B)$ 的最大值。

从 $I(A; B) = H(B) - H(B/A)$ 中可以看出,如果使 $H(B)$ 最大,则 $I(A; B)$ 也最大。然而 $H(B)$ 不能无限大,因为 $H(B)$ 永远受到物理条件的限制,即有效功率的限制。这个功率限制所对应的输入信号的均方差为

$$\sigma_a^2 = \int_{-\infty}^{\infty} a^2 p(a) da$$

不失一般性,我们假定加性噪声的平均值为零,即

$$\bar{c} = \int_{-\infty}^{\infty} c p(c) dc = 0$$

则输出信号的均方涨落可以写为

$$\sigma_b^2 = \int_{-\infty}^{\infty} b^2 p(b) db$$

由于 $b = a + c$ (即信号加噪声),可以得到

$$\sigma_b^2 = \sigma_a^2 + \sigma_c^2 \quad (1.41)$$

其中,

$$\sigma_c^2 = \int_{-\infty}^{\infty} c^2 p(c) dc$$

从前面的方程可以看出,对输入信号的均方差设置一个上限等同于对输出信号的均方差设置一个上限。因此,对一个给定的均方差 σ_b^2 ,从 $p(b)$ 中求出的相应熵也存在一个上限: