

高等院校光信息科学与技术专业系列教材

光通信导论

Introduction to Optical Communication

吴重庆 编著

Wu Chongqing

清华大学出版社



内 容 简 介

作为光信息科学与技术的重要分支,光通信已成为当代通信的主流,也是当今最成熟、最有影响力的光信息技术,形成了自身完整的理论体系和技术体系,带动了激光器、光检测、光无源器件、光放大、全光信号处理等各类相关技术的发展,并影响到光存储技术、光显示技术以及量子光学的发展。

本书全面介绍了光通信基础知识,涵盖了信息论与通信原理的基本知识、基本光通信系统,以及电与光复用技术等内容。除绪论外全书共8章,第1、2章是信息与通信的基础知识;第3~5章是基本光纤通信系统的三个组成部分:光发射、光接收和传输光路;第6章介绍了SDH同步复用体系与异步电复用技术;第7章介绍了光放大的物理知识,并为第8章做好准备,第8章是光路复用技术。本书强调技术的先导性,并把光通信中最基本的概念和最重要技术作为重点,以便学生在今后较长时期运用这些知识和概念去适应技术的新变化。

本书站在比较高的角度看待具体技术的演进,很多内容是作者的科研经历,语言浅显易懂,适合光信息科学与技术、光学工程、通信和电子科学技术等专业的高年级学生与研究生使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

光通信导论/吴重庆编著. —北京:清华大学出版社,2008.1

(高等院校光信息科学与技术专业系列教材)

ISBN 978-7-302-15688-8

I. 光… II. 吴… III. 光通信—高等学校—教材 IV. TN929.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第105491号

责任编辑:陈国新 顾冰

责任校对:李建庄

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19.5 字 数:465千字

版 次:2008年1月第1版 印 次:2008年1月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:29.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:022281-01

出版说明

INTRODUCTION

光信息科学与技术既是信息科学与技术的重要组成部分,又是 21 世纪光子学的重要应用,它涵盖了光信息的产生、检测、处理、传输、存储以及显示等诸多方向。在过去 30 年中,光子学有了巨大的进步,光电子成为我国重要的产业支柱,光通信技术、平板显示技术、光电检测技术、激光加工技术、光盘存储技术都先后形成了独立的高技术产业,并渗透到国防、医疗、能源、交通等各行各业。因此对于高层次人才的需求极为迫切。同时,光信息科学与技术虽然与电子科学技术有天然的联系,但它是一个平行于电子科学技术的独立的信息科学与技术,对于人才的知识结构、实践能力以及科学素养有独特的要求。我国自 1999 年后,有近百所大学设立了光信息科学技术的本科专业,光学工程、光学、物理电子学以及通信工程、凝聚态物理等相关学科也迅速发展。为了适应这个专业人才培养的需要,清华大学出版社特组织出版了这套光信息科学与技术系列教材。

鉴于光信息科学与技术本身发展非常迅速,知识更新快,而本科生主要是打好专业基础,因此本系列教材在选材、框架结构、讲授方法等都十分注意处理好当前最新知识和长远应用的基础知识的关系,并且注意本套丛中各个教材的搭配与衔接,以便读者对于光信息科学与技术专业有一个全面的认识。

希望本系列教材能够为我国光电子产业的人才培养与技术进步做出贡献。

清华大学出版社

前言

PREFACE

光信息科学与技术是当今最活跃的科学技术领域之一,也是最活跃的信息技术领域之一。如果说 20 世纪是电子时代,那么 21 世纪将是光子时代。与电子技术相比,光信息技术已经在信息检测、信息传输与信息显示等领域占据上风。在信息处理和信息存储方面,虽然光还不及电,但随着最新物理原理的引入,如量子光学、慢光以及 T 赫兹波等,发展势头迅猛,大有与电并驾齐驱之势。

作为光信息科学与技术的一个重要分支和信息社会的主要支柱之一,光信息通信已经成为当代通信的主流。相对于光信息技术的其他分支而言,光信息传输技术是当今最成熟、最有影响力的技术。它不仅形成了自身完整的理论体系和技术体系,同时由于高速、大容量的光通信有着巨大的市场需求,由此带动了激光器制造、光检测、光无源器件、光放大、全光信号处理等各类相关技术的发展。同时,还将影响到光存储技术、光显示技术以及量子光学的发展。因此,学习光通信的理论与技术,对于全面掌握光信息科学与技术是至关重要的。

本书作为光信息科学与技术专业系列教材之一,不仅介绍了光通信的有关内容,而且还涵盖了信息论与通信原理的基本知识,以便使没有学过信息论和通信原理的读者能够具备这方面的基础知识。鉴于本课程是一门以技术为先导的课程,一方面强调技术先导性的特点,不断吸收光通信的最新前沿技术,调整技术新突破对于知识结构的影响,但另一方面仍然把光通信中最基本的概念和最重要技术方法作为重点,站在比较高的角度来看待具体技术的演进,以便读者在今后较长时期都能够运用这些知识和概念,适应今后技术的新变化。

本书是根据作者十年来的教学讲义写成,许多内容是自己的科研经历,这是其他教材内所没有的。同时,根据学过本专业的研究生在后续的学习中的体会,补充了一些实际内容,也澄清了一些模糊概念,可能会对学生的阅读与理解有帮助。本书吸收了大量博士、硕士研究生的工作,包括陶滢、董晖、刘爱明、傅松年、李亚捷、魏斌、程木、王拥军、李政勇等的工作,这里就不一一列举了。同时,本书还要感谢新加坡南洋理工大学网络研究中心提供了许多实验条件,感谢沈平教授和吕超教授的支持。

作 者

2007 年 10 月

目录

CONTENTS

第 0 章 绪论	1
第 1 章 信息与信号	3
1.1 信息的基本知识	3
1.1.1 信息的基本概念	3
1.1.2 信息的度量	5
1.1.3 信息源	8
1.1.4 光学信息	9
1.1.5 信息系统和信道	9
1.2 信号的概念	11
1.2.1 信号的物理性	12
1.2.2 信号的信息性	16
1.3 数字信号	17
1.3.1 一般概念	17
1.3.2 码元函数	18
1.3.3 数字信号的频谱	22
1.3.4 同步	24
1.3.5 起始位	25
1.3.6 包	25
1.4 噪声	26
1.4.1 干扰	27
1.4.2 狭义噪声	28
1.4.3 噪声的表示	29
习题 1	32
第 2 章 光通信的一般概念	33
2.1 通信与通信系统的概念	33

2.1.1	通信的一般概念	33
2.1.2	通信系统的基本组成	35
2.1.3	通信的基本要求	37
2.2	光纤通信的特点	42
2.2.1	光通信与光纤通信	42
2.2.2	光信号的基本特征	42
2.2.3	光纤信道的基本特性	51
2.3	光纤通信系统的基本组成	53
习题 2	56
第 3 章 传输光路		57
3.1	光纤和光缆	58
3.1.1	光纤的一般理论	58
3.1.2	通信用光纤的结构和制造	61
3.1.3	光缆的结构	66
3.1.4	光纤中光信号的传输特性	67
3.2	无源光器件	82
3.2.1	光纤连接器	82
3.2.2	光纤耦合器	85
3.2.3	波长相关器件	87
3.2.4	偏光器件	92
3.2.5	功率相关器件	97
3.2.6	自聚焦透镜与光纤准直器	98
3.2.7	光开关	101
第 3 章附录	104
附录 A	光纤新标准	104
附录 B	关于脉冲上升时间和下降时间的证明	107
习题 3	110
第 4 章 光发射机		111
4.1	光发射机使用的光源	112
4.1.1	通信光源的要求	112
4.1.2	半导体激光器	113
4.1.3	发光二极管	122
4.2	光的调制	124
4.3	直接调制光发射机	126
4.3.1	激光器的驱动电路	126

4.3.2	激光器的控制电路	132
4.3.3	光电集成模块	135
4.4	外调制	136
4.4.1	材料的各向异性	136
4.4.2	电光效应	140
4.4.3	电光调制器	144
4.5	线路编码	146
第4章附录		150
附录A	MAX3669 驱动器简介	150
附录B	NTC(负温度系数)热敏电阻常识及应用	151
习题4		152
第5章	光接收机与基本光纤数字通信系统	153
5.1	光检测器	154
5.1.1	光检测的物理基础	155
5.1.2	PIN 半导体光电二极管	156
5.1.3	雪崩光电二极管	157
5.2	光接收机的性能要求	160
5.2.1	光接收机的误码率	161
5.2.2	光接收机的其他性能	163
5.3	光接收机前置放大部分	164
5.3.1	光前端接口	164
5.3.2	光接收机的前置放大电路	165
5.3.3	光电集成接收组件	170
5.4	光接收机的其他部分	171
5.4.1	主放大部分	172
5.4.2	数字信号恢复部分	175
5.4.3	译码部分	178
5.5	基本光纤数字通信系统	180
5.5.1	概述	180
5.5.2	功率限制系统的中继距离	181
5.5.3	色散限制系统的中继距离	182
第5章附录		184
附录A	S3026	184
习题5		185

第 6 章 基于电复用的光纤通信系统	187
6.1 复用技术概述	187
6.2 电复用技术和时分复用方式	189
6.2.1 电复用的基本方式	189
6.2.2 时分复用的基本方式	195
6.3 同步数字体系 SDH	197
6.3.1 基本速率体系	199
6.3.2 SDH 的帧结构	201
6.3.3 STM-1 的同步复用	203
6.3.4 时钟同步与指针调整	206
6.4 异步时分复用技术	208
6.4.1 概述	208
6.4.2 帧结构	210
6.4.3 异步通信的同步	220
第 6 章附录	223
附录 A SDH 的发展历史	223
习题 6	223
第 7 章 光放大	225
7.1 光放大器的原理和一般特性	225
7.1.1 概述	225
7.1.2 光放大器的性能指标	227
7.1.3 放大器应用中的分类	230
7.2 半导体光放大器	232
7.2.1 载流子和光子的速率方程	233
7.2.2 SOA 在准连续光时的放大特性	236
7.2.3 SOA 的瞬态放大特征	240
7.2.4 SOA 的光-光相互作用	245
7.2.5 SOA 反射对放大特性的影响	250
7.3 掺铒光纤放大器	253
7.3.1 EDFA 的原理与结构	254
7.3.2 EDFA 的增益特性	257
7.3.3 EDFA 的瞬态特性与多波长放大特性	261
7.4 光纤拉曼放大器	263
第 7 章附录	265
附录 A 光放大器的发展历史	265

习题 7	266
第 8 章 光路复用技术	267
8.1 概述与技术体制	267
8.1.1 光路复用技术的驱动力和复用方式	267
8.1.2 密集波分复用的技术体制	269
8.2 光通道层技术	274
8.2.1 光发射机与光机收机	274
8.2.2 波长适配	276
8.3 光复用段层技术	282
8.3.1 波分复用/解复用器	282
8.3.2 其他波分复用器件	285
8.4 光传输层技术	286
8.4.1 光纤	286
8.4.2 光纤放大器	288
习题 8	290
缩略词索引	291
参考文献	295
后记	296

作为光信息科学与技术的一个重要分支,光纤通信已经成为当代通信的主流,是信息社会的主要支柱之一。光纤通信就是以光作为信息载体、以光纤作为传输介质的光信息传输技术。由于它的快速发展,改变了通信产业和光信息科学与技术的面貌,成为整个光信息领域的领头羊。

相对于光信息技术的其他领域而言,光纤传输技术是当今最成熟、最有影响力的技术。它不仅形成了自身完整的理论体系和技术体系,同时,由于高速、大容量的光通信技术的市场发展需求,以及在光域中的灵活组网技术的需求,带动了激光器制造技术、光检测技术、光无源器件、光放大、全光信号处理等各类相关技术的发展。同时,还将影响到光存储技术、光显示技术以及量子光学的发展。因此,学习光通信的理论与技术,对于全面掌握光信息科学与技术是至关重要的。

人们在通信中使用某些技术进行信息交换时,这些技术在约定上是比较随意的。尽管通信科学也存在不以人们意志为转移的客观规律性,但人们常常为了达到商业化目的和受当时技术水平的限制,并不严格按照通信科学的规律办事。或者说,人们对于通信的科学规律的认识还是比较浮浅的,通信还是处于以技术为先导的阶段。一般来说,这门课程并不按照定义(概念)一定律一定理一推论的基本理论体系脉络去演绎,概念间的定量关系往往不很重要,而更强调它的技术体系以及解决问题的技术方案。当一种技术发展了或者一种器件有了突破,就可能导致整个技术体系发生重大变化。而且,原先使用的概念和术语,也不知不觉地发生了变化。因此,在学习中的一方面要注意正确地使用一些术语去表述概念,另一方面也不一定要特别拘泥于术语。因为,许多术语都是习惯用法,在不同的场合和不同的历史阶段有不同的含义,希望读者能够结合实际情况灵活的掌握。这表明,在学习光通信原理的时候,学习方法与物理学有极大的不同。这一点读者务必要有清醒的认识。

考虑到光信息科学与技术专业的学生,此前很少接触到有关信息科学和通信原理的知识,所以本书在选材上,特别增加了信息与通信的基础。其中第1章特别加强了信息与信号等基本概念的介绍。这部分知识,对于整个光信息科学与技术都是十分有用的,希望大家能够联系光信息科学与技术的其他课程的内容,更进一步深刻的加以领会。第2章讲述了通信原理和光通信系统的知识。一方面光通信系统作为整个通信系统的一部分,离不开整个通信系统的知识。只有将光通信放在完整的通信系统的全过程中,才能正确的理解光通信的发展和演变。另一方面,光通信系统作为一个系统,基本上是以元件的外特性为出发点来

研究系统的性能的。尽管本书也介绍一些元器件内在机理的知识,例如介绍激光器、光电二极管、半导体光放大器等元件的内部机理知识,但这些问题应该由其他课程去解决。而本书更着眼于如何利用这些器件组成一个性能全面同时能够满足用户需求的低成本系统。

从元件到部件再到系统,然后再进一步组成网络,主要依靠机械装配、粘接、电气连接、光路连接等技术手段,而其中电气连接和光路连接是最重要的。每一个元件、部件或者子系统,都可以看成是一个系统,系统最重要的特性是它的输入信号与输出信号的关系。学习光纤通信系统,就是要学习它的元件、部件的特性通过什么样的连接如何影响整个系统的特性。基本上可以分为正问题和逆问题两种。正问题是已知内部结构去求它的外部特性,即所谓分析的方法;逆问题是已知系统的外部特性,如何去获得合理的结构,即所谓综合的方法。这两种方法在书中会不断地交替使用。

在从元件到部件再到系统然后再进一步组成网络的过程中,我们虽然很重视局部性能对于整体性能的影响,但是,如果描述局部性能的公式过于复杂,将造成整体性能的描述过于复杂,得不出什么清楚的概念。因此在对待这些公式的时候,应该重视对结果影响大的那些因素,忽略那些影响小的因素。这要求除了要记住公式的本身之外,还要知道公式中一些变量的数量级,以便确定在同一个公式中哪些变量起主要作用或者在什么情况下起主要作用。反之,得到一个公式的精确解不一定是本书的重点,而能够迅速地估算出解的大概结果,以便给出定性的关系才是至关重要的。

以技术为先导的课程相关联的另一个特点是,经济因素在整个课程中起着重要的作用。一个技术方案只有当它在技术上可行,经济上合理的时候,才会被采纳从而得到发展。虽然书中没有明确说明某个产品的价格,但是价格因素的影响是无处不在的。价格因素的变动引起技术方案的变化以至于技术体制的变化,这样的实例是屡见不鲜的。请读者学习的时候,脑子里要多一根价格因素的弦,不仅在学习中便于理解,而且在未来的工作中也是很重要的。

本书的结构为:第1章是信息与信号的基础知识,主要是对大家熟悉的信息与信号的概念加以精确化;第2章为通信的基本概念以及光通信的基本概念,目的是对于光通信的概念有一个全面的了解;第3~5章是一个基本的光纤通信系统的三个基本组成部分:光发射、光接收和传输光路,主要讲授最基本的点对点传输系统,使读者打好光通信基础;第6章不仅是前3章的总结,而且介绍了最重要的两种电复用技术:同步时分复用SDH体系与异步时分复用,使读者接近了实际的光通信系统;第7章不仅介绍了光放大的基本物理效应,而且为第8章介绍光路复用做好准备;第8章是光路复用技术,主要讲授波分复用技术,并按照通道层、复用段层以及传输层3个层次标准进行讲解。从以上的选材来看,尽管本书强调技术的先导性,但仍然是把光通信中最基本的概念和最重要技术方法作为重点,以便今后学生在较长的历史阶段都能够运用这些知识和概念,并且能够适应今后技术的新变化。

1.1 信息的基本知识

1.1.1 信息的基本概念

21世纪是人类跨入信息社会的新世纪。信息(information)在社会活动中的作用越来越大。但什么是信息?它有哪些特点?它怎样度量?运动与变化服从什么规律?等等这些问题回答起来仍然十分困难。到目前为止,人们对信息的认识还没有统一意见。

当今普遍认为,信息作为一种客观存在,它和物质、能量一样,构成了客观世界。所以客观世界是由物质、能量和信息三大要素所组成。关于“什么是信息”这样一个最基本的问题,正如“什么是物质和能量”一样,是一个十分困难的问题,目前并没有定论。最广义的概念是,信息是事物的特征、状态和与其他事物的关联。例如说,一条信息“这是一个球”,就理解为这个物体具有球的形状。一条信息“这个球是静止的”,说明它处在静止状态。例如一条信息“A球比B球大”,虽然我们不知道A球与B球的具体体积,但“A球比B球大”这样一个事实是知道的。

比较狭义的观点是“信息是某种能够用来消除不确定性的东西,它是信息获得者从‘不知’到‘知’的过程中,对事物从不确定到确定的一个度量”。这种观点的一个重要的例子是:例如有人告诉你“明天要下雨”,那么你就从不知道明天天气(不确定)到知道明天的天气(确定),于是你就获得了信息。虽然这种观点也涉及到了“确定性与不确定性”的问题,但这个观点是建立在信息获得者的基础上的,是以信息获得者对所获得的消息(message)的反应作为这条消息是否含有信息的判据。这种观点认为,假如你看到报上一条消息,是你已经知道的,所以你就没有得到新的信息。依照这种观点,同样一条消息,对某个人来说不含有信息,而对另一个人来说,却含有信息。假定这条信息无人知道,似乎这个信息就不存在。由于这种观点是以信息接收者的主观判断作为“确定性与不确定性”的判据,不是以客观事物的状态作为确定性的判据,从而使人们对“确定性”的理解变得不可捉摸。这种观点与当今认为信息是构成客观世界的一个要素的观点相矛盾,容易使人陷入主观唯心主义的泥潭。所以,我们的看法是应该采用前面一种观点。证明信息的客观性的另一个例子是生物的遗传信息(见图1.1.1)。我们知道,生物的生长是在细胞核内的染色体的遗传基因控制下进

行的,正是有了这些基因中的遗传信息,所以生物的子亲才和父本相像,才有了今天绚丽多姿的世界。这些遗传信息,无论是否被人认识,它都是客观存在的,甚至在人类出现之前就已存在,所以用人对于消息的知与不知作为信息是否存在判据显然是错误的。

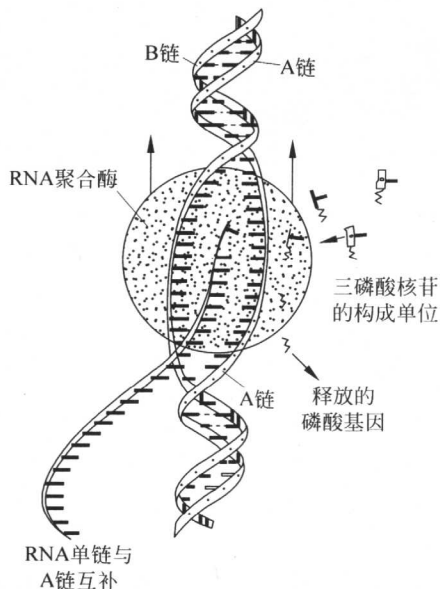


图 1.1.1 生物信息和 DNA

自然界的万事万物,从一个状态转换为另一个状态,可分为两种情况:一种是必然的,一种是非必然的(有多种可能的)。例如拿起一个硬币,当你放手的时候,硬币受重力的作用而下落,这是必然的。但落到地面的状态,却可能有两种:图案朝上或数字朝上。出现哪一个状态,完全是随机的,是不可事先预知的。但当它在地面落定之后,它的状态就完全确定了。只有一个事物从事前的“不确定”状态,到事后的“确定”状态,那么它才含有这个状态区别于其他状态的状态信息。再例如掷骰子,当它落地之后,处于6点朝上的状态,那么它就不是其他5种状态。也就是说它处于一种完全确定的状态(6点朝上),而不再是其他可能的状态。所以,信息就是从事物的可能性(不确定性)转换为现实性(确定性)的体现。

信息有什么规律?或者说信息有什么特征呢?物质满足的基本规律是“物质不灭定律”,即物质可以从一种形态转换为另一种形态,但在转换过程中,物质的量(质量)不会增加也不会减少;能量满足的基本定律是“能量守恒定律”,能量可以从一种形态转换为另一种形态,在转换过程中,能量既不会增加也不会减少;他们都是守恒的。但信息则不然,信息可以从一个载体传递到另一个载体,但传递过程不会使原有载体的信息减少。例如一本书,书里面承载了大量信息,某人阅读之后,他获得了很多信息。但原书中的信息仍然存在,另一个人再阅读,照样可以获得大量信息。所以,信息的第一个基本特征就是共享性。

信息的第二个特征,是可以被传递,这可以称为“信息的运动”。物质和能量也都会被传递。但物质的运动是绝对的,“没有不运动的物质”(恩格斯语)。能量的传递一般都遵循从高能态向低能态传递的规律,例如,热能总是从高温物体向低温物体传递,电能总是从高电位向低电位传递(不十分严格),在碰撞过程中,动能总是从动能大的物体向动能小的物体传递。但信息不满足这些规律,信息的传递,可以自然发生,也可以人为的进行。例如,地震波的传递,自然地把地震的信息传播开来。而更多信息的传递是人为地进行,我们今天的信息社会,其基本特征之一就是高速、大量的传递信息。

信息的传递依赖于能量的传递,通常二者的传递方向是一致的,但并不一定要求一致。下面通过图 1.1.2 的一个电路例子可以说明。

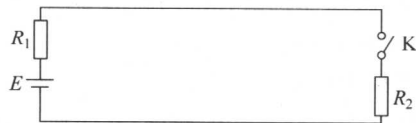


图 1.1.2 信息传递和能量的传递

这个电路是常用的电话摘机信号检测电路。在图 1.1.2 中,当用户提起电话机手柄的时候,开关 K 就闭合;放下手柄的时候,开关 K 就断开。因此开关 K 的开合状态对应于电话机的摘机

状态,是交换机所需要的信息。在电路中,开关 K 的开合状态变成电路中的电流,然后再变成电阻 R_1 上的电压被检测出来。显然,能量的传输是从电源 E 向开关 K 的方向传送,而信息的传递是从开关 K 向电阻 R_1 的方向传送。从这个例子可以看出,能量的传递与信息的传递的方向并不一定是一致的。

关于信息传递所遵循的规律,现在还没有被总结出来。信息的传递虽然包括自然的扩散和人为的传播两种,但它传播的方向、数量、信源的分布、传播过程所遵循的规律、分类等等均没有明确的说法,还是值得深入研究的。

信息的第三个特征,是信息的控制作用,即:自然界的大量存在的随机的、无序的运动,可以在信息的控制下成为可预知的、有序的运动。例如,一个硬币从空中落到地上,出现正面还是反面是随机的。但一个人拿着硬币放到地面上,要它出现哪个面就能出现哪个面,这完全由人的大脑提供的信息控制。人类正是利用了信息的控制作用,才把社会按照人类的设想、计划改造成和谐、井井有条的当今的面貌。

以上三条信息的特征是基本的、本质的。

除此而外,信息还有其他许多特征。例如信息可以“衍生”。所谓“信息的衍生”,是指在原有信息的基础上,加工提取出“新的”信息。例如从“ $A=2$ ”和“ $B=4$ ”两条信息中,可以衍生出“ $A<B$ ”,“ B 是 A 的二倍”,“ B 是 A 的平方”等“新信息”。当然,这些信息原本就寓于原有的信息集合之中,只是没有被认识到而已。

当然信息还可以以物质的状态被存储起来,并被多次使用,例如磁盘,这一点无须解释。

关于对信息的描述,可以分为三个层次,即“语法”、“语义”和“语用”。语法是描述这条信息的数学的或物理的方法。例如我国长途电话区号,采用3或4位十进制表示,这种编码方法就是“信息的语法”。注意在语法这个层次,信息代码所表示的具体含义是无要紧要的。例如010与021这两个代码,从传递的信息量的角度看,二者没有区别。除了用数字和文字描述信息而外,还常用物理的方法,例如“红绿灯”交通信号。在语法层面上的“信息”是抽象的、没有具体内容的。语义是编码的具体含义。例如在语义这个层面上看,010和021这两个代码有不同的含义,010代表北京,而021代表上海。在语法的层面上,作为交通信号的“红绿灯”,什么颜色代表什么含义是不重要的。但在语义层面上,红灯代表停止,绿灯代表通行,所以语义层面的信息是具体的、有内容的。语用这个层面的信息,包括了该信息的外延,和它对接受到信息的客体的作用。换言之,物体或物质之间的相互作用,除了以能的形式相互作用外,还可以通过信息相互作用,这也是信息的控制作用的体现。在通信课中,一般只注重语法这个层面,有时也会涉及到语义,一般不会涉及语用这个层面。

1.1.2 信息的度量

1) 确定状态的信息量

正如前一节所说,信息就是从事物的可能性(不确定性)转换为现实性(确定性)的体现,所以,如果一个事物在事前可能发生的状态很多(不确定性很大),而事后确定了一个状态,那么排除的不确定性就越大,因此所处的状态所包含的信息量就越大。例如掷骰子,它在落地前有6个可能状态(1~6点),落地后它所处的状态(例如6点),就排除了1~5点等5个状态。因此,它处于这个状态的信息,和硬币处于图案朝上状态的信息相比,有更大的信息

量。信息量实际上是事物的某个确定状态所排除的可能状态的度量。

换成概率的语言,就是一个事物出现某个状态的概率越大,那么当它处于这个状态所包含的信息量就越少。反之,如果出现某个状态的概率越小,一旦处于这个状态,则包含的信息量就越大。如天气预报说,北京地区在春节期间不下雨。这是一个大概率的事件,因此没有包含很多信息。而某人告诉你“明天要地震”。由于地震是一个小概率事件,如果这条信息是真实的话,那么无疑含有比较大的信息量。

下面给出信息量的一个数学描述:

假如一个事物 X 它可能处于的状态,构成集合 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 而出现这些状态的概率分别为 $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 则定义它出现某个状态 x_i 时所包含的信息量 $I(x_i)$ 为

$$I(x_i) = -\log p_i \quad (1.1.1)$$

这里,没有明确指出对数的底,这要看如何选择信息量的单位。我们希望以信息量最少的那个状态所含有的信息量,作为信息量的单位。最简单的情况就是,如果一个事物只可能取两个状态,而这两个状态出现的概率又是相等的,即

$$X = \left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2 \\ \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \end{array} \right\} \quad (1.1.2)$$

显然,这个状态(x_1 或者 x_2)出现时所包含的信息量是最少的,可以定为信息量的单位。这个信息量的单位称为比特。换言之:如果一个随机事件有两个等概率的可能状态,那么当一个状态出现时,这个事件所处状态包含的信息量定义为 1 比特(bit)。于是,以比特为信息量单位时,信息量的定义为

$$I(x_i) = -\log_2 p_i \quad (1.1.3)$$

值得注意的是,式(1.1.3)右边的 p_i 是事前的出现某状态的概率(可能性);式(1.1.3)左边的 $I(x_i)$ 是事后某状态已经出现时(现实性)的信息。不难看出,由式(1.1.2)所描述的状态出现时,它含有的信息量为 1 比特。而对于一个必然发生的事件,它的信息量为 0。对于一个二进制的计数系统,每一位只可能有两个状态(0 和 1),因此二进制的每一位的出现都包含了 1 比特的信息。而对于十进制的计数系统,每一位可能有 10 个状态(0~9),当其中任何一个状态出现时,这个状态所包含的信息量为

$$I(x_i) = -\log_2 \left(\frac{1}{10} \right) = 3.322 \quad (1.1.4)$$

上述关于信息量的定义,必须在事物状态的发生前就知道它出现各种状态的概率,但这往往是困难的。尽管如此,它毕竟给出了计算信息量的科学依据。请注意,这里给出的概念与其他教科书上的概念还是有区别的。这个概念不是从“消息”出发的,而是以事物所处的状态出发的,它既是客观的,又是不依赖于接收者的。

由概率论的知识可知,独立事件同时发生的概率,等于各个事件单独发生的概率之乘积。而乘积的对数,等于各乘数的对数之和。这表明如果一个事件是由一系列独立的子事件所构成,那么这个事件发生后所包含的信息量,就是各个独立子事件所包含的信息量之和,这称为信息量的可加性。

例如,对于一个二进制的计数系统,每一位包含了 1 比特的信息,那么当出现两位时,它的信息量就是 2 比特。对于一个字节(B, 8 位的二进制数),它就含有 8 比特信息。对于一个可

以存储 256KB 的随机存储器(RAM),它就可能含有 $256 \times 1024 \times 8 = 2\,097\,152$ 比特的信息。

2) 现实过程的信息熵

事物的状态是不断变化的,这种状态的变化称为过程,即随机过程。已经出现的随机过程称为一个“现实过程”。因此,从一个可能发生的随机过程到已经发生的一个现实过程,这个事物就具有了信息。那么整个现实过程所具有的信息是多少呢?这里引入一个信息熵的概念。所谓信息熵是指整个现实过程各个状态信息量的平均值:

$$H = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m I_j(x) \quad (1.1.5)$$

式中 m 是出现的状态总数(包括重复出现的状态)。如果每个状态的出现是独立的,随机过程是平稳的,且出现状态 x_i 的概率为 p_i ,那么显然有

$$H = \sum_{i=1}^N p_i I(x_i) = - \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (1.1.6)$$

式中 N 是可能的状态数(状态集合的元素数)。这样从统计的角度看,一个现实过程的信息量大约为

$$I = mH = m \sum_{i=1}^N p_i I(x_i) = -m \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (1.1.7)$$

这样,可以不需要知道一个现实过程的每一个状态,就估算出一个现实过程大约的信息量。

对于一个只有两种状态且等概率的随机过程,当一个现实过程发生时,这个现实过程的信息熵为 1,而信息量为 m 。

上述信息熵的概念和一般教科书上的信息熵的概念是有区别的,它是指一个现实过程的平均信息量,而不是指一个事件的“多种可能状态的自信息量”的平均值(或看作概率空间的一种特殊的矩函数),因为对于一个可能状态无所谓信息量,只有现实过程才有信息量。

3) 信息速率和符号速率

状态的变化(随机过程或现实过程)可表示为状态的时间函数 $x(t)$,它的平均变化速率可用频率(单位时间出现的状态数) f_0 表示,那么它的信息产生速率为

$$f_0 H = f_0 \sum_{i=1}^N p_i I(x_i) = -f_0 \sum_{i=1}^N p_i \log_2(p_i) \quad (1.1.8)$$

这种以时间顺序变化的信息,称为信息流。在通信系统中,信息正是按照一定的时间序列传递的信息流。例如在光纤通信系统中,信息是以光脉冲的形式,一个个传送的;在计算机中,信息是以多个随时间变化的高低电平的形式传送的(并行传送)。对于通信系统来说,信息流是以单位时间内传送的信息量的多少来描述的,称为信息速率,它的单位是比特/秒,因此又常常称为比特率。

注意,在通信系统中,还常常使用另一个单位:波特。它定义为单位时间内传递的符号数(符号速率)。这些符号可以是电平、脉冲等。例如一个 9600 波特的调制器,是指它在 1 秒钟能传送 9600 个符号。波特率和比特率不是同一个概念。如果每个符号包含 1 比特的信息,那么波特率和比特率在数值上相等。如果每个符号包含了多于 1 比特的信息,例如十进制的符号,那么波特率就会小于比特率;反之,为了确保每个比特的信息都能正确传送,往往采用冗余编码,例如 1B2B 编码,这样每个符号包含的信息量就少于 1 比特,这时波特率就会高于比特率。尽管波特率与比特率既不是同一概念,而且数值上也不相等,但人们还

是常常把二者混为一谈,这点请读者在阅读文献时加以注意。

1.1.3 信息源

这里的信息源和以后通信系统中讲的信源不是一个意思,在大多数文献上都把它简称为信源,常常引起混淆。这里的信源指的是信息的产生者,通信系统的信源指的是信息的发出者。信息的产生者就是被信息所描述的那个事物,而信息的发出者是指发出信息的人或设备。尽管在很多情况下,信息的发出者就是信息的产生者,但也有很多情况二者并不是同一个客体。例如,存储在计算机内的数据,它可能是别人的信息,而不是计算机自己产生的信息。当这台计算机与其他计算机进行通信的时候,这台计算机就是通信系统的信源,但不是信息产生的本源,也就是说,它不是本节所说的信息源。

信息源含有多少信息量?这一直是信息论多年研究的基本问题。但实质上,每个信息源所含有的信息量都是不可穷尽的。到现在为至,我们仍然无法彻底地、毫无遗漏地完全描述,哪怕是一个原子、分子,甚至一个电子的状态及与其他事物的关联。而常规的物体又是由千千万万个原子、分子所组成,它们所可能有的状态,不知道有多少种组合。因此,在理论上不可能穷尽一个客观对象的信息量。

但在实际生活中,能从信息源中取得的信息量,是和我们的检测手段或检测工具相联系的。例如,一个物体的温度信息,假定它的温度在 20°C 左右,如果以 10°C 为一个分度,那么用一个一位数字就可以完全描述它的温度信息,它的信息量不过 3.32 比特。如果以 1°C 作为分度,那么它含有 6.62 比特的信息。如果要求精确到 0.1°C ,那么将有近 10 比特的信息。在信息处理系统中(如计算机、单片机和数字信号处理芯片),模数转换器的精度实际决定了信源的信息量。例如一个 10 位精度的模数转换器,每次转换输出的信息就是 10 比特。而一个 16 位的模数转换器,它每次转换就输出 16 比特。

同时,尽管信息源的状态是不可穷尽的,但是,在讨论问题的时候,仍然把信源的状态限制在一定的范围内。例如对于脉冲,我们只规定有和无两种状态,至于非常小的脉冲,我们将它排除在外。也就是说,把客体的状态限制在一定的范围之内成为可以统计的量,这样就可以计算出它的信息量。

在限定信息源的状态之后,信息源的状态可分为离散和连续两种。当然不排除混合状态。如果信息源的状态是离散可数的,那么就称它为离散信源;如果状态是连续分布的,就称它为连续信源。

另一个与信息源相关的问题就是信息的产生速率。前面已经说明,一个现实过程产生信息的速率取决于状态的变化频率。但在实际处理过程中,能从信息源所获得的实际信息速率,也与我们的检测手段有关。如果信息源产生信息的速率很快,而信息检测系统的速率或者信息传递系统的速率很低,就难以获得准确的信息。奈奎斯特证明了,如果信息源产生信息的变化频率限制在 f_0 以内,那么只要检测的频率大于 $2f_0$,就不会丢失信息。

大多数与时间有关的信息(过程信息),例如人的语音,地震的地震波,用于检测机器故障的机器噪声等,它们的频率都有一个频率上限。因此实际检测的信息速率为 w (单位是 b/s),可用下式估算

$$w = Iv \quad (1.1.9)$$