

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划，列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部工科电子类专业教材 1986—1990 年编审出版规划,由无线电技术与信息系统教材编审委员会通信编审小组征稿,推荐出版,责任编委为天津大学俞斯乐教授。

本教材由西安电子科技大学担任主编,北京大学徐孟侠教授担任主审。

本课程的参考学时数为 54 学时,其主要内容包括模拟图象通信和数字图象通信,但侧重数字图象通信。全书共八章,分为四个部分。第一部分(第一至三章)阐述图象信号的分析方法和图象编码的基本原理,它是全书的基础部分。第二部分(第四和第五章)讨论对静止图象和电视图象这两种不同形式的图象进行压缩编码的基本方法。第三部分(第六章)讨论图象信号传输中的调制方式和传输方式。第四部分(第七和第八章)介绍一些主要图象通信方式的基本实现方法,并简要介绍图象信息交换和通信网的基本概念。各章均有习题,书后并附有部分习题答案。使用本教材时,可根据不同的教学要求适当取舍内容,灵活安排讲课时数。例如,教学学时为 54 学时,从第一章至第八章所用的参考学时数依次为 4、10、10、6、4、6 和 4 学时,留出 4 学时做实验。若教学学时为 36 学时,第一章至第七章(第八章不讲)所用的参考学时数依次为 4、8、6、4、4、4 和 4 学时,留出 2 学时做实验。本课程的先修课程为“通信原理”、“电视原理”和“数字信号处理”。

本教材由吴成柯编写第一、二、四、六和八章,戴善荣编写第三和七章,陆心如编写第五章,吴成柯统编全稿。参加审阅工作的还有天津大学王兆华教授和北京邮电学院全子一教授,他们对本书初稿提出了许多宝贵意见;强学军同志试作了部分习题,并协助作者计算了一些典型图象的统计特性;西安电子科技大学图象实验室为本书的编写提供了实验条件。作者在这里表示诚挚的感谢。由于编者水平有限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

作 者

1989 年 7 月

目 录

第一章 绪论

1.1 图象通信系统的基本组成	1
1.1.1 通信与图象通信	1
1.1.2 图象描述	1
1.1.3 图象通信系统的组成	2
1.2 图象通信的发展概况	4
1.3 视觉原理	7
1.3.1 人眼的构造	7
1.3.2 视觉特性	8
1.3.3 视觉模型	9
1.4 图象质量评价	11
1.4.1 图象的主观评价	12
1.4.2 图象的逼真度	12
习题	13
参考文献	13

第二章 图象信号分析

2.1 二维傅里叶变换	15
2.1.1 二维线性位移不变系统	15
2.1.2 二维线性位移不变系统的 空间频率响应	16
2.1.3 二维傅里叶变换	18
2.2 二维抽样定理	21
2.2.1 图象的扫描与抽样	21
2.2.2 二维抽样定理	21
2.3 二维离散傅里叶变换	24
2.3.1 二维离散傅里叶变换的定义	24
2.3.2 二维离散傅里叶变换(DFT)的 性质	27
2.3.3 二维 DFT 的实现	35
2.4 图象变换的一般表示式	37
2.4.1 图象变换的矩阵表示式	38
2.4.2 向量外积表示式	41
2.5 图象量化	47
2.5.1 最佳量化	47
2.5.2 矢量量化	51

2.6 图象的统计特性	52
2.6.1 空间域上的统计特性	52
2.6.2 频域上的统计特性	58
2.6.3 图象差值信号	59
附录 一维 FFT 算法	61
习题	64
参考文献	66

第三章 图象压缩编码

3.1 信息保持编码	68
3.1.1 等长编码	68
3.1.2 不等长编码	69
3.1.3 最佳不等长编码	71
3.1.4 准可变字长码	73
3.2 率失真理论	73
3.2.1 互信息量	74
3.2.2 离散信源的率失真函数	76
3.2.3 连续信源的率失真函数	78
3.2.4 相关信源的处理方法	82
3.3 函数正交变换编码	83
3.3.1 正交变换与子图象关系	84
3.3.2 K-L 变换	85
3.3.3 Walsh-Hadamard 变换	90
3.3.4 离散余弦变换(DCT)	97
3.3.5 变换域的压缩编码	104
3.4 线性预测编码	106
3.4.1 基本原理	106
3.4.2 最佳线性预测	108
习题	109
参考文献	110

第四章 静止图象编码

4.1 静止图象传输的特点	112
4.2 灰度图象编码	113
4.2.1 方块编码	113
4.2.2 逐渐浮现图象的编码	117
4.2.3 内插和外推法编码	121

4.2.4 比特平面编码	122	6.4.2 图象信号的卫星传输	174
4.2.5 抖动图象编码	124	6.4.3 图象信号的光纤传输	178
4.3 二值图象编码	126	习题	181
4.3.1 二值图象的统计特性	126	参考文献	181
4.3.2 跳过白色块编码(WBS 编码)	127	第七章 图象通信方式	
4.3.3 游程长度编码(RLC)	128	7.1 传真通信	183
4.3.4 二值图象的方块编码	130	7.1.1 基本结构与参数	184
4.3.5 算术码	132	7.1.2 传真信号的高效传输	187
习题	134	7.2 可视电话	198
参考文献	135	7.2.1 系统的组成与参数	199
第五章 电视编码		7.2.2 可视电话的传输	201
5.1 电视信号概述	136	7.3 会议电视	203
5.2 图象信号的线性预测编码	138	7.3.1 会议电视系统的组成	203
5.3 帧内预测编码	139	7.3.2 图象切换	204
5.3.1 电视帧内编码	139	7.4 有线电视	206
5.3.2 自适应预测	144	7.4.1 共用天线电视系统	207
5.3.3 自适应量化	146	7.4.2 有线电视系统	208
5.4 帧间预测编码	147	7.5 静止图象通信	208
5.4.1 帧间预测的一般概念	147	7.5.1 多节目广播电视	209
5.4.2 帧间预测的其他模式	148	7.5.2 图文电视与可视图文	209
5.4.3 运动补偿预测	149	7.6 卫星电视广播系统	211
5.5 混合编码	152	7.6.1 系统组成	212
5.6 传输误差的影响	154	7.6.2 系统工作过程	213
习题	155	习题	213
参考文献	156	参考文献	215
第六章 图象信号的传输		第八章 图象信息交换及通信网	
6.1 对图象信号模拟传输的要求	157	8.1 图象信息的交换	217
6.1.1 噪声	157	8.1.1 模拟空分交换	217
6.1.2 线性失真	158	8.1.2 数字时分交换	218
6.1.3 非线性失真	159	8.1.3 分组交换	223
6.2 图象信号的模拟调制方式	161	8.2 图象信息通信网	223
6.2.1 残留边带调幅	162	8.2.1 模拟图象信息通信网	223
6.2.2 调频	163	8.2.2 数字通信网的网同步	224
6.3 图象信号的数字调制方式	168	8.2.3 综合业务数字网(ISDN)	227
6.3.1 多相相位键控	168	习题	229
6.3.2 正交幅度键控	171	参考文献	229
6.4 图象信号的传输方式	172	习题答案	230
6.4.1 图象信号的微波传输	172	附图(照片 1~照片 13)	

第一章 绪 论

1.1 图象通信系统的基本组成

1.1.1 通信与图象通信

在人类社会里,人们离不开信息的传递。人类相互之间以及人类与外界环境之间传递或交换信息的过程就是通信。虽然所传递的信息有语音、音乐、文字、图片、符号、数据以及气味等多种形式,但可以将它们归纳为语音、图象和数据三种主要形式。当人们通过自己的感觉器官,来获取这些形式的信息时,主要是依靠视觉和听觉。据一些学者估计,由视觉所获得的信息约占全部信息的70%,其余的信息是由听觉、触觉和嗅觉等感官获取的。

电话通信是目前使用得最为广泛的一种形式,它是通过听觉获取语音、音乐等信息形式的一种通信形式。图象通信是通过视觉获取图片、文字、符号等图象信息形式的另一种通信方式。在通信的发送端,将图象信息变成电信号,在接收端再把它重现为视觉可获取的图象信息。与语音信息相比,图象信息具有直观性强、信息丰富等特点。在直观性方面,对某些自然景物或客观现象虽然可以通过语言的描述来理解,但若通过看图来理解,往往会更直观、更深刻。在信息容量方面,通过视觉获取的图象信息往往比通过听觉获取的语音信息具有更多的信息量。当我们看到电视画面上所展现的一幅飞机新产品外观或服装新式样时,如果要用语音来描述所看到的信息,可能要花长得多的时间。由于图象信息具有这些特点,图象通信在通信中已占有很重要的地位。

图象通信的方式一般是按照它们的业务性质来划分的。可分为电视广播、传真、可视电话、会议电视、图文电视、可视图文以及电缆电视等。若按照图象内容的变化性质来划分,可分为活动图象和静止图象两大类。对这两类不同的图象信号,为了提高它们的传输效率,往往采用不同的压缩编码方法。

1.1.2 图象描述

为了实现图象通信,必须对图象进行正确的描述。图象是当光辐射能量照在客观存在的物体上,经其反射或透射;或由发光物体本身发出光能量,在人的视觉器官中所重现出的物体的视觉信息。因此,照片、传真、电视、图画等都属于图象的范围。

图象按其灰度等级不同,可分为只有黑与白两种灰度级的二值图象(如一般的工程图和文字传真等)和多灰度级黑白图象。按图象的色调划分,有无色调的单色图象即黑白图象和有色调的彩色图象。按图象内容的变化性质划分,有活动图象和静止图象。按图象所占空间的维数划分,有二维图象、三维图象和多维图象。

现在,以反射图象为例讨论对图象的描述,如果用 $i(x, y, t)$ 表示在 t 时刻对物体的人射光的亮度,其中 x, y 是平面上两个轴的坐标, $r(x, y, t)$ 表示反射系数,那么,人的视觉器官中所感受的光的亮度 $f(x, y, t)$ 可表示为

$$f(x, y, t) = i(x, y, t) \cdot r(x, y, t)$$

这是对单色二维图象的描述。如果是一幅在三维空间的彩色图象，则可表示为

$$f(x, y, z, \lambda, t) = i(x, y, z, \lambda, t) \cdot r(x, y, z, \lambda, t)$$

其中， λ 为波长，不同颜色的光具有不同的波长。如果是静止图象，式中的参量 t 可以消除。

当反射系数 r 为零时，表示光全部被物体吸收(该物体便是绝对黑体)，当反射系数为 1 时，光全部被反射。在一般情况下，有

$$0 \leq r(x, y, z, \lambda, t) \leq 1$$

由于照射在物体上的入射光的能量总是有限的，并且永远为正，因此有

$$0 \leq i(x, y, z, \lambda, t) \leq A$$

式中， A 为正的常数。由 r 和 i 的取值范围可以看出，图象 f 的取值范围是非负有界的。我们常把单色图象 f 的值称为图象的亮度 l ，那么， l 的范围显然为

$$L_{\min} \leq l \leq L_{\max}$$

间隔 $[L_{\min}, L_{\max}]$ 称为亮度范围。对一般的室内图象，可以认为 $L_{\min} \approx 0.005 \text{ lx}$ (勒克司)， $L_{\max} \approx 100 \text{ lx}$ 。为了便于表示，通常把单色图象进行规格化，用零表示黑色的亮度值，用 L 表示白色的亮度值，因此有

$$0 \leq l \leq L$$

二值图象的亮度只取两个值 0 和 L ，通常将它们进一步规格化为 0 和 1 两个值。

1.1.3 图象通信系统的组成

和话音通信系统一样，图象通信系统也有模拟通信系统和数字通信系统两种。我国现有的广播电视系统，就是模拟图象通信系统。它的组成方框图如图 1.1 所示。

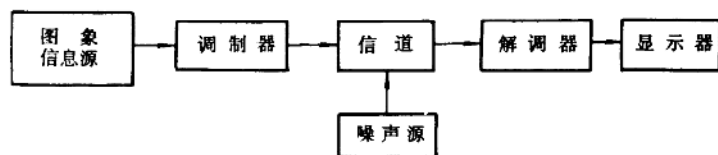


图 1.1. 模拟图象通信系统

图中的信息源是指经光电变换后，所得到的图象信息。完成光电变换的设备也称为图象通信系统的输入设备。常用的输入设备有摄像机和微密度计等。在摄像机中常用的是用硅靶管制成的光电导型摄像机。当光照射在靶面上时，在靶面上就形成了和光图象 $f(x, y)$ 分布相对应的电位分布，在靶面上就得到了对应的电图象。当光束扫描后，就能输出图象信息。随着集成电路技术的发展，电荷耦合摄像器件(CCD)已经成为重要的输入设备。它具有体积小、重量轻、可靠性好、功耗小以及噪声小等优点。

调制器完成频谱变换的作用，使图象信号更适合于在信道中传输。常用的调制方式为残留边带调制和调频。

图象显示器显示被复原的图象,常用的有阴极射线管显示器、黑白显象管显示器和彩色显象管显示器。在简便的应用场合下,也可用打印机的输出显示图象。

在模拟图象通信系统中,所传输的图象信号一般都具有如下特点:(1)频带宽。例如,电视信号的频带可达6 MHz,即使是变化缓慢、活动部分很少的可视电话,其图象信号的频带也可达1 MHz;(2)在模拟信道中传输时,必须采用相位均衡器以解决线性相位特性的问题;(3)图象信号在相邻帧的对应位置之间以及同一帧的相邻位置之间具有很强的相关性。

随着大规模集成电路和计算机技术的发展,人们不断探索在图象通信系统中采用数字技术。数字式图象传输具有如下的一些优点:

(1)可以多次中继而不致引起噪声的严重积累,因此适合于多次中继的远距离图象通信或在存贮中的多次复制。

(2)有利于采用压缩编码技术。虽然在目前的技术条件下,图象的数字传输比模拟传输需要占用更宽的频带,但采用压缩编码技术,可在一定的信道频带条件下,获得比模拟传输更高的通信质量。

(3)可采用数字通信中的抗干扰编码技术,以提高抗干扰性能。

(4)易于实现保密通信。

(5)采用大规模集成电路,可使功耗降低、体积减小、重量减轻、可靠性提高、维修简便,并最终降低成本。

(6)易与计算机联网,便于综合业务的应用。

当然,数字式传输也有一些缺点,如占用信道频带较宽,目前成本较高等。然而,由于它的上述优点,使数字图象通信系统越来越受到人们的重视。

数字图象通信系统的组成方框图如图1.2所示。

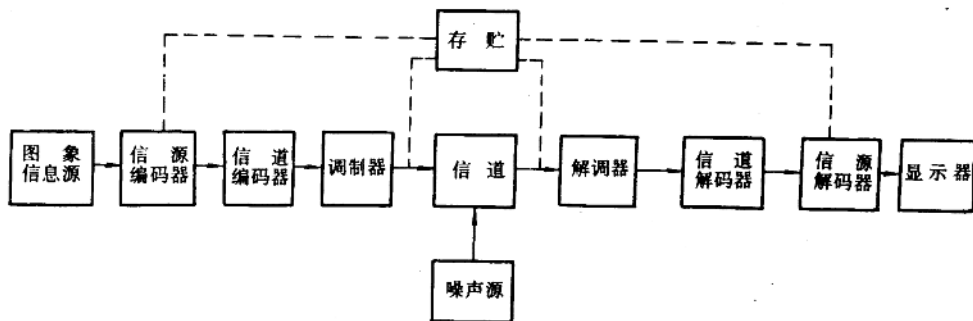


图 1.2 数字图象通信系统

与模拟图象通信系统相比,增加了信源编码器、解码器和信道编码器、解码器。由于图象信号具有相关性强的特点,采用信源编码器可以去除这种相关性以压缩图象信号的频带或降低信号传输的数码率。这样当图象信号通过信道传输时,可以提高存贮介质(例如磁带、磁盘)的利用率。在数字图象通信系统中,由信息源送给信源编码器的图象信号可以是模拟的,也可以是经过抽样和量化后的数字信号。信道编码器的作用与话音通信系统

相同,也是为了提高对信道的抗干扰性能。在数字图象通信系统中,常用的调制方式有调幅、调频和调相。

在图象通信系统中,若有三个以上的用户时,就构成网络的形式。常见的网络形式有星状结构、树状结构、环状结构和网状结构四种,如图 1.3 所示。在星状网络中,有一个中心站作为中心接点,其余用户接点直接与中心接点相连。若网络中有 N 个接点,则该网络有 $(N-1)$ 条连接线路,具有节省线路的优点。但中心接点的交换机设备较复杂。树状网络是一种多级星状网络。与星状网络相比,它的总线路长度较短,且结点易于扩充。

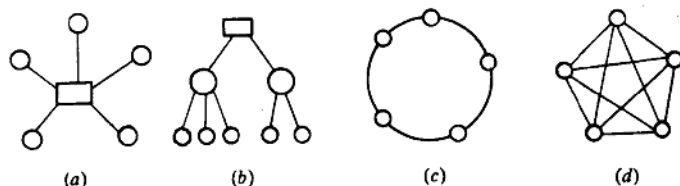


图 1.3 网络形式

(a) 星状; (b) 树状; (c) 环状; (d) 网状

星状网络和树状网络都属于集中型网络。集中型网络的一个缺点是中心接点的故障会使整个网络失效,因此这类网络的可靠性较差。环状网络中每个接点有一个输入接口和一个输出接口,用户之间的通信可沿一个方向也可沿两个方向进行。若网络中有 N 个接点,则这种网络的连接线路为 N 条,因而也是一种节省线路的网络。在环状网络中,一个接点要与另一个接点通信,有时要经过很多次转接,各接点的交换机设备较复杂。由于这种网络是各接点相互串接的,任一个接点或线路的故障都会造成全网失效,因此可靠性也较差。网状网络所需的线路总长度较长, N 个接点的网络需 $N(N-1)/2$ 条线路,但由于不经过集中交换,网络的可靠性较高。

1.2 图象通信的发展概况

从通信发展的历史来说,早在 1876 年美国贝尔发明电话之前,1865 年在法国的巴黎和里昂之间就试验成功了属于图象通信领域的传真通信。以后,尽管传真通信的质量在不断改进,可视电话也试验成功,但由于这些图象通信方式的传送速度慢,设备比较复杂、成本较高等缺点,一直发展缓慢。而话音通信却占着主导地位,发展很迅速。70 年代以来,图象通信逐渐成为人们生活中常用的一种通信方式。随着大规模集成电路和计算机技术的发展,特别是办公室自动化与国际信息交流的发展推动了图象通信的发展。1980 年的国际电报电话咨询委员会(CCITT)为三类传真机和公共交换电话网上工作的数字传真设备建议了国际标准。1984 年 CCITT 又形成了综合业务数字网(ISDN)的建议,这意味着非话通信方式,例如会议电视、可视电话、图文电视、可视图文和传真等图象通信方式已在通信中占有重要的地位。下面将介绍图象通信中除了广播电视以外的几种主要方式,如可视电话、会议电视、传真、图文电视、可视图文和有线电视等的发展概况。

(1) 可视电话和会议电视: 可视电话和会议电视的发展是和电视传输的发展密切相关的。首次表演性的单色电视广播是 1925 年在英国实现的。1936 年英国广播公司(BBC)开始使用电视广播, 1940 年实现了彩色电视的传输。到 1948 年末, 美国已有 100 万部电视机。此后, 各种电视传输方法和系统相继被提出来, 它们是北美和日本采用的 NTSC 制式, 西欧、非洲和我国采用的 PAL 制式, 以及法国和苏联采用的 SECAM 制式。电视制式的标准化进一步推动了电视传输的发展。随着电视传输的发展, 人们希望有一种能看见对方图象的电话通信, 这就是可视电话。在可视电话中, 所传输的图象是活动图象, 它和电视的数字传输、会议电视中所传输的图象具有相同的特点。

最早的可视电话是 1964 年在美国纽约国际博览会所展出的可视电话机 Picturephone MOD-I。70 年代初, 可视电话已商品化, 当时的传输带宽为 1 MHz。由于传输频带宽和成本高, 可视电话的发展受到限制, 人们开始是用模拟方法来压缩频带, 例如增加隔行扫描的行间隔数, 延长图象传输时间等。这样做的结果是降低了活动图象传输的质量。采用各种数字编码技术, 减少图象的相关性, 可以在频带一定的条件下获得较高的传输质量。目前已经实现了在 64 kbit/s 的传输速率下获得较高的传输质量。数码率更低的可视电话系统也于最近取得进展, 这时, 图象先经过特征提取, 把传输速率压缩为 4.8 kbit/s , 然后在一路话音信道上传输。这对实现聋哑人的通信是很有意义的。

会议电视最早于 1930 年安装在美国贝尔实验室。70 年代中期, 采用数字编码技术的会议电视系统得到了发展, 相继建立了 6.3 Mbit/s 和 1.5 Mbit/s 的会议电视系统。美国于 1977 年通过卫星会议电视系统召开了全国销售会议, 这节省了很多的人力和财力。1985 年 12 月召开了一次连接墨西哥、美国、瑞典、阿根廷、希腊和印度等国家的全球电视会议, 仅美国就有 5 万人参加会议。对于长距离的会议电视系统, 已经出现数码率为 384 kbit/s 和 768 kbit/s 的会议电视系统, 这样的数码率有利于视频信号进入综合业务数字网。

电视传输通常是指具有类似于广播电视质量的传输。一般地说, 它比会议电视和可视电话要求更高的图象质量。我们知道, 彩色电视的数字信号, 有高达 140 Mbit/s 的数码率。现在已实现了适合于在数字通信系统的三次群上传输, 数码率降为 34 Mbit/s 的编码方法。主要的编码方法有预测编码和变换编码两种。用线性预测方法对图象信号编码是 1952 年由贝尔实验室首先提出的, 1966 年对实际的图象从理论上系统地提出了编码方法, 1969 年进行了线性预测编码的实际试验。此后, 出现了各种改进的帧内和帧间线性预测编码方法和自适应预测编码方法。1975 年以来, 有人通过测量电视图象中运动物体的位移来进行帧间预测, 可使数码率进一步降低。这一方法不仅用于电视传输提高了质量, 也可用于可视电话和会议电视。变换编码是 1968 年由 Pratt 首先提出的, 他采用的是傅里叶变换编码。此后, 相继出现了 Hadamard 变换、Walsh 变换、斜变换、K-L 变换如余弦变换编码等。变换编码是从频域的角度减小图象信号的相关性, 它在降低数码率方面也取得了和预测编码相近的进展。

为了获得比标准电视更高的图象质量, 从 1970 年开始对高清晰度电视(HDTV)进行了研究, 它的扫描线/场频有 $1125 \text{ 行}/60 \text{ Hz}$ 或 $1249 \text{ 行}/50 \text{ Hz}$, $2:1$ 隔行扫描; 而画面的宽度与高度之比由普通广播电视的 $4:3$ 扩大为 $5:3$ 或 $16:9$ 。(这样的比例对人眼的观看更合适些。)显示器则将采用对角线为 1 m 的显象管, HDTV 图象质量由于分辨率的提高

而得到提高,其质量相当于 35mm 的幻灯片,优于 35mm 的普通电影。但是, HDTV 图象信号的频带较宽,以日本 NHK 公司的建议为例,亮度信号 Y 为 20 MHz,两个色差信号 C_R 、 C_B 分别为 7.0 和 5.5 MHz。因而,若不采取频带压缩的措施,其信号带宽为普通电视的五倍以上,传输时占用频带太宽。1984 年日本 NHK 公司提出多重亚抽样编码(MUSE)方法,它利用亚抽样和运动补偿技术使频带得以压缩。虽然 HDTV 是一种很有前途的电视制式,但在降低成本、与现有的标准电视兼容以及频带压缩方法等方面还需要进一步进行研究。

(2) 传真:把文字、图表、照片等用纸记录的静止图象,通过光电扫描方法变换为电信号,经传输后在收端以硬拷贝方式得到和发端原图相类似图象的通信方式称为传真。1925 年开始使用横贯美国大陆的照片传真。此后,传真机的速度和质量不断提高。60 年代,就出现了能在一个话路上传输一份 ISO(国际标准化组织)A4(210 mm × 297 mm;相当于我国十六开纸的大小)约需 6 分钟时间的一类机。当采用一些简单的频带压缩方法后,将传输时间缩短为 3 分钟,称其为二类机。二类机在 70 年代得到很快的发展,先进的二类机已经具有跳过白色编码的性能。1980 年 8 月,CCITT 通过了有关三类传真机国际标准的建议,这种传真机的特点是信号在调制之前要经过消除信号多余度的数字编码,建议的编码方法是一维改进型的 Huffman 码及二维改进型的 READ 码。由于采用了压缩编码,传输时间进一步压缩为 1 分钟。1984 年 CCITT 又通过有关四类传真机的建议,四类机的编码方法与三类机基本相同,采用改进型 READ 码 II 型,但加有信道纠错码,以适于进入公用数据网。目前,已经出现了仅数秒钟传输一幅 A4 文件的传真机,其分辨率也高达 16 点/毫米。

(3) 图文电视和可视图文:图文电视(TELETEXT)和可视图文(VIDEOTEX)都是提供可视图形文字信息的一种通信方式。图文电视是一种单向传递信息的工作方式,具有图文电视功能的电视台在电视信号的消隐期重复发送图文信息,而用户利用自己的电视机和专用终端收看所需要的图文信息。可视图文是双向工作方式,用户可以利用家用电视机、(专用终端)及普通电话线路,向具有可视图文功能的邮电局(或某种信息中心)提出所需要的服务内容以及从它的数据库中选择所需要的信息,并将这些信息存贮或显示在用户的终端上。70 年代初,这两种通信方式在英国开始使用。1974 年,英国邮政局利用现有的电话网和家用电视机为用户提供情报(天气、商业等)检索的服务业务。此后,各国都相继发展了这种通信方式。80 年代初,西欧、北美和日本已先后建立了 CEPT、NAPLPS 和 CAPTAIN 等系统。我国从 1985 年起也相继研制出一些图文电视系统。图文电视和可视图文系统的性能正朝如下几方面发展:显示的图文信息更丰富和更吸引人;提高存贮和传输的有效性;提高与现有编码标准的兼容性和降低终端成本等。1984 年 CCITT 对图文电视和可视图文在公用数据网进行传输作了建议,在所建议采用的国际标准中,公用数据网是一个被称为开放系统互连(OST)模式的模块结构,该模式分成七层,图文电视和可视图文在模式的第六层,即表示层统一起来,在这一层上它们具有相同的数据编码格式。

(4) 有线电视:有线电视(CATV)是用高灵敏度天线接收的(或由电视台、录像机、视频光盘机直接提供的)电视信号,通过同轴电缆或光纤等宽带传输线路,将电视节目分配给各个用户电视接收机的系统。第一个有线电视系统于 1949 年安装在美国,当时用的是同轴电缆和小功率发射机,它解决了一些由于高山阻挡了电波传播而使某些地区难于收看

到电视的问题。一年后，安装起了第一台正式的有线电视设备。1975年美国有了3000个有线电视系统，提供850万个用户。1982年增加到4100个系统，提供2500万个用户，有线电视的用户占全部电视用户的30%以上。在加拿大，电视用户中的60%以上有有线电视。80年代中期以来，我国的有线电视用户增加得也很快，有线电视迅速发展的主要原因是：城市中高层建筑物的增加和高频噪声的增加，使电视的收看质量变坏；电视节目多频道化的需要以及地区内、地区间信息系统的发展等。在有线电视系统中，不仅能对本地区和外地区的节目再播送，还能自办节目。从1977年以来，已经出现了用光缆传输的有线电视，它具有比同轴电缆更宽的传输频带，有线电视网的出现使有线电视的应用进一步扩大。用户输入信息后，可通过有线电视网络系统看到网内所编的电视节目和服务信息。

1.3 视觉原理

在很多图象通信系统中，图象的最终接受对象是人。人们利用其视觉系统对图象的观察和理解获取图象中的信息。因此，有必要研究人的视觉机构及视觉特性。在研究视觉特性的基础上，我们可把人的视觉过程用一个简单的数学模型表述出来，用这一模型描述主要的视觉特性。

1.3.1 人眼的构造

眼球的水平截面示意图如图1.4所示，它由三层薄膜包围着。在最外一层上，位于眼球前方的大约 $1/6$ 部分为透明的角膜，光线从这里进入眼内；其余 $5/6$ 部分为巩膜，它的作用是巩固和保护整个眼球。中间一层由虹膜和脉络膜组成，虹膜的中间有一个圆孔，称它为瞳孔。瞳孔的直径可在约2mm到8mm之间变化，其作用和照象机中的光圈一样可以控制进入眼内的光通量。最内一层为视网膜。进入角膜内的光线通过水晶体(其作用相当于透镜)聚焦在视网膜上，在视网膜表面分布有大量的光敏细胞，按其形状可分为杆状和锥状两类。大约有650万个锥状细胞集中在黄斑区内，其密度高达15万个/平方毫米，它提供叫做“白昼视觉”的视觉响应，在观看明亮的景物时，依靠锥状细胞，它提供色

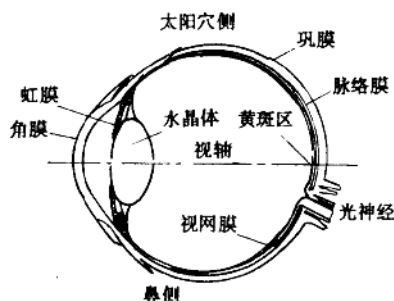


图 1.4 眼球水平截面图

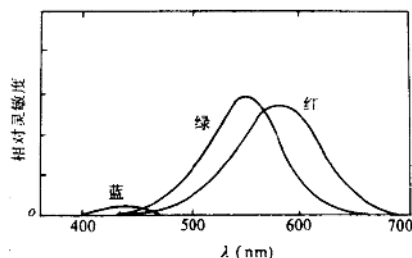


图 1.5 三种锥状细胞的光灵敏度

觉。杆状细胞大约有 1 亿个，它提供叫做“夜视觉”的视觉响应，在观看低照明度下的景物时，依靠杆状细胞，它没有色觉。

提供色觉的锥形细胞有三种类型，它们具有不同的随光波波长变化的吸收特性，它们分别对波长为 580 nm(红光)、540 nm(绿光)和 440 nm(蓝光)的光具有峰值特性，见图 1.5。图中的三条曲线是相互交叉的，说明某一波长的单色光可能引起两种或者三种锥状细胞的响应，总的彩色感觉将是这些锥状细胞响应的综合结果。例如波长 580 nm 对应的黄色光，它是红敏和绿敏锥状细胞同时被激励并给出响应的综合结果。

人眼在观察景物时，成象在视网膜的黄斑区周围。视网膜上的光敏细胞受到不同程度的光刺激，就产生强度不同的电脉冲，并经神经纤维传送到神经中枢。由于不同位置的光敏细胞产生了和该处光强弱成比例的电脉冲，因此，大脑中便形成了一幅景物的感觉。

1.3.2 视觉特性

1. 眼的适应性

当人们从强光环境进入较暗的房屋时，需要经过几分钟，才能恢复视觉，这称为暗适应性。反之，当光线突然由暗变为亮时，人的视觉却可以较快地恢复，这称为亮适应性。

对于具有相同亮度的物体，由于其背景亮度不同，会使人眼产生不同的主观感觉。同样的一块黑色物体，若其周围背景是白色，就会使人眼感到该物体比周围背景为灰色时更黑些。此现象称为对比现象。和亮度对比现象相似，对彩色物体，有彩色饱和度对比现象和色调对比现象，即背景不同时，会感到有不同的彩色饱和度和色调。

2. 对比灵敏度

实验表明，人眼辨别亮度差的能力是同周围环境以及照度本身的大小有关的。我们把主观上刚可辨别的最小亮度差 ΔL 称为亮度的可辨别阈值。在图 1.6 中，若将亮度为 $L + \Delta L$ 的目标置于亮度为 L_0 的背景之中，可以发现， ΔL 不仅与 L 本身有关，还与 L_0 有关。

设背景亮度 $L_0 = L$ ，可测得一条 $\Delta L / L$ 随 L 变化的曲线，如图 1.7 中的虚线所示。

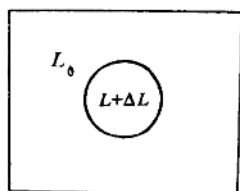


图 1.6 目标与背景的亮度

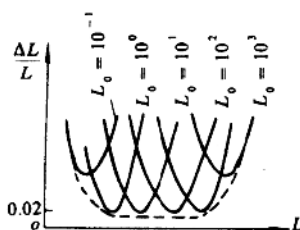


图 1.7 对比灵敏度

在亮度 L 的相当宽的范围，所谓的韦伯比 $\Delta L / L$ 接近于一常数 0.02。而在很高和很低的 L 下，此比值就不是常数。 $\Delta L / L$ 称为对比灵敏度。若 L_0 与 L 不同而取某一定值，则 $\Delta L / L$ 与 L 和 L_0 的关系如图 1.7 中的实线所示，这时对比灵敏度为常数的范围大大地缩小了，但图中实线的谷值的包络与虚线一致。由测得的对比灵敏度看出， $\Delta L / L$ 的动态

范围大约是以 L_0 为中心的 2.2 个对数亮度单位, 比 L_0 高或低大约 1.5 个对数亮度单位, 将使人眼产生最白或最黑的感觉。这意味着可以区分的亮度级约为 150~250。

3. 分辨力

区分两相邻发光点的能力称为分辨力。设两相邻点的视角为 θ , 单位为分('), 则分辨力定义为

$$\rho = \frac{1}{\theta}$$

人眼的最小分辨视角为 $1'$, 故 $\rho = 1$ 。

分辨力与背景亮度、被观察物体的运动速度以及颜色有关。当背景太亮, 以致与物体亮度接近时, 分辨力降低。当物体运动速度增加时, 分辨力下降。人眼对彩色的分辨力比对亮度的分辨力要差。如果以黑白分辨力为 1, 则黑红为 0.4, 绿蓝为 0.19。

4. 马赫效应

如图 1.8 所示, 当亮度发生跃变时, 视觉上会感到边缘的亮侧更亮些, 而暗侧更暗些, 称此现象为马赫效应。这意味着一种微分运算, 起着边缘增加的作用。

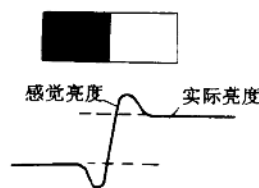


图 1.8 马赫效应

5. 视觉惰性

人眼的亮度感觉不会随着物体亮度的消失而立即消失, 而需要一定的过渡时间, 这就是视觉惰性。实验表明, 在此过渡时间内, 亮度感觉按指数规律逐渐减小。利用这一特性, 由每秒 24 帧的电影画面可形成连续活动景象感觉的电影。当帧重复频率太低时, 会出现闪烁感觉, 不引起闪烁感觉的最低重复频率叫临界闪烁频率, 它略低于 24 Hz。在帧频率高于该临界频率时, 主观感觉亮度为显示亮度的平均值。隔行扫描就是利用这一特性克服闪烁现象的, 这又可降低行扫描的频率, 使得传输频带得以压缩。

6. 可见度阈值

可见度阈值是指正好可以被看到的干扰值, 低于该阈值的干扰是觉察不出来的。当某像素的邻近像素有较大的亮度变化时, 实验表明可见度阈值会增加。对于一条亮度变化较大的边缘, 在边缘处的阈值比离边缘较远处的阈值要高。这就是说, 边缘“掩盖”了边缘邻近像素的信号干扰。这种效应称为视觉掩盖效应。应注意不要将马赫效应与掩盖效应相混淆, 前者是指边缘两边亮度分别有更亮和更暗的感觉。边缘的掩盖效应与边缘出现的时间长短、运动情况有关。当出现的时间较长时, 掩盖效应更显著。当图象稳定地出现在视网膜上时, 掩盖效应就不那么明显。

可见度阈值和掩盖效应对图象编码量化器的设计有重要作用。利用这一视觉特性, 在图象的边缘区域可以容忍较大的量化误差, 因而可使量化级减少些, 从而可降低数码率。2.5.1 节将对这一问题进行详细的讨论。

1.3.3 视觉模型

由于视觉特性是很复杂的, 而且还有很多视觉特性没有被人们所认识, 因此要用一个精确、完整的模型来描述这些特性是非常困难的。然而人们希望在输入的光图象和视觉神

经的输出之间建立一个简单的模型,使所建立的模型与实际结果尽量接近。这里将介绍一种简单的黑白视觉模型。

这是根据人眼对外界光刺激的感知过程而建立的模型,它把视觉过程分为三个阶段。图象亮度从进入角膜起到为视网膜所接受的过程是视觉过程的第一阶段。实验表明,这一阶段的作用可以等效为一个低通滤波器,其传输函数可写为

$$H_1(\omega) = \frac{2\alpha}{\alpha^2 + \omega^2}$$

式中, α 为取决于瞳孔直径的参数,当瞳孔直径为 3 mm 时, $\alpha = 0.7$ 。此时低通滤波器的半功率点截止频率为 6.6 周/度。对应于 $\alpha = 0.7$ 时低通滤波器的传输函数为

$$H'_1(\omega) = \frac{1.4}{0.49 + \omega^2}$$

其图形示于图 1.9(a)。

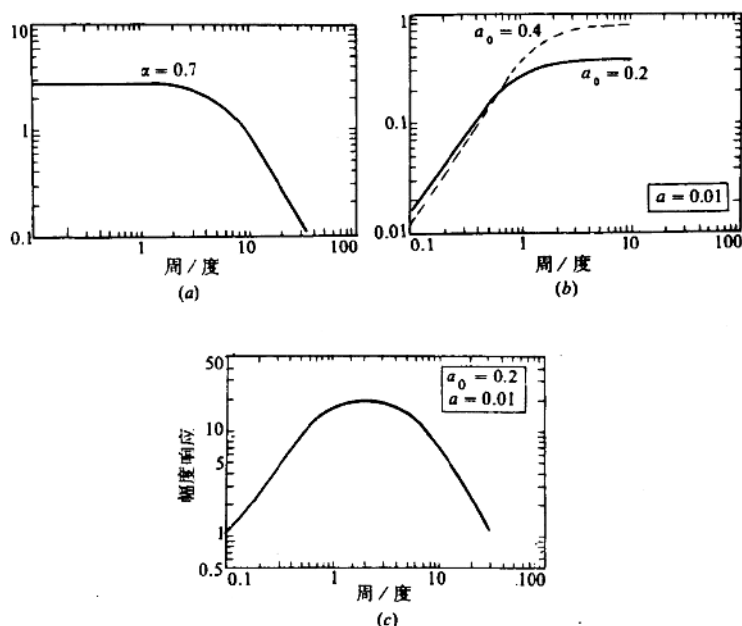


图 1.9 视觉过程的传输函数

(a) 低通滤波特性; (b) 高通滤波特性; (c) 带通滤波特性

视网膜上的光敏细胞对光的响应是视觉过程的第二阶段。实际表明,主观亮度感觉是与景物客观亮度的对数成比例关系的,因此,这一阶段可看作是一个对数运算。

视神经对信号的传递过程是视觉过程的第三阶段。实验表明,这一阶段的作用可以等效为一个高通滤波器,其传输函数可写为

$$H_2(\omega) = \frac{a^2 + \omega^2}{2a_0 a + (1 - a_0)(a^2 + \omega^2)}$$

式中, a_0 和 a 是与神经系统有关的两个参数, 当 $a=0.01$, $a_0=0.2$ 和 0.4 时的图形示于图 1.9(b)。通常, 取 $a=0.01$, $a_0=0.2$ 与实验数据较为一致。此时, 滤波器的传输函数表示为

$$H'_2(\omega) \approx \frac{10^{-4} + \omega^2}{4 \times 10^{-3} + 0.8\omega^2}$$

将第一阶段和第三阶段的作用综合起来, 就可以获得 $H_1(\omega)$ 与 $H_2(\omega)$ 相乘的带通滤波器的传输函数, 其图形示于图 1.9(c)。这样, 可将视觉过程用图 1.10 的模型来表示。

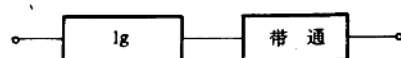


图 1.10 视觉模型

视觉过程的带通特性可以通过实际测量来证明。测量是这样进行的: 在观察者面前放两个光栅(即黑白相间的条纹图案, 条纹变化的密度即为光栅的空间频率)。一个是参考光栅, 它有恒定的对比度和空间频率; 另一个是测试光栅, 它的空间频率和对比度是可变化的。这里, 对比度是指光栅的最大亮度与最小亮度之比。对测试光栅, 固定其为某一空间频率, 然后改变其对比度, 直至观察者的视觉对两个光栅具有相同的对比度感觉, 就获得对应于该空间频率的对比度值, 它是图 1.11 中曲线上的一个点。改变为另一空间频率, 即改变测试光栅条纹变化的密度, 调整对比度, 使观察者对该光栅与对参考光栅有相同的对比度感觉, 又得到曲线上的一点。不断改变测试光栅的空间频率, 就获得一条反映视觉具有带通特性的曲线。由图 1.11 看出, 它与图 1.9(c) 具有类似的形状。该曲线是通过与参考光栅的比较而测得的, 显然它反映了视觉系统输出与输入之间对不同空间频率的响应。如果我们设 $F_i(u, v)$ 为视觉系统输入图象的傅里叶变换, $F_o(u, v)$ 为视觉系统输出图象的傅里叶变换, 那么, 视觉系统的幅度特性可写为

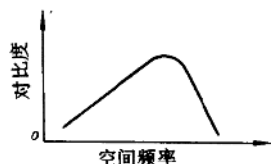


图 1.11 视觉的 MTF 曲线

$$|H(u, v)| = \frac{|F_o(u, v)|}{|F_i(u, v)|}$$

通常, 称 $|H(u, v)|$ 为视觉系统的调制传递函数(MTF)。图 1.11 就是一条视觉系统的调制传递函数曲线。由于视觉系统的调制传递函数易于测试, 因此它在视觉和光学系统中有很重要的作用。

1.4 图象质量评价

在图 1.2 所示的图象通信系统中, 接收端所恢复出的图象质量是与信源编码、信道编码、调制器和信道特性有关的。经信源编码后, 图象信号的数码率被降低了, 但必须保证在接收端的显示器上有足够高的图象质量。因此, 有必要讨论图象质量的评价问题。图象

质量的含义包括两个方面，一是图象的逼真度，另一是图象的可懂度。所谓图象的逼真度是指被评价图象与标准图象的偏离程度，而图象可懂度是指由图象能向人或机器提供信息的能力(例如一幅被传送的文字图象，能读懂的文字数所占的比例)。人们希望能够得出图象逼真度和可懂度的定量描述，但是由于目前对人的视觉系统的性能还没有充分掌握，因此我们将只讨论主观评价方法以及图象逼真度的描述方法。

1.4.1 图象的主观评价

图象的主观评价就是以人作为图象的观察者，对图象的优劣作出的主观评定。这时，所评价出的图象质量不仅与图象本身特性有关，而且还与观察者特性以及观察条件有关。尽管如此，它仍然是目前最常用也是较可靠的方法。

主观评价一般可分为两种类型：绝对评价和相对评价。绝对评价是由观察者根据一些事先规定的评价尺度或自己的经验，对被评价图象提出质量判断。在有些情况下，也可以提供一组标准图象作为参考，帮助观察者对图象质量作出合适的评价。表 1.1 示出国际上规定的五级质量尺度和妨碍尺度(简称为主观评价的 5 分制)。对一般人来讲多采用质量尺度，而对专业人员来讲，则多采用妨碍尺度。

表 1.1 尺度评价表

质量尺度	妨 碍 尺 度
5. 非常好	5. 丝毫看不出图象质量变坏
4. 好	4. 能看出图象质量变坏，但并不妨碍观看
3. 一般	3. 清楚地看出图象质量变坏，对观看稍有妨碍
2. 差	2. 对观看有妨碍
1. 非常差	1. 非常严重地妨碍观看

相对评价是由观察者将一批图象由好到坏进行分类，将它们互比较得出好坏并给出分数。如果将该批图象中其质量为平均水平的图象记为 3 分，那么，比平均水平好的图象记为 4 分，比平均水平好得多的图象记为 5 分，而比平均水平差和差得多的图象分别记为 2 分和 1 分。评价的结果可用一定数量的观察者的平均分数得出。其平均分数 $\bar{C}$ 定义为

$$\bar{C} = \frac{\sum_{i=1}^K n_i C_i}{\sum_{i=1}^K n_i}$$

式中， C_i 为图象属于第 i 类的分数， n_i 为判该图象属于第 i 类的观察者人数。

为了保证图象主观评价在统计上有意义，参加评分的观察者至少应有 20 名，其中应包括一般观众及专业人员。

1.4.2 图象的逼真度

由于对彩色图象逼真度的定量表示是一个更为复杂的问题。这里只简单介绍黑白图象

逼真度的定量表示方法。

为了进行逼真度计算，先要给出一标准的或理想的图象作为参考图象 $f(x, y)$ 。设它是定义在矩形区域 $-L_x \leq x \leq L_x$, $-L_y \leq y \leq L_y$ 内的连续图象。然后我们来讨论一降质的连续图象 $\hat{f}(x, y)$ 与 $f(x, y)$ 之间的接近程度。它们之间的逼真度可用归一化互相关函数来表示为

$$K = \frac{\int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} f(x, y) \hat{f}(x, y) dx dy}{\int_{-L_x}^{L_x} \int_{-L_y}^{L_y} [f(x, y)]^2 dx dy}$$

为了使逼真度与主观评价的结果一致，在进行逼真度计算之前，应该对图象进行某种预处理，例如对数处理，用 $\sigma\{\cdot\}$ 表示。

对于离散图象，逼真度可定义为归一化均方误差值：

$$\varepsilon = \frac{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N [\sigma\{f(j, k)\} - \sigma\{\hat{f}(j, k)\}]^2}{\sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N [\sigma\{f(j, k)\}]^2}$$

在离散图象情况下， $\sigma\{\cdot\}$ 为对图象中离散点的运算符。除了前面提到的对数运算，常用的为 $k_1 \log_b [k_2 + k_3 f(j, k)]$ 以外，还可以是 $[f(j, k)]^v$ 、 $f(j+1, k) + f(j-1, k) + f(j, k+1) + f(j, k-1) - 4f(j, k)$ 等，其中的 k_1 、 k_2 、 k_3 和 v 都是常数。

习 题

1-1 为了要测试一台摄象机的调制传递函数(MTF)，现有一台能产生黑白相间条纹，且行数可变的电视信号发生器，一台示波器。

(1) 试组成测试的原理框图。

(2) 若从示波器上直接测得电视信号发生器所产生的黑白电平之差值为 2.5 V，而当电视信号每帧的扫描线分别为 592、888、1184、1480、1776 行时，测得摄象机的黑白信号差值为 1.5 V、1.1 V、0.75 V、0.5 V、0.35 V，画出摄象机系统的 MTF 曲线。

1-2 对一幅图象作相对主观评价，有 20 个观察者参加评定。其中，有 10 个观察者认为该图象是“非常好的”，记 5 分；5 个观察者认为该图象是“好的”，记 4 分；另 5 个观察者认为该图象属于“中等水平”，记 3 分。求该图象的平均分数。

参 考 文 献

- [1] W. K. Pratt, Digital Image Processing, Wiley, New York, 1978.
- [2] R. C. 冈萨雷斯, P. 温茨:《数字图象处理》(李叔梁等译), 科学出版社, 1981.
- [3] R. J. Clarke, Transform Coding of Images, Academic Press, London, 1985.