

光电信息处理导论

张肇群 主编

华中理工大学出版社



光 电 信 息 处 理 导 论

张 肇 群 主 编

华中理工大学出版社

光电信息处理导论

张肇群 主编

责任编辑 李凤英

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社印刷厂印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:7.5 插页:2 字数:182 000

1992年10月第1版 1992年10月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-0690-7/TN·22

定价:2.05元

(鄂)新登字第10号

前 言

(60年代出现了激光,给古老的光学注入了新的活力,使之步入了蓬勃发展的新阶段。当人们跨入信息社会的今天,信息处理又成为当今极为活跃的学科领域。

信息处理可分为两大类:数字处理和光学处理。这两种处理方法各有所长,也各有所短。一般说,数字处理,即计算机处理,具有灵活多样、精度高的特点,但实时性差。光学处理具有二维并行处理能力,速度快,容量大,实时性好,但不够灵活多样。若把二者结合起来,取长补短,则会发挥更大的优势。有关数字处理的专著和光学处理的专著已有不少,它们在教学、科研和生产等领域发挥了很好的作用。作者试图将二者结合起来,编写了《光电信息处理导论》一书,作为抛砖引玉,以求引起同行对此的关注。

本书是作者根据多年来对硕士研究生和本科生的教学所用讲义和科研资料编写而成。听课的学生多数是电子与信息工程系的,也有光学工程系的。他们在接受能力上各有特点。电信系的学生对傅里叶分析方法较为熟悉,接受较快,要着重物理概念的理解。光学系的学生对傅里叶分析较生疏,初学时要细致引导,加强数学与物理概念的联系。不管哪部分同学对本课程均有浓厚的兴趣。本书除作为教科书外,还可供从事光学工程、光学信息处理、数字计算机处理、模式识别、遥感技术等方面的技术人员和研究人员参考。

本书由张肇群教授主编。全书共十一章,第一章到第七章由张肇群编写,第八、九章由常大定编写,第十、十一章由曹玉琳编写。在编写过程中,得到万发贵教授、朱耀庭教授、柳健教授和周曼丽教授的热情指导和帮助;葛宏伟、徐波等同志做了大量具体工作。

本书的出版凝结了他们的辛勤劳动，作者表示衷心感谢。

雷玉堂副教授主审了全书，并提出了许多宝贵意见，作者一并致谢。由于作者水平有限，书中难免出现错误和不当之处，敬请读者批评指正。

张肇群、常大定、曹玉琳

目 录

第一章	绪论	(1)
第二章	光的标量衍射理论	(6)
§ 2-1	光波的复振幅表示	(6)
§ 2-2	光的衍射现象	(8)
§ 2-3	惠更斯-菲涅耳原理	(9)
§ 2-4	基尔霍夫衍射公式	(11)
§ 2-5	菲涅耳衍射和夫琅和费衍射	(13)
第三章	空间频率和光学傅里叶变换	(18)
§ 3-1	空间频率概念	(18)
§ 3-2	光学傅里叶变换	(23)
§ 3-3	常用函数及其傅里叶变换	(29)
§ 3-4	傅里叶变换实例	(35)
第四章	透镜的傅里叶变换性质	(44)
§ 4-1	薄透镜——位相交换器	(44)
§ 4-2	透镜的傅里叶变换性质	(49)
§ 4-3	透镜成像特性的一般分析	(56)
第五章	光学空间滤波	(59)
§ 5-1	振幅滤波和阿贝-波特(Abbe-Porter)实验	(59)
§ 5-2	位相滤波	(63)
§ 5-3	逆滤波	(66)
§ 5-4	匹配滤波	(67)
§ 5-5	光学滤波的基本运算	(69)
第六章	全息照相	(82)
§ 6-1	全息照相原理	(82)
§ 6-2	盖伯全息图	(85)
§ 6-3	利思-乌帕特尼克斯全息图	(86)

§ 6-4	傅里叶变换全息图	(88)
§ 6-5	彩虹全息图	(91)
§ 6-6	模压全息图	(96)
第七章	光学图像识别	(99)
§ 7-1	空域相关	(99)
§ 7-2	频域相关	(102)
§ 7-3	Vander Lugt 滤波器	(103)
§ 7-4	空间变化处理	(107)
第八章	光电探测器	(119)
§ 8-1	光电效应的基本概念及单元光电探测器	(119)
§ 8-2	光电成像器件	(126)
§ 8-3	电荷耦合器件	(138)
§ 8-4	楔环探测器	(152)
第九章	光电信息处理实时转换器件	(155)
§ 9-1	电光效应及应用	(155)
§ 9-2	空间光调制器概述	(161)
§ 9-3	普克尔效应空间光调制器	(163)
§ 9-4	液晶光调制器	(171)
§ 9-5	声光调制、磁光调制及其应用	(180)
第十章	光电混合处理系统	(188)
§ 10-1	光电混合处理系统的基本概念	(188)
§ 10-2	光学频谱分析系统	(190)
§ 10-3	光电混合相关器	(192)
§ 10-4	以微处理机为基础的混合处理系统	(195)
第十一章	计算机在光电信息处理中的应用	(199)
§ 11-1	抽样定理和离散傅里叶变换	(200)
§ 11-2	快速傅里叶变换(FFT)	(211)
§ 11-3	计算机在光电信息处理中的应用	(218)
参考文献		(231)

第一章 绪 论

一、光电技术与信息工程

当今人类已进入信息社会。在这个社会里,人际间的交往,人类认识自然、改造自然都要通过信息这个媒介。当前人们获取信息的主要手段是光电技术,它已成为信息社会的支柱,有人说未来的世界是光电的世界。

大家知道,人是通过四个渠道获取外界信息的。这就是视觉、听觉、嗅觉和触觉信道系统。然而,作为信息的主要来源,据统计,80%以上的信息是通过视觉信道获取的。

人的视觉系统由眼睛、视网膜和大脑神经三部分组成。眼睛将外界的景物成像在视网膜上。视网膜由无数的视觉细胞组成,犹如一个性能良好的阵列光电探测器,它把光信息转换为电信息,由神经中枢传给大脑,从而识别物体。可以说视觉系统是大自然赋予人类的一个完善的光电系统。

在视觉系统中,眼睛无疑起着重要的作用。它是一台很精细的光学仪器,它的视场大(前视 180°),自动化程度高(自动调距,自动调光),颜色分辨力强。但是也有它的不足,例如,分辨率较低,分辨角仅为 $1'$,因此,它不能直接分辨小如细菌的物体,也不能看清遥远的星球。此外,它的视觉波段窄,只能感知可见光,而无法感知大部分的电磁波段。这就给人们认识世界带来很大的局限。

为了克服眼睛的缺陷,扩展人们的视野,从古代起人们就开始了对光学技术的研究与开发。16世纪,伟大的科学家牛顿和伽利略发明了显微镜和望远镜,开始了光学技术的繁荣时期,人们创造

了品种繁多、性能良好的各种光学设备,为社会进步作出了贡献。

但是总观起来,在过去较长的时期里,光学技术的发展是缓慢的,其原因固然很多,但主要的是,只沿光学—机械单一的模式发展。直到本世纪 60 年代,由于引入了电子技术,发明了激光,才结束了这漫长的徘徊历程,进入了崭新的光电时代。

同样的,电子学的发展也经历了从单一模式到光电结合的过程。在本世纪初,真空三极管和电子放大器的发明,揭开了科技史上新的一页,迎来了崭新的电子时代。现在名目繁多的电子仪器已广泛用于信息社会各个方面。特别是近 30 年来,由于电子器件不断革命创新,由真空管到晶体管,由晶体管到集成电路、大规模和特大规模集成电路,致使电子设备不断更新换代,性能越来越好,朝着高速度、大容量、多通道的方向迅速发展,创造了许多人间奇迹。目前各种电子设备已成为当今信息社会的支柱。

但是,电子技术也和其它事物一样,有着自身的局限性,这些局限性阻碍了它的进一步发展。

(1) 频率的界限。回顾一下电子学的历程,不难看出它的历史是使“频带高频化”的历史。以通信技术为例,最早用电子管的时候,载波频率只有几十 MHz,通信的速率及容量是极为有限的。当用晶体管器件时,载波频率提高到几百 MHz,通信设备性能也随之提高。到了微波器件时代,载波频率达到几百 GHz ($1\text{GHz} = 10^9\text{Hz}$),其波长达到厘米和毫米级,通信能力大大提高了。载波频率的高频化,使电子设备的性能朝着高速率、大容量的方向发展。

但是,人工振荡的电波,根据理论推测,其波长上限不超过 1mm。由于受到波长的限制,微波通信的性能难以提高了。

到了本世纪 60 年代,根据量子效应振荡原理,出现了频率比微波高 1 千倍的激光,频率界限立即被打破了,载波频率提高了几个数量级,给“频带高频化”带来了希望。因此,70 年代初出现了激光光导通信,它的速率和容量比电子通信提高了几个数量级,使通信技术大大向前迈进了一步。

(2) 数的界限。

电子系统随着性能的提高,其所用元件数量呈线性增长,存在着数的界限。以计算机为例,图 1-1 为美国 IBM 计算机从本世纪 20 年代到 80 年代,随着其性能不断提高,所用元件数量增长的情况。

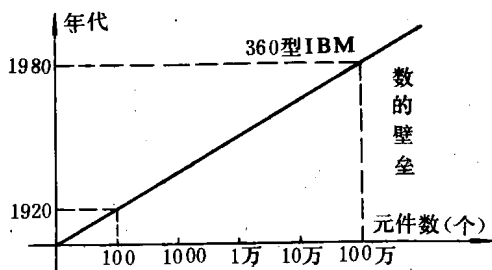


图 1-1 计算机元件增长示意图

由图可以看出,在 20 年代,当 IBM 处于初型的时候,元件数只有 100 个。到了 80 年代,IBM 发展到 360 型时,元件数已高达 100 万个! 如果再继续发展下去就存在着一个数的壁垒(数的界限)。为什么呢?因为电子元件都是作为单一的物理效应来应用的,这就必然会产生由物理定律来决定元件最终性能的极限。例如热力学极限,即为散热所需要的最小元件间隔的界限。尽管电子元件由离散型发展到集成型,其消耗功率在不断下降,但是随着高速度、大容量、小型化不断提高的要求,组成计算机的元件数总是有一定界限的。

使电子计算机所用元件跨越数的壁垒的一个有效途径是把光学技术引入电子学,例如,正在研制的光学计算机。因为构成光学系统的最基本元件——透镜,具有二维并行处理的功能。一个透镜就能完成一幅复杂图像的二维傅里叶变换及卷积运算。完成同样的运算如果采用电子频谱仪,其结构相当复杂,需用大量的电子元件。又如光盘存贮器(Optical disk),在同样面积的情况下,它的信息容量比现有的磁盘大几个数量级。

(3) 方法的界限。电子学对一幅图像的处理是用逐点扫描的方法,把一个二维(或三维)的空间分布变为一维时间序列;图像经处理后,再用同样的方法把一维时间序列恢复为二维图像。即使计

算机运算速度很快,这个处理过程也需要一定时间,在应用中就失去了它的实时性。

光学处理是二维并行的,光速极快,实时性很强。光学的方法就是仿生算法,因为人们观察物体总是二维并行的。

二、光电结合、携手并进

综上所述,光学和电子学都有自己的辉煌经历和优点,然而也有它们各自的不足,如果光电结合,取长补短,互相渗透,就会威力无穷,充分发挥光电技术在信息社会的支柱作用。

光电不仅需要结合,而且在机理上也存在着内在结合的条件:

(1) 从本质上看,光波和电波都是电磁波,本质相同,只是频率各异。光波频率高是很大的优点。电子技术较为成熟,光学可以借鉴。

(2) 从系统结构的基本性质看,电子网络和光学系统都是线性系统,二者均具有线性性和不变性。因此,可以用同样的数学方法,例如,用傅里叶分析方法来处理各自的问题。许多光学元件和电子元件的特性有着惊人的相似性,如照相底片和光电管、光学放大器和电子放大器等。

(3) 从任务看,电子系统与光学系统都是用来收集和传递信息的,都对信息感兴趣。所不同的是电子系统处理的信息一般是时间性的,例如被调制的电压或电流随时间的变化。而光学系统处理的信息则是空间性的,例如光波的振幅或光强在空间的分布。从抽象的观点看,这一差别不是本质的。

光子与电子携起手来,在信息科学技术上绝不是简单的加法,而是在开辟更加广阔的天地。

三、本课程讲授的内容

信息处理有两种:数字处理与光学处理。数字处理(计算机处理)已有许多专门论著,在此不再重述。本书重点讲述光学信息处

理基础和光电混合处理系统。

光学信息处理是建立在光的标量衍射的基础上的。因此,在第二章里首先建立受限衍射概念,讨论标量衍射公式以及菲涅尔和夫琅和费衍射。光学傅里叶变换和空间滤波是光学信息处理的核心,在第三、五章中讨论光学二维傅里叶变换和空间滤波运算。透镜是光学系统的基本元件,傅里叶分析方法在光学中卓有成效的应用是与透镜具有二维傅里叶变换性能分不开的,因此,在第四章中讨论薄透镜的傅里叶变换性质。全息术和匹配相关、图像识别是光学信息处理的重要应用领域,在第六、七章中分别加以讨论并介绍具有实用价值的白光彩虹全息、图像识别与工业检测系统。

光电结合是方向。光电转换和光电探测则是光电结合的桥梁和纽带。在第八、九章讨论光电转换技术以及各种探测器和空间光调制器,第十章讨论光电混合处理系统,第十一章介绍计算机在光电信息处理中的应用。

第二章 光的标量衍射理论

衍射是光的属性之一。在光学信息处理中,把光的衍射作为基础,因此,在本章中讨论光波的标量衍射理论。

光波是电磁波,因为磁矢量很微弱,光的效应基本上由电矢量决定。通常所说的光振动,是指空间某点的电矢量随时间的变化。光波是矢量波,从普遍意义上讲,光场分布应该用矢量场表示。因为矢量运算比较麻烦,因此,在大多数有关光的干涉和衍射问题的讨论中,把光场作为标量来处理。当满足下述条件:①衍射孔径远大于波长 λ ,②在离衍射孔较远的地方观察衍射场,标量衍射理论所给出的结果与实际十分相符。幸而,在我们讨论的问题中,这些条件是能满足的。

§ 2-1 光波的复振幅表示

在讨论光的标量衍射理论之前,先介绍一下单色光入射时光波复振幅的数学描述。

如果用标量函数 $U(x, y, z; t)$ 表示 P 点单色光的光振动,则

$$U(x, y, z; t) = A_0(x, y, z) \cos[2\pi\nu t - \phi(x, y, z)] \quad (2-1)$$

式中, $A_0(x, y, z)$ 为光振动的振幅; ν 为光波的时间频率; $\phi(x, y, z)$ 为 P 点的初位相。

ν 为确定常数的光称为单色光。

在运算中,用指数函数比用三角函数有很多方便之处,所以通常将式(2-1)用指数形式表现出来,即

$$U(x, y, z; t) = A_0(x, y, z) e^{-j2\pi\nu t} e^{j\phi(x, y, z)} \quad (2-2)$$

公式(2-2)已将取实部的符号 $\text{Re}\{\cdot\}$ 略去了,但必须记住光的振

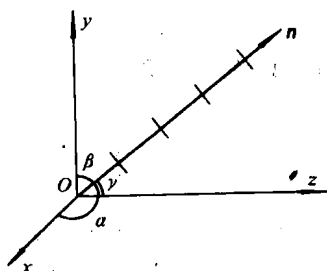
动是由它的实部表示的。

对于确定频率的单色光,时间因子是常数,它对描述光场的分布意义不大,所以光波的数学表达式可写成

$$u(x, y, z) = A_0(x, y, z)e^{j\phi(x, y, z)} \quad (2-3)$$

这个与时间无关的复指数 $u(x, y, z)$ 称为复振幅,它包含了光振动的振幅和位相。

常见的光波有平面波和球面波,我们讨论的也主要是这两种光波,因此,将它们的复振幅列出如下。



一、平面波的复振幅表示

平面波(见图 2-1)的特点:

图 2-1 平面波

波面为平面,波面上每一点的位相等;平面波光场中,各点振幅相等;光波的波面与传播方向垂直。用波面法线与 x, y, z 轴的夹角表示光波的空间位置,则平面波的复振幅为

$$u(x, y, z) = A_0(x, y, z)\exp[jk(x\cos\alpha + y\cos\beta + z\cos\gamma)] \quad (2-4)$$

式中, A_0 为光波的振幅; $k = 2\pi/\lambda$ 称为波数; α, β, γ 为传播方向角。

二、球面波的复振幅表示

球面波的特点:波面是一组同心球面,波面上各点的位相等;光场中各点振幅与该点到球心的距离 r 成反比。光波传播方向与光轴方向一致的球面波称为发散球面波(如图 2-2 左边

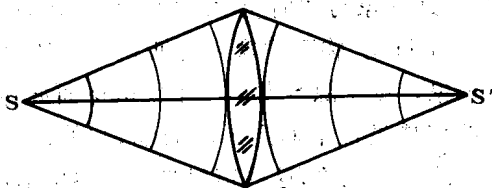


图 2-2 球面波

所示);反之为会聚球面波(如图 2-2 右边所示)。当直角坐标原点与球面波中心重合时,发散球面波的复振幅为

$$u(x, y, z) = \frac{A_0}{r} e^{ikr} \quad (2-5)$$

会聚球面波的复振幅为

$$u(x, y, z) = \frac{A_0}{r} e^{-ikr} \quad (2-6)$$

式中, A_0 为点光源的振幅。

§ 2-2 光的衍射现象

首先,做一个简单的衍射实验。如图 2-3 所示, S 为单色点光源, Σ 为光栏中的一个小孔, P 为观察屏。

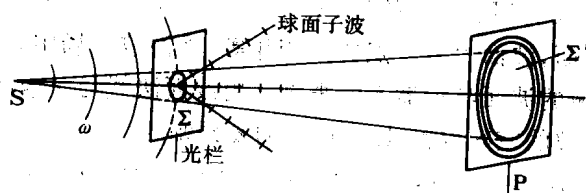


图 2-3 光的衍射

点光源发出一束光,经小孔 Σ ,在观察屏上得到它的投影像 Σ' 。按几何成像原理,只有在 Σ' 内才有光能存在, Σ' 以外光强为零,而且界线是很分明的。但实际测量的结果, Σ' 外也存在光强。因此,此现象与几何光学成像原理相矛盾。

17 世纪,物理学家惠更斯和菲涅耳用光的波动学说解释了这一现象。点光源 S 发出一个发散球面波, ω 为其波前(波阵面),在光波传播过程中遇到了障碍物,它的波前受到小孔 Σ 的限制,产生子波衍射现象,这些衍射光在观察屏形成一个子波干涉场,它是以投影区 Σ' 为中心,并向外扩展的一个衍射花环,因此,不仅投影

区内有光强,投影区外也有明暗相间的条纹。

从上述实验,可以给衍射下一个较为确切的定义:衍射就是光波在传播过程中,遇到障碍物时,它的波前受到限制,偏离“直线传播”的现象。定义中最重要的概念是“波前受限衍射”(Limited Diffraction)。不仅小孔产生衍射,大孔也会产生衍射;不仅圆孔,而且方孔、狭缝等都会产生衍射,只要波前受到限制就会产生衍射。事实上,光波传播时总会受到各种各样的限制。当光照明物体时,会受到物体的有限尺寸及微细结构的限制产生衍射光。因此,衍射现象是普遍存在的。由于光的波长很短,只有光波通过小孔和狭缝时才能明显观察到光的衍射现象。光波通过光学系统时,会受到系统有限大小光瞳的限制,因此,从广义说,光学仪器,哪怕口径很大的天文望远镜,也可称为受限衍射系统。

§ 2-3 惠更斯-菲涅耳原理

惠更斯-菲涅耳原理讲的是光波在介质中的传播规律和光场分布的形成。它包括两方面的内容:惠更斯的子波假设和菲涅耳的干涉解释。

惠更斯的子波假设:如图 2-4 所示, S 为一单色点光源,发出一球面波。 ω 是在光波传播过程中某一瞬间的波前。惠更斯把 ω 面上的每一点看作是子波源,它发出球面子波,子波的包络面形成了新的波前 ω' 。同样地把 ω' 面上的每一点作为新的子波源,发出子波的包络面又形成了新的波前 ω'' 。

如此循环下去,光波不断向前传播,而波前的法线方向就是光波的

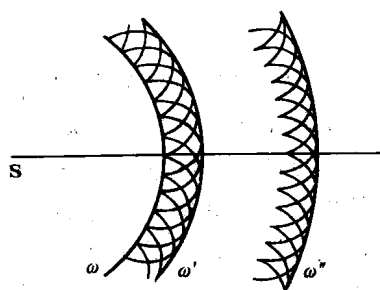


图 2-4 惠更斯的子波假设

传播方向。

惠更斯的子波假设,解释了光波的传播问题,但光场是如何分布的,则未涉及。菲涅耳用干涉原理解释了光场的形成及分布问题。他考虑到各子波来自同一光源,应该相干,因此,光场分布是子波相干叠加的结果。这样用干涉理论补充的惠更斯原理称为惠更斯-菲涅耳原理。它从理论上定性地阐述了光的传播和光场分布问题。

现在讨论惠更斯-菲涅耳原理的数学表达式。如图 2-5 所示,求光场空间任一点 P 的光振动。根据惠更斯-菲涅耳原理, P 点的光振动是 ω 面上各点发出的子波在 P 点相干叠加的结果。

设 Q 为球面波前 ω 上任意一点,它的光振动可用 $u(Q) = A_0 e^{ikR}/R$ 表示。式中 A_0 是光源 S 的振幅, R 为球面波半径。为求叠加积分,在 Q 点附近取元波面 $d\sigma$,则 P 点的光振动为

$$u(P) = \frac{CA_0 e^{ikR}}{R} \iint_{\Sigma} \frac{e^{ikr}}{r} k(\theta) d\sigma \quad (2-7)$$

式中, C 为常数, $k(\theta)$ 为倾斜因子,即考虑元波面 $d\sigma$ 上各子波对 P 点的贡献是与其倾角 θ 有关的。

惠更斯-菲涅耳原理,是建立在“子波源”的假设之上提出的,虽然在解决一些简单孔径的衍射问题中,得到与实际较符合的结果,但它是近似的,而且缺乏严格的以波动理论为基础的根据。虽然引入倾斜因子 $k(\theta)$,但并未说明它的具体函数形式;常数 C 代表什么内容也未作交待。这些不足,由基尔霍夫(Kirchhoff)衍射公式加以补充。

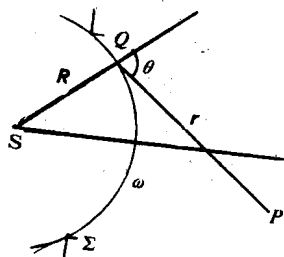


图 2-5 P 点的光振动