 电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

信息光学

(第二版)

梁瑞生 吕晓旭 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY <http://www.phei.com.cn>

0438/12

2008

电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业

信息光学

(第二版)

梁瑞生 吕晓旭 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

信息光学是物理光学和信息理论相互渗透而发展起来的新的学科分支。全书共分 11 章,重点介绍二维线性系统及其傅里叶分析,光学中常用到的特殊函数,卷积和傅里叶变换;叙述标量衍射理论和菲涅耳衍射与夫琅和费衍射以及它们与傅里叶变换的关系;讨论光学成像系统的衍射特性及频率传递函数,光学成像系统的光学传递函数,相干光的概念,光学全息照相的基本原理和光学全息的基本显示技术,空间滤波的基本原理和相干、非相干光学信息处理,以及光学干涉测量中的光信息处理。

本书可作为高等学校"光电信息工程"、"光信息科学与技术"、"光学工程"、"测控技术与仪器"、"光学"、"应用物理"等专业高年级本科生和研究生的教材,也可供从事光学信息处理、光学全息、应用光学等专业的科技人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

信息光学/梁瑞生,吕晓旭编著.—2 版.—北京:电子工业出版社,2008.3
电子信息与电气学科规划教材·光电信息科学与工程专业
ISBN 978-7-121-06418-0

I. 信… II. ①梁…②吕… III. 信息光学—高等学校—教材 IV. O438

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 053581 号

责任编辑:陈晓莉 特约编辑:李双庆

印 刷: 北京市李史山胶印厂
装 订:

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 20.25 字数: 518 千字

印 次: 2008 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4000 册 定价: 30.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

信息光学的主要内容是使用光学的方法实现二维函数的傅里叶变换,并在频率域中描述和处理光信息。信息光学的科学特点是引用通信和信息理论中的普遍概念和思想阐述光学现象,使光学和通信信息理论相结合,光学和信息科学相互渗透。19世纪末和20世纪初,傅里叶分析方法在光学领域中已有成功的应用;20世纪30年代泽尼克相衬显微镜的发明是信息光学早期卓越的成就。但是,信息光学得以迅速发展,却是在20世纪60年代激光器的出现,使人们获得了相干性极好的新光源以后。所以信息光学是近40年发展起来的光学中的一门新兴学科。信息光学中采用了傅里叶分析和线性系统理论分析光波的传播、衍射和成像现象,将光学系统看成是收集和传递信息的系统,把光学现象用通信和信息理论进行阐述,因而信息光学又是信息科学的一个重要部分。信息光学的主要组成部分如光学传递函数、光学全息及其显示、光学信息处理等已在光学工程、光学仪器检测、工业、农业、医学和科学事业中的各个领域有许多应用。信息光学已成为近代光学中最具广泛应用的新分支。这门新兴光学的迅速发展和运用,已引起普遍的重视,并产生了深远的影响。

由于信息光学中主要是采用傅里叶分析和线性理论阐述光学现象,因而信息光学也称为傅里叶光学。

本书是为高年级大学生和研究生的教学需要编写的。全书共分11章,第1章介绍二维线性系统及其傅里叶分析,重点介绍光学中常用到的特殊函数,卷积和傅里叶变换;第2章叙述菲涅耳衍射与夫琅和费衍射,以及它们与傅里叶变换的关系;第3章讨论光学成像系统的衍射特性及频率传递函数;第4章讨论光学成像系统的光学传递函数;第5章介绍部分相干光的概念;第6章和第7章分别讨论光学全息照相的基本原理和光学全息的基本显示技术;第8~10章是空间滤波的基本原理,相干、非相干光学信息处理;第11章是光学干涉测量中的光信息处理。

本书的习题编排考虑到知识点的连续性,改变了传统的以章为基础出题方式,而是以知识内容为基础,综合相关的知识理论给出。其优点是将各章的相关内容串联起来,有益于培养学生综合分析、解决问题的能力。

本书是根据作者多年从事这门学科的教学和科研工作,在第一版的基础上修改重写的。全书由梁瑞生统稿,其中第1章、第5章、第11章由吕晓旭编写,其余各章由梁瑞生编写,光电学院06级研究生杨广、黄宇娴、张庆生等研究生参加了书稿的录入和插图的绘制,李开振同志编写了书中的习题和答案。

本书是我校光学国家重点学科建设中编撰的“光电子科学与技术”丛书中的一部,长期以来一直得到刘颂豪院士的鼓励和指导,得到哈尔滨工业大学李淳飞教授的关心和指点。在编写过程中得到了华南师范大学信息光电子科技学院的老师的支持和鼓励,谨此致谢。

由于作者水平所限,难免有缺点和错漏,恳请指正。

作者

于华南师范大学

目 录

第 1 章 二维线性系统及其傅里叶分析	1
1.1 光学中的信号与系统问题	1
1.2 常用函数	3
1.2.1 阶跃函数	3
1.2.2 矩形函数	4
1.2.3 符号函数	4
1.2.4 斜坡函数	5
1.2.5 三角状函数	5
1.2.6 sinc 及 sinc^2 函数	6
1.2.7 高斯函数	6
1.2.8 圆柱函数	7
1.2.9 冲激函数	7
1.2.10 梳状函数	9
1.3 二维线性系统与线性不变系统	10
1.3.1 二维线性系统	10
1.3.2 二维空间平移不变系统	11
1.4 卷积与相关	12
1.4.1 卷积	12
1.4.2 相关	15
1.5 线性系统及线性不变系统的空域描述	17
1.5.1 信号与系统的基本概念	17
1.5.2 用冲激函数描述二维信号	18
1.5.3 用冲激响应描述线性系统和线性不变系统	19
1.6 线性不变系统的频域描述——本征函数及传递函数	20
1.6.1 线性不变系统对复指数信号的响应特点	20
1.6.2 本征函数、本征值及传递函数	20
1.6.3 二维信号复指数描述及其在线性不变系统中的传输特点	20
1.7 傅里叶分析基础	21
1.7.1 二维傅里叶变换的定义及存在条件	22
1.7.2 广义傅里叶变换	22
1.8 傅里叶变换的性质	24
1.8.1 线性性质	24
1.8.2 对称性质	24

1.8.3	二重傅里叶变换性质	25
1.8.4	空间平移特性	25
1.8.5	频域平移特性	25
1.8.6	缩放性质	25
1.8.7	空域导数性质	26
1.8.8	频域导数性质	26
1.8.9	卷积的傅里叶变换	27
1.8.10	乘积的傅里叶变换	27
1.8.11	相关的傅里叶变换	28
1.8.12	帕斯瓦尔(能量)定理	28
1.8.13	积分性质(一维情况)	29
1.9	一些常用的傅里叶变换对	29
1.10	光波场的数学描述	30
1.10.1	定态光场复振幅的标量描述	30
1.10.2	单色球面波的复振幅	31
1.10.3	平面波的复振幅	33
1.10.4	二维傅里叶分析	37
第2章	光的标量衍射理论	40
2.1	基尔霍夫衍射理论	40
2.1.1	衍射的概念	40
2.1.2	惠更斯-菲涅耳原理	42
2.1.3	基尔霍夫衍射公式	42
2.1.4	衍射的线性性质	44
2.2	衍射的角谱理论	45
2.2.1	角谱的概念	45
2.2.2	角谱的衍射理论	46
2.2.3	角谱衍射理论与基尔霍夫衍射理论的统一	49
2.2.4	孔径对角谱的影响	50
2.3	菲涅耳衍射	51
2.3.1	菲涅耳近似条件和菲涅耳区	51
2.3.2	菲涅耳衍射公式	53
2.4	菲涅耳衍射与傅里叶变换的关系	55
2.4.1	一般情况	55
2.4.2	会聚球面波照明的情况	56
2.5	夫琅和费衍射	57
2.5.1	夫琅和费衍射的近似条件和范围	57
2.5.2	夫琅和费衍射公式	58
2.6	夫琅和费衍射与傅里叶变换的关系	58
2.6.1	夫琅和费衍射与傅里叶变换的关系	58
2.6.2	单位振幅平面波垂直照明的夫琅和费衍射	59

2.7 简单孔径的夫琅和费衍射	60
2.7.1 矩形孔的衍射	60
2.7.2 单缝的衍射	62
2.7.3 双缝的衍射	62
2.7.4 圆孔的衍射	64
2.8 光栅的夫琅和费衍射	66
2.8.1 列阵定理	66
2.8.2 线光栅的衍射	67
2.8.3 余弦型振幅光栅的衍射	71
2.8.4 正弦型位相光栅的衍射	73
2.8.5 矩形位相光栅的衍射	74
第3章 光学成像系统的衍射特性及频率传递函数	77
3.1 透镜的位相变换作用	77
3.1.1 透镜与薄透镜的定义	77
3.1.2 透镜的复振幅透过率	78
3.1.3 透镜的位相调制作用	78
3.1.4 透镜的厚度函数	79
3.1.5 透镜的位相变换函数	81
3.2 透镜的傅里叶变换性质	83
3.2.1 几种特殊情况	83
3.2.2 一般情况	87
3.3 透镜孔径对傅里叶变换的影响	90
3.3.1 物体在透镜前	91
3.3.2 物体在透镜后	92
3.4 透镜的脉冲响应	93
3.4.1 点光源在坐标原点上	94
3.4.2 点光源在偏离光轴的 (ϵ, η) 点上	96
3.5 透镜的成像性质	97
3.5.1 透镜的卷积成像	97
3.5.2 透镜卷积成像的物理意义	100
3.6 衍射受限系统的成像分析	101
3.6.1 成像系统光瞳的概念	101
3.6.2 成像系统的普遍模型	101
3.6.3 衍射受限系统的定义	101
3.6.4 衍射受限系统的脉冲响应	102
3.6.5 衍射受限系统的成像性质	103
3.7 衍射受限系统的相干传递函数	104
3.7.1 衍射受限系统的相干传递函数	104
3.7.2 相干传递函数与光瞳函数的关系	105
3.7.3 举例	106

3.8	有像差系统的相干传递函数	108
3.8.1	广义光瞳函数	109
3.8.2	有像差系统的CTF	110
3.8.3	举例	110
第4章	光学成像系统的光学传递函数	112
4.1	非相干照明衍射受限系统的物像关系	112
4.1.1	非相干照明的特点	112
4.1.2	强度脉冲响应的定义	112
4.1.3	非相干照明系统的物像关系	113
4.2	衍射受限系统的光学传递函数	113
4.2.1	光强的空间频谱及其归一化	113
4.2.2	光学传递函数的定义	115
4.2.3	OTF的物理意义	115
4.2.4	CTF和OTF的关系	116
4.2.5	衍射受限系统的OTF	116
4.2.6	举例	118
4.3	有像差系统的光学传递函数	121
4.3.1	有像差系统的强度脉冲响应	121
4.3.2	有像差系统的OTF	121
4.3.3	举例	122
4.4	光学传递函数在像质评价中的应用	123
4.4.1	光学仪器的像质评价	123
4.4.2	传统的像质评价方法	124
4.4.3	OTF在像质评价中的应用	124
4.4.4	OTF的测量	125
第5章	部分相干光的叠加与传输	127
5.1	部分相干光的概念	127
5.2	多色光场的复函数表示——多频率光波的时频域叠加	128
5.2.1	多色光场的单色光波组合表示	128
5.2.2	多色光场实部与虚部的时域转换	129
5.2.3	有限时间间隔和有限带宽多色光的表示	129
5.2.4	窄带多色光的表示	130
5.2.5	多色光的能量关系及功率谱密度	130
5.3	部分相干光的互相关函数	130
5.3.1	多色光的叠加与相干函数	130
5.3.2	相干函数的谱密度表示	132
5.3.3	复相干度的余弦表示及干涉场的可视度	133
5.3.4	窄带光在准单色条件下的干涉	134
5.4	部分相干光相干性的度量	135
5.4.1	复相干度的一般测量方法	135

5.4.2	时间相干性及相干时间	135
5.4.3	空间相干性	138
5.5	多色光光场函数及互相干函数的传输	139
5.5.1	多色光场函数的传输——多色光的衍射	139
5.5.2	互相干函数和互相干强度的传输	141
5.5.3	准单色扩展非相干光波场的强度传输——范西泰特—策尼克定理	143
第6章	光学全息照相	146
6.1	全息照相的基本概念	146
6.1.1	什么是全息照相	146
6.1.2	全息照相的理论根据	146
6.1.3	全息照相的基本叙述	147
6.2	全息照相的基本分析	151
6.2.1	全息照相的基本公式	151
6.2.2	基元全息图的结构	152
6.2.3	全息中的物像关系	156
6.3	全息图再现像的像质	159
6.3.1	放大率	159
6.3.2	三级像差	159
6.3.3	光源对再现像的影响	160
6.4	全息照相的装置及技术	163
6.4.1	激光源	163
6.4.2	防震台	165
6.4.3	光路系统	166
6.4.4	常用的记录介质及其处理技术	167
第7章	光显示技术	170
7.1	像全息技术	170
7.1.1	像全息的概念及其光路	170
7.1.2	像全息的特点	171
7.2	彩虹全息技术	172
7.2.1	二步彩虹全息	172
7.2.2	一步彩虹全息	173
7.2.3	彩虹全息的像质	174
7.2.4	像散彩虹全息	176
7.3	模压全息技术	177
7.3.1	原版全息图的记录	178
7.3.2	金属压模的制造	179
7.3.3	全息图的模压复制	180
7.3.4	浮雕全息图和模压全息图的像质	181
7.4	傅里叶变换全息技术	182
7.4.1	傅里叶变换全息图的记录	182

7.4.2	傅里叶变换全息图的重现	184
7.4.3	傅里叶变换全息的其他光路布置	185
7.4.4	全息信息存储	189
7.5	全息电影技术	190
7.5.1	概述	190
7.5.2	全息影片的记录和再现	192
第8章	光学空间滤波	195
8.1	阿贝一波特成像理论	195
8.1.1	阿贝成像理论	195
8.1.2	阿贝一波特实验	196
8.1.3	阿贝一波特实验的傅里叶分析	197
8.2	空间滤波的基本原理	201
8.2.1	空间滤波的概念	201
8.2.2	空间滤波的原理	201
8.3	空间滤波的基本系统	203
8.3.1	4f系统	203
8.3.2	双透镜系统	203
8.3.3	单透镜系统	203
8.4	空间滤波器	204
8.4.1	空间滤波器的分类	204
8.4.2	空间滤波器的制作	206
第9章	相干光学信息处理	207
9.1	图像周期性网点的消除	207
9.1.1	图像中的周期性网点	207
9.1.2	图像周期性网点的消除	207
9.2	图像的相加和相减	208
9.2.1	利用干涉仪实现图像相加减	209
9.2.2	利用光栅滤波实现图像相加减	209
9.3	图像的边缘增强	211
9.3.1	用复数滤波器实现图像边缘增强	211
9.3.2	用复合光栅实现图像边缘增强	213
9.4	图像的特征识别	215
9.4.1	匹配滤波器	215
9.4.2	匹配滤波器的制作	216
9.4.3	图像的特征识别	216
9.5	图像的消模糊	217
9.5.1	用逆滤波器使图像消模糊	218
9.5.2	逆滤波器的制造	218
9.6	相位物体不均匀位相分布的显示	219
9.6.1	暗场法	219

9.6.2	相衬法	220
9.6.3	傅科刀口法	221
9.6.4	希尔伯特变换法	223
第 10 章	非相干光学信息处理	225
10.1	光处理与非相干光处理的比较	225
10.2	基于衍射的非相干空间滤波系统	226
10.3	非相干空间滤波的特征识别	228
10.3.1	用空间匹配滤波的图形识别	229
10.3.2	对空间不变性的预处理	230
10.3.3	非相干匹配滤波器的综合	230
10.4	用载波编码的双极非相干光图形识别	231
10.4.1	准备知识	232
10.4.2	载波编码处理	233
10.5	基于几何学的成像处理	235
10.5.1	基本的处理系统	235
10.5.2	空间扫描处理器	236
10.5.3	时间扫描处理器	238
10.5.4	时空处理器	239
10.6	基于几何光学的投影法处理	239
10.7	θ 调制	240
10.8	假彩色编码	242
10.8.1	对比度反转二基色密度假彩色编码	242
10.8.2	三基色密度假彩色编码	245
10.8.3	实时假彩色编码	246
10.9	彩色像消模糊	249
10.9.1	宽带像的消模糊	249
10.9.2	消模糊滤波器的综合	250
第 11 章	光学干涉测量中的光信息处理	253
11.1	信号测量中的调制与解调制原理	253
11.2	光学测量中的光波调制	255
11.2.1	物体对光波的调制	255
11.2.2	光学干涉测量原理	256
11.3	干涉测量中的时域附加调制和解调——相移相位测量	258
11.3.1	相移相位测量的基本概念	258
11.3.2	三步相移相位测量	259
11.3.3	四步相移相位测量	259
11.3.4	N 步相移相位测量	260
11.3.5	相位测量中的相位包裹和解包裹	263
11.3.6	相移相位测量的实例	264
11.4	干涉测量中的空域附加调制和解调——傅里叶变换相位测量	265

11.4.1	傅里叶变换相位测量的原理	265
11.4.2	傅里叶变换相位测量的步骤和实例	266
11.5	全息干涉测量	267
11.5.1	全息干涉测量的原理	268
11.5.2	双曝光全息干涉测量方法	270
11.5.3	单曝光实时全息干涉测量方法	273
11.5.4	时间平均全息干涉测量方法	276
练习题		280
习题一		280
习题二		281
习题三		282
习题四		283
习题五		284
习题六		286
习题七		286
习题八		287
习题答案		289

第 1 章 二维线性系统及其傅里叶分析

1.1 光学中的信号与系统问题

光是一种具有电磁波性质的物质。光的传输空间中存在着空气、水、光学元件、障碍物等物质,通常把存在这些物质的空间统称为介质。光的传输过程既与光波本身的特性有关,也与传输中所通过的介质有关。即不同的光波对于不同的介质时会表现出不同的传输性质,如光在两种介质界面的反射和折射、介质的色散性质、透光性质、光学晶体的非线性性质等;介质的几何形状、尺寸、位置、不同介质的组合等对光的传输也会产生影响,如透镜成像、光的衍射及干涉现象等。我们把通过改变光波的传输性质,对光波产生影响或进行处理以实现一定功能的装置或介质称为光学系统,如望远镜、显微镜、照相机、光谱仪、衍射及干涉装置、非线性晶体等,通过不同的光学系统,可以实现自由传输、成像、衍射、干涉、色散、频率变换等功能。

作为一般意义的理解,可以把通过光学系统的光波称为光学信号,光波通过系统的过程看作是系统对信号的处理。通过系统之前的光波称为输入信号或输入光波,通过系统后的光波称为输出信号或输出光波。作为电磁波,光学信号是随时间和空间而变化和分布的,由于光波的时间频率极高,绝大多数情况下只能检测到它的时间平均效果,一般需把对光学信号的研究转变为空间分布问题进行。对于光学外差等时变问题的研究,则可以采用时变信号与系统的方法处理。对光学信号空间分布的研究,往往是通过对于一个截平面内光学信号分布的研究为基础进行的,因此我们通常把光学信号表示为一个二维分布的空间信号。输入信号所在的平面称为输入面,输出信号所在的平面称为输出面。

介质的性质往往会对光波的传输产生复杂的影响,但是在许多情况下,介质对光波产生的影响是线性的。如果输入信号是若干输入光波的线性组合,系统对这个线性组合信号的总输出,等于各光波单独输入的输出光波的线性组合,而且这个输出信号的线性组合与输入信号的组合形式完全相同,则这个系统满足线性叠加原理,称之为线性系统。对于线性系统,可以采用相对比较成熟的线性系统理论进行分析和研究,这是贯穿本书的主要内容。

如果输入信号产生了一个平移,系统在输入信号平移前后输出信号的唯一差别也只是产生平移,这样的系统叫平移不变系统。平移不变系统不改变输出信号的图形分布,只是平移前后的输出图形整体产生了一个平行的位置变化,这种输入信号与输出信号之间的一致性关系,为信号与系统问题的分析提供了方便。

同时具有线性性质和平移不变性质的系统称为线性平移不变系统。虽然实际上严格满足线性平移不变系统条件是非常困难的,但是许多重要的常用光学系统,例如自由空间满足标量衍射近似的衍射系统,满足一定条件的透镜系统等,在很大程度上都可以视为具有线性平移不变系统的性质。

线性平移不变系统有着突出的特点。由于线性系统的叠加性质,我们可以把复杂的输入信号看作是若干简单的基元输入信号的线性组合,每一个基元输入信号通过系统后都对应着一个子输出信号,总的输出信号是这些子输出信号的线性组合,而且组合的关系与基元输入信号

的组合关系是完全相同的。由于系统的平移不变性质,如果输入信号只是处于输入平面内不同位置的同一种形式的基元信号,那么输出信号也将只有一种形式的信号,虽然输出信号与输入信号的形式可以相同,也可以不同,但是对应的基元输入信号与子输出信号之间一定存在着——对应的平移关系。由此我们不难想到,如果输入信号只是处于不同位置的同一种基元输入信号的线性组合,通过线性平移不变系统后的输出信号也将只是处于不同位置的同一种基元输出信号的线性组合。这样一来,只要知道了一个基元输入信号和及其对应的基元输出信号的函数关系(形式),就可以描述出线性平移不变系统的全部特性。

实际上,任意实际信号可以采用多种不同的基元输入信号来表示,最为常用的基元输入信号表达方式是冲激信号和单色平面波信号。基元函数的应用,有可能仅研究系统对几种函数的作用,就可以了解其他信号通过系统后的结果,使问题大为简化。在信息光学中,冲激信号往往代表着处于不同位置的单色点光源,单色平面波代表着沿不同方向传播的平面波,它们的数学表达式分别是二维冲激函数和二维复指数函数。这两种信号既能够表达信号的物理意义,又能够表达线性平移不变系统的传输特性,同时也是进行系统及信号分析、信号处理以及实际应用中的重要工具。

系统分析中基元信号的选择,是对客观物理现象与规律研究的认识、总结和升华。例如,在几何光学中我们把物体视为不同位置处若干点光源的集合,通过透镜后的像是物体上各点的对应成像点的集合;在研究物光场通过透镜后位于透镜焦平面上的光场分布时,是把物体上不同点沿同一方向发出的光线按一束平行光看待,不同方向的平行光在透镜的焦平面的不同位置。可见人们早已经在对同一输入信号使用冲激信号(点光源)和单色平面波信号(平行光)作为基元信号,二者分别从不同的侧面来描述透镜与信号之间的关系。如果用二维冲激函数表达信号比较符合人们了解光学信号的习惯,那么用单色平面波表达信号对于初学者而言就不那样直观,但是二者的确是以不同的角度和方式描述同一物理过程。

输入光信号被看作不同位置二维冲激函数(点光源)的线性组合,线性组合的系数是对应位置处信号的值,因此以二维冲激信号作为基函数时,描述的是信号直观的空间分布特性,称为空域分析法。单一点光源发出的光波经过光学系统后,其输出信号一般是在输出面上具有一定范围的空间分布,这种点源通过系统后被展开来的空间分布称为点扩散函数。当然,线性系统的总输出是各点输入信号对应的点扩散函数的线性组合,组合系数仍然是对应输入信号的值。

以二维复指数函数作为基函数时,沿每一个方向传输的平行光都是物面上各点一部分内容的组合,并不反映信号直观的空间分布。事实上,沿不同方向传输的平面波代表着光学信号在该方向的空间频率,沿用光谱和频谱分析的习惯,把沿某一方向传输的单色平面波称为沿该方向的角谱。因此,以复指数函数作为基函数时,描述的是信号的频域分布特性,称为频域分析法。对信号频域分布特性的分析与处理,以及对系统传输不同空间频率信号能力的分析与处理,正是光信息处理的精华所在。

既然信号的空域分布和频域分布是对同一个信号不同方式的描述,二者之间必然存在一定的联系,傅里叶分析就是建立这种联系的数学工具。知道了光学信号的空域分布,就可以通过傅里叶分析得到它的频域分布,反之亦然。傅里叶分析在信息光学中的作用主要体现在以下几个方面。

通过傅里叶分析表示光学信号的空域分布与频域分布之间的关系。

傅里叶分析在线性平移不变的系统的输入信号、输出信号及系统之间建立了特别简单的

关系。一般情况下三者之间的关系是比较复杂的,但是如果系统是线性平移不变的,从空域分布考虑,系统输出信号的空域分布只是输入信号空域分布与点扩散函数的卷积积分。从频域分布角度考虑,复指数函数是线性平移不变系统的特征函数,即输入信号是沿哪个方向传输的复指数函数,输出也是按同样的方向传输的同样的复指数函数,系统的唯一作用是在该复指数函数前乘了一个特征值(复常数),改变了信号的幅度大小和相位。由于不同空间频率的复指数函数有着不同的特征值,构成一个特征函数,这个特征函数对输入信号角谱的传输方向没有做任何改变,只起到了一个原样传递作用,被称为传递函数。而且线性平移不变系统的传递函数就是点扩散函数的傅里叶变换,代表了系统的全部性质,系统的频域输出信号是传递函数与频域输入信号的乘积,知道了其中的两个就可以通过简单的乘除运算计算出另一个。

可以根据光学系统的傅里叶变换特点,采用实际的光学系统实现傅里叶分析,进一步通过空间滤波等方法实现光学信号的分析处理。

用傅里叶分析方法还可以对已经采集到的光学信号和图像等进行分析处理,以达到光学测量和改善图像质量等目的。

在光学信号的数值处理中,可以把一些耗时的积分运算化为傅里叶变换形式,通过快速傅里叶变换(FFT)算法实现简化和快速的运算。

建立在线性叠加基础上的空域与频域分析方法,形成了一套成熟的线性分析理论。在信息光学中采用线性系统分析理论,不仅为认识同一物理现象提供了不同的分析方法,以及确定不同分析方法之间的关系,还使人们可以从新的角度理解物理现象,了解其中新的物理意义并产生更多的应用领域。例如线性系统分析方法使人们认识到了空间滤波问题,成为了光信息处理中的重要内容。

需要说明的是,随着计算机技术和图像传感器件技术的发展,通过计算机处理二维光学信号问题已经是普遍方法,在那里二维光学信号都是经过离散化和数字化的,需要采用数字信号处理方法。本书的主要目的是介绍如何用线性理论认识和分析光学现象和光学系统,数字二维光学信号的处理问题,可以参考有关的文献和数字图像处理方面的专门著作。

1.2 常用函数

在光学信号处理中,有一些描述信号和系统的常用数学函数,其中的一些函数还是非初等的特殊函数,这一节中将集中对它们的定义和主要特点进行简要的介绍,以方便后续学习和查阅。许多情况下,这些常用函数的二维形式是可分离变量的,函数形式相同的一维和二维函数放在一起,说明函数的性质时,往往用该函数的一维形式。不失普遍性,通常把函数的最大值都取为1,称为单位函数。所有函数的自变量均为实数。

1.2.1 阶跃函数

一维阶跃函数的定义

$$\text{step}(x - x_0) = \begin{cases} 1, & x > x_0 \\ \frac{1}{2}, & x = x_0 \\ 0, & x < x_0 \end{cases} \quad (1.2.1)$$

二维阶跃函数的定义

$$\text{step}(x - x_0, y - y_0) = \text{step}(x - x_0)\text{step}(y - y_0) \tag{1.2.2}$$

阶跃函数与许多函数都有密切联系,常用符号 $u(x - x_0)$ 表示单位阶跃函数。

图 1.2.1 是一维和二维阶跃函数示意图。

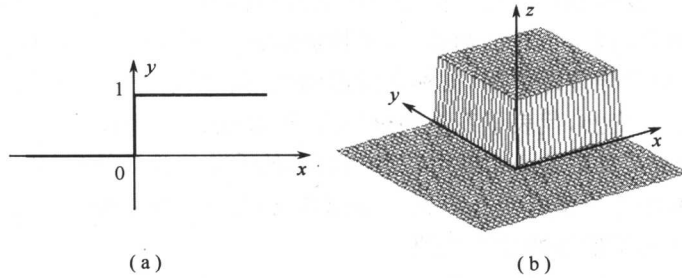


图 1.2.1 一维(a) 和二维(b) 阶跃函数示意图

1.2.2 矩形函数

一维矩形函数的定义

$$\text{rect}(x - x_0) = \begin{cases} 1, & |x - x_0| < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}, & |x - x_0| = \frac{1}{2} \\ 0, & |x - x_0| > \frac{1}{2} \end{cases} \tag{1.2.3}$$

二维矩形函数的定义

$$\text{rect}(x - x_0, y - y_0) = \text{rect}(x - x_0)\text{rect}(y - y_0) \tag{1.2.4}$$

矩形函数与阶跃函数的关系

$$\text{rect}(x - x_0) = \text{step}\left(x - \frac{x_0}{2}\right) - \text{step}\left(x + \frac{x_0}{2}\right) \tag{1.2.5}$$

图 1.2.2 是一维和二维矩形函数示意图。

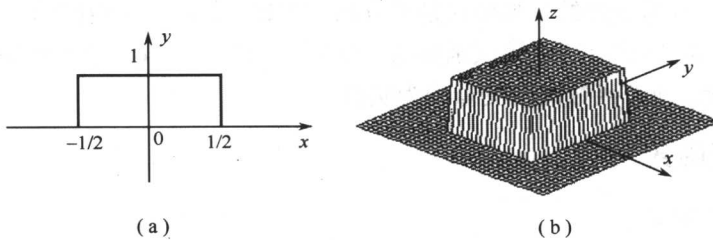


图 1.2.2 一维(a) 和二维(b) 矩形函数示意图

1.2.3 符号函数

符号函数的定义