

 光电信息科学与工程类专业规划教材

傅里叶光学导论

(第3版)

Introduction to Fourier Optics, Third Edition

[美] Joseph W. Goodman 著
秦克诚 刘培森 陈家璧 曹其智 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

光电信息科学与工程类专业规划教材

傅里叶光学导论

(第3版)

Introduction to Fourier Optics
Third Edition

[美] Joseph W. Goodman 著

秦克诚 刘培森 译
陈家壁 曹其智

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

傅里叶分析是在物理学与工程学的许多领域得到广泛应用的一种通用工具。本书讨论傅里叶分析在光学领域的应用,尤其是在衍射、成像、光学数据处理及全息术方面的应用,内容涉及二维信号与系统的分析、标量衍射理论基础、菲涅耳衍射与夫琅禾费衍射、相干光学系统的波动光学分析、光学成像系统的频谱分析、波前调制、模拟光学信息处理、全息术、光通信中的傅里叶光学等。

本书是傅里叶光学和光信息处理领域的标准教材和参考书,可用做高校相关专业高年级本科生和研究生的教材,也可供从事模式识别、图像处理、显示、传感器、通信、数据存储和成像系统等领域研究的工程人员阅读。

Original English language edition copyright © 2005 by Roberts and Company Publishers, Inc.

The Chinese Translation edition Copyright © 2016 by Publishing House of Electornics Industry.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission in writing from the Proprietor.

本书中文简体版专有出版权由 Roberts and Company Publishers 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2006-2082

图书在版编目(CIP)数据

傅里叶光学导论/(美)约瑟夫·W·古德曼(Joseph W. Goodman)著;秦克诚等译. —3版.

北京:电子工业出版社,2016.11

书名原文: Introduction to Fourier Optics, Third Edition

光电信息科学与工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-30106-3

I. ①傅… II. ①约… ②秦… III. ①傅里叶光学-高等学校-教材 IV. ①O438.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 246794 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平

印 刷:北京京海印刷厂

装 订:北京京海印刷厂

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:22.75 字数:610 千字

版 次:2016 年 11 月第 1 版(原著第 3 版)

印 次:2016 年 11 月第 1 次印刷

定 价:59.00 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)88254888,88258888。

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。

本书咨询联系方式:(010)88254552,tan02@phei.com.cn。

谨以此书纪念

我的母亲 Doris R. Goodman 医学博士和我的父亲 Joseph Goodman, Jr. 医学博士。

作者介绍

Joseph W. Goodman 于 1958 年来到斯坦福大学读研究生,并且在斯坦福留下了他的全部职业生涯。他曾是 49 位研究生的博士学位论文导师,他们之中的许多人现在在光学界成就卓著。他曾主持斯坦福的 William Ayer 电气工程讲座,并担任过若干行政职务,包括斯坦福大学电气工程系主任和工学院负责教学人员事务的资深副院长。他现在是 William Ayer 荣誉退休教授。

他的工作曾获得多种奖励和荣誉,包括美国工程教育学会的 F. E. Terman 奖、国际光学工程学会(SPIE)的伽博(Dennis Gabor)奖、玻恩(Max Born)奖、Esther Beller Hoffman 奖、美国光学学会的 Ives 奖章、电气和电子工程师协会的教育奖章。他是美国国家工程科学院院士,并担任过美国光学学会和国际光学学会会长。

第3版中文版序

本书英文版初版由 McGraw-Hill 图书公司于 1968 年出版。1976 年,中文译本也问世了。很可能,本书中文版的读者要比英文版更多,因为中国有庞大的人口,而且她的光学界的规模巨大。

本书第 2 版的篇幅增加了很多,它出版于 1996 年,仍由 McGraw-Hill 出版。就我所知,这一版没有中文译本。

现在这个译本译自 Roberts 出版公司于 2005 年出版的第 3 版。这个版本包含了对迄至出版时所发现的第 2 版中的全部错误的改正,此外,还包括全新的一章“光通信中的傅里叶光学”。第 3 版出版后所发现的错误及改正则可在勘误表网页上找到,网页地址为 <http://public.me.com/jwgood>。

我想对这个中译本的译者们表示我诚挚的谢意,他们是秦克诚、刘培森、陈家璧和曹其智。译者们发现了书中内容和排印的一些错误,我把所有这些错误及其改正都收入了上述勘误表,它们也已反映在中译本中。我感谢他们对本书的这些改进。

我总是觉得,我所从事的教育工作是最有回报、最值得从事的职业之一。我希望这个中译本有助于对中国未来几代光学物理学家和光学工程师的教育,并间接为中国和全世界的进步和繁荣做出贡献。

Joseph W. Goodman

于美国加州 Los Altos

Preface to the Chinese Translation of *Introduction to Fourier Optics*, 3rd Edition

The first edition of this book was published in English in 1968 by McGraw-Hill Book Company. In 1976, the Chinese translation appeared. It is possible that more people have read this book in the Chinese translation than in English, given China's huge population and the large size of its optics community.

A second edition of the book, greatly expanded, was published in 1996, again by McGraw-Hill. To the best of my knowledge, no Chinese translation of this edition exists. This translation is of the third edition, published in 2005 by Roberts & Company, Publishers.

It contains corrections of all errors known in the second edition at the time of publication, and in addition, contains an entirely new chapter on "Fourier Optics in Optical Communications." Additional errors and corrections discovered after the third edition was published can be found on the errata sheet at the web address <http://public.me.com/jwgood>

I would like to express my sincere appreciation to the translators of this edition, in particular to the translators, they are: Qin Kecheng, Liu Peisen, Chen Jiabi and Cao Qizhi. The translators found a number of errors and typographical mistakes, all of which are represented in the Errata Sheet mentioned earlier. I thank them for these improvements of the book.

I have always felt that being engaged in providing education is one of the most rewarding of professions. I hope that this translation will help in the education of the coming generations of optical physicists and engineers in China, and that indirectly it will contribute to innovations and prosperity in China and throughout the world.

Joseph W. Goodman
Los Altos, California, USA

序

傅里叶分析是在物理学与工程学的许多领域得到广泛应用的一种通用工具。本书讨论它在光学领域的应用,尤其是在衍射、成像、光学数据处理以及全息术方面的应用。

既然本书的主题是傅里叶光学,傅里叶分析方法自然起着关键作用,它是我们处理问题的基本分析框架。傅里叶分析是大多数物理学家和工程师都具有的基础知识。他们对线性系统理论也很熟悉,尤其是电气工程师。第2章复习了必要的数学基础知识。对于那些不太熟悉傅里叶分析和线性系统理论的读者,这一章可以作为用其他专门教科书进行更深入学习时的大纲。本书为这方面的更详尽的讨论提供了丰富的参考文献。那些对傅里叶分析和线性系统理论已经入门的读者,通常打过交道的是单一自变量(时间)的函数。第2章中讨论的是二维空间的数学方法(大多数光学问题必须用二维方法处理),它的内容远比一维理论的标准讨论丰富。

本书用做教科书可以满足几种不同类型课程的需求。它直接面向物理学家和工程师,在课程中使用书中哪些章节因不同听课对象而不同。只要经过适当的选择,就可以满足大量不同读者的需要。我们在这里对不同类型的课程提出一些明确的建议。

第一类是一学季或一学期的讲述衍射与成像的课程,这种课程的内容可由本书第2章到第6章及全部4个附录构成。如果时间不够,这几章里的3.8节、3.9节、5.4节和6.6节可以省略或留给程度较高的学生自己阅读。

第二类是用一学季或一学期的课程来讲授傅里叶光学的基本内容,但重点放在光学模拟信号处理的应用上。对这样的课程,我建议把第2章留给学生阅读,第3章从3.7节开始,接着是3.10节,其余部分留给那些对惠更斯-菲涅耳原理的由来感兴趣的学生阅读。第4章中的4.2.2节和4.5.1节可以跳过去。第5章可从薄透镜的振幅透射比函数(5.10)式开始,5.4节可留给程度高的学生阅读,讲述其余所有内容。如果时间不够,第6章可以全部跳过去。在这样的课程中,第7章全部和第8章的大部分都是很重要的内容。如果确有必要减少一些内容,我建议8.2节、8.8节和8.9节可以略去。在这样的课程中,常常想要包括第9章中关于全息术中的一些内容。我建议把9.4节、9.6.1节、9.6.2节、9.7.1节、9.7.2节、9.8节、9.9节和9.12.5节包括进来。4个附录应作为阅读内容而不必课堂讲述。

第三类也是用一学季或一学期的课程讲授傅里叶光学的基本内容,但重点放在作为其一种应用的全息术上。这样的课程同样可以从3.7节开始,继之以3.10节。第5章中应包括进来的内容与上面对重点放在光学信号处理的课程所指出的相同。在这类课程中,可把6.1节、6.2节、6.3节和6.5节的内容包括进来。第7章中只需讲7.1节,不过有时间的话,把7.3节加进来也是很有用的。第8章这时可以跳过去,而第9章全息术是重点内容。在讲了全息术基础之后,第10章提供了进一步丰富课程内容的几种可能。如果时间有限,9.10节和9.11节可以省略。全部附录留给学生自己阅读。

在某些大学中,讲授本课程的时间超过一学季或一学期。若有两学季或两学期,本书的大部分内容都可以讲到。

以上建议当然可以因施教的对象不同或因教师对本书内容所持的侧重点不同而加以修改。我希望这些建议至少可以列出一些可能性。

我感谢许多为本书以前各版提供帮助的朋友。本书手稿的早期版本曾在多所大学中使用。尤其感谢 A. A. Sawchuk, J. F. Walkup, J. Leger, P. Pichon 和 D. Mehrl 等教授和他们的许多学生,他们找出了很多打字错误和一些实质性错误。I. Erteza 和 M. Bashaw 对第二版做出了有益的评论,我感谢他们。出版商安排的匿名审稿人也提出了好几条有用的建议。我特别感谢利思 (Emmett Leith) 教授,他提出了许多有益的建议。我也感谢在我 1995 年傅里叶光学班上的同学,他们争着看谁能发现错误最多。

第三版与第二版的不同之处是改正了以前的排印和内容错误,增加了全新的第 10 章,同时增加了一个关于光栅方程的新附录。对于第 10 章,我感谢 Andrew Weiner 教授、Gregory Brady 先生、Dmitry Starodubov 博士、Jane Lam 博士和 James Fienup 教授有益的意见和建议。我还要感谢本书第三版的出版者 Roberts & Company Publishers 的 Ben Roberts 在第三版成书期间始终如一的鼓励和支持。无疑,还有许多应该感谢的人,我为在这里没能明确提到他们表示歉意。

最后,我要感谢我的夫人 Hon Mai,没有她的理解、鼓励和支持,本书是不可能完成的。

Joseph W. Goodman

目 录

第 1 章	引言	1
1.1	光学、信息和通信	1
1.2	本书内容概述	1
第 2 章	二维信号与系统的分析	3
2.1	二维傅里叶分析	3
2.1.1	定义与存在条件	3
2.1.2	傅里叶变换作为分解式	5
2.1.3	傅里叶变换定理	6
2.1.4	可分离变量的函数	7
2.1.5	具有圆对称性的函数;傅里叶-贝塞尔变换	8
2.1.6	一些常用函数和一些有用的傅里叶变换对	9
2.2	空间频率和空间频率的局域化	12
2.3	线性系统	14
2.3.1	线性性质与叠加积分	14
2.3.2	线性不变系统;传递函数	15
2.4	二维抽样理论	17
2.4.1	Whittaker-Shannon 抽样定理	17
2.4.2	空间-带宽积	20
第 3 章	标量衍射理论基础	23
3.1	历史引言	23
3.2	从矢量理论到标量理论	25
3.3	一些数学预备知识	27
3.3.1	亥姆霍兹方程	27
3.3.2	格林定理	28
3.3.3	亥姆霍兹和基尔霍夫的积分定理	28
3.4	平面屏幕衍射的基尔霍夫公式	30
3.4.1	积分定理的应用	31
3.4.2	基尔霍夫边界条件	31
3.4.3	菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	32
3.5	瑞利-索末菲衍射公式	33
3.5.1	格林函数的别种选法	34
3.5.2	瑞利-索末菲衍射公式	36
3.6	基尔霍夫理论和瑞利-索末菲理论的比较	36
3.7	惠更斯-菲涅耳原理的进一步讨论	37
3.8	推广到非单色波	38
3.9	边界上的衍射	39
3.10	平面波的角谱	40
3.10.1	角谱及其物理解释	40
3.10.2	角谱的传播	41

3.10.3	衍射孔径对角谱的效应	42
3.10.4	传播现象作为一个线性的空间滤波器	43
第4章	菲涅耳衍射与夫琅禾费衍射	46
4.1	背景	46
4.1.1	波场的强度	46
4.1.2	直角坐标系中的惠更斯-菲涅耳原理	47
4.2	菲涅耳近似	48
4.2.1	正相位还是负相位	49
4.2.2	菲涅耳近似的精度	50
4.2.3	菲涅耳近似和角谱	53
4.2.4	两个共焦球面之间的菲涅耳衍射	53
4.3	夫琅禾费近似	54
4.4	夫琅禾费衍射图样的例子	55
4.4.1	矩形孔径	55
4.4.2	圆形孔径	56
4.4.3	薄正弦振幅光栅	57
4.4.4	薄正弦相位光栅	59
4.5	计算菲涅耳衍射的例子	61
4.5.1	方孔径的菲涅耳衍射	61
4.5.2	正弦振幅光栅产生的菲涅耳衍射——塔尔博特像	63
第5章	相干光学系统的波动光学分析	70
5.1	薄透镜作为相位变换器	70
5.1.1	厚度函数	71
5.1.2	傍轴近似	72
5.1.3	相位变换及其物理意义	72
5.2	透镜的傅里叶变换性质	73
5.2.1	输入紧靠透镜	74
5.2.2	输入位于透镜之前	75
5.2.3	输入位于透镜之后	77
5.2.4	光学傅里叶变换的一个例子	78
5.3	成像;单色光照明	78
5.3.1	正透镜的脉冲响应	78
5.3.2	消去二次位相因子;透镜定律	79
5.3.3	物和像之间的关系	82
5.4	复杂相干光学系统的分析	83
5.4.1	算符记号	83
5.4.2	算符方法对一些光学系统的应用	85
第6章	光学成像系统的频谱分析	91
6.1	成像系统的一般分析	91
6.1.1	普遍模型	91
6.1.2	衍射对像的影响	92
6.1.3	多色光照明;相干情形和非相干情形	94
6.2	衍射置限相干成像系统的频率响应	97
6.2.1	振幅传递函数	97

6.2.2	振幅传递函数的例子	98
6.3	衍射置限非相干成像系统的频率响应	99
6.3.1	光学传递函数	99
6.3.2	OTF 的一般性质	100
6.3.3	无像差系统的 OTF	101
6.3.4	衍射置限系统的 OTF 的例子	103
6.4	像差及其对频率响应的影响	104
6.4.1	广义光瞳函数	104
6.4.2	像差对振幅传递函数的影响	105
6.4.3	像差对 OTF 的影响	105
6.4.4	简单像差的例子:聚焦误差	106
6.4.5	切趾法及其对频率响应的影响	108
6.5	相干成像和非相干成像的比较	110
6.5.1	像强度的频谱	111
6.5.2	两点分辨率	112
6.5.3	其他效应	113
6.6	超越经典衍射极限的分辨率	115
6.6.1	数学基础	115
6.6.2	带宽外推的直观解释	116
6.6.3	基于抽样定理的一种外推方法	116
6.6.4	一种迭代外推方法	118
6.6.5	实际限制	118
第 7 章	波前调制	123
7.1	用照相胶片进行波前调制	123
7.1.1	曝光、显影和定影的物理过程	123
7.1.2	术语的定义	125
7.1.3	非相干光学系统中的胶片	126
7.1.4	相干光学系统中的胶片	127
7.1.5	调制传递函数	128
7.1.6	照相乳胶的漂白	130
7.2	空间光调制器	131
7.2.1	液晶的性质	132
7.2.2	基于液晶的空间光调制器	138
7.2.3	磁光空间光调制器	141
7.2.4	可形变反射镜空间光调制器	143
7.2.5	多量子阱空间光调制器	144
7.2.6	声光空间光调制器	146
7.3	衍射光学元件	149
7.3.1	二元光学	150
7.3.2	其他类型的衍射光学元件	152
7.3.3	几句提醒的话	153
第 8 章	模拟光学信息处理	155
8.1	历史背景	155
8.1.1	阿贝-波特实验	155

8.1.2	泽尼克相衬显微镜	157
8.1.3	照片质量的改善;Maréchal 的工作	158
8.1.4	通信理论观点的兴起	159
8.1.5	相干光学对更普遍的数据处理的应用	160
8.2	非相干图像处理系统	160
8.2.1	基于几何类光学的系统	160
8.2.2	包含衍射效应的系统	164
8.3	相干光信息处理系统	165
8.3.1	相干系统的结构	165
8.3.2	对滤波器实现的限制	168
8.4	VanderLugt 滤波器	169
8.4.1	频率平面掩模的合成	169
8.4.2	处理输入数据	171
8.4.3	VanderLugt 滤波器的优点	172
8.5	联合变换相关器	173
8.6	对特征识别的应用	175
8.6.1	匹配滤波器	175
8.6.2	一个特征识别问题	176
8.6.3	特征识别机的光学合成法	178
8.6.4	对尺寸大小和旋转的敏感性	179
8.7	不变的图样识别	179
8.7.1	梅林相关器	180
8.7.2	圆谐波相关	181
8.7.3	合成判别式函数	182
8.8	图像恢复	184
8.8.1	逆滤波器	184
8.8.2	维纳滤波器或最小均方误差滤波器	185
8.8.3	滤波器的实现	186
8.9	合成孔径雷达数据处理	188
8.9.1	合成孔径的形成	189
8.9.2	采集到的数据和记录样式	189
8.9.3	透明胶片的聚焦性质	191
8.9.4	二维像的生成	194
8.9.5	倾斜平面处理器	195
8.10	声光信号处理系统	197
8.10.1	布拉格单元频谱分析仪	197
8.10.2	空间积分相关器	199
8.10.3	时间积分相关器	200
8.10.4	其他声光信号处理系统	202
8.11	离散模拟光学处理器	202
8.11.1	信息和系统的离散表示	202
8.11.2	串行矩阵-矢量乘法器	203
8.11.3	并行的非相干光矩阵-矢量乘法器	204
8.11.4	外积处理器	205

8.11.5	其他离散处理系统	206
8.11.6	处理双极性数据和复数数据的方法	206
第9章	全息术	211
9.1	历史引言	211
9.2	波前重建问题	212
9.2.1	振幅与相位的记录	212
9.2.2	记录介质	212
9.2.3	原始波前的重建	213
9.2.4	全息过程的线性性质	213
9.2.5	全息术成像	214
9.3	伽博全息图	215
9.3.1	参考波的来源	215
9.3.2	孪生像	216
9.3.3	伽博全息图的局限性	216
9.4	利思-乌帕特尼克斯全息图	217
9.4.1	全息图的记录	217
9.4.2	获得重建像	218
9.4.3	最小参考角	219
9.4.4	三维景物全息术	220
9.4.5	全息术的实际问题	222
9.5	像的位置和放大率	223
9.5.1	像的位置	223
9.5.2	轴向放大率和横向放大率	225
9.5.3	一个例子	226
9.6	不同类型的全息图简介	227
9.6.1	菲涅耳全息图和夫琅禾费全息图,像全息图和傅里叶全息图	227
9.6.2	透射全息图和反射全息图	228
9.6.3	全息立体照片	229
9.6.4	彩虹全息图	230
9.6.5	合成全息图	231
9.6.6	模压全息图	233
9.7	厚全息图	233
9.7.1	记录体全息光栅	234
9.7.2	从体光栅重建波前	235
9.7.3	更复杂的记录光路的条纹方向	236
9.7.4	有限大小的光栅	236
9.7.5	衍射效率——耦合波理论	238
9.8	记录材料	245
9.8.1	卤化银感光乳剂	245
9.8.2	光聚合物胶片	246
9.8.3	重铬酸盐明胶	246
9.8.4	光折变晶体材料	247
9.9	计算全息图	248
9.9.1	抽样问题	249

9.9.2	计算问题	251
9.9.3	表示问题	252
9.10	全息像像质的劣化	257
9.10.1	胶片 MTF 的影响	258
9.10.2	胶片非线性的影响	260
9.10.3	胶片颗粒噪声的效应	261
9.10.4	散斑噪声	261
9.11	使用空间非相干光的全息术	262
9.12	全息术的应用	264
9.12.1	显微术和高分辨率体成像	264
9.12.2	干涉测量术	264
9.12.3	通过致畸变介质成像	268
9.12.4	全息数据存储	270
9.12.5	用于人工神经网络的全息加权	272
9.12.6	其他应用	274
第 10 章	光通信中的傅里叶光学	278
10.1	引言	278
10.2	布拉格光纤光栅	278
10.2.1	光纤简介	279
10.2.2	在光纤中记录光栅	280
10.2.3	FBG 对光纤中光传播的影响	281
10.2.4	FBG 的应用	284
10.2.5	工作在透射方式的光栅	285
10.3	超短脉冲的整形和处理	286
10.3.1	时间频率到空间频率的变换	286
10.3.2	脉冲整形系统	287
10.3.3	谱脉冲整形的应用	288
10.4	光谱全息术	290
10.4.1	全息图的记录	290
10.4.2	信号的重建	292
10.4.3	参考脉冲和信号波形之间延迟的影响	293
10.5	阵列波导光栅	294
10.5.1	阵列波导光栅的基本部件	294
10.5.2	阵列波导光栅的应用	299
附录 A	δ 函数和傅里叶变换定理	303
附录 B	傍轴几何光学简介	309
附录 C	偏振和琼斯矩阵	318
附录 D	光栅方程	322
参考文献		323
汉英对照术语表		336
译后记		348

第1章 引言

1.1 光学、信息和通信

从20世纪30年代后期起,物理学的古老分支光学与电气工程中的通信和信息科学的联系越来越紧密。这种趋势是可以理解的,因为通信系统和成像系统都是用来收集或传递信息的。前者处理的信息一般是时间性的(例如被调制的电压或电流波形),而后者处理的信息则是空间性的(例如光波振幅或强度在空间的分布)。但从抽象观点来看,这一差别并非实质性的。

这两门学科之间最紧密的联系大概是,都可用类似的数学方法——傅里叶分析和系统理论来描述各自感兴趣的系统。这种相似性的根本原因不只是两门学科都拥有“信息”这一共同主题,而更在于通信系统和成像系统都具有某些相同的基本性质。例如,许多电子网络和成像装置都具有线性和不变性(其定义见第2章)。任何具有这两种性质的网络或装置(电子的、光学的或其他),在数学上都很容易用频谱分析的方法来描述。因此,正像一个音频放大器可用它的(时间)频率响应来方便地描述一样,一个成像系统用它的(空间)频率响应来描述也同样方便。

两门学科之间的相似并不只限于线性和不变性。某些非线性光学元件(例如照相底片)具有的输入输出关系,正类似于非线性电子学元件(二极管、晶体管等)的相应特性,并且类似的数学分析方法可以应用于两种情况。

尤其重要的是要认识到,数学结构的相似不仅可用于分析的目的,而且可用于合成的目的。于是,正像一个时间函数的频谱可按预定的方式加以滤波操作一样,一个空间函数的频谱也可按想要的方式加以改变。在光学的历史上有许多因应用傅里叶合成技术而取得重要进展的例子,如泽尼克相衬显微镜就是一个赢得诺贝尔奖的例子。在信号与图像处理领域可以看到许多其他的例子。

1.2 本书内容概述

我们一开始就假设本书读者对傅里叶分析和线性系统理论已有扎实的基础。第2章复习了所需的背景知识;为了不使那些对时间信号和系统分析有良好基础的读者感到厌烦,这里只讨论二元函数。这些函数当然是光学中最关注的,而从一个自变量扩展到两个自变量则对数学理论提供了新的丰富内容,引入了许多新的性质,在时间信号和系统理论中没有与这些性质直接对应的东西。

在光学系统理论中衍射现象极为重要。第3章论述标量衍射理论的基础,包括基尔霍夫理论、瑞利-索末菲理论和角谱方法。第4章介绍普遍结果的某些近似,即菲涅耳近似和夫琅禾费近似,并且给出了计算衍射图样的例子。

第5章对由透镜和自由空间传播构成的相干光学系统进行分析探讨。这种分析方法是波

动光学的,而不是惯用的几何光学方法。一个薄透镜模型可视为一个二次相位变换;由此模型导出通常的透镜定律与透镜的某些傅里叶变换性质。

第6章讨论频谱分析方法对相干和非相干成像系统的应用。分别对有像差和无像差系统定义了相应的传递函数,并讨论了其性质。从不同角度对相干与非相干系统进行了比较。导出了可达到的分辨率极限。

第7章探讨了波前调制问题。对作为相干光学系统与非相干光学系统输入介质的照相底片的光学性质进行了讨论。然后转而讨论各种空间光调制器,它们是将信息实时或近实时输入光学系统的器件。最后,相当细致地描述了各种衍射光学元件。

第8章转而讨论模拟光学信息处理。既讨论了连续处理系统,也讨论了离散处理系统。也讨论了在图像增强、模式识别以及合成孔径雷达数据处理方面的应用。

第9章的主题是全息术。详细探讨和比较了由伽柏和利思与乌帕特尼克斯发展起来的技术。对薄全息图和厚全息图都进行了论述。叙述了到三维成像的推广。介绍了全息术的各种应用,但重点在于介绍其基本原理。

最后,第10章介绍了傅里叶光学在对光通信具有重要作用的器件和技术方面的应用。

第2章 二维信号与系统的分析

实验发现很多物理现象都有这样一种共同的基本性质,即在多个激励共同作用下,其响应恒等于每种激励单独引起的响应之和。这种现象称为线性现象,而它们共有的这种特性称为线性性质。由电阻、电容和电感组成的电路网络通常在输入信号的很宽的范围内是线性的。另外,我们即将看到,描写光在很多介质中传播的波动方程使我们自然地认为光学成像过程是从物场光分布到像场光分布的线性映射。

单是线性性质就使得对这类现象的数学描述大为简化,它是我们称之为线性系统理论的这一数学结构的基础。线性性质所带来的巨大好处是能够把对一个复杂激励的响应(不论它是电压、电流、光振幅还是光强)用对若干个“基元”激励的响应表示出来。因此如果一个激励可以分解成基元激励的线性组合,而每个基元激励产生已知具有简单形式的响应,那么由于线性性质,总响应可以由基元激励的响应的相应线性组合而求出。

本章回顾一些对描述线性现象有用的数学工具,讨论一些在分析线性现象时常用的数学分解方法。在后面各章中讨论的激励(系统输入)和响应(系统输出)可以是两种不同物理量中的任何一个。如果光学系统使用的照明显示出空间相干性,那么我们会发现用复数值的光场振幅的空间分布来描述光场是适当的。如果照明完全没有空间相干性,则光场适于用具有实数值的光强的空间分布来描述。我们将着重注意输入信号为复数值时的线性系统分析;实数值输入信号的结果已作为理论的特例包括进来了。

2.1 二维傅里叶分析

傅里叶分析对分析线性和非线性现象都是一个极其有用的数学工具。这个数学工具广泛应用于电路网络和通信系统的研究中;我们假设读者以前已经接触过傅里叶理论,因而熟悉一元函数(如时间函数)的分析。要复习一些基本的数学概念,可以参阅 Papoulis [243], Bracewell [33] 以及 Gray 和 Goodman [139] 写的书。与本书的讨论特别有关的内容可参阅 Bracewell [34]。在这里,我们的目的仅限于让读者进一步熟悉二元函数的分析。我们不追求数学上的高度严谨,而是着眼于运算方法,这是讨论这个题目的大多数工程著作的特点。

2.1.1 定义与存在条件

二元函数 $g(x, y)$ (一般为复值函数) 的傅里叶变换(也叫傅里叶谱或频谱)用 $\mathcal{F}\{g\}$ 表示,其定义为^①

$$\mathcal{F}\{g\} = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) \exp[-j2\pi(f_X x + f_Y y)] dx dy \quad (2.1)$$

^① 二重积分号上下只有一个积分限时,表示此积分限对两次积分都适用。