

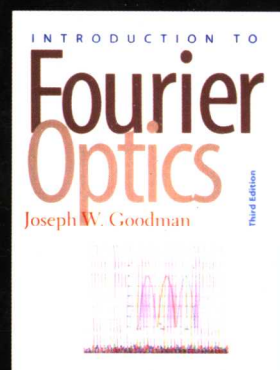
高等学校教材系列

傅里叶光学导论

(第三版)

Introduction to
Fourier Optics

Third Edition



[美] Joseph W. Goodman 著

秦克诚 刘培森 译
陈家璧 曹其智



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry
<http://www.phei.com.cn>

高等学校教材系列

傅里叶光学导论

(第三版)

Introduction to Fourier Optics

Third Edition

[美] Joseph W. Goodman 著

秦克诚 刘培森 译
陈家璧 曹其智

电子工业出版社

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、光学数据处理以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的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© 2006 by Publishing House of Electronics 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:01-2006-0282

图书在版编目(CIP)数据

傅里叶光学导论:第3版/(美)古德曼(Goodman, J. W.)著;秦克诚等译.

北京:电子工业出版社,2006.9

(高等学校教材系列)

书名原文:Introduction to Fourier Optics, Third Edition

ISBN 7-121-02663-5

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第110299号

责任编辑:谭海平 特约编辑:李玉龙

印 刷:北京市天竺颖华印刷厂

装 订:三河市金马印装有限公司

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:787×980 1/16 印张:28.25 字数:723千字

印 次:2006年9月第1次印刷

定 价:55.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。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。

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。

第三版中文版序

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,因为中国的庞大人口和她的光学界的巨大规模。

本书第二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 年出版的第三版。这个版本包含了对迄至出版时所发现的第二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”。第三版出版后所发现的错误及改正则可在由出版者维护的勘误表网页上找到,网页地址为 <http://www.roberts-publishers.com/goodman/Errata.pdf>。

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
2006 年 5 月 1 日

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 maintained by the publisher at the web address <http://www.roberts-publishers.com/goodman/Errata.pdf>.

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
May 1, 2006

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

致使用本书的教师

出版社备有作者自己写的本书中全部习题的题解(英文),提供给采用本书作为教材的教师。要得到一册,请将填写、盖章之后的书后表格传真或者邮寄给电子工业出版社。联系电话:010-88254555,传真:010-88254560, E-mail: te_service@phei.com.cn。

教学支持说明

电子工业出版社作为国内著名的科技与教育图书出版社,出版了很多电子类、计算机类、工程类以及经管类教材。我们十分重视教师手册等教学课件以及网上资源的使用。如果您确认将本书作为指定教材,请您务必填好以下表格并经系主任签字盖章后寄回我们的联系地址,我们将向您提供教师手册或其他教学课件。

情况调查表如下所示(复印有效):

证 明

兹证明_____大学_____系/院_____专业_____学年(学期)
开设的_____课程,共_____学时,现采用电子工业出版社出版的英文原版/
简体中文版_____ (书名/作者)作为主要教材。
任课教师为_____,学生_____个班共_____人。

任课教师需要与本书配套的教师指导手册和习题解答。

电 话: _____

传 真: _____

E-mail: _____

联系地址: _____

邮 编: _____

建议和要求:

系/院主任: _____ (签字)

_____ (系/院办公室章)

_____年____月____日

请与我们联系

Publishing House of Electronics Industry

电子工业出版社: www.phei.com.cn

www.hxedu.com.cn

北京市万寿路173信箱外版教材事业部

联系电话: 010-8825 4555

传 真: 010-8825 4560

E-mail: Te_service@phei.com.cn

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

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	8
2.1.5	具有圆对称性的函数:傅里叶-贝塞尔变换	9
2.1.6	一些常用函数和一些有用的傅里叶变换对	11
2.2	空间频率和空间频率的局域化	14
2.3	线性系统	16
2.3.1	线性性质与叠加积分	17
2.3.2	线性不变系统:传递函数	18
2.4	二维抽样理论	20
2.4.1	Whittaker-Shannon 抽样定理	20
2.4.2	空间-带宽积	23
习题		24
第 3 章	标量衍射理论基础	28
3.1	历史引言	28
3.2	从矢量理论到标量理论	31
3.3	一些数学预备知识	34
3.3.1	亥姆霍兹方程	34
3.3.2	格林定理	35
3.3.3	亥姆霍兹和基尔霍夫的积分定理	35
3.4	平面屏幕衍射的基尔霍夫公式	38
3.4.1	积分定理的应用	38
3.4.2	基尔霍夫边界条件	39

3.4.3 菲涅耳-基尔霍夫衍射公式	40
3.5 瑞利-索末菲衍射公式	42
3.5.1 格林函数的别种选法	42
3.5.2 瑞利-索末菲衍射公式	44
3.6 基尔霍夫理论和瑞利-索末菲理论的比较	45
3.7 惠更斯-菲涅耳原理的进一步讨论	47
3.8 推广到非单色波	48
3.9 边界上的衍射	49
3.10 平面波的角谱	50
3.10.1 角谱及其物理解释	50
3.10.2 角谱的传播	51
3.10.3 衍射孔径对角谱的效应	53
3.10.4 传播现象作为一个线性的空间滤波器	54
习题	55
第4章 菲涅耳衍射与夫琅禾费衍射	57
4.1 背景	57
4.1.1 波场的强度	57
4.1.2 直角坐标系中的惠更斯-菲涅耳原理	59
4.2 菲涅耳近似	59
4.2.1 正相位还是负相位	61
4.2.2 菲涅耳近似的精度	62
4.2.3 菲涅耳近似和角谱	65
4.2.4 两个共焦球面之间的菲涅耳衍射	66
4.3 夫琅禾费近似	67
4.4 夫琅禾费衍射图样的例子	68
4.4.1 矩形孔径	68
4.4.2 圆形孔径	70
4.4.3 薄正弦振幅光栅	71
4.4.4 薄正弦相位光栅	74
4.5 计算菲涅耳衍射的例子	76
4.5.1 方孔径的菲涅耳衍射	76
4.5.2 正弦振幅光栅产生的菲涅耳衍射——塔尔博特像	78
习题	82
第5章 相干光学系统的波动光学分析	88
5.1 薄透镜作为相位变换器	88

5.1.1	厚度函数	89
5.1.2	傍轴近似	90
5.1.3	相位变换及其物理意义	90
5.2	透镜的傅里叶变换性质	92
5.2.1	输入紧靠透镜	93
5.2.2	输入位于透镜之前	95
5.2.3	输入位于透镜之后	96
5.2.4	光学傅里叶变换的一个例子	97
5.3	成像:单色光照明	98
5.3.1	正透镜的脉冲响应	98
5.3.2	消去二次位相因子:透镜定律	100
5.3.3	物和像之间的关系	102
5.4	复杂相干光学系统的分析	104
5.4.1	算符记号	104
5.4.2	算符方法对一些光学系统的应用	106
习题		109
第 6 章	光学成像系统的频谱分析	114
6.1	成像系统的一般分析	114
6.1.1	普遍模型	114
6.1.2	衍射对像的影响	116
6.1.3	多色光照明:相干情形和非相干情形	118
6.2	衍射置限相干成像系统的频率响应	121
6.2.1	振幅传递函数	121
6.2.2	振幅传递函数的例子	123
6.3	衍射置限非相干成像系统的频率响应	124
6.3.1	光学传递函数	124
6.3.2	OTF 的一般性质	125
6.3.3	无像差系统的 OTF	126
6.3.4	衍射置限系统的 OTF 的例子	128
6.4	像差及其对频率响应的影响	130
6.4.1	广义光瞳函数	131
6.4.2	像差对振幅传递函数的影响	131
6.4.3	像差对 OTF 的影响	132
6.4.4	简单像差的例子:聚焦误差	133
6.4.5	切趾法及其对频率响应的影响	136
6.5	相干成像和非相干成像的比较	139

6.5.1	像强度的频谱	139
6.5.2	两点分辨率	141
6.5.3	其他效应	143
6.6	超越经典衍射极限的分辨率	145
6.6.1	数学基础	145
6.6.2	带宽外推的直观解释	146
6.6.3	基于抽样定理的一种外推方法	146
6.6.4	一种迭代外推方法	148
6.6.5	实际限制	150
习题		150
第 7 章	波前调制	155
7.1	用照相胶片进行波前调制	155
7.1.1	曝光、显影和定影的物理过程	155
7.1.2	术语的定义	157
7.1.3	非相干光学系统中的胶片	158
7.1.4	相干光学系统中的胶片	160
7.1.5	调制传递函数	162
7.1.6	照相乳胶的漂白	163
7.2	空间光调制器	165
7.2.1	液晶的性质	166
7.2.2	基于液晶的空间光调制器	173
7.2.3	磁光空间光调制器	177
7.2.4	可形变反射镜空间光调制器	179
7.2.5	多量子阱空间光调制器	181
7.2.6	声光空间光调制器	184
7.3	衍射光学元件	187
7.3.1	二元光学	188
7.3.2	其他类型的衍射光学元件	190
7.3.3	几句提醒的话	191
习题		191
第 8 章	模拟光学信息处理	193
8.1	历史背景	193
8.1.1	阿贝-波特实验	193
8.1.2	泽尼克相衬显微镜	196
8.1.3	照片质量的改善: Maréchal 的工作	197

8.1.4	通信理论观点的兴起	198
8.1.5	相干光学对更普遍的数据处理的应用	199
8.2	非相干图像处理系统	199
8.2.1	基于几何类光学的系统	200
8.2.2	包含衍射效应的系统	203
8.3	相干光信息处理系统	205
8.3.1	相干系统的结构	206
8.3.2	对滤波器实现的限制	209
8.4	VanderLugt 滤波器	210
8.4.1	频率平面掩模的合成	210
8.4.2	处理输入数据	213
8.4.3	VanderLugt 滤波器的优点	215
8.5	联合变换相关器	215
8.6	对特征识别的应用	218
8.6.1	匹配滤波器	218
8.6.2	一个特征识别问题	219
8.6.3	特征识别机的光学合成法	221
8.6.4	对尺寸大小和旋转的敏感性	223
8.7	不变的图样识别	223
8.7.1	梅林相关器	224
8.7.2	圆谐波相关	225
8.7.3	合成判别式函数	227
8.8	图像恢复	228
8.8.1	逆滤波器	228
8.8.2	维纳滤波器或最小均方误差滤波器	229
8.8.3	滤波器的实现	230
8.9	合成孔径雷达数据处理	234
8.9.1	合成孔径的形成	234
8.9.2	采集到的数据和记录样式	235
8.9.3	透明胶片的聚焦性质	237
8.9.4	二维像的生成	240
8.9.5	倾斜平面处理器	242
8.10	声光信号处理系统	244
8.10.1	布拉格单元频谱分析仪	245
8.10.2	空间积分相关器	246
8.10.3	时间积分相关器	248

8.10.4 其他声光信号处理系统	250
8.11 离散模拟光学处理器	250
8.11.1 信息和系统的离散表示	250
8.11.2 串行矩阵-矢量乘法器	251
8.11.3 并行的非相干光矩阵-矢量乘法器	252
8.11.4 外积处理器	254
8.11.5 其他离散处理系统	255
8.11.6 处理双极性数据和复数数据的方法	255
习题	256
第9章 全息术	261
9.1 历史引言	261
9.2 波前重建问题	262
9.2.1 振幅与相位的记录	262
9.2.2 记录介质	263
9.2.3 原始波前的重建	263
9.2.4 全息过程的线性性质	264
9.2.5 全息术成像	264
9.3 伽博全息图	266
9.3.1 参考波的来源	266
9.3.2 孪生像	267
9.3.3 伽博全息图的局限性	268
9.4 利思-乌帕特尼克斯全息图	268
9.4.1 全息图的记录	268
9.4.2 获得重建像	269
9.4.3 最小参考角	271
9.4.4 三维景物全息术	272
9.4.5 全息术的实际问题	274
9.5 像的位置和放大率	276
9.5.1 像的位置	277
9.5.2 轴向放大率和横向放大率	279
9.5.3 一个例子	280
9.6 不同类型的全息图简介	281
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	281
9.6.2 透射全息图和反射全息图	282
9.6.3 全息立体照片	284
9.6.4 彩虹全息图	285

9.6.5	合成全息图	287
9.6.6	模压全息图	288
9.7	厚全息图	289
9.7.1	记录体全息光栅	290
9.7.2	从体光栅重建波前	291
9.7.3	更复杂的记录光路的条纹方向	292
9.7.4	有限大小的光栅	293
9.7.5	衍射效率——耦合波理论	295
9.8	记录材料	303
9.8.1	卤化银感光乳剂	303
9.8.2	光聚合物胶片	304
9.8.3	重铬酸盐明胶	305
9.8.4	光折变晶体材料	305
9.9	计算全息图	307
9.9.1	抽样问题	308
9.9.2	计算问题	311
9.9.3	表示问题	311
9.10	全息像像质的劣化	318
9.10.1	胶片 MTF 的影响	319
9.10.2	胶片非线性的影响	321
9.10.3	胶片颗粒噪声的效应	323
9.10.4	散斑噪声	323
9.11	使用空间非相干光的全息术	323
9.12	全息术的应用	326
9.12.1	显微术和高分辨率体成像	326
9.12.2	干涉测量术	327
9.12.3	通过致畸变介质成像	331
9.12.4	全息数据存储	334
9.12.5	用于人工神经网络的全息加权	336
9.12.6	其他应用	339
习题		339
第 10 章	光通信中的傅里叶光学	343
10.1	引言	343
10.2	布拉格光纤光栅	343
10.2.1	光纤简介	344
10.2.2	在光纤中记录光栅	346