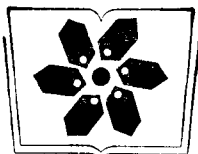


J. W. 顾德门 著
科 学 出 版 社

统计光学



中国科学院科学出版基金资助项目

统计光学

J. W. 顾德门 著

秦克诚 刘培森 译
曹其智 詹达三

科学出版社

1992

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书是迄今为止国际上唯一的一本全面介绍统计光学这一新兴分支学科的专著。本书作者 J. W. 顾德门在信息光学领域内作出了很大贡献,现任国际光学联合会主席、美国光学学会副主席。

本书用通信理论中的概率统计方法,研究光场本身、光传播过程中及接收时的随机涨落。统计光学既是一门应用学科,在信息光学中有着广泛的应用,又涉及对光的本性的理解,同光学中其他分支学科有着密切的联系。它的基础知识已成为光学工作者的必备知识。

本书介绍统计光学的基本内容及其所用的数学工具和方法,总结了最新研究成果。本书也是一本很好的研究生教材,正式出版前曾以讲义形式在美国一些大学使用过多届,效果良好。每章附有习题。

本书可作为高等学校光学专业高年级学生和研究生教材,也可供教师、科研人员和工程技术人员参考。

J. W. Goodman

STATISTICAL OPTICS

John Wiley & Sons, Inc., 1985

统 计 光 学

J. W. 顾德门 著

秦克诚 刘培森 曹其智 詹达三 译

责任编辑 陈菊华

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1992 年 9 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1992 年 9 月第一次印刷 印张: 16 1/4

印数: 1—1 400 字数: 424 000

ISBN 7-03-002915-1/O·474

定价: 11.90 元

中文版序言

在光学教学中,一种自然的进程通常是,从几何光学的光线处理方式出发,进而讨论对衍射和干涉现象的波动处理.在掌握了这些基本概念之后,学生就可以学习更数学化的 Fourier 光学,它讨论的是光通过透镜和透明片系统传播的完全确定性的问题.光学教程通常就在这里结束.我写本书的前提是,完整的光学教程也应当包括对光场的统计性质的详尽说明,因为许多光学问题是不能用确定性方式处理的,反之,它们需要从随机性观点出发来解决.

本书中文版翻译的准备工作经过了一段相当长的时间.我特别感谢北京大学的秦克诚,他非常细心地读了本书的英文手稿,提出了许多重要的更正和改进的建议.我也感谢参加本书翻译工作的其他人,包括刘培森、曹其智和詹达三*.

我诚挚地希望,本书将对中国在四个现代化的进程中作出微薄的贡献,特别是能够有助于加强中国在光学的广阔领域内已经给人深刻印象的研究工作.

作者

于加利福尼亚斯坦福

1985年9月1日

* 本书翻译分工如下: 秦克诚译第一至四章及附录,詹达三译第五、六章,刘培森译第七章,曹其智译第八、九章. 最后译文由秦克诚、刘培森总校. ——译者注

序

从本世纪 60 年代初期以来,人们已逐渐接受了这一主张:现代的光学专业训练应当充分阐明 Fourier 分析概念和线性系统理论概念。我认为,对概率和统计学工具来说,一个类似的阶段也已到来,任何高等的光学教学计划都应将统计光学领域内的某种训练作为一个不可缺的部分。我写本书就是为了满足在这个领域有一本合适的教科书的需要。

本书讨论的问题具有很具体的物理内容,但是很容易被数学所掩盖。因此,讨论这类问题的书籍的作者便面临下面的困难:如何最好地利用现有的强有力的数学工具,而又不致掩盖掉内容的物理意义。在数学严格性方面要作一些处理,并且要尽可能地反复强调各种数学量的物理意义。由于干涉条纹的生成是大多数问题中最基本的物理现象,我在讨论数学结论的意义时尽可能紧密结合条纹来进行。我希望,本书所用的处理方法对光学工程师和电气工程师将会特别有吸引力,同时对物理学家也有用。这种处理方法既适用于自学,也适用于课堂中的正式讲授。书中收入了许多习题。

本书包含的材料涉及很多领域。第一章扼要地叙述全书内容,我们在此不重复。本书根据斯坦福大学统计光学课程的讲义改写而成,这门课在一个学季的 10 周时间内讲完,但是,本书包含的材料足够在 15 周的一个学期甚至两个学季内使用,于是问题在于,在一个学季的情况下,哪些材料可以省略。要在一个学季内学完这门课,重要的是,学生以前应学过概率论和随机过程,并且很好地掌握了 Fourier 方法。在这些条件下,我建议教师让学生自学第一、二、三章,直接从第四章的光学开始讲授。在时间不够时下面各节可以省略或者留给学生自己阅读:第 5.6.4, 5.7, 6.1.3, 6.2,

6.3, 7.2.3, 7.5, 8.2.2, 8.6.1, 8.7.2, 8.8.3, 9.4, 9.5 及 9.6 节.值得一提的是,有时我也用第二章和第三章的内容作为一门一个学季的“概率论和随机过程初步”课程的基础。

本书最早的雏型是 1968 年斯坦福大学的统计光学课程所用的粗略的讲义,因此本书的成书已经经历了一段很长的时间.从许多方面来讲,它的成书时间是太长了(我的有耐心的出版者一定会同意这一点),因为在长达 15 年多的时期里,任何领域都会发生重大的变化.因此,我面临的挑战是,处理题材的方式,要不随时间的推移而过时.为了使信息尽可能最新,在有些章的末尾给出了最新的补充参考文献。

1973—1974 学年,当我有幸在法国 Orsay 光学研究所度过一年教学假时,那份粗略的讲义开始变成经过更细致加工的手稿.直接邀请我的 S. Lowenthal 教授和研究所所长 A. Marechal 教授都非常周到地尽了东道主之谊.他们不仅向我提供了使工作富于成果所需的全部环境,而且还非常善意地免除了通常伴随一个正式职位而来的各项责任.我非常感谢他们的支持和劝告,没有这些,这本书就不会有一个坚实的开端。

写书进展缓慢而由之带来的一个好处是,我有机会在许多年里把本书的内容向许多研究生讲授,他们有一种神奇的能力,会指出那份手稿中缺乏说服力的论点和全部错误.因此,我非常感谢在斯坦福大学听过我的统计光学课的学生们.这份不断改进的讲义还在别的一些大学使用过,我感谢佐治亚州理工学院的 W. Rhodes 和南加州大学的 T. Strand,他们反馈给我的信息有助于表述方式的改进。

一个作者同他(她)的出版者之间的关系常常是疏远的,有时甚至是不愉快的.但是本书的情况完全不是这样. John Wiley 出版公司的编辑 B. Shube 在 15 年前鼓励我写这本书,她不但极有耐心和非常体谅作者的困难,而且给了我许多鼓励并成了我很好的朋友,与她共事是非常愉快的。

我特别感谢北京大学的秦克诚,他花了很多时间读手稿,并提

了许多改进的建议。 还感谢 J. Clark, 她非常出色地打印了全部手稿, 包括所有难打的数学公式。

最后, 我无法以恰当的言辞表达我对我妻子 Hon Mai (林翰美) 女士和女儿 Michele 的感激之情, 她们不但给予我亲切的鼓励, 而且在我埋头写作时没有我的陪伴而度过许多时光。

目 录

第一章 引言	1
1.1 确定性的和统计的两种现象和模型	1
1.2 光学中的统计现象	3
1.3 本书内容概述	5
第二章 随机变量	7
2.1 概率的两种定义和随机变量	7
2.2 分布函数和密度函数	9
2.3 推广到两个或多个联合随机变量	12
2.4 统计平均	15
2.4.1 随机变量的矩	15
2.4.2 多个随机变量的联合矩	16
2.4.3 特征函数	18
2.5 随机变量的变换	20
2.5.1 普遍变换	20
2.5.2 单调函数	22
2.5.3 多元概率变换	26
2.6 实数随机变量之和	27
2.6.1 求 $p_z(z)$ 的两种方法	28
2.6.2 独立随机变量	29
2.6.3 中心极限定理	30
2.7 Gauss 随机变量.....	32
2.7.1 定义	32
2.7.2 Gauss 随机变量的特殊性质	35
2.8 复数值随机变量	38
2.8.1 一般描述	38
2.8.2 复数值 Gauss 随机变量.....	39

2.9 随机相幅矢量的和	41
2.9.1 初始假设	42
2.9.2 均值、方差和相关系数的计算	43
2.9.3 长度和相位的统计	46
2.9.4 一个常相幅矢量与一个随机相幅矢量的和	48
2.9.5 强常相幅矢量与一个弱随机相幅矢量的和	51
习题	52
第三章 随机过程	56
3.1 随机过程的定义和描述	56
3.2 平稳性和遍历性	58
3.3 随机过程的谱分析	62
3.3.1 已知函数的谱密度	63
3.3.2 随机过程的谱密度	65
3.3.3 随机过程经线性滤波后的能谱密度和功率谱密度	66
3.4 自相关函数和 Wiener-Khinchin 定理	67
3.5 交叉相关函数和交叉谱密度	73
3.6 Gauss 随机过程	76
3.6.1 定义	76
3.6.2 线性滤波后的 Gauss 随机过程	77
3.6.3 广义平稳性和严格平稳性	77
3.6.4 四阶矩	78
3.7 Poisson 点脉冲过程	78
3.7.1 定义	79
3.7.2 从基本假设推导 Poisson 统计	81
3.7.3 从随机事件时间推导 Poisson 统计	82
3.7.4 Poisson 过程的能谱密度和功率谱密度	84
3.7.5 双重随机 Poisson 过程	88
3.7.6 经过线性滤波的 Poisson 过程	90
3.8 从解析信号导出的随机过程	91
3.8.1 单色信号的复数信号表示	92
3.8.2 非单色信号的复数信号表示	93
3.8.3 复包络或随时间变化的相幅矢量	96

3.8.4 解析信号作为一个复数值随机过程	97
3.9 复数 Gauss 随机过程	100
3.10 Karhunen-Loève 展开	101
习题	103
第四章 光波的某些一阶性质	107
4.1 光波的传播	107
4.1.1 单色光	108
4.1.2 非单色光	109
4.1.3 窄带光	110
4.2 偏振热光和非偏振热光	111
4.2.1 偏振热光	112
4.2.2 非偏振热光	115
4.3 部分偏振热光	117
4.3.1 窄带光通过偏振敏感的仪器	117
4.3.2 相干矩阵	119
4.3.3 偏振度	123
4.3.4 瞬时强度的一阶统计	126
4.4 激光	128
4.4.1 单模振荡	129
4.4.2 多模激光	135
4.4.3 激光通过运动漫射体所产生的赝热光	139
习题	140
第五章 光波的相干性	144
5.1 时间相干性	145
5.1.1 Michelson 干涉仪	145
5.1.2 实验的数学描述	147
5.1.3 干涉图与光束的功率谱密度的关系	150
5.1.4 Fourier 光谱学	154
5.2 空间相干性	156
5.2.1 Young 氏实验	156
5.2.2 Young 氏实验的数学描述	158
5.2.3 若干几何因素的考虑	162

5.2.4 准单色条件下的干涉	165
5.2.5 有限针孔大小的效应	167
5.3 交叉光谱纯	171
5.3.1 两束光的叠加的功率谱	172
5.3.2 交叉光谱纯和可简约性	173
5.3.3 激光被运动漫射体散射	177
5.4 互相干性的传播	179
5.4.1 基于 Huygens-Fresnel 原理的解	179
5.4.2 支配互相干性传播的波动方程	182
5.4.3 交叉谱密度的传播	184
5.5 互相干函数的极限形式	185
5.5.1 相干场	186
5.5.2 非相干场	188
5.6 Van Cittert-Zernike 定理	190
5.6.1 数学推导	190
5.6.2 讨论	192
5.6.3 一个例子	194
5.6.4 广义的 Van Cittert-Zernike 定理	198
5.7 部分相干光被孔径衍射	204
5.7.1 薄的透射结构对互强度的影响	205
5.7.2 计算观测到的强度图样	206
5.7.3 讨论	208
习题	210
第六章 涉及高阶相干性的一些问题	216
6.1 热光或赝热光的积分强度的统计性质	217
6.1.1 积分强度的平均值和方差	217
6.1.2 积分强度的概率密度函数的近似形式	222
6.1.3 积分强度的概率密度函数的精确解	228
6.2 测量时间为有限大小时互强度的统计性质	232
6.2.1 $J_{11}(T)$ 的实部和虚部的矩	235
6.2.2 积分时间很长和 μ_{11} 很小时 $J_{11}(T)$ 的模和相位的统计	239

8.1.1	假设和简化	327
8.1.2	平均光学传递函数	328
8.1.3	平均点扩展函数	331
8.2	随机吸收屏	332
8.2.1	平均 OTF 和平均 PSF 的一般形式	332
8.2.2	一个特例	335
8.3	随机相位屏	338
8.3.1	一般表述	338
8.3.2	Gauss 随机相位屏	339
8.3.3	相位方差很大时平均 OTF 和平均 PSF 的极限形式	344
8.4	广延的随机非均匀媒质对波传播的影响	347
8.4.1	记号和定义	348
8.4.2	大气模型	350
8.4.3	电磁波通过非均匀大气的传播	354
8.4.4	对数正态分布	360
8.5	长曝光 OTF	363
8.5.1	用波结构函数表示长曝光 OTF	364
8.5.2	波结构函数的近场计算	367
8.6	理论的种种推广	374
8.6.1	推广到更长的传播路程——振幅和相位滤波器函数	375
8.6.2	结构常数 C_n^2 平滑变化的效应	385
8.6.3	大气相干直径 r_0	388
8.6.4	球面波的结构函数	390
8.7	短曝光 OTF	391
8.7.1	长曝光和短曝光	391
8.7.2	平均短曝光 OTF 的计算	393
8.8	星体斑纹干涉量度学	399
8.8.1	方法的原理	400
8.8.2	对这个方法的一个启发性的分析	404
8.8.3	对星体斑纹干涉量度学的更完全的分析	407

6.2.3 高信噪比条件下 $J_{11}(T)$ 的模和相位的统计	244
6.3 强度干涉仪的经典分析	246
6.3.1 振幅干涉量度学和强度干涉量度学	247
6.3.2 强度干涉仪的理想输出	249
6.3.3 干涉仪输出中的“经典”噪声或自“噪声”	252
习题	256
第七章 部分相干性对成象系统的影响	259
7.1 若干预备性考虑	259
7.1.1 薄透射物体对互相干性的影响	260
7.1.2 薄透镜引入的时间延迟	262
7.1.3 焦平面到焦平面的相干性关系	264
7.1.4 单块薄透镜的物-象相干性关系	268
7.1.5 出瞳中的互强度和象的互强度之间的关系	272
7.2 计算象的强度的各种方法	275
7.2.1 对光源积分	275
7.2.2 用入射的互强度函数表示光源	279
7.2.3 四维线性系统方法	283
7.2.4 非相干极限和相干极限	290
7.3 两个例子	294
7.3.1 两个相距很近的点的象	294
7.3.2 正弦振幅物体的象	297
7.4 成象作为一个干涉量度过程	300
7.4.1 成象系统作为一个干涉仪	300
7.4.2 用干涉仪收集象的信息	304
7.4.3 相位信息的重要性	308
7.4.4 相位提取	312
7.5 相干成象中的斑纹效应	315
7.5.1 斑纹的起源和一阶统计	316
7.5.2 系综平均相干性	318
习题	323
第八章 有随机非均匀介质出现时的成象	326
8.1 薄随机屏对象质的影响	327

8.8.4 推广	411
8.9 理论结果的普遍性	414
习题	415
第九章 光的光电检测方法中的基本性限制	419
9.1 光电探测的半经典模型	420
9.2 经典光强的随机涨落的效应	422
9.2.1 十分稳定的单模激光器辐射的光电计数统计	424
9.2.2 计数时间大大短于相干时间时偏振热辐射的光电计数统计	425
9.2.3 计数时间任意时偏振热光的光电计数统计	428
9.2.4 偏振效应	430
9.2.5 空间相干性不完全的效应	431
9.3 简并参量	433
9.3.1 光电计数的涨落	434
9.3.2 黑体辐射的简并参量	438
9.4 振幅干涉仪在低光平下的噪声限制	442
9.4.1 测量系统及待测的量	443
9.4.2 计数矢量的统计性质	444
9.4.3 离散 Fourier 变换作为一种估值工具	445
9.4.4 可见度和相位估值的精度	448
9.5 强度干涉仪在低光平下的噪声限制	452
9.5.1 强度干涉仪的计数方式	453
9.5.2 计数涨落乘积的期望值及其与条纹可见度的关系	454
9.5.3 和可见度估值联系的信噪比	457
9.6 斑纹干涉量度学中的噪声限制	461
9.6.1 探测过程的一个连续模型	461
9.6.2 探测到的象的谱密度	463
9.6.3 象的谱密度估值的涨落	467
9.6.4 星体斑纹干涉量度术的信噪比	468
9.6.5 对结果的讨论	470
习题	472
附录A Fourier 变换	475

A.1 Fourier 变换的定义	475
A.2 Fourier 变换的基本性质	476
A.3 一维 Fourier 变换表	478
A.4 二维 Fourier 变换对偶表	479
附录 B 随机相幅矢量和	480
附录 C 探测出的斑纹象的谱的四阶矩	486
参考文献	489
索引	498

第一章 引言

光学作为一门学科,早已进入它的生命的第二个千年。但是,尽管这样高龄,它仍然非常生气勃勃,显得年轻。在 20 世纪中叶,各种事件和各种发现赋予这门学科以新的生命、新的活力和新的丰富内容。其中特别重要的是:(1) Fourier 分析及通信理论的概念和工具被引入光学,这主要发生在 40 年代末直至 50 年代;(2) 50 年代末激光器的发现和成功的实现;(3) 60 年代里非线性光学这一领域的开创。本书的主旨是,一场没有这样惹人注意但却同等重要的变化,已在整个世纪内逐渐地然而越来越快地来到了,这就是统计概念和分析方法进入光学领域。本书便来讨论这些概念在光学中所起的作用。

统计光学这门学科自身有一部相当长的历史。许多基本的统计学问题在 19 世纪末期已经解决,并被 Rayleigh 勋爵应用于声学 and 光学。随着光的量子本性的发现,特别是随着 M. Born 提出量子力学的统计诠释,在光学中对统计方法的需要大大地增加了。E. Wolf 于 1954 年为讨论波的相干性而引进了一个优美而且广阔的框架,这就奠定了一个基础,光学中的许多重要的统计问题都可以在这个基础上以统一的方式处理。同样值得特别提出的是, L. Mandel 所开拓的光电探测的半经典理论,这一理论以比较简单的方式把经典的波动量(场,强度)的统计涨落的知识同光与物质的相互作用中的涨落联系起来。上面的历史远不是完全的,不过在下面每一章里会更详细地讨论。

1.1 确定性的和统计的两种现象和模型

根据正规的教学进程,一个学物理或工程的学生是在一个完全确定性的体系内同光学首次相遇的。在该体系中,各种物理量由

数学函数表示,这些函数或者预先完全规定,或者假定可以被精确测量。这些物理量受到完全确定的变换的作用,这些变换以完全可以预言的方式改变这些物理量的形式。例如,若有一个已知复数场分布的单色光波入射到一个完全不透明屏上的透明孔径上,那么在离开屏一段距离处产生的复数场分布,可以用波动光学中早已建立的衍射公式准确计算出来。

从这种初等课程训练出来的学生可能会确信,他们已经掌握了基本的物理概念和定律,可以去求他们遇到的几乎任何问题的精确解答了。的确,他们或许也得到过警告,有一些问题,特别是在弱光探测中出现的问题,需要用统计方法来解决。但是乍看之下,解题的统计方法常常显得是一个“二等”方法,因为统计学通常是在缺乏充分的信息因而无法求出从审美观点看更令人满意的“准确”解的时候使用的。问题也许本来就太复杂,无法以解析方法或数值方法求解;也许是边界条件确定得不好。求解一个问题,优先的选择当然应该是确定性的方法,统计学的引入只是作为我们自身的弱点和局限性的标志。部分是由于这种观点的结果,统计光学的题目通常是留给那些学得更好的学生、特别是那些具有数学修养的学生的。

虽然上述观点的起源是很清楚的,并且是可以理解的,但是它所得出的关于确定性分析和统计分析的相对优缺点的结论却大谬不然,主要理由如下:首先,很难设想(如果不是不可能的话),光学中的一个实际工程问题不包含某些需要进行统计分析的不确定性因素。即使是那些透镜设计者,他们用以进行光线追踪的是人们已接受了几世纪的精确物理定律,最后也对质量控制感到担心!因此,统计方法肯定不是一个主要留给那些对数学比对物理和工程更有兴趣的人的题目。

其次,认为使用统计方法就意味着一个人能力有限因而应当竭力避免使用,这种观点是建立在对统计现象本性的一种过于狭隘的看法之上的。根据充分的实验证据,大多数物理学家都相信,光与物质的相互作用从根本上说是一种统计现象,在原则上它是