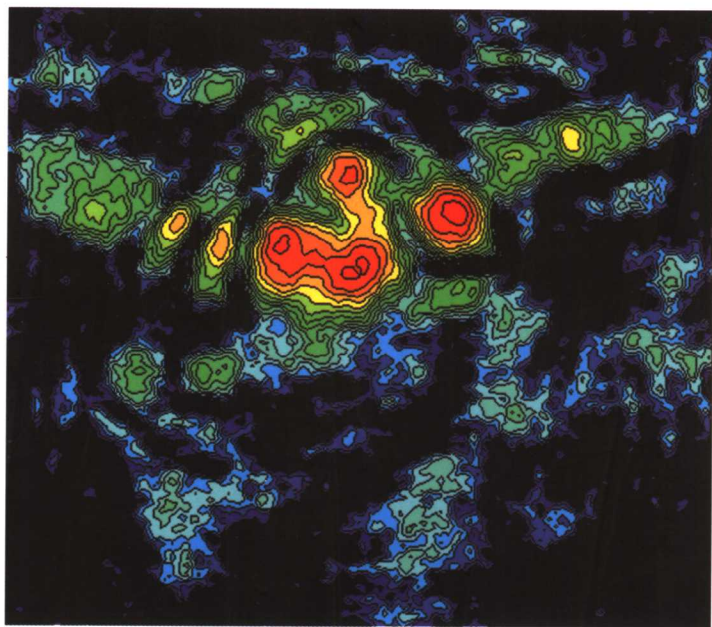


饶瑞中 著

*Light Propagation
in the Turbulent
Atmosphere*

光 在湍流 大气中的传播



光 在湍流 大气中的传播

饶瑞中 著

*Light Propagation
in the Turbulent
Atmosphere*

 安徽科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

光在湍流大气中的传播/饶瑞中著. —合肥:安徽科学技术出版社,2005.12

ISBN 7-5337-3390-8

I. 光… II. 饶… III. 光-湍流大气-传播
IV. TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 011888 号

*

安徽科学技术出版社出版

(合肥市跃进路 1 号新闻出版大厦)

邮政编码:230063

电话号码:(0551)2833431

E-mail: yougoubu@sina.com

yougoubu@hotmail.com

网址: www. ahstp. com. cn

新华书店经销 合肥义兴印务有限责任公司印刷

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.5 字数:288 千

2005 年 12 月第 1 版 2005 年 12 月第 1 次印刷

定价:29.90 元

(本书如有倒装、缺页等问题,请向本社发行科调换)

序

随着激光技术日趋成熟,激光在大气中的应用正受到世界各国日益广泛的重视,如激光通讯、激光雷达、激光测距以及激光能量的输运等等。大气湍流引起的折射率随机起伏将导致激光束光场的随机变化,它会严重限制不同激光工程系统的使用性能,甚至决定激光工程系统的技术可行性。因此,研究激光大气传输湍流效应具有重要的理论和应用意义。

激光大气传输湍流效应本质上就是光在湍流大气中的传播问题。20世纪50年代前苏联学者 Tatarskii 引入 Kolmogorov 和 Obukhov 发展的湍流统计理论,求解湍流大气中波传播方程,取得的一些理论结果相当好地解释了在此以前所取得的实验结果,从而奠定了光波在湍流大气中传播的理论基础。由于激光的广泛应用和激光光子的高简并度特性,激光在湍流大气中的传输已成为近代大气光学最前沿和最热门的研究课题之一。虽然已经取得了大量的成果,然而,由于激光在湍流大气中传输是一个十分复杂的随机非线性过程,强起伏条件下的激光传输、非均匀各向同性湍流(特别是大气湍流存在的间歇性)对激光传输的影响,以及如何估计大气湍流对特殊激光工程系统设计与使用的合理性等问题,都需要更深入的研究。

饶瑞中同志长期以来一直结合我国激光工程的实际需求,开展相应的理论与实验研究。他在激光光强、相位和到达角等主要物理量的起伏概率分布和频谱特性、激光光斑图像的特征和湍流

大气特性的分析和描述等方面都取得了不少有价值的研究成果,得到了国内外学者的较高评价,是我国大气光学的主要学科带头人。

《光在湍流大气中的传播》一书除了介绍在本领域研究中所必需的基础知识,还结合国内外相关研究的最新进展,着重总结了饶瑞中同志和他的同事们所取得的理论和实验研究成果,并对激光大气传输中的湍流效应下一步需要研究的问题提出了自己的见解。我相信本书的出版,将会对从事或即将从事这一领域研究的工作者有所帮助,同时也会对从事研制、设计和使用激光工程系统的科研人员有所启示。

中国工程院院士


2005 年 10 月

前 言

光的传播是人类最早观察研究的自然现象之一,从直线传播到波动特性、波粒二象性,人们对光的特性已有本质的理解.光在确定性均匀介质中的传播规律已基本被人们掌握,但光在随机非均匀介质(如地球大气)中的传播规律至今仍是一个令人十分困惑的问题.经过自牛顿时代起至今(特别是20世纪中期以来半个多世纪)的努力,人们已取得了长足的进步,解决了一些基本问题,研究结果得到了较为广泛的应用,但仍存在着一些关键问题悬而未决,促使人们进行深入的研究.

地球大气是我们赖以生存、无法躲避的生活环境,它是一种典型的随机非均匀介质.大气可以划分为由微粒组成的离散混浊大气介质和由热运动分子构成的“连续”湍流大气介质.在地面进行光学观测总要受大气的影响,而两种类型的大气介质对光传播的影响是不同的.混浊大气介质对光传播的影响主要体现在空气中的尘埃的散射作用,光在任意方向上偏离直线传播.灰蒙蒙的天空、日晕等是较常见的现象,日益严重的沙尘暴天气是一个极端的例子.湍流大气介质对光传播的影响主要集中在直线传播的近轴范围内,烈日下柏油路面上像波浪一样起伏的空气、晴朗夜空星光的闪烁是很容易观察到的现象.大气介质对光传播的影响显然破坏了成像的质量,因此在地面进行光学观测不能充分发挥光学仪器的效能,在进行天文观测时最为明显.哈勃望远镜被送到太空去的原因就是要躲避地球大气.

激光是 20 世纪最伟大的发明之一. 激光的高相干度、高亮度、强方向性是普通光源无法比拟的优点, 它在各个学科与技术领域的应用无所不在、与日俱增. 但当激光在大气中长距离传播时, 由于大气的影 响, 相干度、亮度会下降, 光束会发散、抖动, 当然还有许多物理上的性质要改变, 激光的优点被大大消蚀. 因此, 要充分发挥激光的优势, 必须了解大气湍流对激光的影响.

由于两种类型的大气介质对光传播的影响不同, 对两种影响的处理方法也有差异: 混浊介质中的光传播主要以光强为研究对象, 其主题是辐射传输方程的求解; 湍流介质中的光传播主要以光场为研究对象, 其主题是波传播方程的求解. 本书仅研究湍流大气对光传播的影响.

虽然牛顿早就对天文观测中的星光闪烁现象做了科学的解释, 但系统的光传播研究开始于 20 世纪中期. Obukhov 应用了 Rytov 的平缓扰动法求解随机介质中的波传播方程, 随后 Tatarskii 引入由 Kolmogorov 和 Obukhov 发展的湍流统计理论中有关湍流谱的结果, 取得了本质性的突破. 他所获得的闪烁强度与传播距离的关系和实验结果完全符合, 一举奠定了光传播理论的基础. 其理论体系已成为弱起伏条件下的经典理论. 然而随着闪烁饱和现象的发现, Tatarskii 的理论已不再适用. 原因在于它是一种微扰理论, 当起伏不能再作微扰处理时, 理论也就失去了适用性.

闪烁饱和现象的发现促进了各种理论研究方法的竞相出现, 解决了一些强起伏条件下的传播问题. 与弱起伏理论相比, 这些方法各有其适用的特定领域, 还没有一套较为完整的理论体系. 随后出现的利用 Markov 近似求解光场的统计矩方程的方法得到了强起伏条件下的闪烁强度的渐近解. 但在弱、强过渡的临界起伏条件下, 依然没有很好的处理方法. 激光、高性能光电探测器件以及高速计算机的飞速发展促进了随机介质中波传播实验研究和数值研究的蓬勃发展, 发现了许多新的现象, 但要获得普适的

理论体系与结果依然困难重重。

湍流介质中光传播研究的困难之处表现在三个方面。首先是随机介质中波传播理论本身的复杂性：非微扰起伏问题；其次是湍流介质随机特性的复杂性：湍流的非局地均匀各向同性和间歇性；第三个方面在于实验条件的不可控制性：传播路径上湍流均匀性的假设、气象要素均匀性的假设、Taylor 冻结湍流的假设等在多大程度上成立总是很难确定的，因此，将实验结果与理论结果作严格的比较是不可能的。

随着对湍流问题的深入研究，实验观测已经证实大气湍流存在间歇性(intermittency)。Kolmogorov 湍流统计理论主要解决以结构函数和谐密度为表现形式的二阶统计矩的问题，在二阶统计矩上，间歇性的影响是微不足道的。因此，在 Kolmogorov 湍流统计理论基础上获得的光传播理论结果在一般情况下依然有效。而间歇性主要表现在高阶统计矩的标度性质上，是 Kolmogorov 湍流统计理论不能充分描述的，它对光传播的影响也是无法完全用建立在 Kolmogorov 局地各向同性湍流统计理论基础之上的光传播理论来解决的。当我们考虑因大气湍流间歇性引起的光传播湍流效应的高阶统计性质等问题时，传统的理论研究方法则无能为力，必须引入新的研究手段。

湍流介质中光波传播的研究既是一个引人入胜的基础理论问题，也是一个具有重要应用价值的工程技术问题。如何定量可靠地评价湍流大气对光传播的影响也是一个重要的研究问题。建立在确定性介质中的像差、成像质量等评价方法能否有效地描述湍流介质中的相关问题？这些问题都要求我们必须将湍流介质中光波传播的研究紧密结合实际应用来开展。

关于光波在随机介质中的传播理论已有大量著作。这些著作大致分为四类：第一类是系统的理论著作，对随机介质与波传播理论进行了详细的分析与介绍。Tatarskii 的两本著作是其代表。

这些著作可以作为本领域研究工作的基础知识。第二类是论文集,在本领域各个方向上有所建树的专家分别撰写有关内容,反映了光波大气传播的各个侧面。Strohbehn的著作是其代表, SPIE近年来也出版了系列的会议论文集。这类著作的优点是反映了杰出研究者各自的研究心得,具有重要的参考价值;其缺点是各部分之间在物理概念、研究思路等方面缺乏有机的协调与连贯性,使人难以把握光波在随机介质中的传播理论的整体一贯性。第三类著作是一些学者在某些专题上的研究成果,深入并独到的研究方法,具有重要的参考价值。第四类是对光波在随机介质中的传播理论的现有研究结果的汇编,具有重要的应用参考价值,但在基础知识的表述上逊于第一类著作,并且没有明确体现出前沿研究方向。

本书的撰写目的异于上述著作,既吸收了本研究领域相关的研究成果,也反映了作者本人的研究心得和结果,着眼点放在物理概念的掌握、关键问题的把握、理论与应用的紧密结合上。本书主要想在以下三个方面有所尝试:湍流介质中光传播的物理概念的理解;湍流介质中光传播关键物理问题的理论探索;与湍流介质中光传播的工程应用有关的理论探索。因此本书没有涵盖湍流介质中光传播理论的方方面面,却在所涉及到的部分有所侧重,并提出一些作者本人没有解决的、正在着手或希望着手研究的问题,和读者朋友一起思考。

本书第一章到第三章首先阐述湍流大气光学的概貌、传播光学与湍流统计理论的基础知识,重点放在物理概念的阐述上,帮助读者建立随机介质中光传播的物理图像,了解各种处理方法的适用范围,明白研究的目的。为了避免烦琐的数学符号掩盖物理的本质,本书对传播理论和随机过程的数学推导一概从略。

第四章和第五章介绍湍流介质中光传播的研究方法。主要包括数值分析方法和各种解析方法。在湍流介质中光传播的研究历

史过程中,解析方法曾是主要的研究手段并取得了重要的成果.但随着起伏条件的增强,各种解析方法的适用范围都受到限制,而数值模拟方法已成为主要的研究工具.由于数值模拟方法是从光的传播方程出发,体现了光波传播的物理过程,比解析方法更有助于我们理解问题的实质,因此我们首先阐述数值分析方法,然后再介绍各种主要的解析方法.

第六章主要分析光传播过程中遇到的相干性退化和相位起伏以及光传播的相位校正问题,以空间相干长度、到达角起伏和光场中的相位奇点问题作为研究的重点.第七章分析光传播过程中遇到的光强起伏问题.由于光强是各种应用中牵涉到的主要物理量,我们从起伏强度、概率分布特性、非线性特征诸方面进行了较仔细的考察.第八章专门对光传播过程中遇到的光强、相位、到达角等主要物理量的频谱特征进行了考察.

第九章讨论了激光束在湍流大气中的传播的主要效应(包括光斑扩展、光束漂移等)、光斑特征以及湍流大气中光学成像系统的性能.实际上,湍流大气对激光的全部影响体现在整个光场的分布上,因此,作为空间有限光束的激光光斑图像的特征包含了最广泛的信息.对激光光斑图像特征的研究必将成为激光大气传播研究的主要课题.因此,这一章尝试对光斑的光学质量、各种统计特征进行了初步描述分析.

第十章介绍和探讨了大气湍流光学参数的性质和这些参数测量的光学方法.对湍流介质光学特性的正确了解是分析湍流大气中光传播的基础,因此,大气湍流光学参量的测量在光波大气传播的研究中是不可缺少的.

由于本书是在很短的时间内所作的一种初步的尝试,必然会存在各种各样的不妥之处,恳请有关专家学者批评指正,在此预先表示感谢.如果本书有助于研究生或即将从事这方面工作的研究者较快地掌握有关物理概念、研究思路,找到研究起点,则是对

我最大的鼓励。

本书的出版得到了安徽科学技术出版社的鼎力支持,在此向安徽科学技术出版社深表谢意。

借此机会,我向导师龚知本院士表示深深的谢意,我的有关激光大气传播湍流效应的研究工作一直得到龚老师的亲切指导;向王俊波教授、吴健教授等表示深深的谢意,是他们将我引进了激光大气传播的研究领域。我在激光大气传播的数值模拟等方面向王英俭研究员多有请教,在此深表谢意。向一起从事研究工作的王世鹏、刘晓春等同事表示感谢,有关激光大气传播湍流效应的实验研究工作是大家一起通力合作完成的。我还要向国家 863 计划大气光学重点实验室的其他同事们和自己的研究生们表示感谢,和他们一起讨论问题,使我开拓了思路、就很多问题进行了思考,并从一个方面促成了本书的撰写。

我从事的激光大气传播湍流效应的研究课题一直得到了国家 863 计划激光技术领域的资助,有关研究工作一向得到中国科学院安徽光学精密机械研究所、国家 863 计划大气光学重点实验室领导和有关工作人员的大力支持,在此表示感谢。

最后,我要向我的严父慈母、爱妻稚子、亲朋好友表示衷心的感谢,他们一直对我的科研工作给予温暖的支持。爱妻谭立青女士的一贯督促和辛勤劳作为我增添了前进的动力,免除了后顾之忧。刘昆兆老师的谆谆教诲、鼓励与鞭策使我在科研的道路上遭遇挫折时得以重新振作起来。

饶瑞中

目 录

第一章 湍流大气光传播的定性分析	1
1.0 引言	1
1.1 湍流大气中的光传播现象	2
1.2 大气折射率和湍流的影响	5
1.3 湍流场和光场的统计量	9
1.4 相位和到达角起伏的启发式分析	11
1.5 空间相干性的启发式分析	13
1.6 光强起伏的启发式分析	14
1.7 小结	21
第二章 光的传播与光学质量	24
2.0 引言	24
2.1 平面波、球面波与高斯光束	25
2.2 光的直线传播:几何光学	28
2.3 孔径衍射	31
2.4 球体粒子散射	38
2.5 像差与 Zernike 多项式	40
2.6 光学质量评价方法	46
2.7 光场的相位奇性	50
2.8 小结	55
第三章 湍流与大气湍流统计特性	58
3.0 引言	58

3.1	Kolmogorov-Oboukhov 湍流统计理论	59
3.2	湍流能量耗散率的间歇性及其模型	63
3.3	湍流温度场的间歇性	70
3.4	湍流统计理论中的谱模型	74
3.5	大气湍流的光学统计性质	78
3.6	小结	87
第四章	湍流介质中光传播的数值模拟	91
4.0	引言	91
4.1	场传播抛物型方程	93
4.2	多层相位屏数值模拟	95
4.3	湍流相位屏的构造	98
4.4	光传播模拟的数值问题	102
4.5	平面波、球面波、高斯光束和非理想波型的模拟	107
4.6	数值模拟典型结果	111
4.7	小结	113
第五章	湍流介质中光传播的解析方法	117
5.0	引言	117
5.1	几何光学近似法	120
5.2	Rytov 微扰近似法	121
5.3	随机函数的谱分解	124
5.4	谱分解法求几何光学近似结果	128
5.5	谱分解法求微扰近似结果	129
5.6	场的统计矩方程	131
5.7	Huygens-Fresnel 相位近似法	136
5.8	平面波结果向球面波、高斯光束的推广	139
5.9	小结	145
第六章	空间相干性退化和相位起伏	149

6.0	引言	149
6.1	空间相干性退化	150
6.2	相位起伏:方差、结构函数及概率分布	154
6.3	到达角起伏:方差及概率分布	157
6.4	孔径上的相位起伏和到达角起伏	160
6.5	湍流大气光传播的相位校正原理	166
6.6	湍流大气光传播的相位校正技术	168
6.7	小结	175
第七章	光强起伏	179
7.0	引言	179
7.1	弱起伏条件下的光强起伏	180
7.2	强起伏条件下的光强起伏	183
7.3	闪烁强度的普适模型	187
7.4	有限面积上的光强起伏及孔径平均	190
7.5	光强起伏的概率分布	195
7.6	光强起伏的间歇性特征	207
7.7	小结	214
第八章	光波起伏的时间频谱特征	220
8.0	引言	220
8.1	光波起伏的时间频谱	222
8.2	湍流谱对光波起伏频谱的影响	228
8.3	高斯光束的光波起伏频谱特征	238
8.4	有限孔径和饱和情况下的光波起伏频谱	243
8.5	光波起伏频谱的高频幂律特征	248
8.6	激光大气闪烁的小波频谱分析	252
8.7	小结	254
第九章	激光束传播效应和湍流中的成像	261
9.0	引言	261

9.1	激光束的漂移	263
9.2	激光束的扩展	269
9.3	湍流大气中望远镜的分辨本领	272
9.4	光强图像的特征尺度	279
9.5	光斑的光学质量:Strehl 比与锐度	287
9.6	光斑的分形结构与相位奇点	293
9.7	小结	298
第十章	湍流大气光学参数的测量	301
10.0	引言	301
10.1	光学湍流强度的描述	302
10.2	温度脉动法测量湍流强度和特征尺度	307
10.3	湍流强度和特征尺度的光学测量方法	314
10.4	大气湍流谱的测量	323
10.5	整层大气相干长度的测量	332
10.6	大气湍流强度廓线的测量	336
10.7	小结	342
	湍流大气光学研究的难题(代结语)	347

第一章 湍流大气光传播的定性分析

1.0 引言

湍流大气光传播学是一门十分艰深、专业的学问,它所涉及的(大气)湍流的性质和随机介质中的波传播规律分别是两个十分复杂的研究课题.前者是几个世纪尚未解决的难题,后者的具体对象和应用范围则十分广泛,虽然运用了物理学已知的几乎所有可能应用的方法,目前却只在一些十分有限的特殊条件下获得了成果.

如果我们直接切入定量的数理分析,则往往陷入数理公式推导的庞大的谜团,反而对这门学问的真实面目摸不着头脑.为了对湍流大气光传播学的研究对象、方法和一些基本的物理概念和图像获得一些感性的认识,我们首先在本章中介绍一下湍流大气中的常见的光传播现象、湍流大气的基本图像、湍流场和光场的统计物理量,在这些物理图像的基础上,通过最简单的几何光学的方法分析湍流大气中的光传播过程,导出光场的一些统计物理量与传播条件的关系,从而对湍流大气中的光传播问题有一个比较清晰的概念,为以后全方位的数理分析奠定基础.

1.1 湍流大气中的光传播现象

空气和阳光是人类赖以生存的基本物质条件,千百年来,大气中神奇、绚丽的光学现象(大气光象)也为人类提供了丰富的精神食粮.湛蓝的天空使宇宙显得那样的庄严和神圣,连人们心目中的仙女也是蓝色的(blue fairy).彩虹、霞光、晕、华是多么激动人心:“赤橙黄绿青蓝紫,谁持彩练当空舞?”海市蜃楼引起人们无穷的想像:“忽闻海上有仙山,山在虚无缥缈间.”所有这些神奇的大气光象都是光波与大气在特定条件下相互作用的结果.当我们用科学逐渐揭开大气光象的神秘面纱,它们不但没有令我们失去美好的联想,反而为我们提供了科学研究的标本.

大气光象产生的原因是多方面的,有空气分子和空气中的水珠、尘埃等的作用,也有大气湍流的作用.对于前者,我们在本书中不作讨论,而只讨论后者和一些与人工光源有关的光传播现象.

我们在晴朗的夜空中总能看到星星在眨眼睛,这是最为常见的星光闪烁现象.由于闪烁,我们不可或缺的空气成了现代天文观测的令人讨厌的附骨之疽.牛顿对星光闪烁现象进行了认真、细致的观测、分析,在其著名的《光学》一书中,他写到:

即使能按照理论制造出实用化的理想望远镜,但它的有效应用依然受到一定的界限的约束.高塔的投影在晃动,天上的星星在闪烁,从这些现象可以推测:我们仰望群星所途经的空气在永恒地颤动着.但使用较大的望远镜观测时,星星不再闪烁.这是因为,从入口不同位置入射的光各自抖动,这些抖动各式各样,有时相反,同时落在眼睛底部不同的位置上,它们的速度太快并且混乱,无法区分开来.所有被照亮