

信息科学技术学术著作丛书

光信息大气传输理论与 检测技术

魏计林 李晋红 等 著



科学出版社

信息科学技术学术著作丛书

信息大气传输理论与检测技术

魏计林 李晋红 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

无线激光传输的优势和大气随机复杂的多样性,使光信息大气传输理论与检测技术成为现代光学的重要研究方向。本书是在国家自然科学基金等项目研究成果的基础上完成的。较为系统和深入地论述了光信息大气传输理论与检测技术的主要理论和方法。主要内容包括激光在大气中的传输理论,部分相干光在大气湍流中的传输变换、光谱变化和光束质量,大气湍流中的奇点光学,光学元件与测量仪器,气体分子的吸收与发射光谱测量技术,瞬态双原子分子的光谱及其动力学,大气湍流模拟装置及光学效应。

本书可作为高等院校光学、光学工程、物理电子学、大气科学、应用气象学及通信工程等专业的教学参考书,也可供从事空间光通信、激光雷达、激光制导、光谱测量等领域的科技工作者、教师、研究生或高年级本科生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

光信息大气传输理论与检测技术 / 魏计林等著. —北京:科学出版社, 2015
(信息科学技术丛书)

ISBN 978-7-03-043554-5

I. ①光… II. ①魏… III. ①信息光学 IV. ①O438

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 045366 号

责任编辑:张艳芬 王 苏 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:19

字数:367 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《信息科学技术学术著作丛书》序

21 世纪是信息科学技术发生深刻变革的时代，一场以网络科学、高性能计算和仿真、智能科学、计算思维为特征的信息科学革命正在兴起。信息科学技术正在逐步融入各个应用领域并与生物、纳米、认知等交织在一起，悄然改变着我们的生活方式。信息科学技术已经成为人类社会进步过程中发展最快、交叉渗透性最强、应用面最广的关键技术。

如何进一步推动我国信息科学技术的研究与发展；如何将信息技术发展的新理论、新方法与研究成果转化为社会发展的新动力；如何抓住信息技术深刻发展变革的机遇，提升我国自主创新和可持续发展的能力？这些问题的解答都离不开我国科技工作者和工程技术人员的求索和艰辛付出。为这些科技工作者和工程技术人员提供一个良好的出版环境和平台，将这些科技成就迅速转化为智力成果，将对我国信息科学技术的发展起到重要的推动作用。

《信息科学技术学术著作丛书》是科学出版社在广泛征求专家意见的基础上，经过长期考察、反复论证之后组织出版的。这套丛书旨在传播网络科学和未来网络技术，微电子、光电子和量子信息技术、超级计算机、软件和信息存储技术，数据知识化和基于知识处理的未来信息服务业，低成本信息化和用信息技术提升传统产业，智能与认知科学、生物信息学、社会信息学等前沿交叉科学，信息科学基础理论，信息安全等几个未来信息科学技术重点发展领域的优秀科研成果。丛书力争起点高、内容新、导向性强，具有一定的原创性；体现出科学出版社“高层次、高质量、高水平”的特色和“严肃、严密、严格”的优良作风。

希望这套丛书的出版，能为我国信息科学技术的发展、创新和突破带来一些启迪和帮助。同时，欢迎广大读者提出好的建议，以促进和完善丛书的出版工作。

中国工程院院士

原中国科学院计算技术研究所所长



前 言

开展光信息大气传输理论与检测技术的研究,以及对激光通信、激光武器、深空探测、光学雷达、卫星遥感、航空测绘等领域的研究具有重要意义。近年来,因广义惠更斯-菲涅耳原理的应用以及 Rytov 结构函数平方近似的引入,用半解析或解析方法对大气中激光传输的研究得到了发展。几十年来,研究人员在光信息大气传输理论与检测技术方面做了大量的科研工作,得到了许多有价值的理论模型和实验方法,促进和推动了相关技术和学科快速发展。

本书内容主要建立在作者及其所在科研团队从事激光大气传输与检测研究、近些年承担的相关科研项目和研究生教学基础上,对光信息大气传输理论和光在大气中的检测技术进行归纳、分析和总结。

全书共 10 章。第 1 章为绪论,主要阐述光信息大气传输理论与检测技术的研究意义和国内外研究进展,使读者对光信息大气传输理论与检测技术有大致了解。第 2 章介绍激光在大气中的传输理论,分别从大气基本描述和物理特性、大气光学特性、大气湍流的形成与特点、大气湍流结构常数与功率谱模型和激光在大气湍流中的传输效应方面进行介绍。第 3 章重点分析部分相干光在大气湍流中的传输变换,首先叙述光传输变换的常用方法和部分相干光的基本理论,然后基于广义惠更斯-菲涅耳原理,从光强演化、角扩展、方向性和束宽扩展方面对部分相干厄米正弦类高斯光束、涡旋光束和刃型位错光束在大气湍流中的传输变换进行分析。第 4 章分别从高斯谢尔模型光束和合成光束两方面分析光谱在大气湍流中的变化行为。第 5 章为部分相干光在大气湍流中的光束质量,介绍聚焦光斑尺寸、远场发散角、斯特列尔比、 K 参数和 M^2 因子等光束质量的评价参数,分别讨论部分相干厄米高斯光束和涡旋光束在大气湍流中的光束质量。第 6 章为大气湍流中的奇点光学,内容包括奇点光学的基本概念、产生光涡旋的实验方法、相干涡旋和合成相干涡旋在大气湍流中的动态演化、刃型位错在大气湍流中的转化。第 7 章为光电检测系统中常用器件及设备,内容包括基本的光学元件、各种光谱仪、光源和光电探测器。第 8 章为气体分子的吸收与发射光谱测量技术,内容包括气体灵敏吸收光谱检测技术和放电荧光光谱。第 9 章为瞬态双原子分子的光谱及其动力学,内容包括 CS 、 CS^+ 、 He_2 瞬态分子光谱及其微扰和预解离动力学。第 10 章介绍大气湍流装置的特征描述及类型,并阐述一种长光程热风对流式大气湍流模拟装置;在此基础上,分析激光通过大气湍流模拟装置的特性以及各种测量技术。

本书撰写分工如下:第1章和第2章由魏计林执笔,第3~6章由李晋红执笔,第7~9章由李传亮执笔,第10章由邱选兵执笔。全书由魏计林审阅和统稿。

本书是在国家自然科学基金项目(No. 61178067, 61405136)、山西省基础研究项目(No. 2012021016, 2013021010-4)、山西省高校科技创新项目(No. 2014146)和精密光谱科学与技术国家重点实验室开放课题等研究成果的基础上撰写的,在此对国家自然科学基金委员会、精密光谱科学与技术国家重点实验室、山西省科技厅和教育厅等表示衷心的感谢。在撰写本书过程中,借鉴和参考了国内外同行的研究成果,引用了大量的参考文献,谨在此表示衷心的感谢。

限于作者学识和水平,加之光信息大气传输理论与检测技术的研究涉及面很宽,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

作者

2014年12月

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 光信息大气传输理论与检测技术的研究意义	1
1.2 光信息大气传输理论与检测技术的研究进展	2
参考文献	7
第 2 章 激光在大气中的传输理论	14
2.1 大气基本描述和物理特性	14
2.1.1 大气组分	14
2.1.2 大气结构	15
2.1.3 大气模式与标准大气	16
2.2 大气光学特性	17
2.2.1 大气折射	18
2.2.2 大气吸收	19
2.2.3 大气散射	21
2.3 大气湍流的形成与特点	24
2.4 大气湍流结构常数与功率谱模型	25
2.5 激光在大气湍流中的传输效应	28
2.5.1 光强起伏	29
2.5.2 光束漂移	29
2.5.3 源像抖动	31
2.5.4 光束扩展	33
参考文献	34
第 3 章 部分相干光在大气湍流中的传输变换	37
3.1 光传输变换的常用方法	37
3.1.1 几何光学方法	37
3.1.2 矩阵光学方法	38
3.1.3 波动方程	40
3.1.4 衍射积分方法	42
3.1.5 傅里叶光学方法	46

3.2 部分相干光的基本理论	48
3.2.1 互相干函数和互强度函数	48
3.2.2 交叉谱密度函数和复空间相干度	49
3.2.3 维格纳分布函数	50
3.3 部分相干 HSG 光在大气湍流中的传输变换	51
3.3.1 理论模型	52
3.3.2 光强演化	53
3.3.3 角扩展	59
3.3.4 方向性	63
3.3.5 束宽扩展	66
3.4 涡旋光束在大气湍流中的传输变换	81
3.4.1 光强演化	81
3.4.2 束宽扩展	84
3.5 刃型位错光束在斜程大气湍流中的传输变换	86
3.5.1 光强演化	86
3.5.2 角扩展	89
参考文献	91
第4章 部分相干光在大气湍流中的光谱变化	94
4.1 GSM 光束通过大气湍流的光谱变化	94
4.2 合成光束通过大气湍流的光谱变化	100
参考文献	109
第5章 部分相干光在大气湍流中的光束质量	112
5.1 激光光束质量的评价参数	112
5.1.1 聚焦光斑尺寸和远场发散角	112
5.1.2 斯特列尔比 S_R 和 K 参数	113
5.1.3 桶中功率和 β 参数	113
5.1.4 M^2 因子	114
5.2 部分相干 HG 光束在大气湍流中的 M^2 因子	115
5.2.1 理论模型	115
5.2.2 数值计算与分析	118
5.3 涡旋光束在大气湍流中光束质量的分析	121
5.3.1 M^2 因子分析	121
5.3.2 S_R 分析	123
5.3.3 K 参数分析	125

参考文献	127
第 6 章 大气湍流中的奇点光学	129
6.1 奇点光学概况	129
6.1.1 基本概念	129
6.1.2 产生光涡旋的实验方法	132
6.2 相干涡旋在大气湍流中的动态演化	135
6.3 合成相干涡旋在斜程大气湍流中的动态演化	139
6.4 刃型位错在大气湍流中的转化	147
参考文献	155
第 7 章 光学元件与测量仪器	160
7.1 光学元件	160
7.1.1 光学材料	160
7.1.2 光学元件透光特性和表面质量	162
7.1.3 反射镜	164
7.2 光源	169
7.2.1 光源的特性描述	169
7.2.2 气体放电光源	171
7.2.3 固体发光光源	172
7.2.4 激光光源	172
7.3 光谱测量及探测仪器	176
7.3.1 干涉仪	176
7.3.2 光谱仪	183
7.4 光电探测器	192
7.4.1 光电探测器的技术指标	192
7.4.2 真空管光电探测器	197
7.4.3 半导体光电探测器	206
7.4.4 热电探测器	210
7.4.5 电荷耦合器件	211
7.5 锁相放大器	215
7.5.1 锁相放大器的原理	215
7.5.2 锁相放大器的组成	215
7.5.3 SR830 DSP 型锁相放大器	218
参考文献	219
第 8 章 气体分子的吸收与发射光谱测量技术	221
8.1 吸收光谱技术	221

8.1.1	新型 Herriott 吸收池以及直接吸收光谱技术	221
8.1.2	基于 F-P 腔的腔锁定吸收光谱技术	226
8.1.3	光外差-Herriott 型多光程吸收光谱技术	232
8.1.4	光外差-速度/浓度调制吸收光谱技术	235
8.2	放电荧光光谱技术	236
8.2.1	射流束放电发射光谱技术	237
8.2.2	超声分子束 SO 自由基放电光谱	239
	参考文献	241
第 9 章	瞬态双原子分子的光谱及其动力学	243
9.1	几种瞬态分子光谱	243
9.1.1	CS 中性自由基分子光谱	243
9.1.2	CS ⁺ 分子离子光谱	244
9.1.3	He ₂ 准分子光谱	250
9.2	瞬态 CS 分子的光谱及其微扰	253
9.2.1	$d^3\Delta_1(v=6)$ 的微扰分析	256
9.2.2	$d^3\Delta_2(v=6)$ 的微扰分析	258
9.2.3	$d^3\Delta_3(v=6)$ 的微扰分析	259
9.3	He ₂ 的预解离动力学	260
9.3.1	研究背景	260
9.3.2	实验结果和讨论	260
9.3.3	预解离理论分析	263
	参考文献	264
第 10 章	大气湍流模拟装置及光学效应	268
10.1	大气湍流模拟装置的特征描述	268
10.2	大气湍流模拟装置类型	271
10.2.1	水介质湍流模拟法	271
10.2.2	热风式湍流模拟法	272
10.2.3	相位屏模拟法	273
10.2.4	液晶大气湍流模拟法	274
10.3	长光程大气湍流模拟装置设计	275
10.3.1	气路装置	276
10.3.2	激光光路装置	277
10.3.3	大气湍流模拟与控制电路	280
10.4	激光通过大气湍流模拟装置的特性概述	282
10.5	激光通过大气湍流模拟装置的特性测量	283

10.5.1 局部湍流强度测量技术:温度脉动法和折射率脉冲法	283
10.5.2 路径平均的湍流强度测量技术:闪烁法和到达角起伏	284
10.5.3 湍流功率谱和特征尺度的测量技术	286
10.5.4 M^2 测量技术	287
参考文献	289

第 1 章 绪 论

1.1 光信息大气传输理论与检测技术的研究意义

自 1960 年第一台激光器问世以来,激光技术发展极快,几乎渗透到所有自然科学领域,对物理学、医学、生物学以及通信技术等也都产生了深远的影响。当时,一些有远见卓识的科学家根据激光所具有的特性,推断激光将会在通信、测距、雷达等领域拥有巨大的应用前景,许多国家纷纷投入大量的人力和物力相继开展了在该领域的研究^[1]。

激光本身具有高强度、高相干性、高单色性和高方向性等特性,这使其具有速度快、波束窄、容量大、保密性好和抗干扰性强等优点,因此激光成为空间光通信中最理想的载体。尤其在信息量呈爆炸性增长的今天,社会对大容量、高速率通信技术的需求非常迫切。一方面,市场上的通信业务早已由通话音频向数据图像、因特网、多媒体业务等方向转变,急需解决海量数据传输的瓶颈。另一方面,随着通信网的建设加速,局域网以及千兆赫兹以太网开始快速发展。将这些高速的局域网和千兆赫兹以太网连接到运营商的通信网络,必须依靠容量巨大的接入网络。当前有很多接入技术可供选择,如光纤、微波等。但光纤敷设时间长及其高额投入限制了其普及;微波技术日渐成熟,但这种接入方式需要频谱许可证和高额的初始投资等,对业务提供商而言,这种接入方式不够经济。而空间激光通信具有不需要频谱许可证、带宽高、协议透明、成本低廉、链路部署快捷、安全保密性能好、便携性好等优点,引起了业界的广泛关注,成为一种新兴的宽带无线接入方式。空间激光通信技术可应用在地面岛屿与海岸之间、城市楼房之间、江河两岸之间,解决宽带网络“最后一公里”问题,进而实现全光网络。所以,空间激光通信将带来并促进信息产业的迅速发展。但是,由于大气折射率的随机起伏,激光在大气中传输一定距离后,光束将发生扩展,光强将出现起伏,激光束携带的信息受到不同程度的破坏或丢失,这些都严重影响了空间激光通信的性能。因而,开展光信息大气传输理论与检测技术的研究对空间激光通信具有重要意义^[2,3]。

另外,从国防军事角度来看,对光信息大气传输理论与检测技术的研究也十分必要。一方面,未来战争的主战场将是太空、临近空间、航空、地面、海洋的立体空间,越来越多的国家认识到掌握空间对于打赢未来战争的重要性。目前的航空、航天等侦察平台正向高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率和多传感器

复合侦察等方向发展,迫切需要将海量原始数据以无损压缩方式从侦察平台直接传输或中继传输至指控终端,满足现代军事实时性要求。另一方面,未来局部战争需要激光武器具备抗电子干扰能力、安全保密能力、机动通信能力和快速反应能力等。空间激光通信和射频通信以复合模式工作,已成为未来军事通信的趋势。所以,空间激光通信可在特殊时段、区域和天气条件下进行通信,与射频通信共同构成高速、无缝、保密军用激光通信链路。但激光武器系统在复杂的大气环境中工作,大气中的分子、气溶胶等微粒的散射和大气湍流效应对光信息传输、接收和利用都有影响,从而使激光武器的高精度跟踪瞄准系统的技术性能明显降低。为了提高军事通信的能力和激光武器的精度,必须对光信息大气传输理论与检测技术进行深入分析。可以说,激光通信技术直接影响一个国家“制天权”、“制空权”、“制信息权”的能力^[2-4]。

深空探测是本世纪载人航天活动的重要研究领域之一。人类希望通过探测深空,进一步认识地球的形成和演变,认识空间现象和地球自然系统之间的关系,因此,深空探测活动具有重要的经济价值和科学价值。深空探测测控通信网的设计要求能完成对探测器的跟踪和测量,并实现对探测器平台和有效载荷的超远距离的遥控和返回信息的接收,最后完成对探测器下行链路传输信息的接收。深空探测结果传回地球处理时需要考虑大气对光信息传输的影响,因此,光信息大气传输理论与检测技术的研究成果可运用到深空探测活动中^[2]。

1.2 光信息大气传输理论与检测技术的研究进展

在过去半个多世纪里,关于大气湍流中光(波)传输方面的著作已出版许多,其中,国外的有 Tatarskii 的 *Wave Propagation in a Turbulent Medium*^[5]、Strohbehn 的 *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*^[6]、Ishimaru 的 *Wave Propagation and Scattering in Random Media*^[7] 以及 Andrews 和 Phillips 合著的 *Laser Beam Propagation through Random Media*^[8] 等。国内的有宋正方的《应用大气光学基础》^[9]、张逸新和迟泽英的《光波在大气中的传输与成像》^[10]、吴健等的《大气中的光传输理论》^[11]、姜会林等的《空间激光通信技术与系统》^[3] 以及饶瑞中的《光在湍流大气中的传播》^[11] 和《现代大气光学》^[12] 等。这些著作的处理方法虽然基本已经系统化,得到了一些规律,而且这些规律已在天文观测和大气光通信等领域得到了应用,但时至今日,参与研究的人员基本上已经有这样的共识——难以找到解决光波在随机介质中传输的各类问题的一个普适性理论,常常需要在一定的简化条件下进行复杂的数值模拟,力求得到与实验上相符的结果^[11,13]。于是,人们便将精力集中于各种具体问题的研究,寻找各自的解决方案。也正是由于这一点,根据已有的大气湍流条件,建立了多种理论模型,诸如几何光学近

似^[14-16]、里托夫(Rytov)方法^[5]、广义惠更斯-菲涅耳原理^[17,18]、马尔可夫(Markov)近似^[13,19-21]、局域小扰动方法^[16]和启发式唯象模型^[6]等。

光大气传输的研究工作最初仅是为了解释如星光闪烁之类的自然现象,因此没有形成系统的研究规模^[1]。激光器问世之后,激光在大气中的传输问题引起了人们的关注。奥布霍夫(Obukhov)应用 Rytov 的平缓扰动方法求解出随机介质中的波动方程,随后塔塔尔斯基(Tatarskii)引入由柯尔莫哥罗夫(Kolmogorov)和奥布霍夫发展的湍流统计理论中有关湍流谱的结果,用局部各向性湍流理论描述湍流,得到了一些比较符合实际的结果,受到研究人员的注意,其理论体系早已成为弱起伏条件下的经典理论^[11]。当大气湍流增强或传输距离增大后,特别是闪烁饱和现象的发现,塔塔尔斯基使用的平缓扰动理论已不再适用。原因在于它是一种扰动理论,当起伏不能再作微扰处理时,理论也就失去了适用性^[11]。这就促使很多研究人员在理论上作进一步的探索,以求解释在强湍流条件下的光传输特性。随后由将马尔可夫近似引入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^[1,11]。

完全相干光在大气湍流的传输已有大量的报道。近年来,土耳其的 Eyyuboglu 和 Baykal 研究组在这方面开展了许多工作。Eyyuboglu 和 Baykal 利用广义惠更斯-菲涅耳原理,研究了余弦高斯和双曲余弦高斯光束在大气湍流中传输后光强剖面的互易,指出源平面处为余弦高斯分布的场在大气湍流中传输后得到双曲余弦高斯分布,反之亦然^[22]。随后,Eyyuboglu 等经过数值计算模拟研究了离轴高斯光束、高阶环状高斯光束、平顶光束、双曲余弦高斯光束、厄米正弦高斯光束、厄米双曲正弦高斯光束和厄米双曲余弦高斯光束在大气湍流中的平均光强等传输特性,指出一般普通的光束在大气湍流中传输,会经历分布不同的几个阶段的演化,最终得到类高斯的分布^[23-30]。他们也研究了高阶贝塞尔光束和修正贝塞尔光束在大气湍流中的传输,指出高阶贝塞尔光束在传输中会转化为修正贝塞尔光束分布,同样,修正贝塞尔光束在传输中会转化为贝塞尔光束分布^[31,32]。另外,其他研究者对完全相干光束通过大气湍流的传输特性也进行了许多研究^[33-36]。

自 Wolf 和 Carter^[37]在 1975 年提出了准单色的部分相干高斯光源的概念以后,代表部分相干光的高斯谢尔模型(Gaussian Schell model,GSM)光源理论得以发展和完善。从此部分相干光在大气湍流中的研究逐渐增多。Wu 和 Boardman 推导出通过大气湍流的交叉谱密度函数表达式并进行了数值图例计算,首先指出以 GSM 光束为代表的部分相干光比完全相干光受大气湍流的影响要小^[38,39]。后来 Wolf 研究组对这一工作进行了进一步分析^[40-42]。2002 年,Gbur 和 Wolf 用均方根束宽定量地研究部分相干光在随机介质中的光束束宽扩展,首次提出“湍流长度”的概念,以便更直观定量讨论光束受大气湍流的影响^[40]。2003 年,Shirai 等用模式分析的方法研究了 GSM 光束在大气湍流中的光束扩展,指出高阶模式的

光束在大气湍流中的扩展比低阶模式的小,但是在自由空间中各个模式有相同的扩展,对部分相干光比完全相干光受到大气湍流的影响要小给出了解释^[41]。Salem等建立了两个简单理论模型,指出用部分相干光通过远距离传输后较完全相干光的一些优点^[42]。Dogariu 和 Amarande 通过检测光束的束宽,定性地证实了在大气湍流传输中部分相干光受到的影响比完全相干光要小的结论^[43]。此外, Eyyuboglu 和 Baykal 研究了对部分相干余弦高斯和双曲余弦高斯光束在大气湍流中的透过率^[44],季小玲等研究了部分相干双曲余弦高斯通过大气湍流的光束扩展^[45],Shirai 等对 GSM 光束和部分相干厄米高斯光束在大气湍流中的方向性进行了报道^[46-48],李晋红等对部分相干厄米正弦类高斯光束、涡旋光束和刃型位错光束等在大气湍流中的光强演化、束宽扩展、角扩展和方向性等进行了深入分析^[49-61]。

1986 年, Wolf 首次从理论上证明:当光源的光谱相干度满足定标定律(scaling law)时,由光源辐射的光在传输中才能保持光谱不变性。反之,若光源违反定标定律,从这样的光源发出的光即使在自由空间中传输,其光谱也要发生变化^[62]。各种物理机制诱导的光谱变化在物理学、计量学和天文学中精密光谱测量和谱选择的光学互连等方面体现出诱人的应用前景,有些成果已经被用到星际测量中,给一些未能解释的天文现象进行了很好的说明^[63]。光束在大气湍流中的光谱变化也引起了研究者的关注。2004 年, Roychowdhury 和 Wolf 研究发现,满足定标定律的准均匀光经过大气湍流传输后的光谱和光源处的光谱重合^[64]。随后, Ji 等研究了 GSM 光束经过大气湍流介质的光谱变化。研究结果表明,若是满足定标定律,不管 GSM 光束是不是准均匀的,经过大气湍流传输时,其归一化光谱与源光谱重合。假如不满足定标定律,离轴光谱会出现分裂现象^[65]。Wang 等对椭圆高斯光束通过大气湍流光谱移动和光谱开关进行研究,研究表明:通过大气湍流传输的归一化光谱与源光谱是有差异的,并且存在光谱移动和光谱开关现象。光谱开关和光谱移动与湍流结构常数、光束参数和观察点的位置有关^[66]。Ding 等报道了大气湍流中 GSM 脉冲光束的光谱移动和光谱开关,研究指出第一阶光谱开关的临界位置随结构常数的增大而增大,而第二和第三阶光谱开关的临界位置随结构常数的增加呈现非线性变化^[67]。彭艳艳和李晋红等研究了非 Kolmogorov 大气湍流对 GSM 光束和合成光束光谱变化的影响^[68,69]。

激光在大气传输中的光束质量也是备受国内外光学和激光界关注的前沿课题之一。其中用 M^2 因子^[70]作为评价各种光束在大气中光束质量参数的报道越来越多^[71-79]。Dan 和 Zhang 利用维格纳分布函数(WDF)二阶矩得到激光束在大气湍流中 M^2 因子的公式,并对部分相干平顶光束在大气湍流中 M^2 因子进行了研究^[71,72]。Yuan 等基于 Tatarskii 谱和 Hill 修正谱分别分析了完全相干和部分相干空心光束、完全相干和部分相干厄米高斯(HG)光束、径向列阵部分相干平顶光

束在大气湍流中的 M^2 因子^[73,74,79]。Ji 等分别讨论了线阵 GSM 光束和截断 GSM 光束在大气湍流中 M^2 因子的变化^[76,77]。Zhou、Ding 等报道了部分相干洛伦兹 (Lorentz) 高斯光束和非圆部分相干平顶光束在大气湍流中的 M^2 因子^[75,78]。王伟伟等研究了非 Kolmogorov 大气湍流对部分相干厄米高斯光束 M^2 因子的影响^[80]。

近年来,奇点光学的研究对象已从完全相干光扩展到部分相干光。对部分相干光而言,一般不存在光强为零的光涡旋,却存在光谱相干度或互相干函数为零的相干涡旋^[81,82],又称为相关涡旋^[83,84]。目前,用来研究部分相干场中相干涡旋的方法主要有两种。一种方法是相干模拟理论^[85],就是将部分相干光认为是相干模式的非相干叠加。Ponomarenko 在 2001 年研究了一类含光涡旋的部分相干光的传输特性,该部分相干光具有可分离的位相,可表示为由角向指数相同的 LG 模非相干叠加^[86]。Bogatyryova 等也利用相干 LG 模的非相干叠加构造出具有可分离相位的部分相干光,对相干涡旋的研究发现,相干涡旋属于横平面上的圆形位错,并实验证实了理论预测^[87]。2007 年,刘普生和吕百达研究了 LG 模叠加形成的部分相干光的相干涡旋,指出权重因子和模指数以及参考点的选择都会改变圆刃型位错出现的位置^[88]。另一种研究部分相干光中的相干涡旋特性的是分析光谱相干度或交叉谱密度函数或互相干函数。Gbur 和 Visser^[81]从理论上预言了部分相干光的光谱相干度具有孤立的奇点对,该点为相干涡旋。Palacios 等^[83]指出数值计算和实验技术能够预测和验证空间相干函数的相关涡旋存在。Maleev 等^[84]用四维互相干函数数值分析了部分相干光在近场和远场区域空域相关涡旋的存在。Schouten 等用部分相干光做了杨氏双缝实验,研究了光谱相干度奇异行为,证实了在一定的位置存在相干涡旋^[89]。Swartzlander 等^[90]通过 Fizeau 干涉仪研究了相关涡旋的构成,证实了相关涡旋具有拓扑电荷散射现象。Li 等推导出部分相干涡旋光束的光谱相干度的解析表达式,用以研究相干涡旋和合成相干涡旋在自由空间和大气湍流中的动态演化^[53,56,91-93]。

光束合成是获得高功率、高质量的激光输出的有效方法,在自由空间光通信、定向能量传输等领域有广泛的应用,因而合成光束通过大气湍流的传输也有许多报道。Ji 和 Li 研究了线形列阵合成光束通过大气湍流的方向性^[94]。Cai 等研究了矩形和径向列阵合成光束在大气湍流传输中的平均光强分布,比较了矩形与径向列阵、相位锁定与非相位锁定的异同^[95]。Zhu 等讨论了矩形列阵随机电磁合成光束通过大气湍流的光谱密度和偏振度^[96]。另外,对两束或多束光干涉形成的合成光涡旋的奇异特性已进行了详细研究^[97-99]。Molina-Terriza 等指出两束含有螺旋波前位错的非同轴叠加光束比单光束更具有丰富的涡旋结构^[97]。Maleev 等研究了两束非同心的涡旋光束干涉形成的合成光涡旋的特性^[98]。最近,Wang 等提出了一种激光径向列阵模型,用带不同初始位相的高斯光束组成了径向列阵合成

光束,指出该径向列阵光束在自由空间和透镜光学系统中都可产生合成光涡旋^[99]。Cheng 等以部分相干叠加涡旋光束为例,将合成光涡旋的概念推广到合成相干涡旋^[100]。

基尔霍夫(Kirchhoff)和本生(Bunsen)利用光栅发现元素特征谱线,开始了真正意义上的光谱测量。在众多光谱研究领域中,瞬态分子的光谱研究是其中一个非常有意义并具有挑战性的课题^[101-104]。伊利诺伊州立大学的 McCall 小组提出的腔增强-速度调制光谱技术和高灵敏低温离子束光谱(sensitive cooled resolved ion beam spectroscopy)技术极大地提高了分子离子光谱技术的灵敏度^[105,106]。美国布鲁克海文国家实验室的 Sears 小组提出了无多普勒增宽的频率调制光谱技术,此技术可将瞬态分子的光谱分辨率提高到 1 MHz^[107,108]。最近,光学频率梳光谱技术也被应用到了瞬态分子光谱测量上,JILA 的 YeJun 小组把光学频率梳同腔增强光谱和速度调制光谱技术结合起来,提出了腔增强-光学频率梳-速度调制光谱(cavity-enhanced direct frequency comb velocity modulation spectroscopy)技术,此技术具有频谱范围宽、灵敏度高和绝对频率准的特点^[109]。

热风式的对流湍流发生装置由于与真实的大气最为接近,而且容易控制温度梯度和风速,故在实验室模拟大气湍流中较为常见。1993 年, Magee 等采用热风式装置模拟湍流大气,并利用剪切干涉仪测量波前,计算的波前结构函数与理论比较吻合^[110,111]。1998 年,美国的 Majumdar 等研制了一种基于冷热空气混合的湍流箱,该湍流箱既能控制温度梯度也能控制风速,比较接近真实的大气湍流效应,在保持各向同性的情况下,甚至还能模拟出比大气湍流强 1000 倍的湍流扰动,独立控制折射率结构常数^[112]。中国科学院光电技术研究所的张慧敏和李新阳研制的热风式湍流模拟装置对传输光束周围的空气加热,用风扇抽吸热空气产生湍流,通过改变加热温度和风扇的转速,模拟不同强弱的湍流;并计算了波前结构函数、大气相干长度等参数。结果表明,该装置能产生基本符合大气湍流统计理论的湍流^[113]。2010 年,李岩等提出了一种用于光传输实验研究的湍流箱,侧面的风扇使空气通过加热网格进入湍流箱内部,再通过制冷网格流出湍流箱另一个侧面,激光传输用的光学窗口在湍流箱的另两个侧面,箱内的温度是可控的^[114]。魏计林等设计了一种多光程复合气流发生装置,该装置利用 Horriett 光程池可在 1 m 长的模拟池中实现 100 m 以上的长光程大气湍流模拟,并通过混合独立的热风和冷风循环装置实现温度梯度和风速,实际测量不同风速和不同温度梯度下的光束质量因子 M^2 并计算了大气结构常数^[115-117]。由于应用领域相对于光衰减和散射技术要窄一些,湍流特性测量技术的发展具有一定的局限性。与大气的消光、散射特性相比,大气湍流的空间和时间分布变化更为复杂,既需要局部观测,也需要大范围大尺度的平均特性测量,因此需要相应的测量技术与手段。大气湍流的光学效应测量已经逐渐成为大气湍流特性测量的主要测量手段^[12]。