Multi-Dimensional
Optimization of Beams in Atmospheric
Laser Communication System

大气激光通信系统光束多维度优化技术

赵义武　倪小龙　娄　岩　刘　智　等/著

科学出版社

大气激光通信系统光束多维度优化技术

赵义武　倪小龙　娄　岩　刘　智　等　著

科学出版社

北　京

内 容 简 介

本书全面阐述了对大气激光通信系统光束进行多维度优化的方法，主要包括激光在大气中传输的特性、大气对激光通信系统性能的影响、激光光束多维度特性调控、大气湍流模拟装置性能分析、不同初始特性激光光束受大气湍流影响的研究以及光束优化的激光通信系统大气信道性能实验研究。本书为大气激光通信系统性能优化以及激光大气传输、大气辐射、天文观测、光学遥感、环境观测、自适应光学等基础研究及先进光电工程应用提供基础数据、应用模式和基本工具。本书反映了大气激光通信系统性能优化研究的重要进展，对大气激光通信系统性能优化及相关研究有一定的参考价值。

本书可供物理、光学类的研究生，高年级本科生和高等院校教师作为教材使用，也可供无线光通信、光学工程、大气物理、遥感以及天文等相关领域科研人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

大气激光通信系统光束多维度优化技术/赵义武等著. —北京：科学出版社，2018.9

ISBN 978-7-03-058365-9

Ⅰ. ①大… Ⅱ. ①赵… Ⅲ. ①激光通信系统-系统优化 Ⅳ. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 168332 号

责任编辑：刘凤娟 / 责任校对：彭珍珍
责任印制：吴兆东 / 封面设计：无极书装

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

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷
科学出版社发行 各地新华书店经销
*
2018 年 9 月第 一 版 开本：720×1000 1/16
2018 年 9 月第一次印刷 印张：9 1/2 插页：2
字数：186 000

定价：79.00 元

(如有印装质量问题，我社负责调换)

前　言

自由空间光通信是近年来新兴的一种通信技术，它结合了光纤通信与微波通信的双重优点，既满足通信容量大、速率高的要求，又免去铺设光纤的复杂过程，被广泛应用于各个研究领域。作为信息载体的激光光束在大气中传输时，大气湍流所引起的折射率随机起伏严重地影响了光束的传输质量，破坏了光场的相干性，从而产生光强闪烁、到达角起伏、光斑漂移以及光束扩展等一些湍流效应，严重影响了通信系统性能。因此，降低激光信号受大气信道影响的有效方法成为近年来的研究热点。不同相干特性、偏振态以及螺旋相位特性激光光束受大气湍流影响的情况不同。针对这种情况，本书提出了一种通过对激光通信系统光束的初始相干长度、偏振态以及螺旋相位特性进行优化来提高大气信道光通信系统性能的方法。

本书在国内外研究的基础上，对高斯光束在大气湍流中传输时受湍流影响的情况进行了研究。在理论研究的基础上进行了距离为 1km 和 6.2km 的城市链路大气传输特性实验，针对高斯光束在大气湍流介质中传播时的光强闪烁、到达角起伏以及光斑漂移效应进行了长期的实验观测与分析研究。通过实验，给出了光强闪烁、到达角起伏以及光斑漂移效应的日变化规律、季节变化规律、不同光束波长条件下的变化规律，以及光强闪烁、到达角起伏、光斑漂移效应的频谱变化规律及概率密度变化规律。

本书对常见的开关键控 (on-off keying，OOK) 调制激光通信系统性能受大气湍流影响机理进行了研究。在相距为 1km 和 6.2km 的两通信链路上，进行了为期 3 个月的大气激光通信实验。实验结果表明：误码率的变化与闪烁因子的变化关联度很高，误码率随着闪烁因子的升高而增加。越高的传输速率对大气环境的要求也越高。

本书对采用液晶进行相位调控的原理进行了研究。对光波的偏振态及采用液晶进行光束偏振态调控的基本原理进行了研究，并进行了实验验证。实验结果表明：对于线偏振光来说，其偏振参数波动情况为：方位角 2.131%，椭圆率 1.823%，偏振度 0.625%；对于圆偏振光，偏振参数波动情况为：方位角 1.475%，椭圆率 1.268%，偏振度 0.455%。对光波的相干特性及采用液晶对光束相干长度进行控制的基本原理进行了研究，并进行了实验验证。实验结果表明：生成相干长度为 0.15mm 和 1.5mm 部分相干光束，光束相干度均方根误差分别为 0.022011 和 0.020883，峰谷值分别为 0.074325 和 0.072998。对具有螺旋相位结构的涡旋光束及采用液晶生成具有螺旋相位结构的涡旋光束的基本原理进行了研究，并设计了相关实验，验证了

生成涡旋光束的正确性。

提出了一种基于液晶空间光调制器的激光相干度及束散角复合控制方法，并对本方法所调制激光光束的相干度和束散角精度进行了实验检测。采用液晶空间光调制器生成相干长度为 0.9mm、束散角为 7.5mrad，相干长度为 1.5mm、束散角为 3.8mrad 的部分相干光束，其相干度误差在 5% 以内，均方根误差分别为 0.027386 和 0.031314，峰谷值分别为 0.084658 和 0.089103；其束散角误差在 15% 以内，均方根误差分别为 0.032478 和 0.043186，峰谷值分别为 0.091201 和 0.102130。

优化设计了大气湍流模拟装置，给出了其所模拟大气湍流的大气相干长度、大气折射率结构常数等参数的计算公式。采用 532nm、808nm、1064nm 以及 1550nm 四种波长激光器与检测装置分别从大气湍流模拟装置模拟大气湍流的信道参数，大气湍流的稳定性以及所模拟湍流与真实的大气湍流相比的等效性等方面对大气湍流模拟装置性能进行了标定。实验结果表明：① 大气模拟装置所模拟大气湍流的相干长度稳定范围为 5~20cm，等效湍流链路长度为 1km 时大气湍流模拟装置所能模拟的 C_n^2 最大值为 1.81×10^{-16}；若模拟链路距离为 10km，大气湍流模拟装置所能模拟的 C_n^2 最大值为 1.81×10^{-15}，光强闪烁等效距离为 661.2m。② 对流式湍流模拟装置在 16cm×16cm 区域内的波动量小于 15%，不同波长条件下相干长度满足 Kolmogorov 理论，频谱波动量小于 20%。③ 对流式大气湍流模拟装置所模拟大气对于光强闪烁效应的模拟在频谱特性和概率密度分布特性上均与真实的大气相符。对于到达角起伏效应的模拟，在 y 轴方向上，频谱特性与概率密度特性均与真实大气相符；但在 x 轴方向上，由于模拟装置缺少横向侧风产生装置，概率密度分布无明显规律。

对不同初始相干长度、偏振态以及拓扑电荷数激光光束在大气湍流中的传输特性进行了理论研究。并采用第 5 章所设计标定的大气湍流模拟装置来模拟大气湍流，研究了不同初始相干长度、偏振态以及拓扑电荷数激光光束在大气湍流中传输时抑制大气湍流的能力。实验结果表明：① 随着相干长度的减小，激光光束受大气湍流影响所产生的光强闪烁效应越来越小。且与完全相干光相比，部分相干光束不仅在闪烁因子统计量上小于完全相干光，其光强闪烁的强度波动量也小于完全相干光。② 当偏振角 $45^\circ\leqslant\theta<90^\circ$ 时，光束经过大气湍流传输后的闪烁因子随着偏振角的增大而减小；当偏振角 $0^\circ<\theta\leqslant45^\circ$ 时，光束经过大气湍流传输后的闪烁因子随着偏振角的减小而减小。左旋圆偏振和右旋圆偏振激光光束，其光强闪烁因子随湍流强度的变化趋势基本相同，与线偏振激光光束相比，左旋圆偏振光和右旋圆偏振光在相同的大气湍流强度下其光强闪烁因子均小于任何偏振角度的线偏振光。③ 随着光束拓扑电荷数的增加，激光光束受大气湍流影响所产生的光强闪烁效应越来越小。对于拓扑电荷数为 4 的激光光束，其在大气相干长度为 5cm 时的闪烁因子为 0.03 左右，而完全相干光此时已经达到 0.16 以上。

对激光通信系统发射端光束的初始偏振态、相干特性以及螺旋相位特性进行了优化，在真实的大气环境下进行了通信距离为 6.2km 的野外大气通信实验。实验结果表明：① 对激光通信系统光源的初始相干长度、偏振态以及螺旋相位进行优化的方法，可以有效地降低接收端光强起伏。② 对于初始相干长度、偏振态以及螺旋相位优化的激光通信系统，其全天的误码率均在 10^{-10} 量级以下，全天一半以上的时间范围内均未出现误码。对于高斯光束激光通信系统，其误码率的最高值达到了将近 10^{-6} 量级。可见，对激光通信系统的初始相干长度、偏振态以及螺旋相位进行优化，可以有效地抑制大气湍流对激光通信系统的影响，降低接收端光强起伏，降低激光通信系统误码率，有效地提高激光通信系统性能。

目　录

前言
第 1 章　绪论 ····· 1
1.1　研究背景和意义 ····· 1
1.2　国内外研究现状 ····· 3
1.3　本书主要研究内容 ····· 7
第 2 章　激光在大气中传输的特性 ····· 9
2.1　激光在大气中传输的基本理论 ····· 9
2.1.1　大气湍流的形成 ····· 9
2.1.2　大气折射率结构常数 ····· 12
2.1.3　大气折射率起伏功率谱密度 ····· 14
2.1.4　光强闪烁 ····· 15
2.1.5　光斑漂移 ····· 17
2.2　激光在大气中传输的特性实验研究 ····· 17
2.2.1　实验设置 ····· 18
2.2.2　光强闪烁 ····· 21
2.2.3　到达角起伏 ····· 30
2.2.4　光斑漂移 ····· 38
2.3　本章小结 ····· 44
第 3 章　大气对激光通信系统性能的影响 ····· 45
3.1　大气对激光通信系统性能影响的基本理论 ····· 45
3.1.1　OOK 调制误码率分析 ····· 45
3.1.2　中断概率 ····· 47
3.1.3　平均容量 ····· 48
3.2　大气对激光通信系统性能影响的实验研究 ····· 49
3.2.1　实验设置 ····· 49
3.2.2　大气激光通信系统误码率测试 ····· 51
3.3　本章小结 ····· 55
第 4 章　激光光束多维度特性调控 ····· 56
4.1　基于液晶的相位调制技术 ····· 56
4.1.1　液晶的电控双折射效应 ····· 57

4.1.2　液晶空间光调制器选取与使用 …… 58
4.2　激光光束偏振态调制 …… 59
4.2.1　光波偏振态 …… 59
4.2.2　光波偏振度 …… 62
4.2.3　基于液晶空间光调制器的光偏振态调控 …… 62
4.2.4　激光偏振态调控实验与结果分析 …… 64
4.3　激光光束相干度调控 …… 67
4.3.1　光波相干特性 …… 67
4.3.2　光束相干特性调控原理 …… 68
4.3.3　光束相干特性调控实验与结果分析 …… 69
4.4　激光光束相位特性调控 …… 72
4.4.1　涡旋光束 …… 72
4.4.2　基于液晶的涡旋光束产生原理 …… 72
4.4.3　涡旋光束生成实验 …… 73
4.5　激光光束多维度复合调控及整形发射技术 …… 75
4.5.1　束散角与相干度同时调控的基本原理 …… 75
4.5.2　相干度与束散角调制实验与结果分析 …… 78
4.6　多参数高精度可控激光光源 …… 82
4.7　本章小结 …… 83
第 5 章　大气湍流模拟装置性能分析 …… 85
5.1　大气湍流模拟装置原理及组成 …… 85
5.2　湍流模拟装置信道参数标定 …… 86
5.3　湍流模拟装置模拟稳定性实验研究 …… 91
5.3.1　波长稳定性 …… 91
5.3.2　区域稳定性 …… 92
5.3.3　频谱稳定型 …… 94
5.4　湍流模拟装置模拟等效性实验研究 …… 95
5.4.1　实验设置及基本原理 …… 95
5.4.2　频谱对比 …… 97
5.4.3　概率密度对比 …… 99
5.5　本章小结 …… 101
第 6 章　不同初始特性激光光束受大气湍流影响的研究 …… 103
6.1　不同相干度激光光束受大气湍流影响的情况研究 …… 103
6.1.1　部分相干光束在大气湍流中的传输理论 …… 103
6.1.2　部分相干光束在大气湍流中传输的实验研究 …… 105

6.2　不同偏振态激光光束受大气湍流影响的情况研究 ····· 108
6.2.1　不同偏振态光束在大气湍流中的传输理论 ····· 108
6.2.2　不同偏振态光束在大气湍流中传输的实验研究 ····· 112
6.3　不同拓扑电荷数涡旋光束受大气湍流影响的情况研究 ····· 115
6.3.1　不同拓扑电荷数涡旋光束在大气湍流中的传输理论 ····· 115
6.3.2　不同拓扑电荷数涡旋光束在大气湍流中传输的实验研究 ····· 117
6.4　本章小结 ····· 120
第 7 章　光束优化的激光通信系统大气信道性能实验研究 ····· 122
7.1　实验系统及方案 ····· 122
7.1.1　实验链路 ····· 122
7.1.2　实验系统 ····· 123
7.1.3　实验方案 ····· 125
7.2　实验结果与分析 ····· 126
7.3　本章小结 ····· 128
第 8 章　总结和展望 ····· 129
参考文献 ····· 134
彩图

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着现代通信步入个人通信时代，通信系统日益庞大和复杂，对信息交换的容量、信息传输实时性、信息速率、保密、抗干扰、抗截获能力等提出了更高的要求，只依靠现有的卫星载波中继，容量小、成本高，已越来越满足不了通信事业和人类信息社会飞速发展的需要。为了满足我国社会经济发展与国防事业的迫切需要，急需发展高码率、高保密性和抗截获能力的信息传输系统。

由于激光的波长在微米量级或更短，因此具有很宽的通信带宽，可提供极高的信息传输速率 (1Gbit/s 甚至更高到几十 Gbit/s)。激光光束发散角可以做到很小，达到弧度甚至微弧度量级，有很强的指向性，这就使信号光束难以被截获、窃听，可以极大地提高通信系统的安全性。与微波和毫米波通信相比，激光通信终端的体积小、重量轻、能耗低。激光通信系统所具有的上述优点对于建立各种目标之间的高速轻型通信链路具有十分重要的意义。

研究空间激光通信技术的国家和地区主要有美国、欧洲、日本和俄罗斯。从 20 世纪 60 年代开始，上述国家投入大量人力和物力，对空间激光通信进行了长期研究。近二十年来，随着技术的不断进步，激光器及其调制技术、探测器技术、光学精密机械加工制造和装调技术、自适应光学技术和计算机技术等都有了重大突破，在地对地链路、飞机对地链路、卫星间链路、卫星对地链路等方面取得了大量研究成果，在链路传输距离、激光通信速率、误码率等重要技术指标方面取得了重大进展。目前，空间激光通信技术的发展正处于实际应用和全面发展阶段，已完成了各种激光通信链路系统的概念研究，关键技术和核心部件已基本解决，在实验室内实现了多种激光通信链路的原理验证，已进行了低轨卫星对同比卫星和同步卫星之间的低中码速率激光通信实验和高轨卫星对地面站、低轨卫星对地面站的激光通信实验。这些通信实验系统达到了高捕获概率、短捕获时间、抗多种干扰的高灵敏度动态跟瞄和较高传输速率的预期目标。

我国卫星间光通信研究与欧洲、美国、日本相比起步较晚，从 20 世纪 70 年代开始激光通信技术的跟踪和初步研究，由于激光技术、精密机械、材料和控制技术等限制，发展速度相对较慢。国内开展空间激光通信的单位目前主要有哈尔滨工业大学、中国科学院上海光学精密机械研究所 (简称中科院上海光机所)、中国电子科技集团公司第三十四研究所、中国空间技术研究院 (简称航天科技五院)、北京

大学、电子科技大学、长春理工大学等。其中长春理工大学于 1999 年在国内首次实现车载动基座间的野外通信。2002~2003 年长春理工大学承担了国家 863 课题，即空间平台测控与通信技术研究及卫星与地面间激光间激光通信技术研究，完成了一些关键技术实验研究。

空间激光通信技术中的很多链路都要经过大气，如地对地链路、飞机对地链路、卫星对地链路等，大气环境对激光通信系统的影响不能忽视。激光通过大气信道传输时会产生大气衰减效应及大气湍流效应。大气衰减效应是由大气组成对光波的吸收和散射作用而造成的能量的衰减；大气湍流效应是由大气的湍流运动使大气折射率具有随机起伏的性质，光束在大气信道中传输时会产生光束随相位的随机起伏、光束的随机漂移、能量在光束截面上的重新分布 (畸变、展宽、破碎等) 以及由此而引起的激光接收系统探测面上的光强起伏等现象。上述种种影响可能会使激光信号探测信噪比降低，捕获瞄准跟踪系统工作不正常，从而导致通信突发错误，甚至中断。因此，解决大气的影响是国内外空间激光通信研究人员需要解决的关键问题。大气湍流和背景噪声是制约大气激光通信系统性能的主要因素。大气运动形成的大气湍流引起大气激光折射率出现随机起伏，造成在其中传播的激光出现光强闪烁、光斑漂移、到达角起伏、相位起伏、光束扩展等现象，使得接收光信号受到严重干扰, 通信误码率上升，甚至出现短时间通信中断，严重影响了大气激光通信的稳定性和可靠性。在大气激光通信系统中，精密的捕获、对准和跟踪 (APT) 技术是一项世界性的难题，跟踪探测器上的光斑能量控制是 APT 系统中的关键技术之一。同样的，大气湍流和背景噪声也对捕获、对准和跟踪造成很严重的影响，大大降低了对准精度，增加了对准时间，降低了系统工作的稳定性。并且，通常跟踪系统探测器均采用 CCD(能量积分型器件)，因此频域降噪技术对其已无能为力，在光谱域进行降噪 (采用窄带滤光片) 也存在着激光温漂问题。根据实验研究，经过 1km 和 6.2km 大气传输后，不同初始相干长度激光光束受大气影响的程度不同。降低光束的初始相干长度，可以在一定程度上抑制大气湍流造成的激光光束强度闪烁效应、到达角起伏效应以及光斑漂移效应等。对光束进行螺旋相位调制使其具有初始轨道角动量也同样能对大气湍流的影响有一定的抑制。不同偏振态的激光受大气影响程度也不同。所以，如果对激光通信系统的通信光与信标光同时进行初始的相干特性、偏振特性以及相位特性的优化，可以在很大程度上提高激光通信系统的通信质量和跟踪对准精度，实现低成本、高性能、高稳定性的大气激光通信。并且，激光光束具有轨道角动量后，如果在其传输过程中出现了遮挡 (即监听)，哪怕只是较小的一部分光束被遮挡，在接收端所接收到的光束的轨道角动量也会发生变化。对于圆偏振光，在大气中传输时，其偏振态 (左旋或者右旋) 不发生改变，亦即大气对圆偏振态没有退偏作用。若能研制出高精度激光光束多维度复合调控组件，实现上述对激光通信系统通信光和信标光参数的初始调整和优化，

再结合现有电控技术和信号处理技术，可为高速保密激光信息传输技术提供一种切实可行的途径。

1.2 国内外研究现状

为了减小大气环境对激光通信系统的影响，研制高速率、低误码率的空间激光通信系统，国内外空间激光通信技术研究人员进行了深入的研究，获得了大量有关大气影响的数据，提出了很多有价值的方法和方案。

在地面接收端，大孔径接收是克服大气湍流效应最简单的一种方法。接收端接收孔径的大小决定了由强度波动所引起的接收端强度起伏。增大接收端接收孔径可以减小能量波动。这种接收端孔径对能量波动的影响便称为孔径平滑效应。并且，如果接收端孔径没有尺寸的限制，可以无限地增大，那么便不会有由大气湍流引起的闪烁，但实际上这种情况并不会出现。在实际使用中，通常会权衡接收孔径的大小、接收装置尺寸以及指向跟踪误差等因素，进而选取一个最优的接收孔径尺寸。对于平面波和球面波，孔径平均理论已在弱起伏条件下有着广泛的应用和实践 [1−7]，并且，逐渐应用于强湍流条件 [6,7]。为了孔径平滑理论，研究人员进行了一系列实验。但在早期的实验研究中并未考虑闪烁的饱和效应，这导致实际的实验结果与理论预测结果并不相符。并且，随后的实验数据也受到实验路径长度的限制 [1−3]。Churnside 分别导出了弱湍流和强湍流区、平面波和球面波的孔径平滑因子计算表达式 [8]; Andrews 等导出了适用于不同湍流区的孔径平滑因子计算普适模型 [9]。美国 Maryland 大学的 Maryland Optics Group (MOG) 对大孔径接收技术展开了一系列理论和实验研究。在实验中，他们采用了混合式自主重构技术、定向光和射频无线网络等新技术，这些措施主要为：① 窄光束独立设置链接；② 全网链路状态变化管理，将指向、对准精度和拓扑结构链路控制进行关联。在他们的研究中，采用对接收到的光强闪烁信息进行多图分析的手段对自由空间光通信链路进行了灵活的分析和优化，对孔径平滑理论进行了详尽的分析，并推导出孔径尺寸选取和收发器尺寸、重量以及功率等制约因素的关系 [10,11]。Wayne 等在不同的湍流条件下，采用不同的孔径尺寸开展了 1km 水平链路实验。其结果显示当前的孔径平滑理论模型和实验数据之间还不能非常完美地吻合，无论采用何种模型都不能准确地描述实验数据 [12]。Frida 等针对孔径尺寸与光强闪烁强度间的联系进行了分析研究，结果表明，在中强度起伏条件下，当接收孔径尺寸为大气相干长度时，光束强度的起伏是服从对数正态分布的；当大气相干长度远大于接收孔径尺寸时，光束强度起伏服从 gamma-gamma 分布 [13]。Naila 等针对激光通信进行了相关研究，其采用多载波调制的 M 进制相移键控的激光通信系统在不同的湍流强度条件下进行孔径平滑模型分析，发现若要减小光强闪烁

对激光通信系统的影响，需对系统平均载波噪声、接收孔径大小以及失真比进行折中[14]。Kumar 等研究了采用不同调制方式下，孔径平滑现象对激光通信系统抑制大气湍流影响性能的提升，其结果表明孔径平滑效应对大气湍流影响的抑制能力在 OOK 调制模式下最强[15]。

除了大口径接收技术，美国加利福尼亚理工学院的 James Lesh 和 Keith Wilson 等提出了一种增加发射接收孔径数目的大气影响抑制方法。通过将传统的单束发射接收光束变为多数不相干的激光光束，且各激光光束间的光程差大于激光光束本身的相干长度，其本质是一种非相干叠加技术。美国的喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory，JPL) 和麻省理工学院的林肯实验室在大气光学参数检测及多光束在大气中传播的理论和实验研究基础上，进行了多次长期的多光束大气传输特性实验[16,17]，取得了大量的实验结果和数据。紧接着，美国和日本针对多孔径发射接收技术在抑制湍流上的有效性上进行了多次名为 GOLD 的实验。Kim 开展了 TerraLinkTM8-155 大气测量实验。其结果表明，在相同的孔径尺寸条件下，更多的光束数目，可以更好地抑制大气湍流对激光光束的影响。并且，其还对接收端光束进行了概率密度分析。结果表明：采用单发射口径时，接收端光强起伏非常大，并且服从指数分布，而随着孔径数目的增多，接收端光强闪烁概率密度近似服从对数-正态分布[18]。Navidpour 等推导出多孔径发射接收激光通信系统误码率的计算方法，若要使激光通信系统的误码率保持在一个很低的水平，需要将孔径间距增大到一定的距离才可以抵消受到各子系统空间相关性的影响[19]。在此基础上，Cvijetic 等推导出多孔径发射接收系统的系统性能边界，并对多雪崩二极管 (APD) 信号输出增益的大小进行选择[20]。Belmonte 等研究了多孔径发射接收技术对激光通信系统的谱效率、中断容量等性能指标的影响情况[21]。Tsiftsis 等采用 K 分布作为大气信道模型，分析了 OOK 调制模式下，多孔径发射接收技术对激光通信系统性能的提升并得出了误码率表达式[22]。Navidpour 等分析了采用多孔径发射接收提升激光通信系统性能，大气信道模型为正态分布时，强度调制 OOK 调制模式下的大气激光通信系统误码率表达式[23]。Zhu 等对多孔径发射接收模式下，符号判断模式的选取对激光通系统误码率的影响情况进行了研究。结果表明，最大释然检测器性能最优[24]。Popoola 等利用多孔径发射接收技术提高激光通信系统性能，计算了当大气信道为对数分布时，采用相移键控 (PSK) 调制模式的激光通信系统误码率的计算表达式，并采用 PIN 型探测器为信号接收装置，分析了最优增益、等增益以及选择核定技术等的性能对比[25]。进一步，Hung 还对差分相移键控 (DPSK)、相移键控 (PSK) 等其他调制方式的性能进行了分析[26]。Ghassemlooy 等推导出相移键控激光通信系统在信道服从 gamma-gamma 模式时的误码率表达式[27]。

在不增加或不改动系统硬件的情况下，通过优化激光通信系统中探测器的阈

值及某些关键参数，或采用自动控制的方式使这些参数在系统运行时可以自适应地适时调整，也可以抑制大气对激光通信系统的影响。美国喷气推进实验室的 Mukai 等曾利用自适应阈值技术减小空–地激光通信链路的误码率 [28]。Burris 等也利用自适应阈值技术来实现光通信终端中滤波器探测器阈值的智能设定，从而提高对光信号的识别及检测能力，降低系统误码率 [29]。Wang 等的研究也表明，通过预测光信号衰落的边缘概率分布，可以利用最大似然逐符号检测或最小均方误差等方法来估计信号的衰落情况，从而为探测器设定一个合理的阈值，进而提高系统的性能 [30]。Louthain 等也在机载光通信终端中使用自适应阈值技术来抑制大气闪烁带来的噪声，并取得了一定的效果 [31]。但优化阈值及参数需要完善的理论分析作为支撑才能取得比较理想的优化效果。

2002 年，Tyson 首次在激光通信系统中加入了自适应光学技术，理论分析表明，自适应光学技术有效地降低了大气湍流对通信链路的影响 [32]。日本也于 2005 年利用加装了自适应系统的光学地面站与国际空间站进行了对接实验 [33]。进入 21 世纪，自适应光学技术发展迅速，越来越多的光通信系统中加入了自适应光学技术，以校正大气闪烁对光束的影响 [34]。然而，尽管自适应光学技术可以有效抑制大气的闪烁效应，提高光学系统的成像质量，但是要把自适应光学技术与自由空间光通信系统完美结合还有一些问题要解决。如在通信距离较远、存在强闪烁现象的条件下，光束波前会不连续，波前探测器不能有效地实时反映出光束的波前质量情况，这也就导致了自适应系统不能通过有效地重构波前，达到校正的目的。1998 年，中国科学院安徽光学精密机械研究所的王英俭等对采用自适应技术的激光大气传输实验结果证实，在强闪烁条件下，光强的振幅达到饱和后会使自适应光学系统的闭环控制产生振荡，从而无法正常工作。Lukin 等于 1999 年采用自适应光学技术进行的大气激光通信实验结果也表明，在弱湍流情况下，自适应系统可有效降低系统误码率，但在强湍流情况下，校正效果不明显 [35]。2010 年，Berkefeld 等采用 1064nm 波长激光器在欧空局地面光学观测站和卫星之间进行了加入自适应光学系统的星地激光通信实验，其所采用的自适应光学系统变型镜为 144 单元薄膜型变形反射镜，波前探测器为子孔径数为 11 的哈特曼波前传感器 [36]。Levine 等在相距 1.3km 两端间进行了水平链路实验，分析研究自适应光学系统对水平链路大气激光通信系统湍流影响的补偿能力。其结果表明，加入自适应光学系统后，激光通信系统光斑的斯切尔比由约 0.09 提升到了 0.58 左右，光束质量显著提高 [37]。但将自适应光学系统加入激光通信系统中还有很多关键问题有待解决。首先，激光通信链路较长，并且在强起伏条件下时，过强的湍流会打破光束波前的连续性，造成相位分支点出现。此时，波前畸变很难被波前传感器探测，这就意味着波前矫正器失去了矫正的参考相位，自适应光学系统无法工作。Lukin 等的研究便证明了这种观点，在强湍流条件下，由于波前传感器无法为波前矫正器提供矫正参考相位，

自适应光学系统校正湍流的能力极大地受到了限制[38]。并且，自适应系统结构比较复杂，造价高，系统工作时，若要获得较好的校正效果，需要很高的校正带宽，对技术与设备均有很高的要求。针对这种情况，Weyrauch 等提出了一种新型的自适应光学系统——无波前传感器的自适应光学系统，其在激光通信系统中加入了这种盲优化的自适应光学系统。这种自适应光学系统工作时，探测器探测到经大气信道传输的带有信号的光束，以探测到的光强作为受大气影响的评价指标，采用随机并行梯度算法进行反复迭代进而优化系统的性能指标，抑制大气对激光通信系统的影响。其中，采用超大规模集成电路来进行自适应光学系统的随机并行梯度运算，波前校正器为 132 单元变形反射镜。实验结果表明，在弱湍流和中等湍流条件下，该方法可以很好地对大气湍流造成的波前畸变进行矫正，并且，即使在强起伏条件下，该方法仍具有一定的矫正能力。与传统的由波前自适应光学系统相比，由于盲优化型自适应光学系统具有结构简单、实时性强、成本低、强湍流条件下工作性能好以及计算量较小的优点，在激光通信领域有很广阔的应用空间[39,40]。但目前该方法还不够成熟，更好地对激光通信系统性能的评价表达式的建立仍有很多难题需要解决，并且目前的迭代过程很烦琐，计算效率较低。

采用相移键控调制的原理进行信号调制和解调，可以在很大程度上提高激光通信系统的探测灵敏度。2010 年，在卫星 TerraSAR-X 的通信终端和 DLR 地面光学站进行了星地激光通信实验[41]，采用相移键控调制的相干检测技术，最高通信速率达到了 5.625Gbit/s，首次实现了星地相干光通信链路。但由于需要接收波面的相位完整，又因在探测端信号与本振光混频后的干涉条纹对比度将下降，为保证一定的误码率，准确的信号解调需要在天气能见度状况极好、湍流很弱的情况下才可以采用相移键控调制机理。此外，在通信速率大于 10Gbit/s 且前置放大器达到一定灵敏度需求情况下，湍流效应导致的波前畸变将增大通信误码率，所以基于相移键控调制的外差探测接收技术无法满足大气激光通信链路的要求。

用全息成像技术补偿大气闪烁对光束的影响是解决大气湍流问题的一个新方法。1949 年 Gabor 首次建议使用波前记录 (全息) 方法校正显微镜的畸变。随后 Semenova 等继续对该技术进行研究[42,43]。全息技术可以通过动态全息图记录光束的波前信息，从而对干扰进行补偿。相比于自适应光学系统，全息技术的优点在于降低了系统的复杂程度，不需要加装高性能的控制系统，提高了可靠性的同时降低了系统功耗。但是，目前全息补偿技术还在研究发展中，关键技术不完善，离实际应用尚有一定距离。

为了减少大气环境对激光通信系统的影响，除了以上提到的补偿大气湍流对激光通信系统性能影响的方法外，也可以在发射端对初始光束进行优化。2002 年，Ricklin 等提出使用部分相干高斯谢尔光束作为大气光通信系统的发射光源，解析地研究了部分相干光束在弱湍流条件下强度起伏空间相关性和对数强度方差，研究

结果表明：随着光源的空间相干长度降低，大气湍流引起的闪烁系数减小，空间光通信系统误码率明显降低 [44]。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Berman 等采用量子力学方法研究部分相干光经大气湍流长距离传输的光子分布函数及其量子效应，结果表明部分相干光能明显降低闪烁系数 [45]。Shirai 等又采用模式分析法研究了湍流大气传输中部分空间相干光的光束扩展，研究表明低阶模式在湍流大气中的相对扩展要大于高阶模式 [46]。Borah 等对大气激光通信系统中最优初始光束相干长度进行了实验研究，其对弱湍流条件下，不同相干长度的激光通信系统的中断概率及系统性能的变化情况进行了分析。并对波前曲率、链路长度、波长以及光束波前相位半径等光束参数对相干长度的影响进行了详细的分析 [47]。在此基础上 Xiao 等提出了激光通信系统中最优相干长度的选取方法 [48]。Kyle 等对激光通信系统初始光束相干长度抑制大气湍流对激光通信系统性能影响的情况进行了理论分析和实验研究。其研究结果表明，在不同湍流情况下，与采用完全相干光作为初始光源的激光通信系统相比，采用部分相干光的激光通信系统在接收端的光强闪烁值可以减少 50%[49]。2008 年，Liu 等提出了基于涡旋光束轨道角动量的光信息编码，并对其传输过程中的编码与解码进行了研究，这种新型的编码方式具有更高的保密性 [50]。2010 年，Djordjevic 等对涡旋光束在大气中传输的情况进行了分析和研究，研究表明：涡旋光束受大气湍流影响较小 [51]。

1.3 本书主要研究内容

目前，大多数的研究都是从解决某个具体技术问题的方向出发的，而没有以激光通信系统整体角度对激光相干、偏振、相位特性及其应用技术进行系统和较深入的理论和实验研究，例如，激光在大气传输过程中偏振态、相干特性以及相位特性的变化特点，激光通信系统内部光路中激光相干、偏振以及相位特性的变化及其规律，以及如何合理利用激光相干、偏振以及相位特性变化规律进行系统的优化设计，最大限度地提高激光通信系统的性能指标，等等。本书主要研究内容如下：

(1) 研究高斯光束在大气中传输时受大气湍流影响的情况，主要研究大气湍流所引起的激光光束在接收端的光强闪烁、到达角起伏以及光斑漂移等现象，分别采用统计分析、概率密度分析以及频谱分析等方法研究湍流所引起的上述现象；并得出大气湍流的日变化规律、季节变化规律以及波长变化规律。

(2) 从 OOK 调制模式下激光通信系统在大气信道中运行时的误码率、中断概率以及平均容量等三个方面分析大气湍流对激光通信系统性能的影响，并在真实大气环境下，研究大气湍流所引起的接收端光强起伏现象对激光通信系统性能的影响。

(3) 研究采用液晶对激光光束偏振、相干度以及螺旋相位进行高精度调控的理

论和方法。并设计实验对激光光束进行偏振、相干度以及螺旋相位调制，验证调制精度。研究激光光束的相干度及束散角复合调控技术，对调控精度进行实验验证，设计并制作多参数高精度可调激光光源。

(4) 研究并制作大气湍流模拟装置。并采用真实链路测量数据对湍流模拟装置所模拟湍流的信道参数、稳定性及等效性进行实验验证。

(5) 利用所制作的大气湍流模拟装置，定量研究不同偏振态、相干长度以及拓扑电荷数激光光束受大气湍流影响的情况，分析不同激光光束的不同初始参数来抑制湍流影响的能力，得到在不同大气环境下的最优初始光源参数，以抑制大气湍流对激光光束传播的影响。

(6) 对激光通信系统发射端光束的初始偏振态、相干长度以及拓扑电荷数进行优化，并在真实的大气环境下进行野外大气通信实验，验证本方法抑制大气湍流对激光通信系统性能影响及提升大气激光通信系统性能的能力。