

大气激光信道传输的特殊介质 影响及其信号处理

朱耀麟 陈锦妮 宋 鹏 孟 超 薛 谦 著

非外借



科学出版社

大气激光信道传输的特殊介质 影响及其信号处理

朱耀麟 陈锦妮 宋 鹏 著
孟 超 薛 谦

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书以大气激光通信的无线信道传输特性和信息处理为主线,全面系统地介绍不同大气条件对自由空间激光通信传输特性的影响,注重基础理论分析与应用实践相结合,主要内容包括大气介质、降雨、雾、沙尘暴以及爆炸产生的烟雾对大气信道传输的影响,OFDM 系统结构及不同信道编码下的信道估计适用于高速传输的 MIMO 系统的大气激光通信和均衡技术,大气湍流信道不同调制方式下直接检测系统性能,相干光检测技术的光传输系统及偏振复用/偏振分集接收的相干检测,以及晴朗天气下紫外光通信系统的性能等。本书着重讨论对大气激光通信最具影响的因素,并在一定程度上反映了国内外的研究现状。

本书可作为与无线光通信相关的电子信息类、通信工程等专业的本科院校本科生、研究生的教材或教学参考书,也可供相关领域科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

大气激光信道传输的特殊介质影响及其信号处理/朱耀麟等著. —北京:科学出版社, 2019.1

ISBN 978-7-03-059846-2

I. ①大… II. ①朱… III. ①激光通信-信号传输-研究 IV. ①TN929.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018) 第 264970 号

责任编辑:宋无汗 张瑞涛/责任校对:郭瑞芝

责任印制:张 伟/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

*

2019 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 B5

2019 年 1 月第一次印刷 印张:13 1/2

字数:272 000

定价:85.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着通信技术向大容量和长距离方向发展,大气激光通信在卫星间通信、本地网“最后一公里”接入及军事通信等领域有着广阔的应用前景。大气空间光通信是指以激光束为信息载体,在空间中直接进行数据、语音和视频等信号传输的通信技术,融合了微波通信和光纤通信的优势,能进行点对点、点对多点或多点间的语音、数据和图像双向通信。国际上已经对空间光通信系统所涉及的各项关键技术展开了深入研究,取得了突破性进展,成功实现了星间通信和星地通信。我国也已成功地试验了星地通信,很多单元技术已趋于成熟。

本书在总结过去研究工作的基础上,阐述自由空间激光通信的基础理论技术方法及应用实践,为大气激光通信技术的深入研究提供理论基础,并详细讨论大气介质、降雨、雾、沙尘暴以及爆炸产生的烟雾对大气信道传输的影响。为达到高速传输的目的,研究了一些新的适合大气传输的激光通信技术,如 FSO-MIMO 系统、FSO-OFDM 传输系统、副载波调制-副载波传输系统等。为了提高系统性能,研究了不同信道编码下的信道估计和相位均衡技术。最后介绍大气紫外光通信原理,给出非直视紫外光通信系统的两种模型:共面单次散射模型和非共面单次散射模型,通过实验证明大气紫外光通信的可行性。

全书共 9 章,第 1 章介绍大气激光通信的发展历程及大气信道传输概论。第 2 章讨论大气介质、降雨、雾、沙尘暴对大气信道传输的衰减特性。第 3 章通过引入烟雾浓度扩散模式,研究爆炸产生的烟雾对大气信道传输的影响。第 4 章介绍大气激光通信下 OFDM 系统结构及不同信道编码下的信道估计。第 5 章研究大气激光通信下的相位均衡技术。第 6 章研究基于 MIMO 系统的高速大气激光通信系统和基于高阶调制的高速大气激光通信系统及其相位均衡技术。第 7 章介绍大气湍流信道不同调制方式的直接检测性能。第 8 章研究相干光检测技术的光传输系统及偏振复用/偏振分集接收的相干检测系统。第 9 章介绍非直视紫外光通信系统的两种模型,分析晴朗天气下紫外光通信系统的性能,对无线紫外光通信可行性进行实验分析。本书由薛谦审阅了每一章,在编写过程中,课题组所有人员都直接或间接做出了贡献,在此深表感谢。

由于本书介绍的是现代较新的理论和方法,加上作者水平有限,书中的内容难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 大气激光通信	1
1.1 大气激光通信的发展	1
1.2 大气信道传输概论	3
1.2.1 降雨、雾、沙尘对大气信道传输的影响	3
1.2.2 爆炸产生的烟雾对大气信道传输的影响	4
1.3 大气激光通信下 OFDM 的发展	5
参考文献	7
第 2 章 光信号在大气介质中的能量衰减	9
2.1 大气介质对光信号传输的影响	9
2.1.1 大气分子的吸收效应	11
2.1.2 大气分子的散射效应	12
2.1.3 大气湍流效应	13
2.1.4 大气气溶胶对光信号的影响	14
2.2 降雨对光信号的影响	16
2.2.1 雨滴单球粒子的 Mie 散射	17
2.2.2 光波在雨介质中的衰减	17
2.2.3 雨滴尺寸分布模型	19
2.2.4 雨滴单球粒子的计算机仿真	20
2.2.5 光波在雨介质中的衰减仿真	22
2.3 雾的物理特性及对光信号的衰减效应	24
2.3.1 雾的分布与分类	24
2.3.2 雾的气溶胶模型	25
2.3.3 雾滴谱分布	26
2.3.4 雾滴尺寸分布模型	27
2.3.5 光信号在雾中的衰减仿真	28
2.4 沙尘暴对光信号的衰减效应	30
2.4.1 沙尘气溶胶模型与衰减特性	31
2.4.2 沙尘气溶胶粒子的复折射率	32
2.4.3 沙尘气溶胶的衰减特性	33

2.5 本章小结	36
参考文献	36
第 3 章 爆炸产生的烟雾对激光传输影响研究	38
3.1 烟雾对激光衰减的计算	38
3.1.1 van de Hulst 近似方法	39
3.1.2 爆炸烟雾中激光衰减计算需要确定的参数	40
3.1.3 爆炸烟雾粒子分布选取	40
3.1.4 梯度传输理论	41
3.2 爆炸烟雾粒子的扩散模式	45
3.2.1 连续点源高斯扩散模式	46
3.2.2 烟团扩散模式	48
3.2.3 美国 AD 报告推荐的烟幕扩散模式	49
3.2.4 爆炸烟雾扩散模式的假设	50
3.2.5 仿真计算	51
3.3 爆炸对激光传输中湍流强度的影响公式推导	55
3.3.1 爆炸产物模型分析	55
3.3.2 爆炸产生大气压强的计算	56
3.3.3 爆炸超压峰值的对比	58
3.3.4 爆炸产生湍流的计算	60
3.3.5 仿真结果与分析	61
3.4 本章小结	63
参考文献	63
第 4 章 大气激光通信下 OFDM 系统结构及影响因素	65
4.1 大气激光通信下 OFDM 的数学描述	65
4.1.1 基本原理	65
4.1.2 保护间隔和循环前缀	68
4.1.3 大气激光通信下 OFDM 相干系统模型	70
4.2 大气激光通信下 OFDM 系统信道估计	73
4.2.1 信道估计算法	74
4.2.2 插值算法	77
4.2.3 基于导频的大气激光通信下 OFDM 信道估计	78
4.2.4 基于训练序列的大气激光通信下 OFDM 信道估计	81
4.3 信道编码下的大气激光通信 OFDM 信道估计	85
4.3.1 RS 码下的信道估计	86
4.3.2 Turbo 码下的信道估计	88

4.3.3	LDPC 码下的信道估计	90
4.3.4	仿真比较分析	92
4.4	本章小结	93
	参考文献	93
第 5 章	大气激光通信下的相位均衡技术	95
5.1	相位均衡技术概述	95
5.1.1	BPSK 调制技术	95
5.1.2	QPSK 调制技术	96
5.1.3	QAM 调制技术	97
5.1.4	自适应滤波器原理	97
5.1.5	自适应滤波器应用	98
5.1.6	大气激光通信下的均衡系统模型	101
5.1.7	格形结构自适应滤波器	101
5.2	最小均方误差算法	102
5.2.1	LMS 算法原理	102
5.2.2	RLS 最小均方误差算法	103
5.2.3	算法的性能分析	104
5.2.4	仿真结果与分析	105
5.3	恒模盲均衡算法	106
5.3.1	恒模盲均衡算法原理	106
5.3.2	盲均衡技术的应用	107
5.3.3	Godard 算法	108
5.3.4	Bussgang 类算法	108
5.3.5	CMA 算法	109
5.3.6	CMA 算法的改进	110
5.3.7	仿真结果与分析	112
5.4	本章小结	113
	参考文献	114
第 6 章	适于高速传输的大气激光通信	115
6.1	基于 MIMO 系统的大气激光通信	115
6.1.1	MIMO 系统简介	115
6.1.2	系统模型的建立	116
6.1.3	自适应波束形成技术	117
6.1.4	恒模算法的改进应用	118
6.1.5	仿真结果及分析	119

6.2 适于信息高速传输的均衡技术	120
6.2.1 64-QAM 调制技术的应用	120
6.2.2 均衡系统模型	120
6.2.3 步长因子的选择对恒模算法中的影响	121
6.2.4 眼图及蒙特卡罗曲线	122
6.2.5 仿真结果及分析	123
6.3 本章小结	126
参考文献	126
第 7 章 大气湍流信道不同调制方式直接检测性能	127
7.1 直接检测接收机模型	127
7.1.1 直接检测的基本原理	127
7.1.2 光电检测器统计特性	128
7.1.3 光电检测器噪声模型	129
7.2 开关键控直接检测性能	131
7.2.1 接收机信噪比和灵敏度	131
7.2.2 对数正态分布信道接收机性能	133
7.2.3 Gamma-Gamma 信道接收机性能	135
7.3 脉冲位置调制直接检测	137
7.3.1 单脉冲位置调制	137
7.3.2 差分脉冲位置调制	140
7.4 数字脉冲间隔调制直接检测	140
7.5 副载波强度调制系统载噪比	142
7.5.1 ASK 副载波强度调制	142
7.5.2 MPSK 副载波强度调制	144
7.5.3 OFDM 副载波强度调制	144
7.6 本章小结	147
参考文献	147
第 8 章 大气湍流信道相干检测系统性能	149
8.1 相干光检测技术	149
8.1.1 相干光检测系统组成	149
8.1.2 相干光检测基本原理	149
8.1.3 相干光检测优点及关键技术	150
8.2 相干光检测灵敏度及影响因素	151
8.2.1 相干光接收机检测灵敏度	151
8.2.2 Gamma-Gamma 信道相干光检测性能	155

8.3 相干光检测载波恢复技术	156
8.3.1 MPSK 载波频偏估计和相位估计算法	156
8.3.2 副载波强度调制载波恢复	158
8.3.3 OFDM 载波频偏估计算法	162
8.4 偏振复用/偏振分集接收相干检测	166
8.4.1 相干检测偏振分集接收	166
8.4.2 偏振复用/相干接收	167
8.5 本章小结	167
参考文献	168
第 9 章 紫外光通信	169
9.1 紫外光通信简介	169
9.1.1 紫外光通信原理	169
9.1.2 紫外光通信特点	170
9.2 紫外光通信的应用	171
9.3 紫外光通信国内外研究现状	173
9.3.1 国外研究状况	173
9.3.2 国内研究状况	174
9.4 紫外光通信系统理论分析	175
9.4.1 大气组成及紫外光光谱特性	175
9.4.2 紫外光通信信道特性分析	176
9.4.3 紫外光通信两种大气传输模型	179
9.4.4 非直视紫外光通信系统的两种模型	182
9.5 晴朗天气下紫外光通信系统性能分析	186
9.5.1 路径损耗分析	187
9.5.2 脉冲响应分析	188
9.5.3 系统 3dB 带宽	190
9.5.4 信道容量仿真预测	192
9.6 紫外光源和光的接收设备	194
9.6.1 紫外光源	194
9.6.2 光电探测器	197
9.6.3 滤光片	199
9.6.4 无线紫外光通信可行性实验分析	200
9.7 本章小结	202
参考文献	203

第1章 大气激光通信

1.1 大气激光通信的发展

近几年来,随着人们对宽带多媒体业务的需求增长,整个通信网络朝宽带化方向发展,光通信技术成了宽带通信的理想选择。自由空间光通信(free space optical communication, FSO)系统是无线通信与光纤通信两者结合的产物。它包括深空卫星、同步轨道卫星、中轨道卫星、低轨道卫星之间及地面站之间的激光通信,还包括卫星与地面站之间的激光通信。大气激光通信是利用激光在大气中传输来通信,与无线电相比,光具有频率高、方向性强、可用频谱宽、保密性强等优点;与光纤通信相比,具有造价低、施工简单、速度快等优势。随着计算机网络宽带化的发展,大气激光通信技术被提出来解决宽带接入中的“最后一公里”问题。

20 世纪 80 年代,各国竞相开始对不同调制方法的自由空间光通信技术进行理论与工程化研究。美国、日本及欧洲的一些国家在光通信技术方面的研究一直处于领先地位。80 年代初,麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT)林肯实验室和美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)联合研制了 NASA-ACCS 通信卫星演示系统,发射机采用了差分相移键控(differential phase shift keying, DPSK)调制方式,通过光外差检测进行接收,并于 1989 年成功发射了装载该系统的卫星。1995 年,由 NASA 支持的加州理工学院喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制完成了激光通信演示系统(laser communication demonstration systems, LCDS),对信号光采用 OOK 调制方式。OOK 调制的优点是对激光器光源频率的稳定性要求不高,信标光采用连续波(continuous wave, CW)调制方式,LCDS 的数据传输速率为 750Mbit/s。1995 年,美国战略导弹防御组织实施了空间技术研究车 2(Space Technology Research Vehicle 2, STRV-2)实验计划。STRV-2 的通信单元采用 IM/DD 方式半导体激光发射和雪崩光电二极管接收,数据传输速率估计达到 1Gbit/s。2000 年,朗讯公司和 Astro Terra 公司成功实现了 1550nm 附近 4 波长、波分复用为 10Gbit/s、传输距离为 5km 的无线光通信实验商用系统。2013 年 10 月,美国 NASA 成功实现了月球激光通信终端与地面的激光通信链路,数据传输速率为 622Mbit/s。该项目采用 16-PPM 调制、超导纳米线单光子探测及地面终端阵列收发技术,有效克服了大气湍流信道的光强闪烁问题和接收功率密度低的问题,实现了灵敏度极高的光子接收。欧洲主要的光通信研究组织是欧洲航天局(European Space Agency, ESA)以

及英国、法国和德国的一些机构。80 年代后期, ESA 制定了著名的半导体激光星间链路实验 (Semiconductor-Laser Intersatellite Link Experiment, SILEX) 计划, 该计划是在卫星之间建立激光通信链路, 研制所有关于卫星之间激光通信的子系统 and 通信单元。1994 年, 由英国、加拿大和比利时的公司联合研制了小型光学用户终端 (small optical user terminal, SOUT) 和甚小光学用户终端 (very small optical user terminal, VSOUT), 采用 IM/DD 方式实现星间链路通信。2001 年, SILEX 计划中研制的通信终端成功实现了世界上首次星间激光链路实验, 采用二进制相移键控调制 (binary phase shift keying, BPSK) 相干检测方式, 通信速率为 50Mbit/s。2005 年, 德国宇航中心 (DLR) 研制了 BPSK 调制/零差检测光通信通信终端 (laser communication terminal, LCT), 通信实验数据传输速率达到了 5.625Gbit/s, 也是现有星地通信实验中的最高速率。2006 年 5 月, 日本的光学轨道间通信工程试验卫星 (Optical Inter-orbit Communication Engineering Test Satellite, OICETS) 与国家信息通信技术研究所在 (National Institute of Information and Communication Technology, NICT) 地面站成功地实现了激光通信实验。OICETS 搭载的激光利用通信设备 (laser utilizing communication equipment, LUCE) 激光通信终端, 采用光功率为 100mW、偏振态为左旋圆偏振的 847nm 激光, 调制方式为非归零码直接强度调制, 数据速率为 49.3Mbit/s, 误码率为 10^{-6} 。2009 年, 英国诺森比亚大学 Popoola 指出大气湍流会大大降低直接检测系统性能, 副载波调制优于 OOK, 是一种有效抑制大气湍流影响的调制方法, 可以将副载波 BPSK 调制技术应用于大气通信链路。2014 年 11 月, AlphaSat 卫星与“哨兵”1A 之间进行了第二代激光通信终端 (laser communication terminal, LCT) 激光通信验证, 采用 BPSK 调制/零差检测, 测试速率达到 600Mbit/s, 到 2015 年 8 月, 已成功进行了 100 多次高速激光通信试验。

国内对自由空间光通信的研究起步较晚, 但近年来已经取得了一些突破和进展。2002 年, 中国科学院成都光电技术研究所开发了无线光通信终端, 传输速率为 10Mbit/s, 工作波长为 850nm, 通信距离为 1~4km, 发射功率为 3~30mW。电子科技大学对空间激光通信关键技术进行了有益的探索, 2002 年研制了地面演示系统进行卫星光通信验证。武汉大学主要进行大气激光通信及信标光的捕获和跟踪方面的研究, 于 2002 年进行了大气激光通信试验, 采用 IM/DD 方式, 并在 2008 年完成了空间光通信自动跟踪伺服系统的地面模拟试验, 2011 年实现 4.6km FSO 链路, 使用密集波分复用完成了 5Gbit/s 数据传输。西安理工大学自 2000 年起对大气激光通信系统进行研究, 在光学设计、编码调制等方面取得了令人欣喜的进展, 已经成功研制出一种无线激光通信系统终端, 具有一些常用数字接口, 包括串口、并口、以太网, 能在计算机或终端设备之间实现全双工通信, 完成数据、语音和图像的可靠传输。2009 年, 广西桂林激光通信研究所研制了激光大气通信机。该通信

机通信距离可以达到 5km, 通信速率为 155Mbit/s, 误码率小于 10^{-7} 。哈尔滨工业大学深入研究了星间激光通信技术。2011 年 10 月, 哈尔滨工业大学研制的星地通信终端搭载在“海洋二号”卫星上, 进行了我国首次星地激光通信试验并取得圆满成功, 单路数据传输率可以达到 504Mbit/s。2013 年 9 月, 长春理工大学成功地完成了飞机和飞机间的远距离激光通信试验, 且在深空光通信方面也进行了有益的探索与研究。

从国内外自由空间光通信发展脉络可以看出: 自由空间光通信技术发射端已由最初的 OOK 调制方式向其他多种调制技术发展, 如 SCM 调制、PPM 调制、多脉冲位置调制 (MPPM)、数字脉冲间隔调制 (DPIM) 以及 BPSK 调制等, 可靠、高效和抗干扰能力强的调制技术是进行高传输速率和低误码率通信的保证, 在提高系统性能方面起着重要作用。自由空间光通信的接收端也因为直接检测灵敏度低而向相干检测方向发展。

1.2 大气信道传输概论

1.2.1 降雨、雾、沙尘对大气信道传输的影响

激光在大气信道传输时受气候条件的影响很大, 这主要是由于大气中气体分子和气溶胶粒子的吸收和散射造成的。在大气自然介质中的主要影响物质是 CO_2 、 O_2 、水滴、烟、灰尘、冰片等。在对流层中, 大部分水分以水蒸气、雾、水滴的形式结合起来, 使能见度降低。据统计, 激光在大气中的雨、雾、雪中的衰减程度依次是 3~8dB/km、3~10dB/km 和 3~20dB/km。

胡中华等^[1]提出用光的遮挡作用计算雨对大气激光信道传输的衰减, 并假设雨滴对通过的光信号完全阻断, 得出雨衰率随降雨强度的增加不断增加, 最终阻断光波信号的结论; 沙炎军^[2]运用夫琅禾费衍射和几何光学散射理论, 建立了雨滴对激光的衰减模型, 得出随着降雨强度的增大透射率不断减小等结论; 欣克利^[3]给出了在雨介质中光信号的衰减系数与降雨量之间的表达式; 郭婧等^[4]分析了雨滴的 M-P 分布、Joss 分布、Weibull 分布等尺寸分布模型在不同降雨率中的适用性, 并分别求出雨滴衰减系数的仿真曲线。文献 [2]~[4] 通过数值分析所得出的激光信号的衰减随降雨率的增大而增大, 忽略了雨滴粒子尺度分布的影响, 文献 [4] 所得的实验结果与实际测量值的差距较大。

在日常生活中, 最常见的是平流雾和辐射雾。王丽萍等^[5]给出了中国雾区的时空分布和变化规律。Kim 等^[6]对韩国两个地区在三年内的衰减效率因子进行了同步自动检测, 得到了五种主要气溶胶粒子的衰减效率因子, 确定了气溶胶粒子的浓度对衰减效率因子的影响公式。Bendersky 等^[7]利用与实际数据相符的雾滴模

型和理论,推导了雾和湿性气溶胶对 $1.064\mu\text{m}$ 光信号的衰减作用,尤其是水含量及粒子直径对衰减系数的影响。Chan 等^[8]运用多元线性回归方法推导了澳大利亚地区气溶胶中化学成分对大气衰减系数的影响效应。

Sokolik 等^[9,10]利用 Mie 理论推导了沙尘气溶胶粒子的光学性质参数并计算了沙尘气溶胶对大气的冷却和加热率,得到了辐射波长和沙尘粒子半径对消光系数的影响效应。Carlson 等^[11]利用长波和短波相结合的方式,推导了撒哈拉沙漠中沙尘气溶胶对冷却和加热率以及对大气辐射量的影响。王宏等^[12]在塔克拉玛干地区对沙尘气溶胶对光信号的辐射特性做了理论上的研究和实际测量,发现相对于撒哈拉和世界气象组织等其他地方的沙尘气溶胶模型,当地气溶胶的单次反照率增大,复折射指数减小,前向散射的能量减弱,对太阳辐射的吸收效应较弱。沈志宝等^[13,14]利用卫星和地面上的测量资料,估算了我国西北地区大气中沙尘气溶胶的辐射效应,得出沙尘气溶胶对地表系统和大气中光波的辐射效应都与地表的反照率有一定关系。申绍华等^[15,16]用数值模拟的方法研究沙尘气溶胶对天气系统的效应,研究结果表明:当沙尘暴暴发时,在白天,沙尘辐射加热使大气低层产生强烈的上升运动;在晚上,沙尘辐射冷却使大气低层垂直速度场表现为下沉运动。

1.2.2 爆炸产生的烟雾对大气信道传输的影响

国外对激光在烟幕中的传输研究较多,并且很多是在烟箱中进行实验,然后通过 Mie 理论进行分析和计算。例如,波兰华沙军事技术学院的 Cudzilo 和 Paplinski 等对发烟雾为混合物时产生的烟雾对 $10.6\mu\text{m}$ 激光的衰减特性进行了研究;Wayan 和 Chylek 根据 Mie 理论对大的球粒子散射效率因子进行了计算。印度的一些科研人员在烟箱中测试了超过 7 种配方的氯化物发烟剂所产生的烟雾对红外和 $10.6\mu\text{m}$ 的激光的衰减效果;美国在这方面的研究机构和人员也很多,其中艾德伍德研究、开发和工程中心研究人员 Embury、Walker、Zimmermann 等曾在 1993 年利用烟幕试验箱来模拟商用石墨薄片在战场上的红外消光效应。但是这些研究都不是针对爆炸所产生的激光衰减因素,如投弹产生烟雾,燃烧产生烟雾、烟尘等。

大气激光通信在战场环境的应用越来越多,作为战时的应急通信手段越来越受到重视。激光在战场的通信质量与战场环境有最直接和最大的关系,而爆炸作为战场的最主要因素,研究爆炸与激光通信有重要意义。对于爆炸环境的通信传输的研究相对较少,1997 年武汉大学的管荣生、李钦等对高空核爆炸对无线电波传播的影响进行研究,但这并不是对光传输进行研究。2009 年,国防科技大学的吴建辉等对核爆炸光辐射特性以及探测技术的理论等进行了研究,实际中核爆炸与常规炮弹爆炸的差别很大,而且这种环境传输信道的特性不是他们研究的重点。谢朝阳等^[17]也对爆炸条件下释放的气溶胶烟雾等激光传输介质的运动进行研究,但没有对爆炸产生的烟雾进行具体分析,更没有对投弹与透过率的关系进行仿真等

研究。在爆炸与湍流的研究方面，目前除了在核爆炸条件下有少量研究，在常规爆炸中常常是关于煤坑环境下的爆炸与湍流和冲击的介绍^[18]，这些研究并不涉及激光传输的问题，同时更没有推导出对激光传输影响的湍流与爆炸强度的直接关系。因此本节正是基于这些不足在这些方面做初步的探讨，并且给出合理的计算关系。表 1-1 表示激光在烟雾中传输的部分研究。

表 1-1 激光在烟雾中传输部分研究年鉴表

时间	机构	研究人员	研究成果
1999 年	国防科技大学	常胜利	研究红外波段红外烟雾干扰特性
2000 年	大连理工大学	姜宁	建立烟雾遮挡效果目标函数、舰艇运动模型、烟雾运动模型
2001 年	江西电子科技研究所	熊晓伟	针对红外气溶胶烟雾干扰效果，提出基于灰色系统观点的定量评估方法
2002 年	南京理工大学	李毅	采用蒙特卡罗方法等对球形原始粒子聚集成凝聚粒子结构进行仿真
2003 年	石家庄军械工程学院	王永仲	得到“屏蔽形成延时”“屏蔽持续时间”两个性能参数，并提出平均扩散系数概念
2004 年	北京理工大学爆炸与灾害预防实验室	任慧	证实了以石墨为主体的材料对工作在红外波段的军用电子器材有良好干扰功效
	南京理工大学	陈兵	分析了烟源在大气下的弥散特性，并提出烟雾弥散的仿真模型
2005 年	清华大学深圳研究生院	任慧等	运用红外傅里叶变换光谱仪检测红外吸光度
	南京理工大学	朱晨光等	用小波变换的图像边缘检测算法画出烟雾云团边缘曲线，并求出封闭曲线面积
2006 年	清华大学精密仪器系	李明	提出利用相邻波段红外透过率推算同样光学路径激光透过率的多项式拟合方法
	北京跟踪与通讯技术研究所	高卫	提出按干扰对目标识别划分等级来评估烟雾对观瞄用光电成像系统干扰效果
2008 年	西安理工大学	柯熙政、杨利红等	研究了激光在雨中的传输衰减

1.3 大气激光通信下 OFDM 的发展

尽管在光通信领域中，也有首字母写为“OFDM”的形式，但是长期以来都表示的是“光频分多路复用”。第一篇关于 OFDM 的论文由 Pan 等公开发表于 1996 年^[19]，但 OFDM 对光纤信道色散有很好的鲁棒性这一点未引起人们的足够重视。直到 2001 年 Dixon 等指出这一点之后，OFDM 技术在光通信领域的情况才有所好转。

由于 OFDM 采用了逆快速傅里叶变换 (IFFT) 和快速傅里叶变换 (FFT) 算

法,不需要均衡,同时相较传统的 FDM 技术具有较高的频谱利用率,如图 1-1 和图 1-2 所示。另外,对于突发性错误来说,它还具有良好的抵抗性,这些特点都使得 OFDM 技术成为与 FSO 结合的第一选择。下面简要介绍 FSO-OFDM 系统的研究现状。



图 1-1 传统的 FDM 多载波调制技术



图 1-2 OFDM 多载波调制技术

2001 年, Sun^[20] 建立了一种 OFDM 系统模型, 该模型较传统的 OFDM 系统可以很好地抑制带内干扰和码间干扰, 且带宽利用率很高。同年, You 等^[21] 提出了两种降低 FSO-OFDM 峰值平均功率比的技术, 对峰均比和子载波数之间的关系进行了分析比较, 为子载波数的选择提供了一定的理论依据。

2003 年, 日本科技大学的 Ohtsuki^[22] 提出了在无线激光通信中采用多载波调制的概念。同年, 上海交通大学张煦院士^[23] 于耄耋之年在《光通信技术》上发表了《多载波调制在通信系统的应用》这篇文章, 这是国内首次提出将多载波调制技术应用于无线激光通信系统是光通信发展的方向这一观点。

2006 年, Shieh 等^[24] 第一次提出了相干光 OFDM(CO-OFDM) 系统, 该系统可以有效地抑制光色散的影响, 并以单模光纤为传输介质验证了其抑制光色散的效果, 结果表明 10Gbit/s 的光信号经过 3000km 介质后光信噪比损耗小于 2dB。

2007 年, Djordjevic 等^[25] 提出了一种适合于光通信的基于 LDPC 编码的 OFDM 直接检测系统。当该技术用于光纤通信时, 可以很好地抑制光纤通信中的残留色散及非线性的影响。而在 FSO 中, 将 LDPC 码和交织技术联合起来, 对发生湍流的大气信道有很好的抗衰落性, 可以有效抑制大气湍流的影响。

2008 年, Cvijetic 等^[26] 首次在室内模拟了通信速率为 10Gbit/s、传输距离为 2.5km 的 FSO 通信实验, 比较了大气激光通信下的 OFDM 与 OOK 的性能。结果表明, OFDM 可以很好地抑制大气信道对光信号的影响, 同时指出, OFDM 将会成为下一代大气激光通信系统最有效的方案, 因而逐渐成为近几年的研究热点之一。

如图 1-3 所示^[27], 不需要在城市内大兴土木, FSO 系统就可以为楼与楼、区域和区域之间迅速高效地提供数字宽带业务, 从而可以大大降低成本。

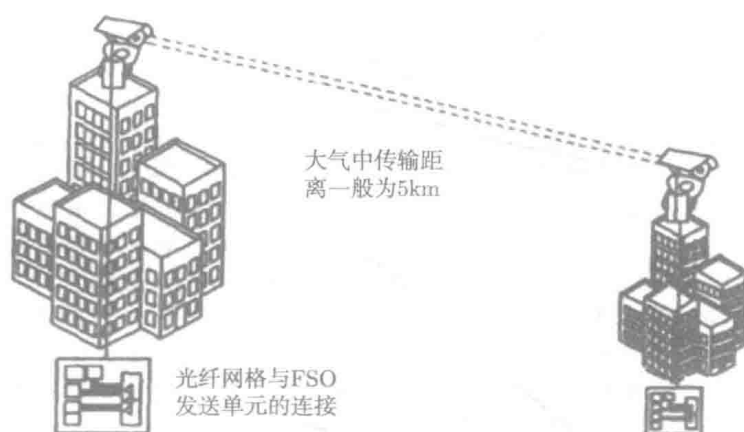


图 1-3 大气激光通信系统的应用场景

参考文献

- [1] 胡中华, 陈家璧, 刘雅. 光在雨中传输的研究 [J]. 大学物理, 2007, 26(7): 34-39.
- [2] 沙炎军. 雨滴特性及对激光信号传输的影响 [D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [3] 欣克利. 大气激光监测 [M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 郭婧, 张合, 王晓锋. 降雨对 532nm 和 1064nm 激光传输的衰减特性研究 [J]. 光学学报, 2011, 31(1): 24-30.
- [5] 王丽萍, 陈少勇, 董安祥. 中国雾区的分布及其季节变化 [J]. 地理学报, 2005, 60(4): 689-697.
- [6] KIM Y J, KIM K W, KIM S D, et al. Fine particulate matter characteristics and its impact on visibility impairment at two urban sites in Korea: Seoul and Incheon[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(2): 593-605.
- [7] BENDERSKY S, KOPEIKA N, BLAUNSTEIN N. Effects of attenuation of 1.064- μm optical waves by humid aerosols and fog over horizontal atmospheric communication links[J]. Optical Engineering, 2004, 43(3): 539-552.
- [8] CHAN Y C, SIMPSON R W, MCTAINSH G H, et al. Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(19): 3237-3250.
- [9] SOKOLIK I, GOLITSYN G. Investigation of optical and radiative properties of atmospheric dust aerosols[J]. Atmospheric Environment(part A)general Topics, 1993, 27(16): 2509-2517.
- [10] SOKOLIK I N, TOON O B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1999, 104(D8): 9423-9444.
- [11] CARLSON, TOBY N, BENJAMIN, et al. Radiative heating rates for Saharan Dust[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1980, 37(1): 193-213.
- [12] 王宏, 石广玉, AOKI T, 等. 2001 年春季东亚-北太平洋地区沙尘气溶胶的辐射强迫 [J]. 科学通报, 2004, 49(19): 1993-2000.
- [13] 沈志宝, 魏丽. 中国西北大气沙尘对地气系统和大气辐射加热的影响 [J]. 高原气象, 1999, 18(3): 425-435.

- [14] 沈志宝, 魏丽. 我国西北大气沙尘气溶胶的辐射效应 [J]. 大气科学, 2000, 24(4): 541-548.
- [15] 申绍华, 陈受钧. 沙尘辐射强迫锋生过程的数值模拟 [J]. 气象学报, 1993, 51(3): 283-295.
- [16] 申绍华, 陈受钧. 沙尘暴辐射强迫的锋生过程分析 [J]. 气象学报, 1993, 51(4): 425-433.
- [17] 谢朝阳, 罗景润, 郭历伦. 炸药爆炸条件下释放气溶胶扩散研究 [J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(10): 87-91.
- [18] 黎体发, 张莉聪, 徐景德. 瓦斯爆炸火焰波与冲击波伴生关系的实验研究 [J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(2): 4-6.
- [19] PAN Q, GREEN R J. Bit-error-rate performance of lightwave hybrid AM/OFDM systems with comparison with AM/QAM systems in the presence of clipping impulse noise[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(2): 278-280.
- [20] SUN Y. Bandwidth-efficient wireless OFDM[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998, 19(11): 2267-2278.
- [21] YOU R, KAHN J M. Average power reduction techniques for multiple-subcarrier intensity-modulated optical signals[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 3(12): 2164-2171.
- [22] OHTSUKI T. Multiple-subcarrier modulation in optical wireless communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2003, 41(3): 74-79.
- [23] 张煦. 多载波调制在通信系统的应用 [J]. 光通信技术, 2003, 27(10): 1-2.
- [24] SHIEH W, ATHAUDAGE C. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing[J]. Electronics Letters, 2006, 42(10): 587-589.
- [25] DJORDJEVIC I B, VASIC B, NEIFELD M. LDPC-Coded OFDM for optical communication systems with direct detection[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(5): 1446-1454.
- [26] CVIJETIC N, QIAN D, WANG T. 10Gb/s free-space optical transmission using OFDM[C]. Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, 2008: 1-3.
- [27] 徐荣, 龚倩, 张光海. 城域光网络 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003: 440-442.