



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

# 激光在大气和海水中 传输及应用

王英俭 范承玉 魏合理 著

Laser Beam Propagation and  
Applications through  
the Atmosphere and Sea Water



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



规划项目

现代激光技术及应用丛书

# 激光在大气和海水中 传输及应用

王英俭 范承玉 魏合理 著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

激光大气传输已成为近代大气光学及其工程应用领域最前沿、最活跃的研究内容之一,并取得一系列突破性进展。本书着重反映了当前激光大气传输问题的若干前沿进展。

本书主要介绍激光大气传输数学物理基础知识;激光在大气和海水中的衰减效应,以及一些重要的高分辨率大气分子吸收线参数;激光大气传输湍流效应和非线性热晕效应及其自适应光学相位校正问题的主要理论和实验研究结果,包括超短脉冲激光大气传输自聚焦效应的研究进展、激光大气传输在大气参数激光雷达探测、激光通信和激光成像中的应用。

本书内容新颖、物理概念清晰,可供从事与激光大气传输相关的科技工作者以及高等院校理工科大学生和研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

激光在大气和海水传输及应用/王英俭,范承玉,  
魏合理著. —北京:国防工业出版社,2015. 12  
(现代激光技术及应用丛书)  
ISBN 978-7-118-10312-0

I. ①激… II. ①王… ②范… ③魏… III. ①激光—  
光传输技术—研究 IV. ①TN24 ②TN818

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 283915 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)  
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司  
新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 22 $\frac{3}{4}$  字数 402 千字  
2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

## 丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

## 丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			



世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很大进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划组织编写出版了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会,为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会,这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家;编辑委员会成员主要以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整。组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为国家“十二五”重点出

版规划项目和国家出版基金资助项目。丛书本身具有鲜明特色：一)丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;二)丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;三)丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;四)丛书作者均来自于国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平。特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周灿强

2015年3月

自 1960 年世界上第一台红宝石激光器发明以来,激光技术及其在众多领域(包括大气环境探测及国家安全等)的应用立即受到各国科学家的高度重视。激光在大气传输过程中将产生一系列线性或非线性效应,这些效应一方面为大气环境探测提供多种可能的方法,另一方面又影响或限制了在大气环境条件下的激光技术的应用。因而激光大气传输的一系列科学问题得到高度关注和深入研究。

大气对激光传输产生比较严重影响的效应包括:大气气体分子和气溶胶粒子的吸收和散射造成的激光能量的衰减;大气湍流造成的光强起伏(闪烁)、光束抖动、光斑扩展等湍流效应;非线性热晕效应造成的光束偏移、光斑畸变和扩展,并最终决定到达靶面上的最大激光功率密度等。因此,弄清激光在大气中传输的规律及如何利用或减少大气对激光传输的影响,已成为激光在大气中应用的一个极为重要的基础性工作。它将为许多激光工程应用的可行性论证及相应工程系统的优化设计提供科学依据。

激光大气传输研究的内容十分丰富,学科基础涉及面也相当广泛,同时有十分复杂的随机性、非线性等问题。激光大气传输已成为近代大气光学及其工程应用领域最前沿、最活跃的研究内容之一,并取得一系列突破性进展。近二十年来,这方面的主要研究进展大多以专题综述性文章形式发表在有关杂志上。在较综合性的著作中也有一定介绍,但专门针对“激光大气传输”问题方面有欠系统性和前沿性。塔塔尔斯基(Tatarskii)的《湍流大气中波的传播理论》(中译版)、美国 *Applied Physics* 丛书中的 *Laser Beam Propagation through the Atmosphere* (英文版)等专著可以说是激光大气传输领域权威著作,但都未见再版,近二十年来的研究进展没有系统性总结。因而,专门系统地深入研究激光大气传输的专著,特别是尽可能详细总结最新研究结果,是相关领域科技工作者和研究生非常需要的。本书正是基于这一考虑,并恰逢编纂“现代激光技术及应用”丛书之

际遇而成。

正是基于“激光大气传输”的专门性、系统性、前沿性的考虑,本书将集中于激光大气传输的高分辨率分子吸收光谱、大气湍流效应和非线性热晕效应三个方面的数学物理基础和系统性的研究结果(对于系统性研究结果,侧重于介绍影响光束远距离传输的衰减及光束漂移、光斑扩展畸变等光束质量因子方面),对于其他效应只作简述并尽可能列出相关参考文献。本书共分为6章:第1章系统介绍激光大气传输的数学物理基础,包括激光大气传输方程和大气流体动力学方程及其近似物理条件、求解方法以及激光大气衰减的基础理论知识;第2章介绍大气对激光传输的衰减,着重介绍高分辨率大气分子吸收光谱和一些重要大气分子的吸收线参数研究的最新成果以及大气(包括分子和气溶胶)衰减的计算方法;第3~5章分别系统介绍激光大气传输湍流效应和非线性热晕效应及其自适应光学相位校正问题、主要研究结果以及发展展望;第6章介绍几个重要大气参数的激光雷达探测方法以及激光通信等中的大气传输问题。

本书第1章1.1节和1.2节及第4章和第5章由王英俭撰写;第1章1.3节和第2章及附录由魏合理撰写;第1章1.4节和第3章、第6章由范承玉撰写。王英俭对全书内容进行了组织和统稿。龚知本院士对本书给予了悉心指导。书中采用的大量研究结果是中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心众多同事们共同努力取得的,在这里一并表示衷心的感谢!感谢本书编委对本书的指导,特别感谢主编周寿桓院士提出的建议。但限于作者学识能力,不完善、不妥之处在所难免,敬请专家学者批评指正。

作者

2015年1月



## 第1章 激光大气传输数学物理基础

1.1	光波传输方程及其近似	001
1.1.1	近轴近似标量波动方程	001
1.1.2	光波传输的几种近似求解方法	002
1.1.3	激光大气传输相位校正原理	006
1.2	地球大气的物理基础	007
1.2.1	大气基本状态与结构	007
1.2.2	大气的主要成分	009
1.2.3	大气流体动力学方程及其近似	010
1.3	激光大气衰减基础	012
1.3.1	大气气体分子吸收光谱基础	013
1.3.2	粒子光散射理论基础	019
1.4	大气光学湍流	023
1.4.1	大气湍流量纲分析	023
1.4.2	Kolmogorov 湍流及其特征参数	025
1.4.3	非均匀各向同性湍流	029
1.5	小结与展望	030
	参考文献	031

## 第2章 激光在大气和海水中的衰减

2.1	大气气体分子的吸收	033
2.1.1	主要大气气体分子的吸收光谱	034
2.1.2	高分辨率、高灵敏度大气吸收光谱的测量方法	043
2.1.3	高分辨率大气分子吸收光谱的部分测量结果	048
2.1.4	激光大气分子吸收计算方法	067
2.2	大气气溶胶的衰减	077
2.2.1	大气气溶胶粒子对激光的吸收及其测量方法	077

2.2.2	气溶胶衰减计算方法	084
2.3	常用激光波长大气吸收和散射系数	097
2.4	激光在海水中的衰减	099
2.4.1	海水中光辐射传输方程	099
2.4.2	海水的光学性质	099
2.4.3	激光在海水中传输	107
2.5	小结与展望	109
	参考文献	110

### 第3章 激光大气传输湍流效应

3.1	激光大气传输湍流效应	113
3.1.1	光强和相位起伏及其频谱特性分析	113
3.1.2	光强闪烁	116
3.1.3	光束到达角起伏特征	117
3.1.4	激光传输 Strehl 比近似理论	122
3.2	湍流效应自适应光学校正	123
3.2.1	湍流效应相位校正及其残差近似分析	124
3.2.2	激光大气传输湍流效应及其相位校正实验研究	126
3.3	激光大气传输相位校正非等晕性	129
3.3.1	聚焦非等晕性	129
3.3.2	角非等晕性	132
3.4	强湍流效应的自适应光学校正若干问题	136
3.4.1	强闪烁效应对相位校正的影响	136
3.4.2	不连续相位及校正研究	141
3.4.3	随机并行梯度下降算法自适应光学校正	148
3.5	小结与展望	153
	参考文献	153

### 第4章 激光大气传输非线性效应

4.1	热晕效应的几何光学近似分析及其定标参数	157
4.1.1	稳态热晕效应	158
4.1.2	瞬态热晕效应	165
4.2	整束热晕效应相位补偿近似分析	169
4.2.1	等效热透镜效应的 $q$ 参数变换	169

4.2.2	整束热晕相位校正定标参数分析	171
4.3	湍流热晕相互作用线性化理论	176
4.3.1	基本方程及其小扰动解	178
4.3.2	相位补偿下的 Strehl 比表达式	183
4.3.3	定标参数与计算分析	186
4.4	飞秒激光大气传输自聚焦效应	191
4.4.1	自聚焦的物理描述	191
4.4.2	稳态自聚焦理论	192
4.4.3	动态自聚焦理论	195
4.4.4	自聚焦的阈值	196
4.4.5	等离子体散焦效应	197
4.4.6	超短脉冲传输的单丝结构	198
4.4.7	飞秒光丝强度自陷现象	199
4.4.8	光束自净化现象	200
4.4.9	光丝自愈合现象	201
4.5	小结与展望	204
	参考文献	204

## 第5章 高能激光大气传输数值模拟与实验研究

---

5.1	激光大气传输数值计算模式	207
5.1.1	基本方程的坐标变换	207
5.1.2	激光大气传输的数值计算方法	209
5.1.3	激光大气传输的数值计算网格选取的基本原则	221
5.2	高能激光大气传输数值模拟与实验验证研究	224
5.2.1	热晕效应模拟实验研究	224
5.2.2	高能激光热晕效应实验研究	232
5.3	高能激光大气传输定标规律数值仿真研究	243
5.3.1	聚焦平台光束大气传输光束扩展理论分析	243
5.3.2	线性效应引起的光斑扩展	245
5.3.3	湍流效应与热晕效应相互作用的分析	248
5.4	小结与展望	252
	参考文献	252

## 第6章 激光大气传输应用

---

6.1 激光雷达大气探测技术 .....	254
6.1.1 大气成分探测激光雷达发展简介 .....	254
6.1.2 大气风速测量 .....	256
6.1.3 大气湍流参数测量 .....	258
6.2 激光大气传输在光通信中的应用 .....	263
6.2.1 大气对通信的影响 .....	264
6.2.2 激光通信中大气湍流的影响抑制技术 .....	266
6.3 自适应光学鬼成像 .....	273
6.3.1 鬼成像系统 .....	273
6.3.2 自适应光学鬼成像系统 .....	276
6.3.3 自适应光学鬼成像系统实验仿真 .....	277
6.4 小结与展望 .....	278
参考文献 .....	279

附录 常用激光波长大气分子与气溶胶吸收和散射系数 .....	282
--------------------------------	-----

# 第 1 章

## 激光大气传输数学物理基础

激光在大气中传输涉及电磁波传播理论和大气物理基础知识。因此,首先将从麦克斯韦电磁波方程出发,简述给出本书讨论的一般情况下均适用的激光大气传输近轴近似波动方程,给出激光大气传输应用最为广泛的几种近似分析方法及其适用物理条件,并简述激光大气传输的相位校正原理;其次,简要介绍大气的基本结构和组成,重点是将大气看作理想气体,从流体动力学方程组出发,给出激光大气热相互作用动力学方程,并详细讨论几种典型的激光与大气相互作用物理近似条件下的求解方法;然后,介绍大气衰减基础知识,包括大气分子吸收光谱和粒子散射的基本理论;最后,简要介绍大气湍流的一些基本概念。

### 1.1 光波传输方程及其近似

激光在大气中传输满足麦克斯韦(Maxwell)电磁波方程:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\mathbf{E} n^2) - \frac{i}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\boldsymbol{\varepsilon}_i \mathbf{E}) = -2 \nabla [\mathbf{E} \cdot \nabla (\log n)] \quad (1-1)$$

式中:  $\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_0 (\boldsymbol{\varepsilon}_r + i \boldsymbol{\varepsilon}_i)$ ,  $n = \sqrt{\boldsymbol{\varepsilon}_r}$ , 介电常数虚部对应大气对光波的吸收;  $c$  为光波在真空中传播的光速。

式(1-1)等号右边项表征偏振特性,对于能量传输、测距、制导、照明等激光应用而言均可忽略不计。在不考虑大气偏振影响的情况下,麦克斯韦(Maxwell)方程可以标量化。同时,考虑到一般情况下大气扰动量是小量以及激光方向性好,因此一般研究激光大气传输问题均采用近轴近似标量波动方程。

#### 1.1.1 近轴近似标量波动方程

当传输介质的介电常数变化频率远小于光波电磁振动频率或介电常数没有受到电磁感应而明显变化,以及传输介质的介电常数空间变化很小对光的偏振影响可以忽略时,激光传输满足下列形式的标量麦克斯韦方程:

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E - i \frac{n \alpha_i}{k_0 c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E = 0 \quad (1-2)$$



式中： $\alpha_i$ 为传输介质对光波的吸收系数。

假设  $z$  轴方向为光束传输方向，令  $E = \varphi e^{i(kz - \omega t) - \alpha_i z/2}$ ，并且满足下列两个条件：

(1) 传输介质不均匀散射尺度远大于光波波长，光散射集中在前向小角度范围内；

(2) 大气对激光传输的消光引起的变化远小于光束横向尺度  $D$  内的振幅的不均匀，即忽略传输方向上振幅变化二阶小量。

式(1-2)可以简化为

$$2ik \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 \varphi + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) \varphi + ik\alpha_i \varphi + \frac{2ik}{c_m} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0 \quad (1-3)$$

式中： $k = k_0 n_0$ ； $c_m = c/n_0$ ； $\nabla_{\perp}^2$ 为横向拉普拉斯算符， $\nabla_{\perp}^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ 。

当传输激光脉冲长于纳秒时，式(1-3)中最后一项也可以忽略，即

$$2ik \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 \varphi + k^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) \varphi + ik\alpha_i \varphi = 0 \quad (1-4)$$

以光束横向特征尺度(如高斯光束的  $1/e$  功率点半径)和传输距离  $L$ (或焦距)对近轴近似波动方程做无量纲化处理，可得

$$2i \frac{ka^2}{L} \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 \varphi + (ka)^2 \left( \frac{n^2}{n_0^2} - 1 \right) \varphi + ika^2 \alpha_i \varphi = 0 \quad (1-5)$$

式中： $ka^2/L = N_F$ ， $N_F$ 为光束菲涅耳数，是表征光束衍射特征的重要物理参数。

在后面章节可以看到，在光束菲涅耳数和光束横截面波像差无量纲参数一致的情况下，激光传输效果是等效的。

### 1.1.2 光波传输的几种近似求解方法

考虑到实际大气介质以及激光与大气相互作用的复杂性，一般要针对不同的物理问题采用一些近似模型和求解方法，以阐明和理解物理问题。实际上，一些近似求解结果在一定条件下也能满足半定量分析的需要。

#### 1. 几何光学近似

当大气介质的不均匀尺度  $l$  远大于光波波长  $\lambda$  时，可忽略衍射效应对光束相位变化的贡献，可得到几何光学光线和光强方程：

$$(\nabla S)^2 = k^2 n^2 \quad (1-6)$$

$$\nabla \ln I \cdot \nabla S + \nabla^2 S = -n\alpha_i \quad (1-7)$$

式中： $I$ 为光强， $I = A^2$ ； $S$ 为等相位面函数。

令  $z$  轴为激光的传输方向，且忽略轴向折射率起伏对振幅起伏的影响，在近轴近似下，由上述方程可以得到光强分布形式解：

$$\frac{I(r,z)}{I_0(r,z)} = e^{-\alpha z} e^{-\int_0^z (\nabla_{\perp}^2 + \frac{\nabla_{\perp}^2 L}{L}) \int_0^z \frac{\nabla_{\perp}^2 n}{n} dz' dz'} \quad (1-8)$$

上述方程可以通过小扰动以及迭代求解。将一阶小扰动解用于半定量分析激光大气传输非线性热晕效应,可方便明晰其物理图像。

令  $n = n_0 + n_1, S = S_0 + S_1, \ln A = \ln A_0 + \chi$  ( $\chi$  为对数振幅起伏),小扰动近似下(忽略扰动的二阶以上小量),可得相位和振幅的一阶近似解:

$$S_1(x,y) = k \int_0^L n_1(x,y,z) dz \quad (1-9)$$

$$\chi(x,y,L) = \frac{1}{2} [n_1(x,y,L) - n_1(x,y,0)] - \frac{1}{2} \int_0^L \int_0^z \nabla_{\perp}^2 n_1(x,y,z') dz' dz \quad (1-10)$$

需要指出的是,在激光大气传输研究中,几何光学近似使用范围是非常有限的。对于整束热晕效应,大气折射率不均匀尺度与光束尺寸相当,因此要求光束菲涅耳数  $N_F = ka^2/L \gg 1$ ,同时要求热镜面可等效于薄镜面。不过,利用几何光学近似分析对于热晕效应的物理图像和定标参数的理解是十分重要的。同样,对于大气湍流不均匀尺度  $l$ ,则要求扰动菲涅耳数  $N_F = kl^2/L \gg 1$ 。大气湍流是由不同尺度湍涡组成的,通常通过统计方法处理激光传输湍流效应问题。后面章节将看到,  $N_F = kl^2/L$  中的不均匀尺度  $l$  可由光束横向相干长度  $r_0$  估算。对于可见光实际湍流大气传输而言,光束横向相干长度一般为数厘米到十几厘米。可见,利用几何光学处理湍流效应的条件是十分有限的。但是,若结合上述小扰动近似求解相位起伏,进而利用惠更斯-菲涅耳原理求解振幅起伏,除强湍流效应外,均可以得到较为满意的近似结果。

## 2. 惠更斯-菲涅耳原理

惠更斯-菲涅耳原理是光的波动说早期解释波传播过程的一个假设,即光波传输中任一空间波阵面上的每一个点  $P_0(x_0, y_0)$  可以看作次级球面波源,其后传播方向的空间中一点的  $P(x, y)$  光波是这些次级球面波的叠加结果,如图 1-1 所示。

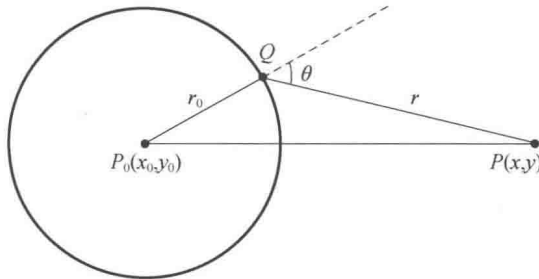


图 1-1 惠更斯-菲涅耳原理计算光场示意图

基尔霍夫基于标量场波动方程和格林定理严格地推导出了基尔霍夫衍射公式,即点  $P(x, y)$  的光场函数为

$$\varphi(x, y, z) = \frac{1}{i\lambda} \iint \varphi_0(x_0, y_0) \frac{e^{ikr}}{r} \cdot \frac{1 + \cos\theta}{2} dx_0 dy_0 \quad (1-11)$$

式中:  $r = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + z^2$ ;  $\theta$  为  $r$  与波阵面法线方向的夹角。

在近轴近似条件下, 则有

$$\varphi(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint \varphi_0(x_0, y_0) e^{\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} dx_0 dy_0 \quad (1-12)$$

可以看到, 式(1-12)是均匀介质传输条件下近轴近似波动方程的精确解。

对于不均匀介质传输情况, 利用几何光学近似将不均匀介质给予波带来的复振幅扰动近似为

$$\varphi_1(x_0, y_0) = e^{\chi + iS_1}$$

式中:  $\chi$ 、 $S_1$  分别为传输路径上的介质导致的对数振幅和相位扰动。

从而可以得到扩展的惠更斯-菲涅耳原理, 即式(1-12)变为

$$\varphi(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \iint \varphi_0(x_0, y_0) e^{\frac{ik}{2z}[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2]} \times e^{\chi + iS_1} dx_0 dy_0 \quad (1-13)$$

事实上, 扩展的惠更斯-菲涅耳原理是在薄镜面效应近似条件下近轴近似波动方程的解。式中, 对数振幅  $\chi$ 、相位扰动  $S_1$  通常利用几何光学近似求得。

### 3. 激光湍流大气传输雷托夫(Rytov)近似解

随机介质中波传输理论的研究, 最早应用的是几何光学近似法, 前面已作介绍, 但其适用范围有限。湍流介质中光传输具有两个主要特点: 一个是湍流介质的随机性, 这决定了必须用统计的方法来研究; 另一个是介质折射率的起伏微弱, 因此可采用微扰的方法来研究。Born 近似是最常用的微扰方法, 但它的应用范围十分有限。后来, Tatarskii<sup>[1]</sup> 采用 Rytov 近似, 并引入到现代湍流统计理论中获得了相当大的成功, 成为现今处理弱起伏条件下光波传输的经典理论, 而且理论结果得到了实验验证。随后的一些工作虽然采用了不同的方法, 但获得的结果基本相同, 因此本节简述 Tatarskii 的若干基本结果。

假设大气的电导率为 0, 磁导率为 1, 由于大气湍流内尺度  $l_0$  远大于激光波长  $\lambda$ , 则可以忽略偏振的影响, 麦克斯韦方程可简化为抛物线方程, 即

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 n^2 \mathbf{E} = 0 \quad (1-14)$$

若对电场  $\mathbf{E}$  的某一标量求解, 则式(1-14)中的矢量  $\mathbf{E}$  可由标量  $U$  来代替。则标量方程为

$$\nabla^2 U + k^2 n^2 U = 0 \quad (1-15)$$

利用 Rytov 近似, 可把电场逐级展开成一系列小量之和, 即

$$U = U_0 + U_1 + U_2 + \dots \quad (1-16)$$

从物理观点来看, 零级项  $U_0$  表示未扰动的波, 一阶项  $U_1$  描述单次散射, 其余为多次散射项。在弱起伏条件下, 只考虑前两项就已满足要求。

同样, 大气折射率可以写成

$$n = n_0 + n_1 \quad (1-17)$$

式中:  $|n_1| \ll n_0 \approx 1$ 。

将式(1-16)和式(1-17)代入式(1-15),并忽略二阶以上的小量,可得

$$\nabla^2 U_0 + k^2 U_0 = 0 \quad (1-18)$$

$$\nabla^2 U_1 + k^2 U_1 + 2k^2 n_1 U_0 = 0 \quad (1-19)$$

式(1-19)可以看成是关于  $U_1$  的含源  $-2k^2 n_1 U_0$  波动方程,其解可以表示为格林函数  $\frac{e^{ik|\mathbf{r}|}}{|\mathbf{r}|}$  与源的卷积,结果为

$$U_1(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \iiint_V \frac{e^{ik|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|}}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} [2k^2 n_1(\mathbf{r}') U_0(\mathbf{r}')] d^3 \mathbf{r}' \quad (1-20)$$

式中:  $V$  为散射体积。

$U_1$  可认为是散射体积  $V$  内位置  $\mathbf{r}'$  处散射体元产生的大量球面波的叠加。位置  $\mathbf{r}'$  处产生的球面波的强度与入射场  $U_0$  和点  $\mathbf{r}'$  处折射率扰动乘积成比例。

根据激光在大气中的湍流散射角较小并且主要是前向散射的特点,可以对式(1-20)作菲涅耳或旁轴近似<sup>[2]</sup>。假设  $\rho$  为传输方向垂直平面上的坐标,那么式(1-20)中的指数项可以简化为

$$|\mathbf{r}-\mathbf{r}'| \approx |z-z'| \left\{ 1 + |\rho-\rho'|^2 / [2(z-z')]^2 \right\} \quad (1-21)$$

分母中的  $|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|$  替换为  $|z-z'|$ ,应用到式(1-21)中,可得

$$U_1(\mathbf{r}) = \frac{k^2}{2\pi} \iiint_V \frac{e^{ik\left(|z-z'| + \frac{|\rho-\rho'|^2}{2|z-z'|}\right)}}{|z-z'|} n_1(\mathbf{r}') U_0(\mathbf{r}') d^3 \mathbf{r}' \quad (1-22)$$

另一方面,定义一个量  $\psi$  作为  $E$  的自然对数,即

$$\psi = \ln U \quad (1-23)$$

则式(1-15)可以转变成里卡蒂(Riccati)方程,即

$$\nabla^2 \psi(\mathbf{r}) + \nabla \psi(\mathbf{r}) \cdot \nabla \psi(\mathbf{r}) + k^2 n^2(\mathbf{r}) = 0 \quad (1-24)$$

式(1-24)的解也可以假设为

$$\psi = \psi_0 + \psi_1 + \psi_2 + \dots \quad (1-25)$$

保留式(1-25)右边的前两项,由式(1-23)可得

$$U = e^{\psi_0 + \psi_1}$$

$$U_0 = e^{\psi_0}$$

从而有

$$\frac{U}{U_0} = 1 + \frac{U_1}{U_0} = e^{\psi_1} \quad (1-26)$$

对式(1-26)两边取对数,可得

$$\psi_1 = \ln \left( 1 + \frac{U_1}{U_0} \right) \approx \frac{U_1}{U_0} \quad (1-27)$$

把式(1-22)代入式(1-27),可得