

光波在大气中的 传输与成像

张逸新 迟泽英 编著

国防工业出版社

光波在大气中的传输与成像

张逸新 迟泽英 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光波在大气中的传输与成像/张逸新,迟泽英编
著. —北京:国防工业出版社,1997.7

ISBN 7-118-01716-7

I. 光… II. ①张… ②迟… III. ①波导光学-成
像理论 ②大气光学-成像理论 IV. 0435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 03387 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 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 7 $\frac{7}{8}$ 203 千字

1997 年 7 月第 1 版 1997 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:13.20 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版,随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模		
主任委员	黄 宁		
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允
	曾 铎		
秘 书 长	刘琯德		
委 员	尤子平	朱森元	朵英贤
(按姓氏笔划为序)	刘 仁	何庆芝	何国伟
	何新贵	宋家树	张汝果
	范学虹	胡万忱	柯有安
	侯 迁	侯正明	莫梧生
	崔尔杰		

前 言

光波通过湍流大气传输和成像是诸如激光通信、航空测绘、卫星遥感、光学雷达、激光武器等领域湍流大气环境中运行的光学系统的设计和使用中必然要考虑的问题。这些领域的光学系统常会遇到光在湍流大气中传输时湍流对它产生的种种湍流效应,例如:大气闪烁、相位面的扰动、到达角的起伏、光束整体漂移、光束湍流扩展等。不同的效应对不同光学系统的影响各不相同,在一定条件下,有些效应能严重地阻碍系统的正常设计性能发挥。例如,光学系统的角分辨率一般由其入瞳的衍射极限限制。然而,各种大气成像光学系统的角分辨率则通常由小于光学系统入瞳的大气湍流相干长度决定,所以即使大孔径望远系统所获长期曝光像的角分辨率也仅能达到一个10cm孔径望远镜的角分辨率。另一方面,由于大气对激光的影响较显著,利用这种规律,又可使激光或其它光源成为一种大气探测的有用工具。因此,随着各类光学工程研制的进展,这个课题受到越来越广泛的注意,几十年来人们已经在这方面做了大量的研究工作,建立了不少有价值的理论模型。

光波在湍流大气中传输的理论是与大气湍流的机理密切相关的,由于大气湍流本身的基本机理至今尚不十分清楚,加之随机光波场的数学处理和相干性变化规律等的复杂性,光波大气传输的效应中还有许多问题尚未清楚,理论与实验测量相差甚远,新的效应不断发现。例如:目前尚无理论能确切地描述强闪烁区域闪烁孔径平滑的实验规律;当光波往复通过同一不均匀度的湍流大气二次成像时,像场伴随视线湍流大气中传输的光波所不具有的特殊相干性,而这些特殊的相干特性中存在着人们所期盼的湍流正效应。正因为此,目前湍流效应仍是一个十分活跃的研究

领域。

本书详细介绍了大气湍流对光波参数的影响规律和程度。书中简要介绍了湍流效应的基础理论,重点介绍了我们近十几年来的研究工作和国内外学者在本领域的研究新成果。全书共分八章。第一章介绍了湍流效应现象及其理论基础,其中包括大气湍流模型、研究湍流大气光传输效应的 Rytov 方法、Markov 方法、广义惠更斯—菲涅耳原理等理论。第二章论述了光束漂移和到达角起伏的几何光学和 Markov 近似理论模型,给出了在湍流大气的广义 Luneburg 透镜近似模型下的到达角起伏概率密度函数和光束漂移及到达角起伏的光强调制概率密度函数。第三章介绍了平均光强、视线和反射回波光束扩展规律的最近研究成果。第四章叙述了大气闪烁对数正态分布与阈值探测理论;由双随机场方法导出了大气闪烁 $K(n_1)$ 分布、地物散射回波闪烁分布、相位起伏分布等理论模型;以等概率密度椭圆分析方法导出了椭圆高斯散斑闪烁分布函数;分析了闪烁分布的孔径平滑效应;通过与实验对比分析了 K 分布、 I - K 分布、对数正态调制拉卡分布、对数正态调制负指数分布等理论的普适性。第五章论述了大气闪烁和孔径平滑问题,重点给出了强、弱闪烁起伏区孔径平滑因子的内插值和渐近理论。第六章简要地论述了大气的光折射理论。第七章从长曝光和短曝光、系统等晕性和照明光源相干性等角度,采用光学传递函数和能谱的方法讨论了大气成像系统的成像规律;在理论上用广义惠更斯—菲涅耳原理和信息理论证明了运行在弱起伏区的相干照明大气成像系存在着超分辨成像能力。第八章叙述了国内外学者在大气湍流对光学雷达测角精度、接收功率、测距精度和信噪比等影响方面的研究结论,介绍了诸如闪烁残余效应、后向散射放大、湍流大气中二次传输相位效应、强起伏区相干半径增加等大气湍流新效应。

本书在撰写过程中得到游明俊副教授和陈文建博士的热心帮助,对此表示衷心感谢。

由于作者学识有限,这方面内容涉及面又很广,我们衷心地希

望各位湍流效应研究老前辈和同行对本书中的错误和不当之处给予批评指正。

作 者

1996年10月

内 容 简 介

随着激光通信、光学雷达等光学工程的迅猛发展,光束大气传输的湍流效应研究已进入了一个新阶段。本书分别对诸如大气闪烁统计分布、闪烁探测孔径平滑和大气成像等湍流大气中光波传输效应研究领域的现状和最新进展作了分析和论述。

全书共分八章,重点介绍了作者近年来的研究工作和国内外学者在本领域所取得的主要研究新成果,内容包括:光束漂移和源像抖动、光束的湍流扩展、闪烁统计分布和闪烁分布孔径平滑效应、大气闪烁规律和闪烁孔径平滑因子、大气折射理论、大气成像超分辨率、大气湍流对光学雷达的测角精度、接收功率和测距精度影响分析以及包括闪烁残余效应等湍流新效应。书中给出了一些实际应用方面希望了解的十分有用的参数。

本书内容新颖、物理概念清晰、参考文献翔实,可供无线电通信、大气光学、军用目标特性和激光雷达等领域从事科学与应用研究,系统设计的科技工作者以及高等学校相应专业高年级本科生和研究生参考。

ISBN 7-118-01716-7/O · 128

定价:13.20 元

目 录

常用符号表	1
第一章 光在湍流大气中传输的理论基础	5
1.1 符号和定义	6
1.2 大气模型	8
1.3 湍流大气中光传输的理论模型	17
1.4 波结构函数的近场计算	42
1.5 推广到更长的传播路径——振幅和相位滤波器 函数	46
1.6 结构常数 C^2 平滑变化的效应	55
1.7 球面波的结构函数和相关函数	58
1.8 湍流内尺度的影响	59
1.9 行星大气的遥测	61
第二章 光束漂移和源像抖动	63
2.1 光束漂移	63
2.2 源像抖动	82
第三章 平均强度和光束扩展	98
3.1 光束扩展	98
3.2 反射光束的扩展	100
3.3 平均光强	103
3.4 空间相干性	106
3.5 斜程传输和反射回波的空间相干长度	108
第四章 闪烁与相位起伏的概率分布	110
4.1 对数正态分布	110
4.2 $K(n_1)$ 分布	113

4.3	椭圆高斯散斑闪烁分布	119
4.4	闪烁分布的孔径平滑	123
4.5	反射回波闪烁分布	125
4.6	相位起伏分布	129
4.7	阈值探测	131
第五章	强度起伏	146
5.1	弱起伏大气闪烁	146
5.2	强起伏大气闪烁	149
5.3	反射效应	153
5.4	孔径平滑效应	154
5.5	斜程孔径平滑因子	165
5.6	闪烁频谱	165
第六章	大气的光折射效应	167
6.1	大气光路方程	167
6.2	折射球对称大气光线追迹	168
第七章	大气成像	176
7.1	长曝光像	176
7.2	用波结构函数表示长曝光 <i>OTF</i>	177
7.3	大气相干直径 τ_0	182
7.4	短曝光 <i>OTF</i>	184
7.5	相干光照明成像	199
7.6	弱起伏区的超分辨率	204
7.7	湍流大气中二次成像	207
7.8	分辨率的信息理论	210
第八章	大气湍流对光学雷达的影响与大气湍流新效应	216
8.1	大气湍流对光学雷达的影响	216
8.2	大气湍流新效应	223
	参考文献	232

常用符号表

$n(r, t, \lambda)$	大气折射率
$\Gamma_n(r_1, r_2)$	折射率起伏 n_1 的空间自相关函数
$\Phi_n(\kappa)$	折射率起伏 n_1 的三维功率谱
$F_n(\kappa_x, \kappa_y, z)$	折射率起伏 n_1 的二维功率谱
$B_n(\rho, z)$	折射率起伏 n_1 的二维自相关函数
Re	Reynolds 数
$D_n(r)$	折射率起伏 n_1 结构函数
C_n^2	折射率起伏 n_1 结构常数
L_0, l_0	分别为湍流外尺度和内尺度
κ	三维空间波数矢量
$r = (x, y, z)$	三维矢量
$\rho = (x, y)$	二维平面矢量
κ_m	与内尺度 l_0 对应的空间波数
κ_0	与外尺度 L_0 对应的空间波数
h	离地高度
u, V	分别为大气风速和垂直传输光路的垂直风速
ψ, ψ_1	分别为复相位和复相位起伏
χ	对数振幅起伏
S_ϕ	相位起伏
σ_1^2	对数强度方差
σ_2^2	对数振幅方差
Γ_{ψ}	复振幅 ψ 的互相关函数
Γ_{ψ^4}	复振幅四阶矩

C_x, C_ϕ, C_x	分别为对数振幅,相位的(自)协方差和对数振幅与相位的协方差
D_ϕ, D_ϕ, D_x	分别为波结构函数,相位结构函数和对数振幅结构函数
$\mathcal{H}_x, \mathcal{H}_\phi$	分别为对数振幅和相位的滤波器函数
H_x, H_ϕ	对数振幅和相位的二维传递函数
$w(z')$	光束束腰
α_0	发射端光束束径
$\langle \rho_c^2 \rangle = \sigma_{\rho_c}^2$	光束束心位移方差(光束漂移)
$P(\rho_c)$	光束漂移概率
$\mathcal{P}_\rho(\bar{P})$	光束漂移导致积分光强起伏概率分布
$\langle \alpha_c^2 \rangle$	光束到达角起伏方差
D_1	平面波结构函数
\mathcal{F}	光波波阵面曲率半径
γ	天顶角(距)
ρ_0	球面波相干长度
D_r	反射器直径
${}_2F_1(\theta, b, C; x)$	超几何函数
$W_\alpha(\omega)$	到达角起伏时间频谱
r_0	Fried 参量
$P(\theta, z)$	到达角起伏概率分布
$\mathcal{P}_\theta(\bar{P})$	到达角起伏导致积分光强起伏概率分布
α_L, α_S	分别是长期光束扩展和短期光束扩展
$\langle I(\rho, z) \rangle$	平均光强
ρ_r	平面波相干长度
$M(\rho, z)$	互相干函数
M_S	双源球面波互相干函数
$P(I)$	闪烁概率密度函数
$P(\psi)$	相位起伏概率分布
${}_1F_1(a, b, x)$	合流超几何函数

e	椭圆度参量
${}_1\phi_1(a, b, x)$	Kummer 函数
FAR	误码率
TNR	阈值噪声比
P_d	探测概率
SNR	信噪比
b_i	光强相关函数
C_i	光强协方差
θ_0	等晕角
σ_i^2	光强起伏方差
$\sqrt{\lambda Z}$	第一 Fresnel 区半径
G	孔径平滑因子
$W_I(\omega)$	闪烁时间频谱
$W_r(\omega)$	对数振幅时间频谱
β	大气蒙气差
\mathcal{K}	大气光路曲率
Δ	地平抬高
ΔS	大气折射导致的测距误差
$h(\rho, \rho')$	点扩展函数
$\mathcal{H}(v_s, v_r)$	光学传递函数
ρ_0	大气湍流相干长度
N_{inf}	信息自由度
$\Phi_{m,n}$	圆椭球波函数
\mathcal{N}	信息量
$F_0(\rho_0)$	短期曝光信噪比降低因子
$F_1(\rho_0)$	长期曝光信噪比降低因子

第一章 光在湍流大气中传输的 理论基础

人类活动和太阳辐照等因素所产生的大气微小温度随机变化 ($<1^{\circ}\text{C}$) 将导致大气风速的随机变化, 从而形成大气的湍流运动。大气温度的随机变化产生大气密度的随机变化, 从而导致大气折射率的随机变化。这些变化是量级为 10^{-6} 的可计算量。这些变化的累积效应导致大气折射率廓形的明显不均匀性, 从而在湍流大气中传输光束的波前也将作随机起伏, 由此引起光束抖动、强度起伏(闪烁)、光束扩展和像点抖动等一系列光传输的大气湍流效应。

大气折射率微小变化的作用类似于处于大气中的小“透镜”, 它们使传输光束出现聚焦、偏折等现象, 从而导致光闪烁和光像抖动等效应。这些“透镜”的大小近似于湍流旋涡的尺度。薄透镜模型是一个好的近似, 但是由于大气是连续的, 所以这些模型是不精确的。

大气湍流导致的最常见且明显的光传输效应是光闪烁与光像抖动。光闪烁是由同一光源发出的通过略微不同路径的光线之间随机干涉造成的; 光像位置抖动是由于从光源发出光线的平均到达角受到光线传输路径上折射率随机变化造成的。第三种效应是湍流导致光束扩展, 一般说来, 湍流引起的高阶像差导致光束扩展。

有关湍流大气中光的视线传播这一论题的文献已非常之多。其中, 最重要而且最有影响的无疑是 Tatarskii 的两本著作^{[1][2]}, 它们是大多数后继工作的基础。Tatarskii 的工作对这一领域的研究工作有着十分深刻的影响, 以致有关这个论题的大多数著作都沿