

影响 Fizeau 干涉仪测风激光雷达 测量精度因素分析

沈法华¹, 孙东松², 陈敏¹, 夏海云¹, 董晶晶¹, 王邦新², 钟志庆², 周小林²

(1 苏州大学物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 基于 Fizeau 干涉仪测风激光雷达是利用线列探测器来测量 Fizeau 条纹的中心移动, 以确定由于多普勒效应产生的激光频率变化的。系统噪声及激光本身的发射频率的线宽、光束发散角、发射光及回波信号光在通过干涉仪之前的光强不均匀性, 以及探测器的内部结构等因素都会影响到风速的测量精度。本文对这些因素做了较为详细的分析, 为提高系统测量精度提供了参考。

关键词: 精度; 均匀性; 盲区; 发散角; 带宽

中图分类号: TN958.98

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2006)01-0053-06

Analysis on the Factors Influencing Measure Precision of Wind Lidar Based on Fizeau Interferometer

SHEN Fa-hua¹, SUN Dong-song², CHEN Min¹, XIA Hai-yun¹, DONG Jing-jing¹,
WANG Bang-xin², ZHONG Zhi-qing², ZHOU Xiao-lin²

(1 Department of Physics, Soochow University, Suzhou 215006, China;

2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Heifei 230031, China)

Abstract: Wind lidar based on Fizeau interferometer detects displacement of fringes of the Fizeau due to Doppler shift by a linear detector. The measurement precision may be influenced by the system noise, the linewidth of the laser, the divergence angle of the beam, the spatial variations in intensity of the incident and scattering light before they come to the interferometer and the inner structure of the detector. These factors are analyzed to provide suggestion on how to improve the measure precision.

Key words: precision; homogeneity; dead space; divergence angle; linewidth

1 引言

大气风场的测量对大气动力学和全球天气运动, 以及对能量、水、气溶胶、化学和其它空气物质圈的深入了解具有重要的意义。高精度的大气风场数据可以提高分析全球气候变化的能力。为了深入

探索气候变化和提高数值天气预报的能力, 迫切需要可靠的、精确的风场分布数据。目前较为普遍的是采用直接接收激光雷达探测风速, 它主要采用边缘技术^[1~3]和条纹技术^[4~9]两种技术。边缘技术是利用窄带滤波器如 F-P 标准具将频率的变化转

收稿日期: 2005-11-07; 修改日期: 2006-04-05

基金项目: 中国科学院百人计划资助和中国科学院知识创新工程资助项目 (CX0201)

E-mail: sfh81914@tom.com

换为能量信号大小的变化来测量多普勒频移；而条纹技术则是利用干涉条纹的重心位置变化来探测频率的变化。传统的条纹技术是利用 F-P 标准具产生的环状条纹，这不利于条纹重心位置的确定。解决的办法是利用复杂的接收光路将环状条纹转变为线条纹^[8,9]，或者利用与环状条纹专门匹配的环状成像探测器，但这种环状成像探测器量子效率一般不高^[4~7]。Fizeau 干涉仪产生的是线条纹，利用它来代替 F-P 标准具可以解决上述问题。由于条纹技术是利用线列探测器的离散的信号来分析条纹（光强分布）的重心位置，所以信号噪声和涉及条纹形状的激光本身发射频率的线宽、光束发散角、发射光、回波信号光在通过干涉仪之前的光强不均匀性和涉及到信号接收的探测器结构对测量精度有不同程度的影响。为了提高系统测量的精度，需对这些因素加以分析。

2 系统结构

基于 Fizeau 干涉仪的测风激光雷达系统结构如图 1。

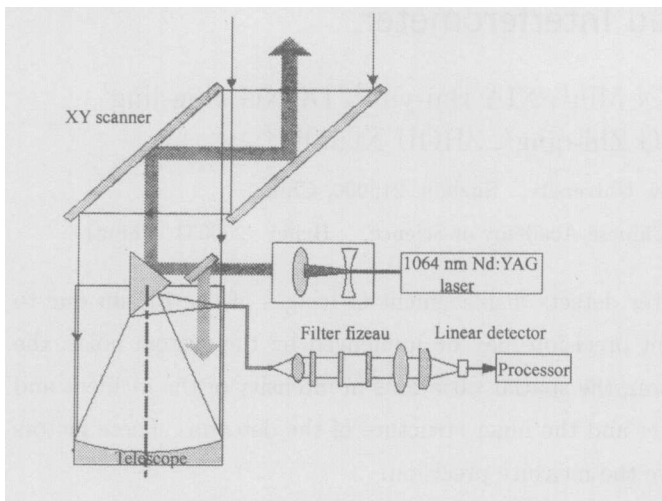


图 1 直接探测多普勒测风激光雷达系统示意图

Fig.1 Diagram of direct detection Doppler lidar for wind measurement

发射机可采用种子注入锁定 Nd:YAG 激光器，波长为 1064 nm 的激光束经过扩束镜通过扫描反射镜指向大气探测区域。发射激光分出一部分作为参考光，消除短期激光频率漂移以及环境对干涉仪的影响。大气散射信号经过扫描和望远镜接收系统耦合到光纤一端，光纤的另一端输出光束经过组合透镜耦合到 Fizeau 干涉仪。利用组合光路将像

会聚到 16 元线列探测器。探测器输出信号经过采集卡送入计算机进行数据处理。发射的激光束被大气中的气溶胶粒子和大气分子散射，虽然其散射信号的频谱宽度不同，但由于风的作用或大气粒子的运动都会产生相对于发射激光频率的多普勒频移。其中一小部分散射光沿发射方向返回激光雷达接收望远镜。当我们激光测量对象有一径向速度 V_r ，则激光频率发生变化为 $\Delta\nu = 2V_r/\lambda$ ，从而引起条纹重心的移动。

表 1 直接探测激光雷达系统参数

Table 1 Parameters for direct detection lidar

参 数	
扫描角 ϕ	45°
垂直分辨率 Δr	30 m
有效天线口径	300 mm
接收视场 FOV	0.15 mrad
工作波长 λ_0	1064 nm
激光单脉冲能量 E_0	170 mJ
脉冲重复频率 ε	50 Hz
激光线宽 $\delta\nu$	80 MHz
除干涉仪光学效率 η_0	5%
CCD 量子效率 η	80%
CCD 通道数 n_z	16
成像范围 $\Delta\nu_z$	1 FSR
Fizeau 通光孔径 Δy	60 mm
Fizeau 平板夹角 α	8.87 μ rad
FSR	500 MHz
反射精细度	9.94
干涉仪平板缺陷 Δd_D	6 nm
照射角 θ	0
垂直高度	3 km
积分时间 Δt	5 s
测风动态范围	± 30 m/s

3 测量风速的基本原理

单色平行光入射到 Fizeau 干涉仪时，在贴近干涉仪平板后表面透过率函数为

$$T = (1 - A - R)^2 \left| \sum_{n=0}^N R^n e^{i\frac{2\pi}{\lambda} \cdot 2\nu L P_n} \right|^2$$

其中

$$P_n = \frac{\sin \theta - \sin(\theta - 2n\alpha)}{2 \tan \alpha} \quad (1)$$

A 为光束在通过干涉仪的光损耗; R 为干涉仪对应波长的反射率; N 为光在两平板之间的反射次数; α 为两干涉平板的夹角; θ 为入射光线在后一块平板上入射光照射角; L 为干涉仪平板之间的间隔。

实际的干涉仪存在缺陷, 假定缺陷为缺陷因子

Δd_D 的高斯分布; 而大气气溶胶后向散射光的频谱形式与发射激光的频谱近似相同, 可作为高斯分布处理。则最终的透过率 T_f 为 (1) 式先对缺陷平均再与高斯谱卷积。探测器第 j 元的透过率为最终的透过率对第 j 元对应的 ΔL 范围积分求平均。考虑到探测器盲区 (探测器元与元之间的非光敏区) 的存在, 得

$$T_f(j) = (1 - A - R)^2 \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N R^{n+m} \cos \left[2\pi(P_n - P_m) \left(\frac{\nu_0}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{\Delta\nu}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} + \frac{j - 1/2 - n_z/2}{n_z - K} \cdot \frac{\Delta\nu_z}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right) \right] \cdot \exp \left(-\frac{4\pi^2(P_n - P_m)^2 \Delta d_D^2}{\lambda_0^2} \right) \cdot \exp \left(-\left[\frac{\pi(P_n - P_m)\Delta\nu_l}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right]^2 \right) \cdot \sin c \left[\frac{P_n - P_m}{n_z - K} \cdot \frac{\Delta\nu_z \cdot (1 - K)}{\Delta\nu_{\text{FSR}}} \right] \right\} \quad (2)$$

式中 $\Delta\nu_l = \delta\nu/\sqrt{4\ln 2}(\delta\nu$ 为激光发射谱宽); 自由谱范围 $\Delta\nu_{\text{FSR}} = c/(2L_0)$, L_0 为 Fizeau 干涉仪中心腔长, 其对应频率为 ν_0 ; $\Delta\nu$ 为多普勒频移量; n_z 为探测器的元数; $\Delta\nu_z$ 为探测器测量总的频率范围; K 为探测器的盲区 (dead space) 和盲区加每个元有效区 (effective space) 的比例, 如 Hamamatsu 公司的 R5900U-L16 系列产品为 0.2, S4111 系列为 0.1。

则探测器第 j 元接收的气溶胶后向散射光子数为

$$N_A(j) = \frac{T_f(j) \cdot (1 - K)}{n_z - K} \cdot \varepsilon \Delta t \frac{E_0 S}{h\nu r^2} \eta_0 \eta \beta_a(r) \cdot \Delta r \cos \phi \exp[-2 \sec \phi \int_0^r \alpha(r) dr] \quad (3)$$

式中 S 为接收望远系统的面积; r 为垂直高度; $\beta_a(r)$ 为 r 高度气溶胶后向散射系数; $\alpha(r)$ 为大气总的消光系数, 其余参数见表 1。将 (2) 式的 $\Delta\nu_l$ 换成 $(\Delta\nu_l^2 + \Delta\nu_M^2)^{1/2}$ ($\Delta\nu_M$ 在高度 3 km 处约为 0.738 GHz) 代入 (3) 式, 再将 (3) 式的 β_a 换为 r 高度分子后向散射系数 β_m , 即得第 j 通道分子后向散射信号 $N_M(j)$ 。实际探测器第 j 元接收到的总的光子数为: $N(j) = N_A(j) + N_M(j)$, 每个元的背景光子数和探测器暗计数均很小本文不考虑。由于瑞利散射谱的宽度远大于米散射谱的宽度, 在所研究的多普勒频移的范围里, 将其散射信号看作噪声处理。

多普勒频移前后条纹中心发生移动。如果频移前后条纹都能被探测器完全接收到, 则条纹的重心和中心重合, 可通过重心的变化来确定多普勒频移及径向风速。计算公式为

$$V_r = (j_0 - j_{v_r}) \cdot V_c = \left(\frac{\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j(0)}{\sum_{j=1}^{n_z} N_j(0)} - \frac{\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j(V_r)}{\sum_{j=1}^{n_z} N_j(V_r)} \right) \cdot V_c \quad (4)$$

其中: j_0 和 j_{v_r} 分别为参考谱重心位置和径向风速 V_r 时的重心位置; 对基于气溶胶测风激光雷达, 扣除分子回波信号后有 $N(j) = N_A(j)$; V_c 为探测器一个元对应的风速大小, 本文为 16.625 m/s。

4 影响误差的因素分析

4.1 噪声产生的系统误差

如果条纹重心的参考位置的确定无偏差, 只考虑频移后条纹重心位置确定产生的误差。由于系统噪声的影响产生的系统误差为

$$(\delta j_{v_r})^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_z} j^2 \cdot (\delta N_j)^2}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j \right)^2}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j\right)^2 \left(\sum_{j=1}^{n_z} (\delta N_j)^2\right)}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j\right)^4} \\
 & 2 \cdot \frac{\left(\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot N_j\right) \left(\sum_{j=1}^{n_z} j \cdot (\delta N_j)^2\right)}{\left(\sum_{j=1}^{n_z} N_j\right)^3} \quad (5)
 \end{aligned}$$

其中: $\delta N_j = \sqrt{N_A(j) + N_M(j)}$ (假设光子分布为泊松分布)。

则系统径向风速误差为

$$\delta_{v_r} = \delta j_{v_r} \cdot V_c \quad (6)$$

图 2 实线为根据表 1 参数, 采用标准大气模型模拟计算结果, 给出了系统风速误差。在 0~3 km 内, 风速误差小于 0.25 m/s。图中同时给出了在不同累积脉冲数的情况下系统的风速误差。可以看出累积脉冲数越多, 系统信噪比越高, 系统测量的风速误差就越小。

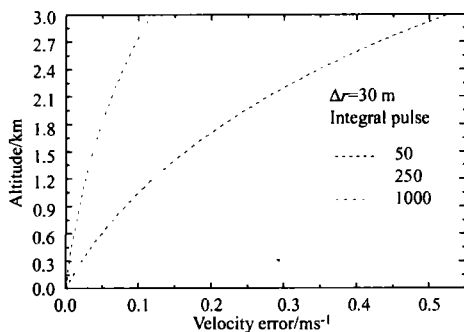


图 2 对于不同的激光脉冲累积数, 径向风速误差随垂直高度的变化

Fig.2 Error of radial wind velocity vs vertical height for different integral pulse

4.2 线列探测器的盲区产生的测量误差

由于探测器盲区的存在使得探测到的信号损失了一部分, K 越大, 损失的信号就越多, 系统的信噪比越低, 系统测量误差就越大。如图 3 所示: $K = 0.1$ 时, 在 3 km 处引起的风速误差约 0.012 m/s, 在 6 km 处约 0.072 m/s; $K=0.5$ 时, 在 3 km 处引起的风速误差约 0.1 m/s, 在 6 km 处约 0.55 m/s。

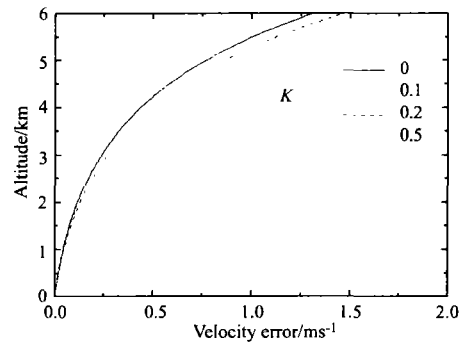


图 3 不同 K 时径向风速误差随高度的变化

Fig.3 Error of radial wind velocity vs vertical height for different K

4.3 激光带宽及光束发散角对测量精度的影响

发射激光带宽越窄越好, 测量精度越高。由图 4 看出在 3 km 处, 激光带宽由 80 MHz 增加到 200 MHz 时, 风速误差由 0.16 m/s 增大到 0.34 m/s, 增大了一倍多, 所以激光带宽对风速测量的精度影响较大。只考虑发散角沿楔角方向对条纹的影响, 与之垂直方向的光束发散对条纹带宽及中心位置没有实质影响。如果入射到 Fizeau 干涉仪的最大发散角为 Θ (半角), 入射倾角 $\theta = 0$ 则

$$T_{f\Theta} = \frac{1}{2\Theta} \int_{-\Theta}^{\Theta} T_f d\theta \quad (7)$$

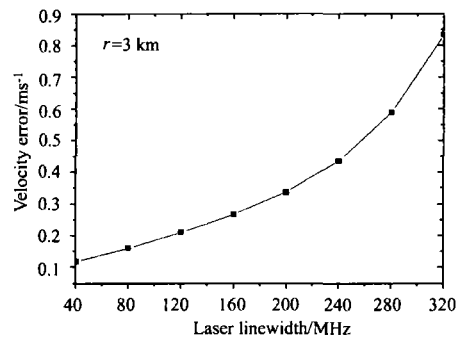


图 4 径向风速误差和发射激光带宽之间的关系

Fig.4 Error of radial wind velocity vs laser linewidth

由图 5 可以看出, 随着光束发散角的增大, 条纹的重心将会发生偏移, 透过率峰值降低, 条纹带宽变大。原理上条纹的重心初始的偏移对风速的测量没有影响, 因为风速计算中需要的是条纹重心的相对位置变化。但透过率峰值降低将会导致探测器接收到的信号变弱, 系统信噪比下降, 测量误差变大; 同时条纹带宽增大, 也将导致风速测量误差增

大。故激光的光束发散角不能太大, 一般至少控制在 1 mrad 以内。

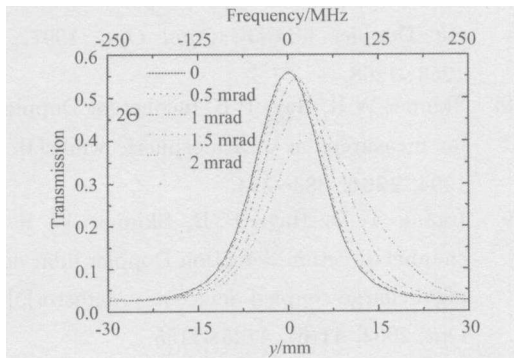


图 5 干涉仪频谱与光束发散角关系

Fig.5 Interferometer spectrum for varied beam divergence

4.4 信号光强分布的不均匀性产生的影响

脉冲累积数越多, 激光发射脉冲光强分布的随机不均匀性对测量精度影响越小。但是实际的光强不均匀性很可能不是完全随机的。同时还存在回波信号的光强空间分布不均匀, 这主要是由于散射粒子分布的不均匀造成的。这种光强空间分布不均匀性将会产生很大的风速测量系统误差^[6]。可以在图 1 接收望远镜后面加一小直径的玻璃棒^[5]或一捆光纤^[6], 可使光强均匀以减小这种影响。本文将接收光路加以改进以消除光强不均匀性造成的误差。它将传统的由测量光强的分布来确定条纹的重心变为测量透过率曲线来确定条纹的重心, 从而克服了光强的不均匀对测量结果的影响。光路图如图 6。

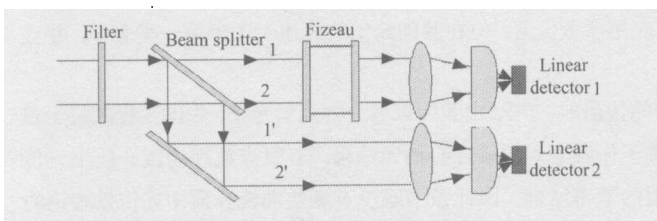


图 6 改进的接收系统光学结构示意图

Fig.6 Optical schematic of improved receiving system

图中两路会聚光路的组合透镜和探测器是一样的。分束片透过 80% 的光, 经过 Fizeau 干涉仪和汇聚光路进入探测器 1, 反射 20% 的光经过反射镜和汇聚光路进入探测器 2。假如光强在总的探测器测量范围内是不均匀的, 而在探测器每个元里光强变化很小, 近似可看作均匀。则进入探测器 1

每个元接收到的气溶胶后向散射光子数为

$$N_{A1}(j) = a(j) \cdot T_f(j) \cdot C \cdot 80\% \quad (8)$$

其中, $a(j)$ 表示光强不均匀函数; C 为 (3) 式中 j 无关的量。

进入探测器 2 每个元接收到的气溶胶后向散射光子数为

$$N_{A2}(j) = a(j) \cdot C \cdot 20\% \quad (9)$$

则由 (6)、(7) 两式得

$$T_f(j) = \frac{N_{A1}(j)}{4N_{A2}(j)} \quad (10)$$

这样我们就将与光强不均匀性有关的量 $a(j)$ 消掉了, 从理论上消除了光强的不均匀对测量结果的影响。

5 结 论

基于 Fizeau 干涉仪测风激光雷达的测量精度受到一系列因素的影响。在设定的系统参数下, 利用标准大气模型计算, 在 3 km 处系统噪声将产生约 0.25 m/s 的径向风速误差。通过增加激光脉冲累积数可减小误差, 但同时测量的时间分辨率下降。探测器盲区引起的测量误差很小。 $K = 0.1$ 时, 在 3 km 处只产生 0.012 m/s 的误差。激光带宽对测量精度的影响较大, 带宽从 80 MHz 增加到 200 MHz 时, 风速误差增大了一倍多。光束发散角在很小时 (<0.5 mrad), 几乎不会引起测量误差的增大; 但发散角较大时会影响测量精度。采用传统的测量光强的重心来反演风速时, 信号光强的不均匀性对测量精度的影响很大。通过测量透过率来测定条纹重心的变化, 从原理上可以消除光强的不均匀产生的测量误差。

参考文献:

- [1] Korb C L, Gentry B M, Li S X F. Edge technique Doppler lidar wind measurements with high vertical resolution[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(24): 5976~5983.
- [2] Liu Zh Sh, Wu D, et al. Low-altitude atmospheric wind measurement from the combined Mie and Rayleigh backscattering by Doppler lidar with an iodine filter[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(33): 7079~7086.

- [3] Flesia C, Korb C L. Theory of the double-edge molecular technique for Doppler lidar wind measurement[J]. *Appl Opt*, 1999, **38**(3): 432~440.
- [4] Killeen T L, Kennedy B C, Hays P B, et al. Image plane detector for the dynamics explorer Fabry-Perot interferometer[J]. *Appl Opt*, 1983, **22**(22): 3503~3513.
- [5] Abreu V J, Barnes J E, Hays P B. Observations of winds with an incoherent lidar detector[J]. *Appl Opt*, 1992, **31**(22): 4509~4514.
- [6] Fischer K W, Abreu V J, Skinner W R, et al. Visible wavelength Doppler lidar for measurement of wind and aerosol profiles during day and night[J]. *Optical Engineering*, 1995, **34**(2): 499~511.
- [7] McGill M J, Skinner W R, Irgang T D. Analysis techniques for the recovery of winds and backscatter coefficients from a multiple-channel incoherent Doppler lidar[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(6): 1253~1268.
- [8] Skinner W R, Hays P B. Incoherent Doppler lidar for measurement of atmospheric winds[J]. *SPIE*, 1994, **2266**: 383~394.
- [9] Irgang T D, Hays P B, Skinner W R. Two-channel direction-detection Doppler lidar employing a charge-coupled device as a detector[J]. *Appl Opt*, 2002, **41**(6): 1145~1155.

作者简介: 沈法华 (1981-), 男, 苏州大学物理科学与技术学院在读硕士, 主要从事多普勒测风激光雷达研究。

* * * * *

书讯

《光在湍流大气中的传播》简介

现代大气光学是研究光波在地球大气中的传播规律及其对各种光电系统的影响的交叉学科。作为一种较为新兴的学科, 无论是对刚刚从事这门学科的专业研究人员, 特别是研究生, 还是相关应用学科的研究人员, 都需要一本合适的参考书。

光波在随机介质中传播的著作大致可分为四类: 第一类是系统的理论著作, 对随机介质与波传播理论进行了详细的分析与介绍。第二类是论文集, 包括 SPIE 出版的系列会议文集, 反映了杰出研究者各自的研究成果, 具有重要的参考价值; 但各部分之间在物理概念、研究思路等方面缺乏有机的协调与连贯性。第三类是一些学者的专题研究成果, 深入并具有独到的研究方法。第四类是对现有研究结果的汇编, 具有重要的应用参考价值, 但在基础知识的表述上逊于第一类著作, 并且没有明确体现出前沿研究方向。

安徽科技出版社出版了饶瑞中撰写的《光在湍流大气中的传播》一书, 由我国著名大气光学专家、中国工程院院士龚知本作序。该书既吸收了本研究领域相关的研究成果, 也反映了作者本人的研究心得和结果, 着眼点放在湍流介质中光传播的物理概念的掌握、关键物理问题的把握、理论与工程应用的紧密结合。因此该书既没有涵盖湍流介质中光传播理论的方方面面, 在所涉及到的部分也有所侧重, 并提出一些大气光学研究的前沿问题。该书第一到三章阐述湍流大气光学的概貌、传播光学与湍流统计理论的基础知识, 重点放在物理概念的阐述, 帮助读者建立起随机介质中光传播的物理图像, 了解各种处理方法的适用范围, 明白研究的目的。第四章和第五章介绍湍流介质中光传播的数值分析方法和各种解析方法。第六章主要分析光传播过程中遇到的相干性退化和相位起伏以及光传播的相位校正问题, 以空间相干长度、到达角起伏和光场中的相位奇点问题作为研究的重点。第七章分析光传播过程中遇到的光强起伏问题。从起伏强度、概率分布特性、非线性特征诸方面进行了较仔细的考察。第八章专门对光传播过程中遇到的光强、相位、到达角等主要物理量的频谱特征进行了考察。第九章讨论了激光束在湍流大气中的传播的主要效应(包括光斑扩展、光束漂移等)、光斑特征以及湍流大气中光学成像系统的性能。第十章介绍和探讨了大气湍流光学参数的性质和这些参数测量的光学方法。