

文章编号: 1001-4322(2005)10-1461-04

同步测量大气湍流折射率结构常数和内尺度的光学方法

朱文越, 赵柱灵, 马晓珊, 饶瑞中

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 基于不同波长的光闪烁, 采用修正的大气湍流 Hill 谱模型, 提出了一种同时反演大气湍流内尺度及折射率结构常数的方法。假定内尺度在某个范围内取值, 对于不同波长的闪烁指数, 如果当内尺度取某一定值时, 由光传输理论计算的 $C_n^2(k_1, \dots)$ 和 $C_n^2(k_2, \dots)$ 相等, 反演成功。根据此原理设计了三波长闪烁计并在某地进行了外场测量。近地面大气湍流的内尺度一般在 2 ~ 10 mm 之间, 且随折射率结构常数 (其量级为 $10^{-16} \sim 10^{-13}$) 的变化而变化, 两者之间存在一定的正相关; 任意两波长组合进行反演得到的内尺度 (或折射率结构常数) 值具有自洽性, 其相关系数的最小值为 0.81, 因此证明了该方法的可行性。

关键词: 内尺度; 折射率结构常数; 修正 Hill 谱; 光闪烁; 大气湍流

中图分类号: P427.1 **文献标识码:** A

在研究光波大气传输问题时, 大气湍流的折射率结构常数 C_n^2 和内尺度 l_0 是两个关键参量, 目前已有很多光学测量方法。Livingston 最早提出利用同一传播方向的、不同距离处测量的闪烁方差求内尺度^[1], Hill, Frehlich 和 Ochs 等人提出了利用双口径 (或双波长) 相关闪烁、空间滤波技术、光强空间相关性等多种探测内尺度的方法^[2~6], Consortini 等人提出利用两平行细光束位移的相关函数性质以及通过同步测量到达角起伏与光强起伏来求出内尺度的方法^[7,8]。大气折射率结构常数的光学测量手段主要利用振幅起伏的闪烁法和相位起伏的到达角法^[9,10]。上述诸多方法从不同角度或原理出发, 实现了大气折射率结构常数和内尺度的测量, 其结果在大气光传输、边界层研究等领域得到了广泛应用。

本文基于 L. C. Andrews 等人提出的大气湍流的修正 Hill 谱模型^[11], 根据同光路上不同波长光强起伏的闪烁指数, 采用双波长直接差分技术, 提出了一种能够同时反演大气湍流折射率结构常数和内尺度新方法, 并设计了一个简单的便携式三波长闪烁计, 实际外场测量结果验证了反演方法的可行性。

1 测量原理

在光闪烁研究中, 实际测量与数值模拟的结果依赖于假定的折射率起伏的空间功率谱模型, 在忽略外尺度 (即假设外尺度为无穷大) 的条件下, 湍流谱一般可写为

$$\Phi_n(k) = 0.033 C_n^2 k^{-11/3} f(l_0) \quad (1)$$

式中: C_n^2 是大气折射率结构常数; $k = 2\pi/\lambda$ 是真空中波数; $f(l_0)$ 是描述内尺度效应的因子。如果湍流内尺度 l_0 为零, 即为 Kolmogorov 谱, 则 $f(l_0) = 1$ 。在考虑小尺度起伏时, 理论研究者广泛使用的是 Tatarskii 谱, $f(l_0) = \exp[-(l_0/5.92)^2]$ 。Hill 提出了一个普适的谱模型, 它是方程

$$\frac{d}{dk} \left\{ K^{14/3} \left[(13.9K(0.135l_0))^{3.8} + 1 \right]^{-0.175} \frac{d}{dk} \Phi_n(K) \right\} = 1.41K^4 (0.135l_0)^{4/3} \Phi_n(K) \quad (2)$$

的解, 其中 K 表示空间波数, $\Phi_n(K)$ 为湍流谱, 由于 Hill 谱没有解析解, L. C. Andrews 等人将其拟合为^[11]

$$f(l_0) = \exp\left(-\frac{l_0^2}{k_l^2}\right) \left[1 + 1.802 \left(\frac{l_0}{k_l}\right) - 0.254 \left(\frac{l_0}{k_l}\right)^{7/6} \right], \quad k_l = 3.3/l_0 \quad (3)$$

该模型称之为修正的 Hill 谱, 在整个谱范围内与 Hill 谱的最大差别不超过 6%, 一般在 1% ~ 2%^[12]。

根据 Tatarskii 的光传输理论, 球面波在距离发射端 L 处的振幅起伏可以由光强起伏的归一化方差即闪烁指数来表示

$$s^2(L) = 8^{-2} k^2 L^1 \int_0^L \int_0^L \Phi_n \left\{ 1 - \cos \left[\frac{L^2}{k} (1 - \dots) \right] \right\} d d \quad (4)$$

* 收稿日期: 2005-01-20; 修订日期: 2005-06-17
基金项目: 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 朱文越 (1976—), 男, 博士研究生, 主要从事大气光传输的湍流效应研究; E-mail: wyzhu@aoibn.ac.cn

式中: z/L 为光传输距离 z 的积分因子。采用修正的 Hill 谱模型,对 (4) 式积分可得^[13]

$$I_i^2(L) = 3.86 \text{ Rybov} \left\{ 0.4 \left[1 + \frac{9}{Q_i^2} \right]^{11/12} \left[\sin \left(\frac{11}{6} \arctan \frac{Q_i}{3} \right) + \frac{2.610}{(9 + Q_i^2)^{1/4}} \sin \left(\frac{4}{3} \arctan \frac{Q_i}{3} \right) - \frac{0.518}{(9 + Q_i^2)^{7/24}} \sin \left(\frac{5}{4} \arctan \frac{Q_i}{3} \right) \right] - 3.50 Q_i^{-5/6} \right\} \quad (5)$$

其中 $Q_i = L k_i^2 / k = 10.89 L / k b^2$, $\text{Rybov} = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ (6)

求解式 (5), 得到大气折射率结构常数的反演公式

$$C_n^2 = 0.2106 \times I_i^2 g(k, L, b) \quad (7)$$

其中 $g(k, L, b) = \left\{ k^{7/6} L^{11/6} \left[-\frac{0.4785}{(L/kb^2)^{5/6}} + 0.4 \left[1 + \frac{0.0759 \times k^2 b^2}{L^2} \right]^{11/12} \times \left[\frac{0.518 \sin(\frac{5}{4} \arctan(\frac{3.63L}{kb^2}))}{(9 + 118.592L^2/k^2 b^2)^{7/24}} + \frac{2.61 \sin(\frac{4}{3} \arctan(\frac{3.63L}{kb^2}))}{(9 + 118.592L^2/k^2 b^2)^{1/4}} + \sin(\frac{11}{6} \arctan(\frac{3.63L}{kb^2})) \right] \right] \right\}^{-1}$ (8)

反演公式 (7) 中: C_n^2 和 b 是待求的未知量, 光传播的距离 L 和闪烁指数 I_i^2 可以由实际测量的光强起伏得到。

由于一个方程不可能同时解出两个未知量, 因此我们采用双波长差分法, 即在同光路上同时测量波数分别为 k_1 和 k_2 的光强起伏 $I_i^2(k_1)$ 和 $I_i^2(k_2)$, 对近红外和可见光波段而言, 忽略由波长引起的折射率结构常数差异^[14], 并认为该路径上的大气湍流状况不随波长而改变, 将 k_1 , $I_i^2(k_1)$ 和 k_2 , $I_i^2(k_2)$ 分别代入式 (7) 构成一个含有两个未知量的方程组

$$\begin{cases} C_n^2 = 0.2106 \times I_i^2(k_1) g_1(k_1, L, b) \\ C_n^2 = 0.2106 \times I_i^2(k_2) g_2(k_2, L, b) \end{cases} \quad (9)$$

由于式 (9) 为超越方程组, 无法直接求出 C_n^2 和 b 的解析解, 只能通过数值反演求解。

反演的思路如下: 对于一次测量的闪烁指数 $I_i^2(k_1)$ 和 $I_i^2(k_2)$ 样本, 让内尺度 b 在某一个范围内变动, 当 $b = b_0$ 时, 根据式 (7) 得到的折射率结构常数 $C_n^2(k_1, b_0)$ 和 $C_n^2(k_2, b_0)$ 的差为零, 则认为此时的 b_0 即为所求的解, $C_n^2(k_1, b_0)$ 或者 $C_n^2(k_2, b_0)$ 的值即为相应的折射率结构常数。由于近地面湍流内尺度的值大都在几 mm 至十几 mm 的范围内, 据此我们确定 b_0 的求解范围定在 (0, 20) 之间。

图 1 是反演 b_0 和 C_n^2 的一个数值模拟示例。由于实际反演时很难找到 $C_n^2(k_1, L, b_0)$ 与 $C_n^2(k_2, L, b_0)$ 完全相等的解, 我们取约束条件为相对起伏

$$= \frac{|C_n^2(k_1, L, b_0) - C_n^2(k_2, L, b_0)|}{[C_n^2(k_1, L, b_0) + C_n^2(k_2, L, b_0)]/2} \leq 3\%$$

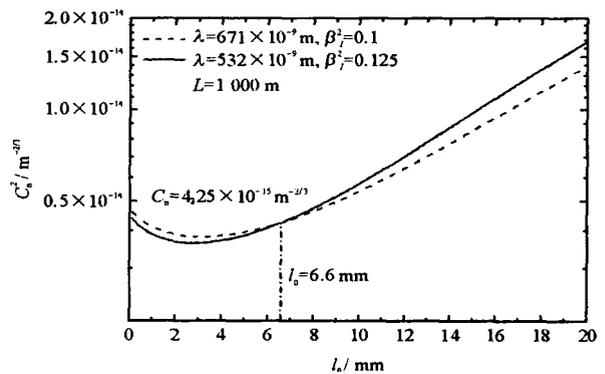


Fig 1 Inversion of the inner scale and the refractive-index structure parameter

图 1 内尺度和折射率结构常数反演的示例

2 实验装置与测量

根据本文提出的反演方法, 我们设计了一个便携式多波长闪烁计, 如图 2 所示。整个系统分为发射端和接收端两部分: 发射端由激光器、挡光器和远程无线控制器 (wireless controller) 组成, 接收端部分包括光电倍增管、数据采集器和计算机。

工作流程如下: (1) 计算机发出指令开启激光器至工作状态, 波长分别为 671 (红光)、532 (绿光) 和 473 nm (蓝光) 的基模激光束经过同一段传输路径后到达接收端, 调整数据采集器的增益以满足信号采集要求, 准备正式采集; (2) 远程无线控制器发出指令使挡光器至“挡光”工作状态, 激光束被同时遮挡, 然后, 计算机开始采集大气辐射背景信号、仪器噪声等背景信息; (3) 挡光器恢复至“通光”状态, 激光束进入放置有中心波长为 671, 532 和 473 nm 以及带宽为 1 nm 窄带干涉滤光片的光电倍增管, 记录光强起伏信号; (4) 数据保存到计算机硬盘, 完成一次采集过程, 流程转到 (2) 进入下一次采集直至采集任务完成。

设 S 为实测信号, B 为背景及探测器本身的噪声信号, I 为真实的激光强度, 闪烁指数表示为

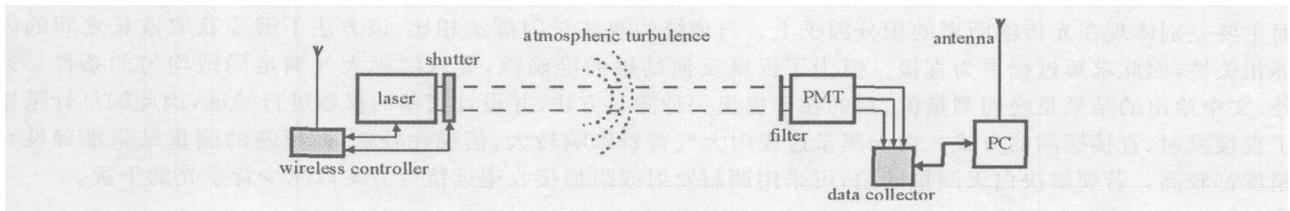


Fig 2 Sketch of the multi-wavelength scintillometer

图 2 多波长闪烁计示意图

$$I^2 = (S^2 - S^2 - B^2 + B^2) / (S - B)^2 \tag{10}$$

这里假定 B 与 I 是统计独立的。

图 3 是在某地的一个测量样本,闪烁计置于距地面约 5 m 的高度处,传输距离约 1 000 m。反演结果为: $C_n^2 = (5.4 \pm 2.4) \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, $l_0 = (10.1 \pm 4.8) \times 10^{-3} \text{ m}$ 。反演的内尺度值没有与其它仪器进行对比参照,结果的可靠性仍需进一步的验证,不过其量级与其它文献报道的结果相符合^[3]。

我们在该测量点进行了连续观测,然后对三个波长中两两组合反演得到的结果进行了统计分析,结果如图 4 所示,其中 l_{GR} 和 $C_{n,GR}^2$ 表示绿光和红光联合反演的值,红光和蓝光、蓝光和绿光相结合的反演值分别记为 l_{RB} , l_{BG} 和 $C_{n,RB}^2, C_{n,BG}^2$ 。显然,除 $l_{RB} \sim l_{GR}$ 的线性回归系数为 0.81 之外,其余的都接近 1.0,尽管反演的 l_0 和 C_n^2 有一定的离散性,但其相关系数也分别达到 0.93 和 0.94,这表明该反演方法具有很好的自治性和稳定性。

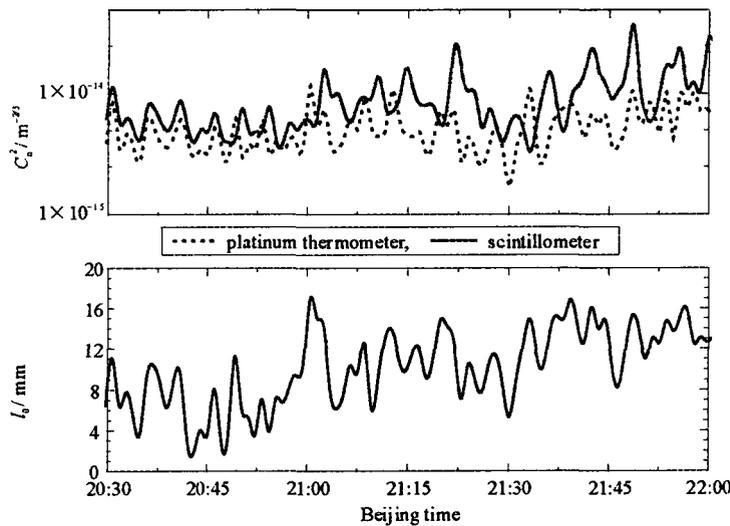


Fig 3 Inversion of the parameters (inversed from 671 nm and 532 nm)

图 3 反演内尺度和折射率结构常数的实例 (671 nm 和 532 nm 波长反演的结果)

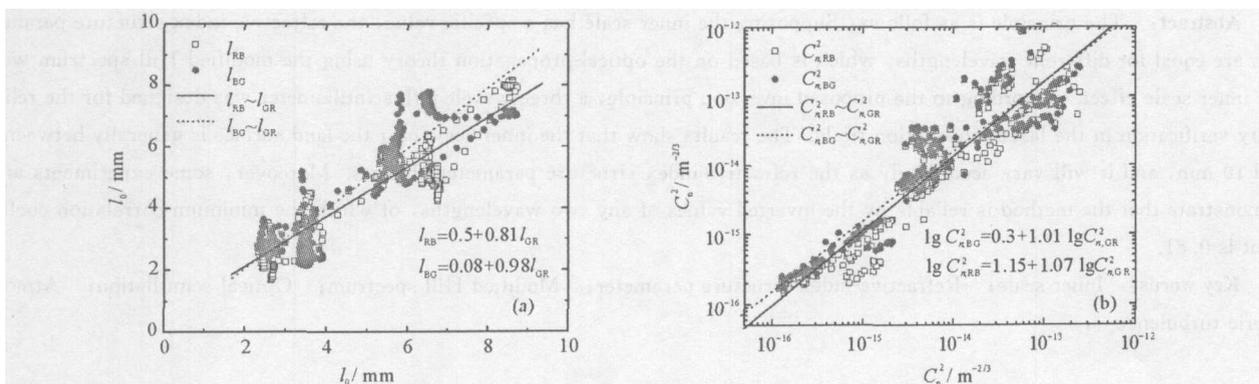


Fig 4 Comparison of the inversed value from three wavelengths

图 4 三波长反演的内尺度 (a) 和折射率结构常数 (b) 的对比验证

3 讨论与分析

本文基于同光路的不同波长的闪烁效应,并采用符合实际大气湍流谱的修正 Hill 谱模型,提出了一种同时反演内尺度和折射率结构常数的方法,其不仅用于球面波的反演,也可以应用到平面波和高斯光束的情况,而

主要差别体现在光传输距离的积分因子上。与传统的双波长闪烁法相比,该方法不需要获取波长之间的闪烁相关性,因此求解过程更为直接。但为了保证反演结果的准确性,要求实际大气满足局地均匀的条件。另外,文中给出的结果是晚间测量值,目的在于提出一种测量方法,并设计简单的仪器进行验证,因此闪烁计采用了直接发射、直接探测的方式。白天测量过程中大气背景影响较大,信噪比较低,而夜晚的测量结果准确性和精度都较高。若要解决白天测量问题,可采用调制发射或附加接收望远镜等方案以减少背景光的干扰。

参考文献:

- [1] Livingston P M. Proposed method of inner scale measurement in a turbulent atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1972, **11**(3): 684—687.
- [2] Hill R J, Ochs G R. Fine calibration of large-aperture scintillometers and an optical estimate of inner scale of turbulence[J]. *Appl Opt*, 1978, **17**(22): 3608—3612.
- [3] Ochs G R, Hill R J. Optical-scintillation method of measuring turbulence inner scale[J]. *Appl Opt*, 1985, **24**(15): 2430—2432.
- [4] Hill R J. Comparison of scintillation methods for measuring the inner scale of turbulence[J]. *Appl Opt*, 1988, **27**(11): 2187—2193.
- [5] Hill R J. Theory of measuring the path-averaged inner scale of turbulence by spatial filtering of optical scintillation[J]. *Appl Opt*, 1982, **21**(7): 1201—1211.
- [6] Hill R J, Frehlich R G. Onset of strong scintillation with application to remote sensing of turbulence inner scale[J]. *Appl Opt*, 1996, **35**(6): 986—997.
- [7] Consortini A, O'Donnell K A. Measuring inner scale of atmospheric turbulence by correlation of lateral displacements of thin parallel laser beams[J]. *Waves in Random Media*, 1993, **3**: 85—92.
- [8] Consortini A, Sun Y, Innocenti C, et al. Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation[J]. *Opt Commun*, 2003, **216**: 19—23.
- [9] Strohbehn J W. Laser beam propagation in the atmosphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978.
- [10] Moene A F, Meijninger W M L, Hartogensis O K, et al. A review of the relationships describing the signal of a large aperture scintillometers[R]. Netherlands: Wageningen University, 2004.
- [11] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, et al. Theory of optical scintillation[J]. *J Opt Soc Am A*, 1999, **16**(6): 1417—1429.
- [12] Goldner E, Ben-Yosef N. Sample size influence on optical scintillation analysis. 2: simulation approach[J]. *Appl Opt*, 1988, **27**(11): 2172—2177.
- [13] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham WA: SPIE Press, 1998.
- [14] Smith F G. Atmospheric propagation of radiation[M]. Bellingham WA: SPIE Press, 1993.

Optical method for simultaneously measuring refractive-index structure parameter and inner scale of atmospheric turbulence

ZHU Wen-yue, ZHAO Zhu-ling, MA Xiao-shan, RAO Rui-zhong

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)

Abstract: The principle is as follows: Supposing the inner scale has a specific value, the refractive-index structure parameters are equal for different wavelengths, which is based on the optical-propagation theory using the modified Hill spectrum with the inner scale effect. According to the proposed inversion principle, a three-wavelength scintillometer was designed for the reliability verification in the laser propagation trials. The results show that the inner scale near the land surface is generally between 2 and 10 mm, and it will vary accordingly as the refractive-index structure parameter changes. Moreover, some experiments also demonstrate that the method is reliable by the inverted values of any two wavelengths, of which the minimum correlation coefficient is 0.81.

Key words: Inner scale; Refractive-index structure parameter; Modified Hill spectrum; Optical scintillation; Atmospheric turbulence