

不同地区大气光学湍流内外尺度测量*

梅海平, 吴晓庆, 饶瑞中

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学中心, 合肥 230031)

摘 要: 用光学湍流参数自动测量系统对内陆地区和沿海地区光学湍流内外尺度进行了大量的实验观测。分析了湍流尺度的日变化规律, 给出了其频数分布。结果表明: 两地内尺度的均值为十几 mm, 外尺度的均值约为 2 m; 内陆地区内尺度日变化趋势较为复杂, 而外尺度的日变化趋势与湍流强度十分相似; 沿海地区内外尺度与湍流强度均无明显关系。大气湍流尺度的大小和分布状态是随时间和空间变化的, 因此, 在估算实际大气湍流对光学系统的影响时, 需要实测湍流尺度以便得到准确的结果。

关键词: 大气光学湍流; 温度脉动; 内尺度; 外尺度

中图分类号: O433.1; TN24 **文献标识码:** A

随着激光雷达、激光大气传输、自适应光学和高分辨率大气成像系统研究的进展, 大气湍流内外尺度对光传播的影响已经日益受到重视^[1-5]。研究表明: 内尺度越大, 闪烁指数也越大, 成像系统的分辨率越差, 并且随着内尺度的增加, 会加速降低成像系统的分辨率^[1]; 有限外尺度既会影响对大气成像系统积分分辨率的估算, 也会严重影响对大气湍流统计特征的测量^[6]。

由于湍流尺度在光学湍流研究中的重要意义, 各种测量方法应运而生^[7-11]。人们一直青睐于通过光学手段来获取湍流尺度信息。另一种测量方法为温度脉动法^[11], 该方法通过测量湍流温度尺度以获取光学湍流尺度, 它的优点在于在复杂地形下可以得到具有代表性的值^[7]。

在没有对湍流尺度进行具体测量前, 人们通常假定它为某一固定值, 并在此基础上讨论其对大气光传输的影响。而实际上, 大气时刻处于复杂的运动过程中, 湍流尺度也是复杂多变的。人们对湍流尺度长时间的观测资料不多, 因而至今尚未形成规律性认识, 更未见有关于不同地域特征下湍流尺度有何异同的文献报道。本文详细描述了用温度脉动法测量湍流尺度的一般原理, 并采用该方法, 在合肥内陆地区和福建沿海地区两个地域特征明显不同的典型地区对光学湍流尺度、湍流强度及相关气象参数进行了长时间、大量的实验观测。

1 湍流强度与湍流尺度

根据 Tatarskii 的光学湍流统计理论, 在惯性子区内, 局地均匀各向同性的湍流大气中, 空间距离为 r 的两点间的折射率结构常数 C_n^2 与 r 的关系为^[12]

$$\langle n(r_0, t) - n(r_0 + r, t) \rangle^2 = C_n^2 r^{2/3}, \quad l_0 < r < L_0 \quad (1)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示系宗平均; l_0 为湍流内尺度; L_0 为湍流外尺度; C_n^2 反映了光学湍流的强度。可见光波段大气折射率 n 的近似表达式为^[13]

$$n - 1 = 77.6(1 + 7.52 \times 10^{-3} \lambda^{-2})(p/T) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: p 是大气压(hPa); T 是大气温度(K); λ 是波长(μm); C_n^2 与温度结构常数 C_T^2 有如下关系

$$C_n^2 = (79p \times 10^{-6} / T^2)^2 C_T^2 \quad (3)$$

$$C_T^2 = \langle T(r_0) - T(r_0 + r, t) \rangle^2 / r^{2/3}, \quad l_0 < r < L_0 \quad (4)$$

因此, C_T^2 可通过测量空间距离为 r 的两点温差来获得。湍流内尺度可理解为温度结构常数在惯性子区与在耗散子区数值相等时的空间距离, 即温度结构常数在惯性子区和能量耗散区间的过渡尺度, 其计算公式为^[11]

$$l_0 = 5.8(D^3/\epsilon)^{1/4} \quad (5)$$

式中: D 为分子热扩散率, 通常取海面标准大气值 $D_0 = 2.06 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$; ϵ 为扰动能量耗散率 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$),

* 收稿日期: 2005-09-12; 修订日期: 2006-01-12

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 梅海平(1980—), 男, 博士研究生, 从事大气光学湍流测量方法研究; hpmei@aiofm.ac.cn.

即惯性子区内扰动能量由大尺度向小尺度传输的速率^[13]，对于局地均匀各向同性湍流^[14-15]，有

$$\epsilon = 15\nu \langle (\partial u_i / \partial x_i)^2 \rangle, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

式中： ν 为分子粘性系数，一般取海面标准大气值 $\nu_0 = 1.461 \times 10^{-5} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ ； x_i 为某一特定的方向的坐标； u_i 为该方向上的风速。令 U_i 为该方向上的平均风速，则根据“冻结湍流”假定^[15]

$$\partial / \partial t = -U_i \partial / \partial x_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

(6)式可转化为

$$\epsilon = 15\nu U_i^2 \langle (\partial u_i / \partial t)^2 \rangle, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

取 x_i 为平均风速的方向，则可利用空间某点风速的时间序列计算湍流扰动能量耗散率。

湍流外尺度是湍流惯性子区的上界和湍流非各向同性的边界，也可理解为能量注入的尺度^[11]

$$L_0 \approx (1.9 \langle \delta_n^2 \rangle / C_n^2)^{3/2} \quad (9)$$

式中： $\langle \delta_n^2 \rangle$ 为空间某一测量点的折射率起伏方差，结合(3)式，(9)式可转化为

$$L_0 \approx (1.9 \langle \delta_T^2 \rangle / C_T^2)^{3/2} \quad (10)$$

式中： $\langle \delta_T^2 \rangle$ 为空间某一测量点的温度起伏方差。

2 系统与测量

测量湍流尺度主要设备为美国 Young 公司生产的超声风速仪，它可同时获取空间 3 维矢量风速和温度的时间序列。根据“冻结湍流”假说，可通过平均风速将时间变量转化成空间变量，从而根据超声风速仪所测的数据可直接算出湍流尺度。本文使用的超声风速仪的测速精度为 0.01 m/s，测温精度为 0.01 °C。测量温度结构常数和单点温度起伏方差的设备为中科院安徽光机所自行研制的高精度温度脉动仪，其灵敏度为 0.002 °C。

合肥地区的测量系统架设于安徽光机所的 35 m 高的气象观测塔上，如图 1 所示。图 1 中 HMP45A/D 表示温度和相对湿度传感器，TF 为单点温度脉动传感器，HTP 为温度脉动仪，FC 为风速风向传感器，MODEL81000 为超声风速仪。它们被连接到美国 Campbell 公司生产的 CR5000 型数据采集器的不同输入通道上进行实时数据采集，得到的数据通过配套的 NL100/105 型网络连接器发送到室内计算机中进行计算处理并保存结果。

福建沿海的测量点选在海岸附近的一个大院内，水平距离海水约 30 m。图 2 为海边测量场地示意图，以工作站(workstation)为中心，0°指向正北方向，40°~280°方向上是大海，海面分布有若干个岛屿，在 0°~40°，280°~360°的方向上是平坦的海岸。实验装备是专门用于野外实验的移动式湍流参数测量系统，系统安装有温度传感器、相对湿度传感器、单点温度脉动仪、温度脉动仪和两台超声风速仪，其整体布局如图 3 所示。超声数据由笔记本电脑通过 RS232 串口通讯采集保存，其它参数由带 A/D 数据采集卡的嵌入式计算机系统实时采样保存。两套系统采用统一采样频率 20 Hz。

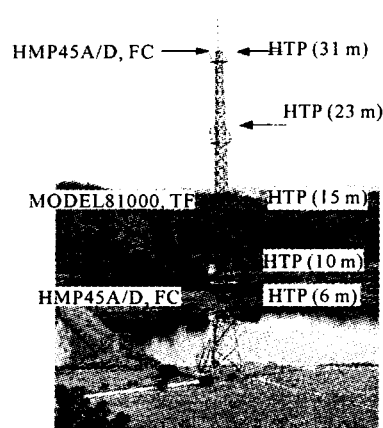


Fig. 1 Turbulence measurement system
图 1 湍流测量系统

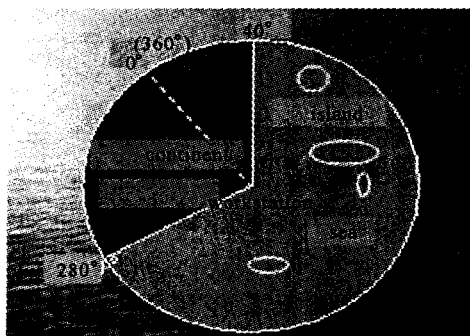


Fig. 2 Schematic diagram of the coastal measurement landform
图 2 海边测量场地地形图

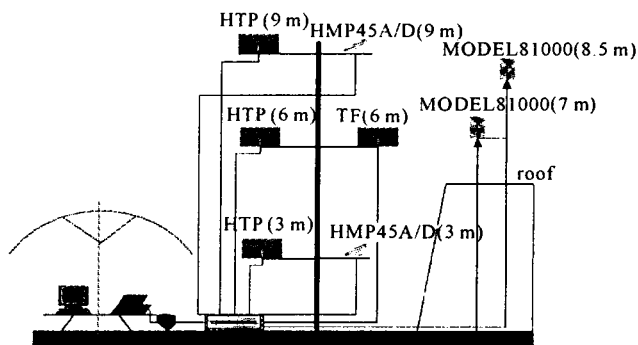


Fig. 3 Mobile turbulence measurement system
图 3 移动式湍流测量系统

为了获得大样本数的统计规律,我们从2003年7月至2004年2月在合肥地区进行了长达半年的实验观察,随后又于2004年8月13日至2004年8月27日在福建沿海进行了半个月的实验观察,采集到的数据为分析湍流尺度的统计变化规律提供了充分的实验依据。

3 测量结果与分析

我们以5 min的数据即6 000个采样数为一个样本(它们都是晴天时的测量结果),计算湍流内外尺度,经5点平均平滑,得到了较为平滑的湍流尺度日变化曲线,如图4~7所示。

对合肥地区大量数据的分析表明:在15 m高度上,外尺度的变化范围一般在几m到十几m,一般午间变化较大,清晨和傍晚较小,夜间经常出现少数数值较大的峰值,并且在整体上湍流强度较大时外尺度也较大;内尺度通常在几mm到十几mm之间,变化趋势相对复杂,在白天和夜晚的各个时刻都可能出现大小不同的高峰和低谷。图4和图5分别为2003年9月25日和10月23日合肥地区的测量结果,不难发现:湍流外尺度的整体日变化趋势与湍流强度相似,这说明湍流外尺度在一定程度上受湍流强度的影响,但在具体细节上两者的变化趋势很不一致,如中午10:00~14:00之间的强湍流时刻,外尺度的高峰与湍流强度的低谷对应,这说明湍流外尺度还在很大程度上受其他未知因素的影响;湍流内尺度值的范围与文献[8]中激光闪烁法的测量结果相当一致,与湍流强度无明显的对应关系,这说明内尺度可能更大程度上决定于其它环境因素。

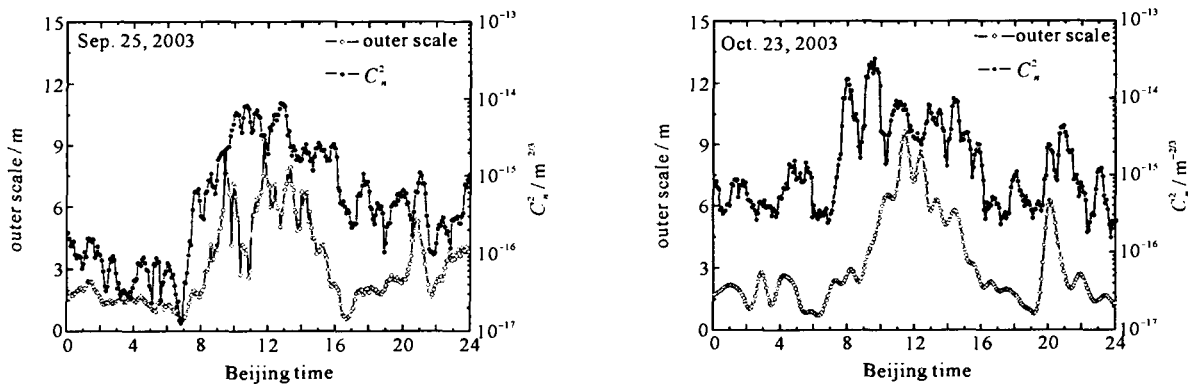


Fig. 4 Turbulence outer scale and turbulence intensity in Hefei

图4 合肥地区湍流外尺度和湍流强度

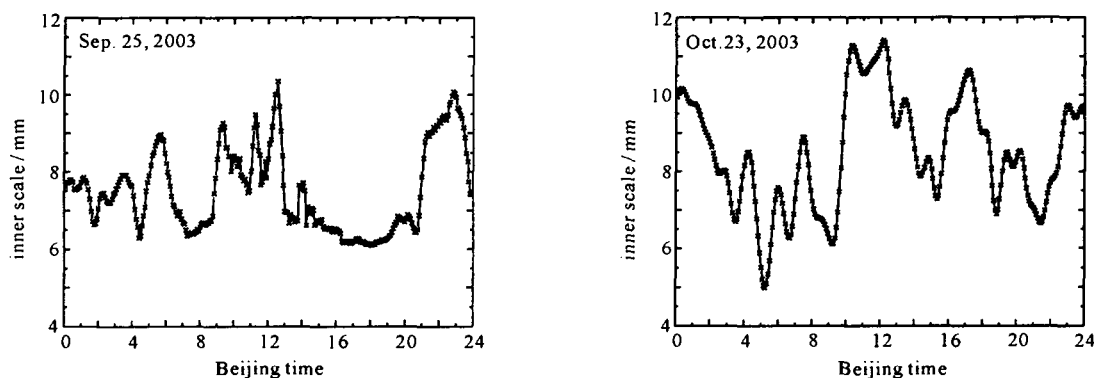


Fig. 5 Turbulence inner scale in Hefei

图5 合肥地区湍流内尺度

对沿海海岸湍流尺度变化特征的分析表明:在距离海岸7~9 m的高度上,湍流外尺度通常在10 m之内,白天外尺度变化特别平缓,其大小在2 m左右,而经常在夜晚出现较大的峰值;海边湍流内尺度的范围通常在10~20 mm之间,其时间演化趋势偶尔与风速或风向有点相似,但总体上湍流内尺度变化的随机性较强,很难发现其对某一种宏观气象参数的明确依赖关系。图6和图7分别给出了2004年8月15日和8月22日沿海海岸湍流内外尺度的两个典型,不难发现:海边湍流内外尺度几乎都不依赖于湍流强度,其峰值可能出现在任意时刻;另外,无论湍流内尺度还是湍流外尺度,在相距1.5 m两个不同高度上的演化趋势都非常一致。

图8和图9分别是根据合肥地区和沿海海岸所有测量数据计算出的湍流尺度的概率分布,其中合肥地区湍流尺度的统计平均值为 $\overline{l_0(15\text{ m})} = 16.2\text{ mm}$ 和 $\overline{L_0(15\text{ m})} = 2.9\text{ m}$;沿海地区两个高度上的统计平均值分别

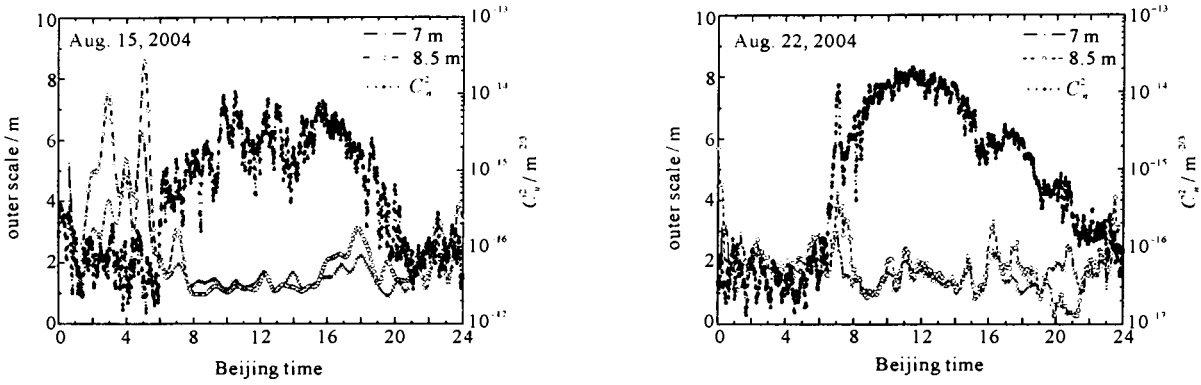


Fig. 6 Turbulence outer scale and turbulence intensity along the coast

图 6 沿海海岸湍流外尺度和湍流强度

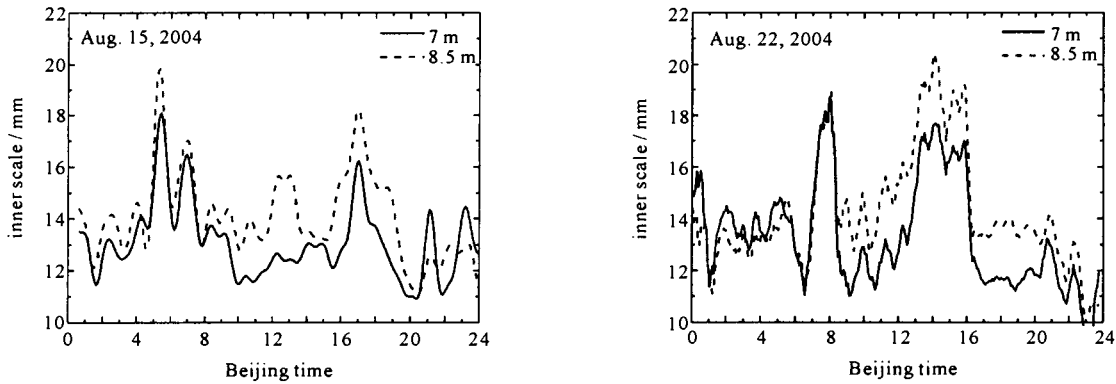


Fig. 7 Turbulence inner scale along the coast

图 7 沿海海岸湍流内尺度

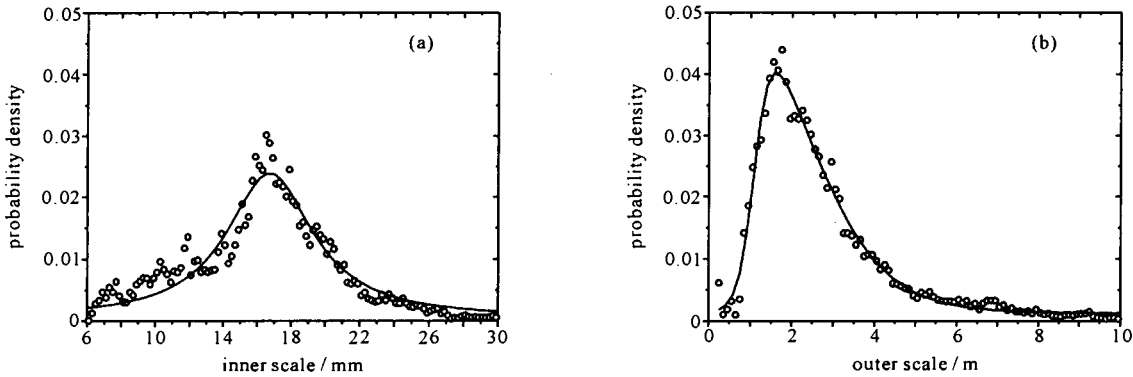


Fig. 8 Probability distribution of turbulence inner scale (a) and outer scale (b) in Hefei

图 8 合肥地区湍流内外尺度概率分布

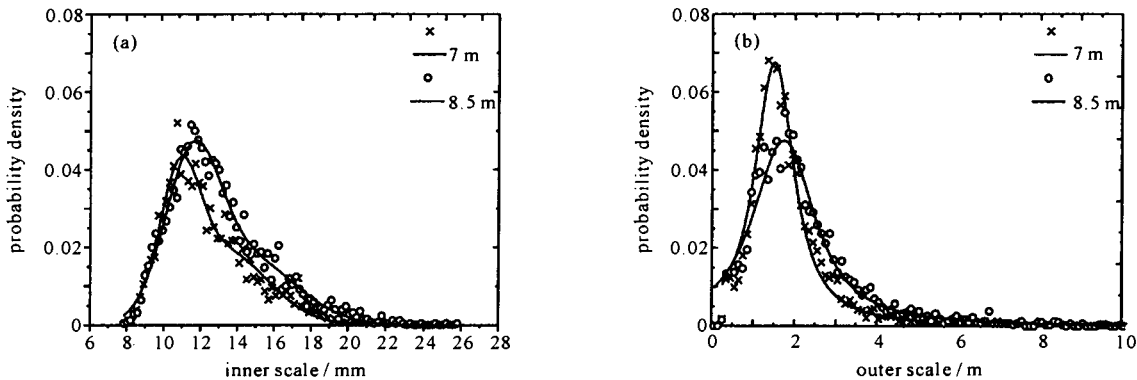


Fig. 9 Probability distribution of turbulence inner scale (a) and outer scale (b) along the coast

图 9 沿海海岸湍流内外尺度概率分布

为 $\overline{l_0(7\text{ m})} = 12.4\text{ mm}$, $\overline{L_0(7\text{ m})} = 1.86\text{ m}$ 和 $\overline{l_0(8.5\text{ m})} = 13.3\text{ mm}$, $\overline{L_0(8.5\text{ m})} = 2.28\text{ m}$ 。结果表明：湍流尺度

通常分布于一定的范围,其分布函数为单峰函数;在不同地区或同一地区的不同高度上,其分布状态都会有所不同;沿海海岸不同高度上的湍流尺度变化趋势相当一致,但较高高度内外尺度均值比较低高度的大,这说明在沿海海岸湍流尺度可能有随高度的增加而增大的趋势。

4 结 论

本文通过大气光学湍流自动测量系统对合肥地区和福建沿海海岸上空的光学湍流参量进行了长时间大量的观测,结果表明:在实际大气中,湍流内外尺度是随时空变化的,在不同地区其大小和变化趋势都有显著差别;在同一地区的不同高度上其大小和分布状态也有所不同。因此,在估算实际大气湍流对光学系统的作用时,需要实测湍流尺度以得到准确的结果。

参考文献:

- [1] 张逸新,孙寅.湍流尺度对大气成像系统分辨率的影响[J].中国激光,2000,27(7):655-659.(Zhang Y X, Sun Y. Effects of the scale of turbulence on optical resolution of imaging system in turbulence. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(7):655-659)
- [2] 骆志敏,吴振森,郭立新,等.考虑内尺度效应时光波闪烁的斜程传输研究[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2002,29(4):455-460.(Luo Z M, Wu Z S, Guo L X, et al. Study of the scintillation for optical wave propagation in the slant path through the atmospheric turbulence by considering the inner scale effect. *Journal of Xidian University (Natural Science)*, 2002, 29(4):455-460)
- [3] Consortini A, Cochetti F, Churnside J H, et al. Inner-scale effect on irradiance variance measured for weak-to-strong atmospheric scintillation[J]. *J Opt Soc Am A*, 1993, 10(11):2354-2362.
- [4] Chesnokov S S, Skipetrov S E. Optical resolution through atmospheric turbulence with finite outer scale[J]. *Opt Commun*, 1997, 141(3):113-117.
- [5] Voitikhovich V V, Guevas S. Adaptive optics and the outer scale of turbulence[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(11):2523-2531.
- [6] 沈锋,姜文汉.有限外尺度对大气湍流统计特征测量的影响[J].光学学报,2001,21(3):290-295.(Shen F, Jiang W H. The effects of finite outer scale on the measurement of characterization of atmospheric turbulence statistics. *Acta Optical Sinica*, 2001, 21(3):290-295)
- [7] 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.
- [8] Ochs G R, Hill R J. Optical-scintillation method of measuring turbulence inner scale[J]. *Appl Opt*, 1985, 24(15):2430-2432.
- [9] Consortini A, Sun L L, Innocenti C, et al. Measuring inner scale of atmospheric turbulence by angle of arrival and scintillation[J]. *Opt Commun*, 2003, 216(1):19-23.
- [10] Consortini A, Innocenti C, Paoli G. Estimate method for outer scale of atmospheric turbulence[J]. *Opt Commun*, 2002, 214:9-14.
- [11] 吴晓庆,王英俭,曾宗泳,等.大气温度起伏谱的测量[J].强激光与粒子束,2002,14(2):233-237.(Wu X Q, Wang Y J, Zeng Z Y, et al. Measurements of the spectrum of atmospheric temperature fluctuations. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(2):233-237)
- [12] 翁宁泉,曾宗泳,马成胜,等.合肥近地面折射率结构常数分布特征及分析[J].量子电子学报,1998,15(4):423-424.(Weng N Q, Zeng Z Y, Ma C S, et al. Atmospheric structure parameter in the boundary layer of Hefei. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(4):423-424)
- [13] 周秀骥,陶善昌,姚克亚.高等大气物理学(上)[M].北京:气象出版社,1991:201-288.(Zhou X J, Tao S C, Yao K Y. Advanced atmospheric physics. Beijing: China Meteorological Press, 1991:199-228)
- [14] Cleve J, Greiner M, Sreenivasan K R. On the effects of surrogacy of energy dissipation in determining the intermittency exponent in fully developed turbulence[J]. *Europhys Lett*, 2003, 61(6):756-761.
- [15] Elsner J W, Elsner W. On the measurement of turbulence energy dissipation[J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7(10):1334-1348.

Measurement of inner and outer scale of atmospheric optical turbulence in different areas

MEI Hai-ping, WU Xiao-qing, RAO Rui-zhong

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

Abstract: Two automatic data-collecting systems were set up respectively in inland and along the coast for measuring the atmospheric turbulence. By long-time observation a great amount of data were obtained. The daily variations and probability of the inner and outer scale of turbulence were analyzed. The mean values of the turbulence inner scale are all more than 10 mm and those of outer-scale are about 2 m in inland and along the coast. The daily variations of the inner scale are complex relatively and those of the outer scale are similar to turbulence intensity in inland. There was no explicit relationship between turbulence scale and turbulence intensity along the coast. The scales and probability distributions of the atmospheric turbulence always vary with the time and space. It is necessary to measure the real-time turbulence scales for accurate estimation of the influence of the atmospheric turbulence on optical systems.

Key words: Atmospheric optical turbulence; Temperature fluctuation; Inner scale; Outer scale