

近地面大气光学湍流外尺度的实验研究

王倩 梅海平 钱仙妹 饶瑞中

Experimental investigation of the outer scale in atmospheric optical turbulence near the ground

Wang Qian Mei Hai-Ping Qian Xian-Mei Rao Rui-Zhong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 224216 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.224216

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.224216>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I22>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

宏-微脉冲激光激发钠信标回踰"u 庾邮□氛□导扑阂肱教

Numerical calculation and discussion on the return photon number of sodium laser beacon excited by a macro-micro pulse laser

物理学报.2015, 64(9): 094206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094206>

大气水汽探测地基差分吸收激光雷达系统设计与性能仿真

System design and performance simulation of ground-based differential absorption lidar for water-vapor measurements

物理学报.2014, 63(20): 204301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.204301>

基于 MST 雷达垂直风速的大气温度剖面反演

Atmospheric temperature profiles estimated by the vertical wind speed observed by MST radar

物理学报.2014, 63(9): 094301 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094301>

湍流大气中星载角反射器阵列回波的闪烁指数

Scintillation statistics of a retro-reflected wave from space

物理学报.2013, 62(16): 164210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164210>

非球形气溶胶粒子短波红外散射特性研究

Scattering properties of non-spherical particles in the CO<sub>2</sub> shortwave infrared band

物理学报.2012, 61(20): 204202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.204202>

# 近地面大气光学湍流外尺度的实验研究\*

王倩<sup>1)2)</sup> 梅海平<sup>1)†</sup> 钱仙妹<sup>1)</sup> 饶瑞中<sup>1)</sup>

1)(中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 合肥 230031)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

(2015年5月13日收到; 2015年6月18日收到修改稿)

分析了含有外尺度的 Von-Karman 湍流空间相关函数模型, 并利用光纤湍流空间传感阵列的实测数据, 根据拟合算法获得了大气光学湍流空间外尺度的值及日变化, 对模型的适用性进行了实验验证. 将空间相关函数理论与空间多点同步测量的数据相结合, 尽可能清晰地展现了几种适合用相关函数描述的湍流尺度. 结果表明, 在 1.8 m 的草地上, 大气光学湍流的外尺度呈现出白天较大、夜间较小的日变化趋势, 正午前后均值约为 0.44 m, 夜间约为 0.3 m. 有三点需要说明: 其一, 当两点间距恰好等于外尺度时, 其空间相关系数为 0.26, 当两点间距超过外尺度之后, 仍具有一定的相关性; 其二, 积分尺度代表了湍流尺度的平均值, 该值略小于外尺度; 其三, 湍流的最大尺度所对应的湍流空间相关性为 0, 其值略大于外尺度. 不难发现: 湍流三种尺度的日变化与湍流强度的日变化趋势非常相似. 以空间布点探测的方法获取湍流特征尺度, 结果直观, 而且能够直接验证湍流空间相关函数模型, 所以可在一定程度上促进湍流空间结构特性的研究.

**关键词:** 大气光学湍流, 空间相关函数, 外尺度

**PACS:** 42.68.-w, 47.27.eb, 43.28.Vd

**DOI:** 10.7498/aps.64.224216

## 1 引言

大气光学湍流是指大气折射率的随机起伏, 它对光学成像系统分辨率和许多光电工程系统如自由空间光通信系统的性能有重要影响<sup>[1]</sup>. 描述光学湍流特性及其在光传播效应分析中应用的主要参量有湍流强度和空间特征尺度, 其中空间特征尺度主要包含湍流内尺度和外尺度<sup>[2-4]</sup>. 在 Kolmogorov 湍流统计理论中, 外尺度是指惯性区的最大尺度. 同时也有一些相近、易混淆的湍流尺度概念, 如把湍流的最大尺度看作外尺度<sup>[5]</sup>, 或用一个积分尺度来表示湍流的最大尺度<sup>[6]</sup>, 或将湍流的最大尺度称之为含能涡区尺度, 认为它就是湍流惯性子区的边界<sup>[7]</sup>.

以上这些特征尺度的定义或概念在定量上存在一些差别, 但定性上是相似的, 它们总是和湍流场的空间结构特性相关联. 确定这些特征尺度应

该依据实际测量的湍流场的空间结构特性, 然而迄今为止, 实际的测量结果并不多<sup>[8]</sup>. 在各种应用中, 主要还是利用理论模型估算湍流特征尺度.

基于 Monin-Obukhov<sup>[9]</sup> 的相似理论, Tatarskii 给出了利用气象参数估算光学湍流外尺度的经验公式<sup>[5]</sup>, Coulman 等<sup>[10]</sup> 给出了估算其高度廓线的经验模式, Lukin<sup>[5]</sup> 则进一步给出了一个常用的综合性理论模式. 然而已有的实际测量结果表明, 湍流外尺度的值并不总是与高度成正比, 这与模型预测结果显著不同<sup>[11]</sup>. 另外, 有关外尺度的高度分布模式也普遍缺乏时间演化特征.

鉴于湍流特征尺度实际测量研究的缺乏, 并考虑到特征尺度是湍流空间相关性的重要表征参数, 我们从研究湍流空间结构特性<sup>[12]</sup> 入手, 对以外尺度为表征参数的 Von-Karman 湍流空间相关函数理论模型进行分析; 对近地面大气光学湍流折射率起伏进行了空间多点同步测量, 得到实际大气光学

\* 国家自然科学基金(批准号: 41205010)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hpmei@aiofm.ac.cn

湍流的空间相关函数, 通过数据拟合算法获得湍流的外尺度及其随时间的变化特征; 最后, 尝试运用相关函数理论阐述光学湍流空间尺度的基本概念, 并进一步明确湍流的积分尺度、外尺度和最大尺度之间的差别.

### 2 局地湍流空间相关函数

根据随机场理论, 可以用下面的式子表示各向同性湍流空间相关函数<sup>[13]</sup>:

$$B(r) = \frac{B(0)}{2^{\nu-1}\Gamma(\nu)} (r/L_0)^\nu K_\nu(r/L_0) \quad (\nu > 0), \quad (1)$$

其中,  $r$  是空间两点的间距,  $L_0$  表示湍流的外尺度,  $\nu$  是常数,  $\Gamma(x)$  表示伽马函数,  $K_\nu(x)$  为第二类修正的贝塞尔函数. 对于各向同性光学湍流,  $B(0) = \sigma_n^2$ ,  $\sigma_n^2$  表示折射率起伏方差. 令  $\nu = 1/3$ , 经过归一化处理, 可得

$$R(r) = \frac{2^{2/3}}{\Gamma(1/3)} (r/L_0)^{1/3} K_{1/3}(r/L_0). \quad (2)$$

(2) 式称为湍流空间相关函数的 Von-Karman 模型. 图 1 给出了外尺度取不同值的空间相关函数曲线, 可见外尺度的值影响着空间相关函数的形态, 随着其值的减小, 空间相关函数下降得更快.

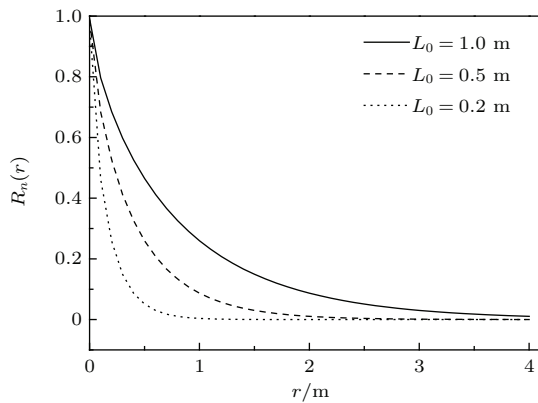


图 1 外尺度取值不同时空间相关函数的比较

Fig. 1. Three correlation functions with the outer scale of 1.0, 0.5, 0.2 m.

### 3 空间相关函数及外尺度的实验测量与分析

考虑到长期以来直接测量光学湍流空间结构参数的设备相对较为缺乏, 本文采用课题组自主研发的光纤湍流传感阵列测量了近地面大气光学湍流的折射率起伏, 相比于传统的单点测量, 这种空

间布点测量可以避免泰勒假定的不确定性. 布设传感器阵列的实验场地位于合肥西郊科学岛的气象观测场内的平坦草地上方 1.8 m 处. 光纤传感器阵列的技术参数在文献<sup>[14, 15]</sup>有详细介绍, 系统首先假定了空气的平均折射率  $\bar{n} = 1$ , 然后通过相关的光电信号解调算法得到了空气的折射率起伏随机时间序列  $\Delta n(t)$ , 继而可以获得表征湍流强度的折射率起伏方差, 其表达式如下:

$$\sigma_n^2 = \left\langle (\Delta n(t) - \langle \Delta n(t) \rangle_t)^2 \right\rangle_t, \quad (3)$$

其中,  $\sigma_n^2$  表示折射率起伏方差,  $\Delta n(t)$  表示折射率起伏的随机时间序列,  $\langle \dots \rangle_t$  表示时间平均.

图 2 给出了传感器阵列空间排布的示意图, 7 个传感器由东至西, 间距分别为 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.85, 1.0 m, 对传感器进行两两组合求相关, 共 21 种组合. 由于传感器给出的是单点的折射率起伏方差  $\Delta n(t)$ , 且本文假定空气的平均折射率  $\bar{n}$  始终为 1, 故实际的空气折射率  $n = 1 + \Delta n$ , 折射率的空间相关函数  $R_n(r)$  等于折射率起伏的空间相关函数  $R_{\Delta n}(r)$ , 可以表示为

$$R_n(r) = \frac{\langle \Delta n(r_0, t) \Delta n(r_0 + r, t) \rangle_t}{\sqrt{\langle \Delta n^2(r_0, t) \rangle_t \langle \Delta n^2(r_0 + r, t) \rangle_t}}, \quad (4)$$

其中,  $r_0$  代表作相关的两个点中其中一个点的空间位置,  $r$  表示两点间距. 对于各向同性湍流来说, 两个空间点上要素的相关函数只与两点间的距离有关, 而与起始点位置无关.

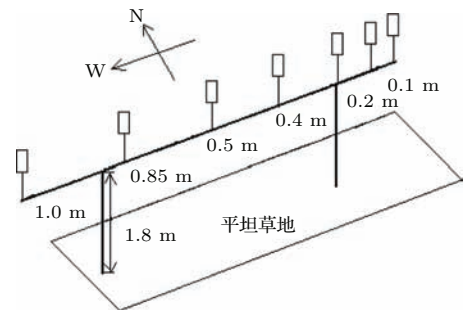


图 2 传感器阵列的空间布局示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the sensing array.

统计和分析采用了晴好天气的观测数据, 主要是因为天气条件好的时候, 光学湍流的影响因素较少, 结果具有普适性, 有利于做统计分析. 2013 年 10 月 25 日天气晴朗, 气象条件稳定, 为了便于分析, 将全天的数据按照 30 min 平均为 48 组, 每组都是相关系数随间距变化的函数, 以下计算结果均是采用这种数据统计办法.

图3选取了一天内的两组实验数据,其中散点代表湍流空间相关系数的实际测量值,曲线表示采用(2)式对散点进行非线性拟合所得到的余差最小的组合.由图3可知,实测的散点在大尺度上偶尔会出现较小的负相关,但是本文给出的相关函数模型是非负的,这可能是由于湍流研究一般要采取系综统计平均的办法,即要求时间上无限长、空间上无限大,而实际的测量和数据统计方法往往不能满足该要求,所以实验上出现微小正值和负值是正常现象,如果做系综统计,大尺度上的相关系数仍然是0.其中图3(a)选取的是07:00的数据,此时处于湍流的转换时刻,图3(b)选取正午13:00的数据,一般情况下这段时间湍流较强.容易发现,转换时刻的湍流空间相关函数在小尺度上下降较快,而正午的相关函数下降相对缓慢.从拟合曲线看出,散点均匀分布在 Von-Karman 模型拟合曲线的两侧,这也是对 Von-Karman 模型的验证.

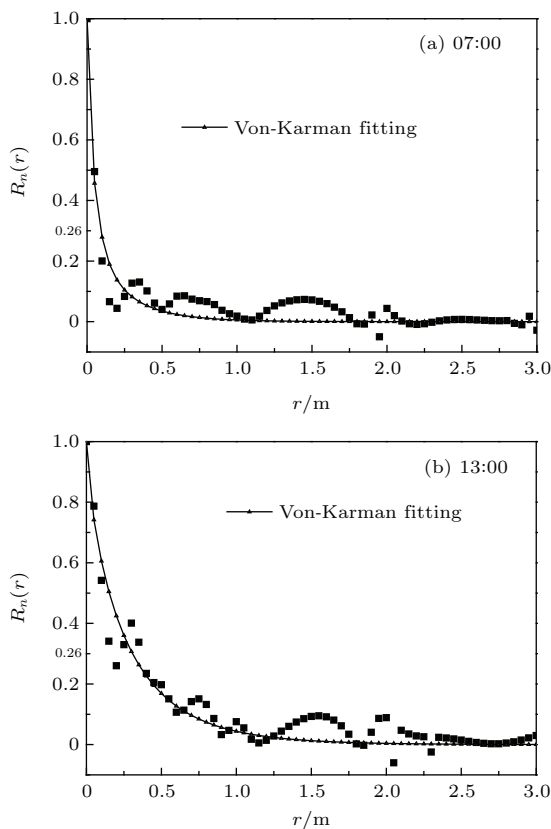


图3 两个时间段的拟合曲线比较

Fig. 3. Comparison of two fitting curves between two different time periods.

图4给出了湍流强度与外尺度日变化的比较,可以看出,外尺度的值具有白天大、夜间小的变化趋势,并且存在两段较为明显的湍流转换时刻.按

时间段对拟合结果进行统计,发现:第一,外尺度的值在0.24—0.50 m之间变化,其中10:00—16:00外尺度的平均值为0.44 m,而夜晚的两个时间段00:00—06:00,19:00—24:00外尺度的平均值分别为0.31 m和0.28 m.对于湍流的转换时刻来说,由于本文采用的模型具有各向同性的前提,但实际上,转换时刻的湍流发展相对不够充分,模型不总是适用,所以这里不予统计;第二,外尺度的拟合结果比现有的理论模型,如Lukin<sup>[5]</sup>给出的 $L_0 = 0.4h$ 偏小( $h$ 表示下垫面的垂直高度),按照这个模型,本文的外尺度应该为0.72 m,初步推断这与对外尺度的定义有关,Lukin将外尺度定义为湍流的最大尺度,也就意味着超出了这个尺度,湍流的相关性为0,而本文所采用的公式中的外尺度并不具备这样的定义.

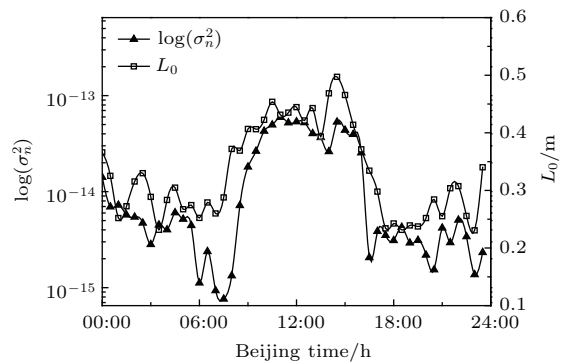


图4 湍流强度与外尺度的日变化比较

Fig. 4. Comparison of diurnal variation of intensity and the outer scale.

图4中的湍流强度 $\sigma_n^2$ 用7个传感器折射率起伏方差的均值表示,以对数坐标显示.可以看出,近地面光学湍流外尺度的变化与湍流强度的日变化具有较高的一致性,其相关度能达到0.84.说明对于近地层而言,大气光学湍流外尺度与湍流强度的影响因素在很大程度上是一致的,主要都受到地气热交换和太阳辐射的影响.

综上所述,本文所测得的近地面大气光学湍流外尺度的值在正午前后比较稳定,均值在0.44 m左右,其余时间的外尺度值比较小,大部分在0.3 m左右.前人对于外尺度的值也给出过不少判断,例如,根据唯象解释<sup>[16]</sup>,湍流的外尺度值与高度相仿,而本文的高度为1.8 m,这比我们的实验结果显然要大得多;如果根据的外尺度廓线模型推算<sup>[10]</sup>,本文的外尺度在0.3—0.4 m之间,这与本文的结果比较相近;而根据Lukin<sup>[5]</sup>的综合性模型推算,本文外



尺度为0.72 m, 这个值比本文的结果大, 下面对这个问题进行详细的分析.

## 4 不同湍流尺度与外尺度的比较

### 4.1 湍流的最大尺度

理论上, 在  $r > L_0$  的能量注入区内, 湍流结构不再均匀, 一些文献直接忽略了这一区域的空间相关性<sup>[15]</sup>, 但实际上, 湍流能量注入区也具有一定空间相关性, 由(2)式可知, 当空间两点的间距  $r = L_0$  时, 空间相关系数  $R(L_0) = 0.26$ , 而两点间距超过外尺度之后, 空间相关系数继续减小, 直至趋于0. 这里初步推断空间相关性0.26不能忽略, 因为与0.26所对应的外尺度正是湍流惯性子区与能量注入区的分界线, 如果忽略不计, 那么湍流的外尺度与湍流最大尺度就无明确区别, 而考虑了湍流大尺度的 Von-Karman 湍流统计理论也失去了意义. 图5是固定间距的空间相关系数的时间演化规律, 当  $r$  接近于0.4 m时, 正午的湍流空间相关系数在0.2—0.3之间, 这一点也证明了外尺度所对应的空

间相关性为0.26.

此外, 从图5可以发现: 第一, 光学湍流的空间相关性随着间距的增大逐渐减小, 当间距超过一定的尺度后, 几乎不存在空间相关性; 第二, 间距越小, 空间相关系数的时间演化规律越明显, 当间距逼近甚至超过外尺度的值时, 两点的空间相关性非常低, 同时, 没有明显的日变化趋势, 这是由于正午的湍流强度较大, 此时湍流的外尺度也相对较大, 湍流的空间相关性必然越强.

在光传输理论中, Tatarskii<sup>[13]</sup>假设当时间自相关系数下降到0.1时, 所对应的时间称为相关时间. 参照该假设, 本文假定了空间相关系数的绝对值在0—0.09之间时, 两点之间便失去了相关性, 此时所对应的空间距离即为湍流最大尺度, 令(2)式

$$R(r) = 0.09, \quad (5)$$

此时, 定义湍流最大尺度为  $L_{\max}$ , 则  $r = L_{\max}$ . 图6给出了湍流最大尺度  $L_{\max}$  的日变化, 由于最大尺度与外尺度的获得是基于相同的拟合算法, 所以其与外尺度虽然在大小上有一定的差异, 但是日

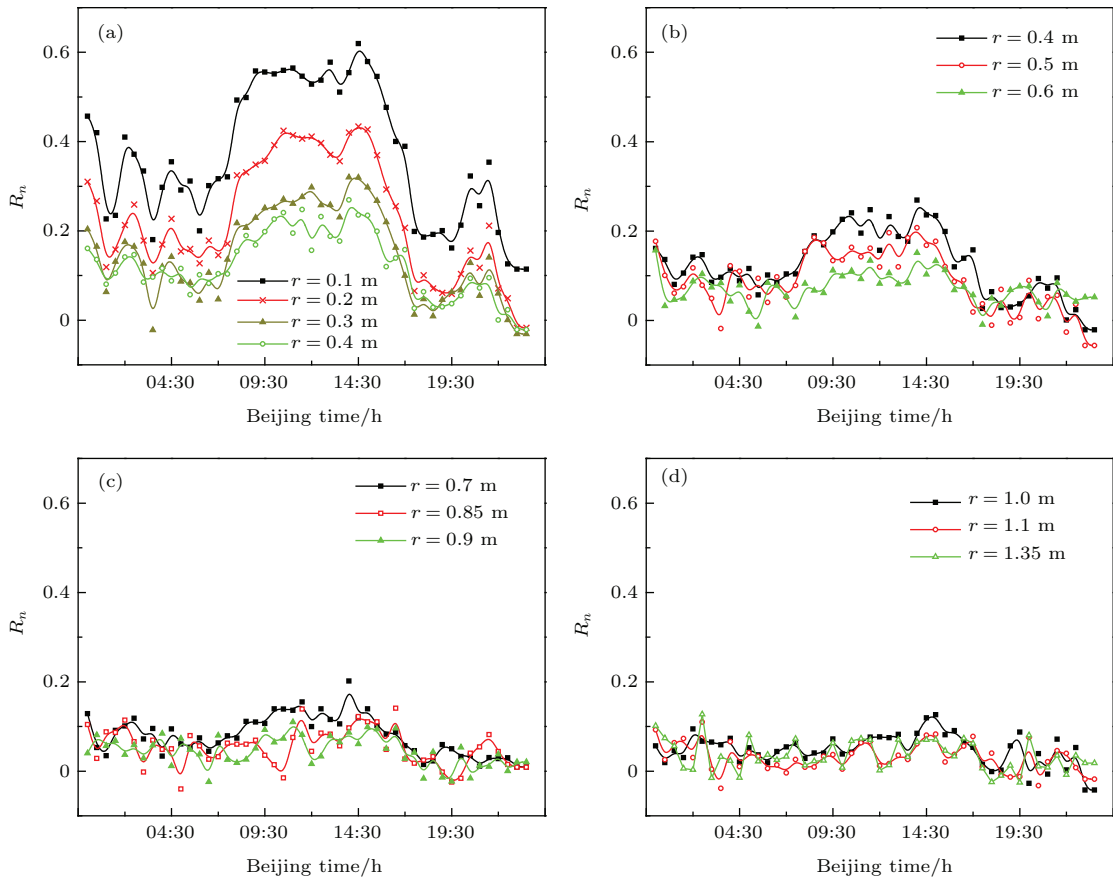


图5 (网刊彩色) 各种间距的空间相关系数的时间演化规律

Fig. 5. (color online) Diurnal evolution law of correlation coefficient with different distances.

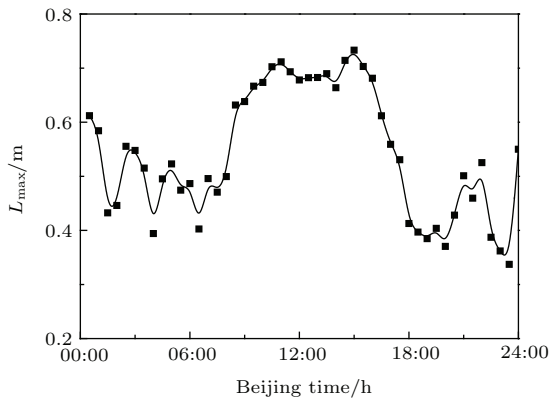


图6 湍流最大尺度的日变化

Fig. 6. Diurnal variation of the biggest vortex scale.

变化趋势比较一致. 可以看出,  $L_{\max}$  与根据 Lukin 的外尺度模型推算的值非常接近, 这是由于本文的外尺度指的是惯性区的最大尺度, 其对应的空间相关性约为 0.26, Lukin 所给的外尺度指的是湍流的 最大尺度, 其对应的湍流空间相关性为 0.

### 4.2 湍流的积分尺度

一些文献将积分尺度定义为湍流的 最大尺度 [6], 实际上积分尺度表征了湍流的平均尺度 [17],

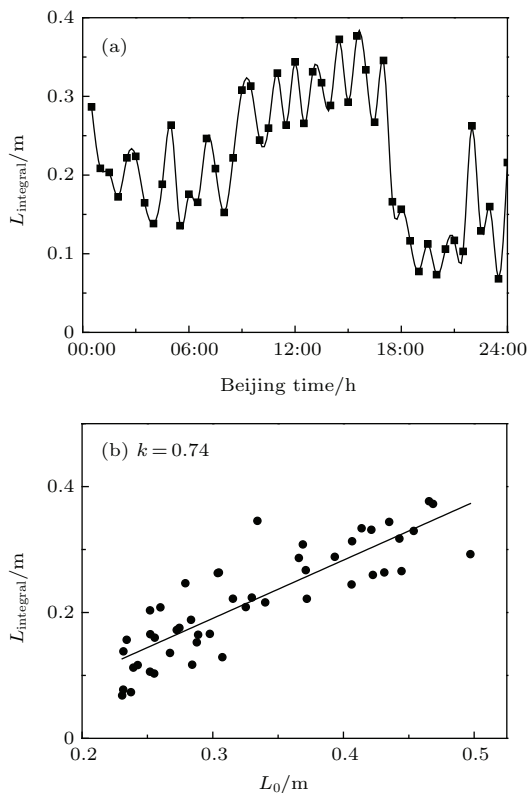


图7 (a) 积分尺度的日变化; (b) 外尺度与积分尺度的线性拟合  
Fig. 7. (a) Diurnal variation of the integral scale; (b) linear fitting of the outer scale and the integral scale.

代表了湍流能量最集中的区域, 可以用空间相关函数定义积分尺度  $L_{\text{integral}}$  [7]:

$$L_{\text{integral}} = \int_0^{\infty} R(r) dr. \quad (6)$$

图 7(a) 给出了积分尺度的日变化曲线. 由图 7(a) 可知: 第一, 积分尺度也具有正午大、夜间小的日变化趋势; 第二, 积分尺度比湍流的外尺度略小, 这与文献 [18] 中给出的  $L_{\text{integral}} = 0.784L_0$  接近; 第三, 相比于外尺度和最大尺度, 积分尺度的日变化曲线中出现了较多的小幅度振荡, 这可能是由于外尺度与最大尺度的获得均是基于相应模型拟合, 而积分尺度则是对原始数据的数值积分, 所以数据的起伏比较明显. 图 7(b) 给出了外尺度与积分尺度的线性拟合, 外尺度与积分尺度也具有较好的线性关系, 这说明不论是积分尺度、外尺度还是最大尺度都是表征湍流空间结构的参量, 具有相近的物理意义.

### 5 结果与讨论

本文采用课题组自主研发的光纤湍流传感阵列对近地面大气光学湍流进行了实际测量, 利用实测的折射率起伏数据, 基于带有外尺度参数的 Von-Karman 空间相关函数模型, 根据拟合算法对光学湍流的空间外尺度进行了计算, 得到了外尺度的值以及日变化规律. 结果表明: 外尺度白天的均值基本在 0.44 m 左右, 这引发了对于另外两种特征尺度的研究, 分别是湍流的最大尺度和积分尺度. 基于空间相关函数理论清晰地展现了积分尺度、外尺度和最大尺度: 对归一化的空间相关函数进行积分, 可得到积分尺度, 这个值一般略小于外尺度, 代表了湍流的平均尺度; 外尺度代表了湍流惯性子区的上边界, 当空间两点间距  $r \simeq L_0$  时, 可以认为这两点仍然具有约 0.26 的相关性; 而湍流的最大尺度代表了两点空间相关性首次降为 0 所对应的尺度, 这个尺度略大于外尺度.

这种采用空间布点测量获取光学湍流的空间相关函数和外尺度的方法不仅是对 Von-Karman 空间相关函数模型的直接验证, 同时较之传统单点测量的方法, 由于本文的测量方法不借助于泰勒假定, 结果更加直观准确. 本文清晰地展现了如何利用空间相关函数获取湍流的三种特征尺度, 比较了较易混淆的三种湍流尺度, 对研究湍流的尺度问题有一定的意义. 下一步工作将尝试提高传感器的空

间分辨率, 通过研究湍流的内尺度等较小的尺度, 对湍流问题进行更深入的探索.

### 参考文献

- [1] Arkadi Z, Ephim G, Norman S K 2010 *Opt. Commun.* **283** 1229
- [2] Lukin V P, Nosov V V, Torgaev A V 2014 *Appl. Opt.* **53** B196
- [3] Yi X, Liu Z J, Yue P 2012 *Opt. Express* **20** 4232
- [4] Lutomirski R F, Yura H T 1971 *Appl. Opt.* **10** 1652
- [5] Lukin V P 2005 *Proc. SPIE* **5981** 598101
- [6] Taylor G I 1938 *Proc. R. Soc. A* **164** 476
- [7] Liu S D, Liang F M, Liu S K, Xin G J 2008 *Atmospheric Turbulence* (Beijing: Peking University Press) p47 (in Chinese) [刘式达, 梁福明, 刘式适, 辛国君 2008 大气湍流 (北京: 北京大学出版社) 第 47 页]
- [8] Kulikov V A, Andreeva M S, Koryabin A V, Shmalhausen V I 2012 *Appl. Opt.* **51** 8505
- [9] Obukhov A M 1971 *Boundary-Layer Meteorol.* **2** 7
- [10] Coulman C E, Vernin J, Coqueugniot Y, Caccia J L 1988 *Appl. Opt.* **27** 155
- [11] Frank D E 1998 *Radio Sci.* **33** 895
- [12] Wang Q, Mei H P, Qian X M, Rao R Z 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 114212 (in Chinese) [王倩, 梅海平, 钱仙妹, 饶瑞中 2015 物理学报 **64** 114212]
- [13] Tatarskii V I (translated by Silverman R A) 1961 *Wave Propagation in a Turbulent Medium* (New York: McGraw-Hill Book company) pp7, 8
- [14] Mei H P 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [梅海平 2007 博士学位论文 (合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院)]
- [15] Xiao S M 2014 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [肖树妹 2014 博士学位论文 (合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院)]
- [16] Rao R Z 2012 *Modern Atmospheric Optics* (Beijing: Science Press) pp155–159 (in Chinese) [饶瑞中 2012 现代大气光学 (北京: 科学出版社) 第 155—159 页]
- [17] Tian Y J, Yang Q S, Yang N, Li B, Chen B, Yang J B 2013 *J. Vib. Eng.* **26** 90 (in Chinese) [田玉基, 杨庆山, 杨娜, 李波, 陈波, 杨靖波 2013 振动工程学报 **26** 90]
- [18] Consortini A, Ronchi L 1972 *Appl. Opt.* **11** 1205

# Experimental investigation of the outer scale in atmospheric optical turbulence near the ground\*

Wang Qian<sup>1)2)</sup> Mei Hai-Ping<sup>1)†</sup> Qian Xian-Mei<sup>1)</sup> Rao Rui-Zhong<sup>1)</sup>

1) (*Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

( Received 13 May 2015; revised manuscript received 18 June 2015 )

## Abstract

In this article, the Von-Karman model of turbulence spatial correlation function which contains the parameter of outer scale is analyzed. Then, the experimental data of air refractive index variation obtained from a high quality fiber optical turbulence sensing array are used to evaluate the outer scale of atmospheric optical turbulence as well as its diurnal variation through the algorithm of nonlinear fitting. The results validate the suitability of the Von-Karman model. By combining the theory of correlation function with the spatially distributed and simultaneously measured data, three kinds of turbulence spatial scales described by correlation function are revealed as clearly as possible. Results show that the values of outer scale in atmospheric optical turbulence 1.8 m above the grassland tend to be larger in the daytime and smaller in the night. The mean value around noon is 0.44 m, while in the night it becomes 0.3 m. Here, three of the important views should be noted. Firstly, when the displacement of two points is just equal to the outer scale, their correlation coefficient is 0.26, and when it exceeds the outer scale, there is still a certain value of correlation coefficient. Secondly, the integral scale represents the averaged value of scale in the vortex of optical turbulence. And, it is slightly smaller than the outer scale. Thirdly, when the distance of two points equals the biggest scale of vortex in optical turbulence, the correlation coefficient tends to zero, and the value of biggest scale is slightly bigger than the outer scale. It is easy to find that the diurnal variation tendencies of the three spatial scales are similar to that of intensity in optical turbulence. The method of obtaining the characteristic scales by spatially arranged and simultaneously measured optical turbulence is direct, and the results can be considered as the evidence to prove the models of correlation function including the Von-Karman model. So, it promotes the research on the property of spatial structure to a certain extent.

**Keywords:** atmospheric optical turbulence, spatial correlation function, outer scale

**PACS:** 42.68.-w, 47.27.eb, 43.28.Vd

**DOI:** 10.7498/aps.64.224216

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41205010).

† Corresponding author. E-mail: [hpmei@aiofm.ac.cn](mailto:hpmei@aiofm.ac.cn)