

近地面大气光学湍流空间相关特性的实验研究

王倩 梅海平 钱仙妹 饶瑞中

Spatial correlation experimental analysis of atmospheric optical turbulence in the near ground layer

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

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 114212 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.114212

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114212>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I11>

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波光子数的数值计算与探讨

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>

分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究

Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors

物理学报.2015, 64(5): 050704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050704>

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706>

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 CO₂ 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空间相关特性的实验研究*

王倩¹⁾²⁾ 梅海平^{1)†} 钱仙妹¹⁾ 饶瑞中¹⁾

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)

(2014年9月15日收到; 2014年11月27日收到修改稿)

本文提出了基于光纤湍流传感器阵列的大气光学湍流空间相关函数测量原理, 并确定了具体的测量方案和数据统计方法. 利用光纤湍流传感器阵列在近地面开展了大气光学湍流空间相关特性的实验测量研究, 尽可能全面地展示光学湍流空间相关函数的各种形式. 结果表明, 大气光学湍流的一维空间相关函数主要表现为两种结构形态, 其一, 58.7% 基本符合各向同性湍流空间相关函数模型, 其相关函数在一定尺度范围内呈现随尺度的增大而减小的趋势, 当超过该尺度时, 相关系数接近于0; 其二, 另有37.9% 表现为与尺度无关, 相关系数维持在0附近小幅度随机振荡. 不难发现: 光学湍流的空间相关特性主要取决于湍流的强弱和湍流是否得以充分发展, 同时, 湍流的相干结构将引起空间相关函数的小幅度振荡. 以空间布点探测直接获取光学湍流空间相关函数的方法, 不仅为分析湍流空间结构奠定了实验基础, 同时, 也为进一步建立非K湍流模型提供了理论开端.

关键词: 大气光学湍流, 空间相关函数, 光纤湍流传感器, 结构形态

PACS: 42.68.-w, 47.27.Gs, 07.60.Vg

DOI: 10.7498/aps.64.114212

1 引言

地球大气由于黏滞系数小、雷诺数大, 其运动几乎总是处于湍流状态. 大气湍流对气候、航空、天文观测、激光精密工程等领域有着重要影响, 涉及大气湍流特性的不同侧面^[1]. 大气湍流的光学特性源自大气密度起伏引起的大气折射率随机起伏, 它会破坏在大气中传播的光波的空间相干性, 产生波前畸变、到达角起伏、光强闪烁等一系列效应, 从而成为限制高分辨力成像、激光能量传输及自由空间激光通信等先进光电系统性能有效发挥的根本因素^[2,3].

早期大气湍流光学特性的应用研究主要依据Kolmogorov各向同性假设^[4], 而随着研究的深入开展, 发现大气湍流在很多情况下明显偏离各向同性状态^[4], 这些状态的影响在应用中也体现出来,

为此一些非K模型提出来用于计算分析^[5]. 这些模型依然建立在各向同性的基础上, 只不过改变了结构函数的幂律. 此外也缺乏直接的实验测量结果. 自适应光学、光传播工程等所关心的光学湍流的结构信息主要包括空间尺度、空间谱和结构函数等^[6,7], 通常这些参数是以泰勒假定为前提, 对单点的时间序列进行时间转空间的处理后获得的. 但在泰勒假定不成立的情况下所得到的结果无法进行有效分析. 迄今一直缺乏直接的空间测量手段, 而湍流的空间相关性测量的主要意义就在于可以不借助于泰勒假定和湍流谱模型假设而获得这些参数的信息.

大气湍流折射率场是一种典型的被动标量场, 其空间多点相关函数中不仅包含了湍流的标度信息, 而且包含了与测量点空间位置的设置相对应的湍流空间结构信息^[8]. 近地面大气湍流可理解为地球大气的壁湍流, 在其中所观测到的随机振荡的空

* 国家自然科学基金 (批准号: 41205010, 61107066) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hpmei@aiofm.ac.cn

间相关函数则表现出了壁湍流中的湍流猝发和相干结构^[9]. 一些在实验室难以开展的流体力学实验(如大雷诺数湍流的微结构)也需要在近地面层进行. 所以, 有关近地面光学湍流的相关性的实验观测可以促进壁湍流理论的发展.

高精度光纤湍流测量技术^[10]的出现使我们能够通过布置传感器阵列进行大气折射率起伏的同步观测, 从而获取大气光学湍流的空间结构特性. 我们利用该技术构建了一个7通道的传感器阵列^[11], 可同步采集传感器各点位置处大气折射率起伏的原始数据. 进而获得了大气光学湍流的空间相关系数及其随时间和空间的变化趋势, 总结了空间相关函数的各种形态, 初步分析了各种形态发生的概率和影响因素.

2 各向同性湍流空间结构特性的应用模型

历史上, 湍流有各种理论, 但最常用的主要是湍流统计理论^[12], 而湍流统计理论主要包括一系列有关于随机函数的数学表达式, 例如结构函数、相关函数、功率谱等. 根据湍流的统计理论, 可以给出Kolmogorov湍流和non-Kolmogorov湍流的空间相关函数模型.

2.1 Kolmogorov模型

在局地均匀各向同性湍流中, 相关函数 $B_n(r)$ 和结构函数 $D_n(r)$ 有如下关系^[1]:

$$D_n(r) = 2[B_n(0) - B_n(r)], \quad (1)$$

$$B_n(0) = \sigma_n^2, \quad (2)$$

其中 σ_n^2 表示单点的折射率起伏方差, r 表示空间两点的间距. 按照Kolmogorov湍流统计理论, 结构函数应表示为^[1]

$$D_n(r) = 2\sigma_n^2 \left(\frac{r}{L_0}\right)^{2/3}, \quad l_0 \ll r \ll L_0, \quad (3)$$

$$D_n(r) = 2\sigma_n^2 \left(\frac{l_0}{L_0}\right)^{2/3} \left(\frac{r}{l_0}\right)^2, \quad r \ll l_0, \quad (4)$$

其中 L_0 , l_0 分别代表光学湍流的外尺度和内尺度. 由于距离大于外尺度的两点之间可以认为是统计独立的, 根据上式可以把相关系数随距离的函数关系简化为

$$R_n(r)$$

$$= \begin{cases} 1 - (l_0/L_0)^{2/3} (r/l_0)^2, & r \ll l_0, \\ 1 - (r/L_0)^{2/3}, & l_0 \ll r \ll L_0, \\ 0, & r \gg L_0, \end{cases} \quad (5)$$

$R_n(r)$ 代表相关系数, 即归一化的空间相关函数值. (5)式表明, 对于一维的局地均匀各向同性湍流, 其空间相关函数在湍流的耗散区呈抛物线形, 在惯性子区内是两点间距的幂函数, 而在间距大于外尺度的能量注入区, 相关系数趋于0.

2.2 non-Kolmogorov模型

另一方面, 长期以来, 人们认为对于non-Kolmogorov湍流, 其惯性区的结构函数也满足幂率, 但幂指数不是2/3, 即

$$R_n(r) = \begin{cases} 1 - (l_0/L_0)^\gamma (r/l_0)^2, & r \ll l_0, \\ 1 - (r/L_0)^\gamma, & l_0 \ll r \ll L_0, \\ 0, & r \gg L_0. \end{cases} \quad (6)$$

综上, 对于各向同性湍流, 空间相关函数的理论模型均应该呈现出在某一尺度范围内随间距递减, 超出该范围内, 基本稳定在0的变化趋势.

3 空间相关函数的测量原理与数据处理方法

高精度光纤湍流测量技术及其原理的介绍可参阅文献^[13, 14]. 单个光纤传感器的间隙为0.045 m, 响应频率为1000 Hz, 以折射率起伏方差为指示的测量精度达 10^{-18} . 布设传感器阵列的实验场地位于合肥西郊科学岛上的气象观测场内的平坦草地上方1.8 m处. 图1给出了传感器阵列空间排布

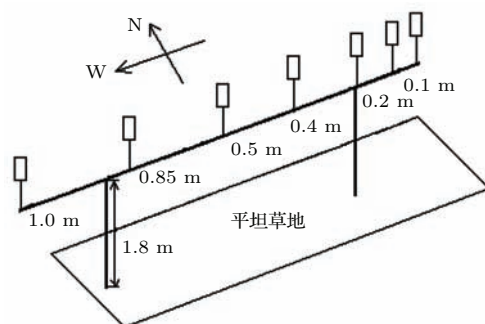


图1 传感器阵列的空间布局示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the array.

的示意图, 七个传感器由东至西, 间距分别为 0.1 m, 0.2 m, 0.4 m, 0.5 m, 0.85 m, 1.0 m.

对阵列中的七个传感器进行两两组合, 共有 21 种间距, 从小到大排列分别为 $r = (0.1 \text{ m } 0.2 \text{ m } 0.3 \text{ m } 0.4 \text{ m } 0.5 \text{ m } 0.6 \text{ m } 0.7 \text{ m } 0.85 \text{ m } 0.9 \text{ m } 1.0 \text{ m } 1.1 \text{ m } 1.2 \text{ m } 1.35 \text{ m } 1.75 \text{ m } 1.85 \text{ m } 1.95 \text{ m } 2.05 \text{ m } 2.35 \text{ m } 2.75 \text{ m } 2.95 \text{ m } 3.05 \text{ m})$. 考虑到湍流内尺度一般在毫米量级, 而根据湍流外尺度的一种理论模型^[15]

$$L_0 = 0.4h \quad (1 \text{ m} < h < 15 \text{ m}), \quad (7)$$

h 代表距离地面的高度, 传感器高度上的湍流外尺度约为 0.72 m. 所以, 该阵列设置的最小间距远大于湍流内尺度 l_0 , 而最大间距超过了湍流外尺度.

以上每种空间组合的相关函数为

$$B_n(r) = \langle \Delta n(r_0, t) \Delta n(r_0 + r, t) \rangle_t, \quad (8)$$

式中 $\langle \cdots \rangle_t$ 代表时间平均. 空间相关系数为

$$R_n(r) = \frac{B_n(r)}{\sqrt{\langle \Delta n^2(r_0, t) \rangle_t \times \langle \Delta n^2(r_0 + r, t) \rangle_t}}. \quad (9)$$

根据 Wiener-Khinchin 定理, 还可以得出随机函数的空间相关函数与功率谱的关系^[2]

$$\Phi_n(K) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty B_n(r) \cos(kr) dr, \quad (10)$$

其中 $\Phi_n(K)$ 代表光学湍流的空间功率谱, K 代表空间矢径.

采用晴好天气下的折射率起伏观测数据进行统计和分析, 主要是因为天气条件好 (特别是晴天无云) 的时候, 光学湍流的影响因素较少, 分析相对简单, 并且根据以往的经验, 晴天光学湍流强度变化的动态范围更大, 从弱到强的各种状态均能得到充分体现. 测量结果具有普适性, 有利于做统计分析. 2013 年 10 月 25 日天气晴朗, 气象条件稳定. 单个传感器所得的折射率起伏时间序列是以 1000 Hz 为采样频率的离散随机时间序列, 而实验数据是以采集 1 s, 停 9 s, 再采集 1 s 的方式进行存储的. 主要原因是: 通过相位载波调制解调原理, 在保证测量精度的前提下, 获得 1 kHz 的湍流响应频率, 计算机对载波信号的采样频率达到 1 MHz, 对 7 通道的数据进行软件解调处理需要花费数秒时间, 在运算存储之后预留几秒时间给计算机休息, 防止过热损坏. 这种方法对空间相关性的测量结果并没有实质的影响, 下面是以每秒钟的数据为一组, 进行相关系数的计算.

另一方面, (5), (6) 式中对湍流空间相关函数的描述是基于湍流统计理论的, 原则上, 若要获得湍流的统计特征需要进行系综平均, 但是系综平均要求时间上无限长或空间有无数点, 这显然是无法做到的, 实际工作中对湍流的统计分析往往只能选取有限的样本数进行时间平均. 但如果统计时间过短, 甚至短于湍流的自相关时间 τ_0 , 就达不到统计平均的效果了, 所以采用的统计时间原则上至少要大于湍流的自相关时间, 才能保证相关函数的统计特征不受平均时间的影响. 而自相关时间 τ_0 是由当时间延迟 $\tau \rightarrow \tau_0$ 时, 自相关函数 $B(\tau_0) \rightarrow 0$ 来确定的. 图 2 给出的是以单个传感器为例, 自相关系数的均值随统计时间的变化趋势.

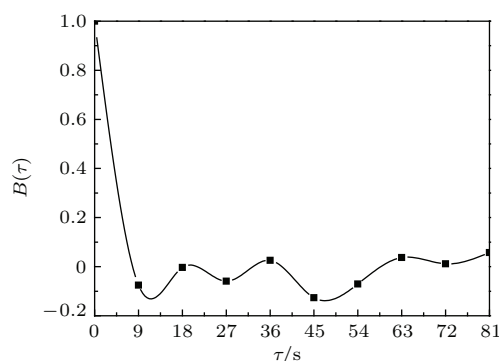


图 2 自相关系数随时间的变化

Fig. 2. Autocorrelation coefficient varies with time.

由图 2 可知, 实验所测的光学湍流的相关时间从 9 s 开始基本上维持在 ± 0.05 左右, 可以认为基本失去相关性. 根据文献^[10]可知近地面大气温度场相关时间尺度一般不超过 20 s, 其他一些物理量, 如超声虚温、温差等的相关时间都在一定范围内变动, 该范围一般为几秒到 100 多秒. 考虑到统计时间既要远大于自相关时间, 又要保证有足够的数据点, 文章的统计平均方法采取的是每三分钟的相关系数做一次平均.

4 空间相关函数的典型形态与发生概率

4.1 空间相关函数的多种形态

图 3 至图 9 以每一秒做一次相关运算, 得出空间相关系数, 根据 (10) 式给出的基本原理, 对相关系数做傅里叶变换得到功率谱, 以便更直观地展现

出湍流状态. 具体的估算采用了普通的周期图法, 即 N 为随机信号 $x(n)$ 的长度, 则功率谱密度为

$$\hat{S}_x(K) = \frac{1}{N} |\text{FFT}[x(n)]|^2, \\ K = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (11)$$

其中 $\hat{S}_x(K)$ 代表信号 $x(n)$ 的功率谱密度的估计值, K 代表信号的空间矢径.

图3至图9中的(a)图给出了随机选取的一天中多个不同时刻的一组光学湍流空间相关函数变化曲线, 与之相对应的湍流状态的差异, 则由

图3至图9(b)中空间功率谱的细节变化体现出来, 这里的功率谱以双对数坐标显示. 观察图3至图9(a)不难发现: 对于每组相关函数曲线, 均有显著的振荡变化趋势, 其相关系数有时为正、有时为负; 随着间距的增大, 可能表现出振荡衰减或增强的趋势, 也可能并无明显趋势; 总体来说, 由于图3至图9仅仅是1 s 的统计结果, 而1 s 还处于湍流的相关时间内, 远远达不到统计平均的要求, 所以相关函数具有较强的随机性, 无法用同一种变化趋势来描述.

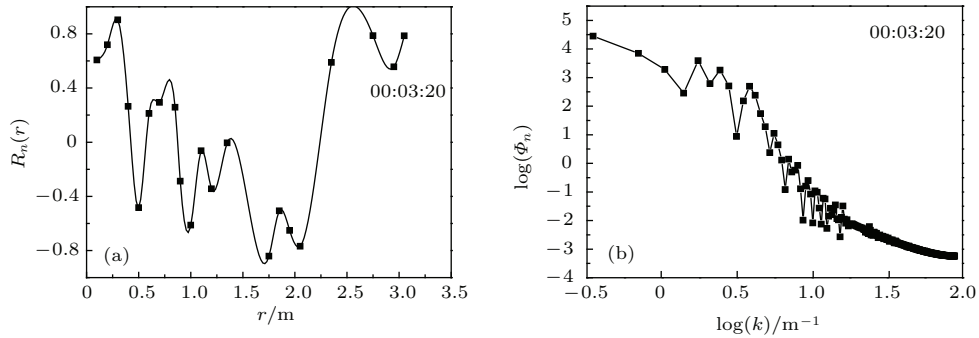


图3 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 3. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

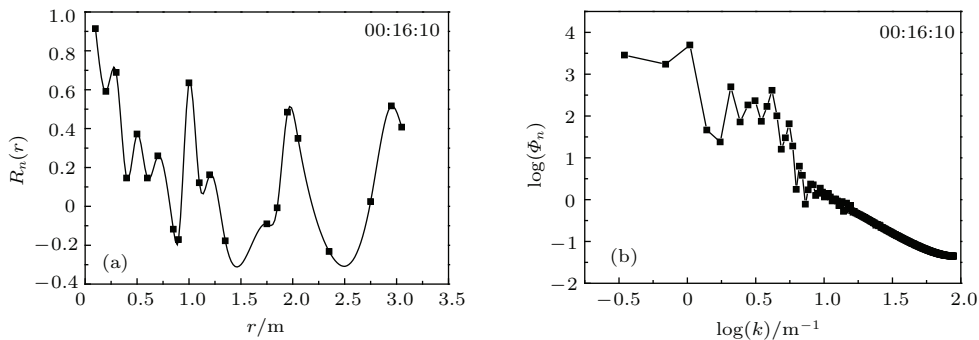


图4 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 4. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

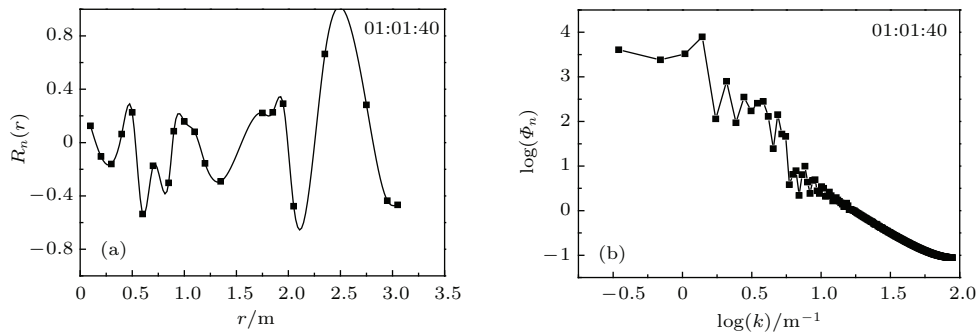


图5 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 5. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

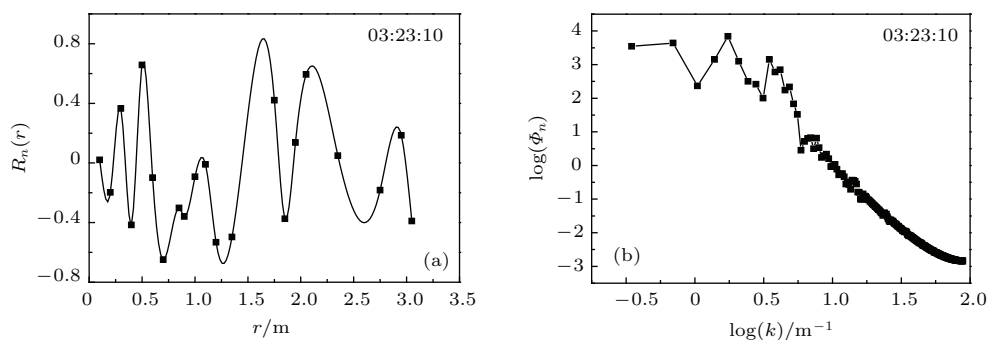


图6 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 6. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

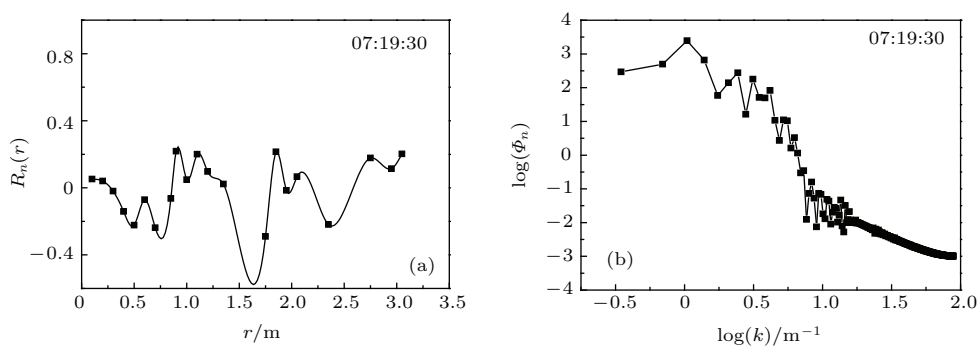


图7 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 7. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

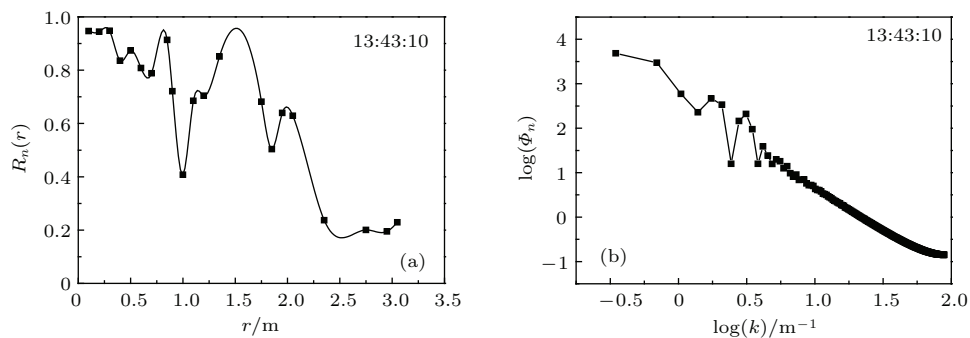


图8 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 8. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

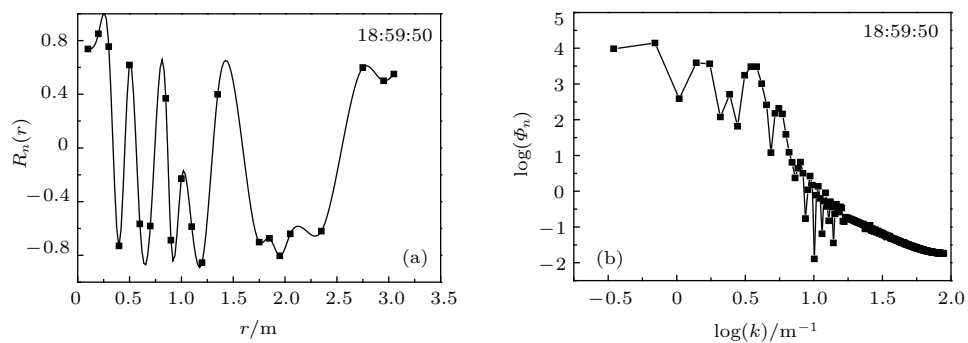


图9 (a) 空间相关函数; (b) 空间功率谱

Fig. 9. (a) Spatial correlation function; (b) spatial power spectrum.

4.2 空间相关函数的典型形态

图 10 是以三分钟为统计时间, 得出的空间相关函数较为典型的两种形态. A 形态表现为随间距的增大, 相关系数逐渐下降, 当间距达到一定的值之后, 相关性趋于 0, 比较符合各向同性湍流理论模型. 但是由于本文仅仅为一个空间维度的测量, 故只能说符合 A 形态的湍流在所测空间维度上是均匀发展的 (从时间角度上看, 为平稳湍流), 即湍流的统计性质与空间的具体位置无关, 但至于此时的湍流是否符合 Kolmogorov 湍流的幂律, 还有待进一步的拟合. B 形态并没有出现相关系数逐渐下降的变化趋势, 而是表现为相关系数始终在 0 附近且保持振荡. 初步推断形成 B 类形态的主要原因为: 1) 湍流未达到均匀状态, 导致距离很近的两点就失去相关性; 2) 该时间段的大气为非湍流状态, 所以相关系数在 0 附近振荡. 除了这两种形态, 偶尔会出现相关系数在小尺度上较小、大尺度上较大的形态或是较大的负相关, 由于这些形态出现的概率较低且没有统一的规律可循, 可认为是数据统计中出现的噪声信号等, 暂时不作考虑. 将各种形态发生的概率进行统计发现: 一天中, A 类形态约占到 58.7%; B 类形态约占到 37.9%; 其余的各种无明显规律的形态约占了 3.4%.

对影响光学湍流空间相关性的因素进行定量的分析, 根据 (5), (6) 式可知, 在外尺度的范围内, 光学湍流的强度与其空间相关函数具有一定的正比关系, 即当尺度一定时, 强度越大, 其空间相关性越强. 另一方面, 湍流强度不仅对其空间相关性的大小有影响, 对空间相关函数的形态也具有一定的影响, 如图 11 所示, C 曲线表示 A 形态发生概率的日变化, 同时, 为了便于分析, 将以折射率起伏方差 σ_n^2 为表征的光学湍流强度日变化曲线显示为 D, 其中 σ_n^2 是 7 个通道的平均值. 直观地看, A 形态的出现很大程度上受到湍流强度的影响. 其中湍流强度较大的时间段 (09 : 00—16 : 00), A 形态出现的概率极高; 而湍流较弱时, 其出现概率较低且不稳定. 同时, 对比 00 : 00—04 : 00 与 18 : 00—22 : 00, 可以发现这两个时间段, 光学湍流的强度相差不大, 但是空间相关函数的形态却有很大的差异. 初步推断, 当光学湍流强度较大时, 其状态也得到较为充分的发展, 此时湍流的各种统计平均结果与理论模型都比较接近; 当湍流较弱时, 湍流不能用同一种

发展状态来描述, 此时湍流的强弱变化、是否处于平稳状态等因素均能影响其空间相关性.

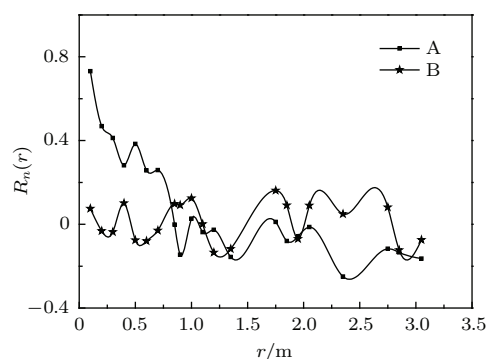


图 10 光学湍流空间相关函数的两种典型形态

Fig. 10. Two classical forms of correlation function.

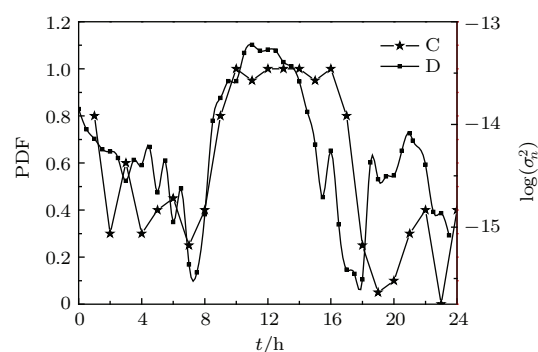


图 11 C: A 形态发生概率的日变化; D: 光学湍流强度的日变化

Fig. 11. C: Daily variation of the A form probability; D: Daily variation of the intensity.

另一方面, 图 10 中的湍流空间相关函数均出现了一定程度的振荡现象, 理论上, 若空间两点不存在相关性, 则相关系数应该恒为 0. 由于数据经过了统计平均处理, 所以数据的不稳定性不是引起振荡的主要因素, 根据文献 [16] 可知均匀各向同性湍流中也存在着相干结构, 文献 [17] 的实验证实自由大气中也存在湍流的相干结构, 并且通过相关分析、谱分析等方法找出了湍流的相干结构. 所以初步推断, 引起湍流空间相关函数振荡的一个重要因素为湍流的相干结构.

实测的光学湍流空间相关函数经过一段时间的统计平均之后, 多数情况是符合理论模型的, 但对于处于边界层的真实大气, 其复杂性远远超过了理论模型, 所以也会有一些其他形态出现. 对于光学湍流空间相关函数结构形态的成因, 可以初步给出这样的结论: 1) 较符合理论模型的 A 形态的形成很大程度上与湍流强度较大且湍流发展较稳定有关; 而对于那些在测量路径上不那么均匀且强度不

大的湍流,一般空间相关性都比较低;2)对于湍流空间相关函数上出现的振荡现象,初步认定与湍流的相干结构有关.

光学湍流的空间相关性研究与大气相干长度的研究也具有一定的关系,初步推断:当光波传输距离一定时,湍流的空间相关性越好,光场的空间相干性就越差.这一点不难解释,因为光学湍流考虑的是脉动量而非平均量,当湍流越强时,流场的起伏越明显,位于湍流外尺度内的两点空间相关性越强,而此时光波的空间相干性必然越弱.

总的来说,本文采用空间布点探测的办法直接给出光学湍流的空间相关函数,在湍流空间相关性的研究中具有一定的意义.因为不管是研究湍流本身的空间结构^[18-20]还是湍流效应^[21-25],湍流的空间相关性都至关重要.文章从各个侧面展示了实测的光学湍流空间相关函数的结构形态.实际上,空间相关函数中包含了大量的湍流结构信息,例如,对于图10中的A形态,相关系数首次趋于0的点就可以认为是光学湍流的外尺度;同时,湍流空间功率谱也可以通过对相关函数做傅里叶变换得到.但是,仅仅在一个维度上进行测量并不能完全展现出湍流的空间结构,所以,下一步工作的重点将是在空间多个维度进行测量,并对湍流的空间尺度、空间谱、间歇结构、相干结构的时间演化特征进行统计分析,并最终尝试给出non-Kolmogorov湍流的经验模型.

5 结 论

本文利用光纤湍流传感器阵列对近地面的大气光学湍流进行了空间布点探测,根据多点同步观测的折射率随机起伏时间序列,得到了大气光学湍流的空间相关函数.研究的侧重点在于光学湍流空间相关性的统计时间和计算原理的确定,目的在于尽可能全面的展现出湍流的空间相关函数结构形态的各个侧面,并初步分析了各种形态的成因.

得出的主要结果有:对于晴天近地层大气光学湍流来说,其折射率起伏的空间相关函数符合各向同性湍流理论模型的约占58.7%,而相关系数始终较小的形态约占到37.9%.结果表明:近地层光学湍流的空间相关性是随湍流强度或发展程度的变化而动态变化的,包括相关系数的大小和变化趋势.其中相关系数的大小主要是由湍流的强度大小

决定,在一定尺度范围内,湍流越强,其空间相关性越大;而相关函数的变化趋势,即是否符合理论模型,不仅由湍流强度决定,与湍流的发展程度密切相关,如果大气处于平流或者非各向同性湍流的状态,那么其空间相关性几乎不由两点间距决定,而是始终处于0附近振荡.另一方面,初步推断湍流空间相关函数的振荡现象是由于湍流的空间相干结构导致.

从光学应用的角度来看,自适应光学等研究通常都是采用Kolmogorov标度理论,但实际的湍流状态并不完全满足该理论^[26],而本文给出湍流的空间相关函数的典型形态和发生概率,目的在于对实际湍流状态偏离理论模型的程度做一定的分析,并支持相干长度的测量和计算分析,判断假设的条件是否具备合理性.

当前的研究作为研究光学湍流空间相关性的第一步,先给出实测的相关函数的结构形态,下一步的工作将以实测的空间相关函数为基础,对近地面各向同性湍流的空间结构进行进一步的研究.主要是针对non-Kolmogorov湍流的空间外尺度和空间功率谱进行研究,最终将尝试给出非K湍流的经验模型.另一方面,针对特殊天气条件下光学湍流的发展过程及其影响因素的研究具备丰富的内涵,也将是未来工作的重点,将作为专题开展.对光学湍流的空间相关函数进行观测和分析,所得结论除了可以揭示其本身空间结构,对标量湍流场的研究也具有一定的借鉴作用.如果进行长期的观测,给出实测的湍流空间结构参数,改变以往一贯采用既定湍流模型和路径平均假设结果而带来的众多不确定因素,归纳得出光学湍流空间谱的时空分布模型,则可为光传播效应的数值模拟提供必要的实验依据.

感谢安徽光机所吴晓庆研究员的讨论.

参考文献

- [1] Rao R Z 2012 *Modern Atmospheric Optics* (Beijing: Science Press) p155-159 (in Chinese) [饶瑞中 2012 现代大气光学 (北京: 科学出版社) 第155—159页]
- [2] Cui L Y, Xue B D, Cao X G, Zhou F G 2014 *J. Opt. Soc. Am. A* **31** 829
- [3] Reinhardt C N, Tsintikidis D, Hammel S, Kuga Y, Ritcey J A, Ishimaru A 2012 *Opt. Eng.* **51** 031205

- [4] Wu X Q, Wang Y J, Zeng Z Y, Gong Z B 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14**233 (in Chinese) [吴晓庆, 王英俭, 曾宗泳, 龚知本 2002 强激光与粒子束 **14**233]
- [5] Wu X Q, Huang Y B, Mei H P, Shao S Y, Huang H H, Qian X M, Cui C L 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 0601001 (in Chinese) [吴晓庆, 黄印博, 梅海平, 邵士勇, 黄宏华, 钱仙妹, 崔朝龙 2014 光学学报 **34** 0601001]
- [6] Guo Y M, Ma X Y, Rao C H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 13420701 (in Chinese) [郭友明, 马晓燠, 饶长辉 2013 物理学报 **62** 13420701]
- [7] Cai D M, Wang K, Jia P, Wang D, Liu J X 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 10421701 (in Chinese) [蔡冬梅, 王昆, 贾鹏, 王东, 刘建霞 2014 物理学报 **63** 10421701]
- [8] Shraiman B I, Siggia E D 2000 *Nature* **405** 639
- [9] Jiang N 1999 *Mechanics in Engineering* **21** 75 (in Chinese) [姜楠 1999 力学与实践 **21** 75]
- [10] Mei H P 2007 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, the Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [梅海平 2006 博士学位论文(合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院)]
- [11] Xiao S M 2014 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: Hefei Institutes of Physical Science, the 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)]
- [12] Kolmogorov A N 1991 *Proc. R. Soc. Lond. A* **434** 9
- [13] Hao L, Mei H P, Qian X M, Zhu W Y, Rao R Z 2008 *Acta Photonica Sin.* **37** 2292 (in Chinese) [郝磊, 梅海平, 钱仙妹, 朱文越, 饶瑞中 2008 光子学报 **37** 2292]
- [14] Xiao S M, Mei H P, Qian X M, Rao R Z 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0201002 (in Chinese) [肖树妹, 梅海平, 钱仙妹, 饶瑞中 2011 光学学报 **31** 0201002]
- [15] Lukin V P 2005 *Proceedings of SPIE* Bellingham, WA, September 21–22, 2005p598101
- [16] She Z S, Jackson E, Orszag S A 1990 *Nature* **344** 226
- [17] Nosov V V, Grigoriev V M, Kovadlo P G, Lukin V P, Nosov E V, Torgaev A V 2008 *Proceedings of SPIE* Krasnoyarsk, Russian, June 22, p729609
- [18] Simmons L F G, Salter C, Taylor G I 1938 *Proc. Roy. Soc. Lond. A* **165** 73
- [19] Karman T V 1937 *Physics* **23** 98
- [20] Townsend A A 1947 *Math. Proc. Cambridge*. **43** 560
- [21] Renhorn I G E, Svensson T, Boreman G D 2013 *Opt. Eng.* **52** 026001
- [22] Kulikov V A, Andreeva M S, Koryabin A V, Shmalhausen V I 2012 *Appl. Optics* **51** 8505
- [23] Consortini A, Innocenti C, Paoli G 2002 *Opt. Commun.* **214** 9
- [24] Voistekhovich V V, Cuevas S 1995 *J. Opt. Soc. Am. A* **12** 2523
- [25] Osman K T, Horbury T S 2007 *Astrophys. J* **654** 103
- [26] Rao C H, Jiang W H, Ling N 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 1323 (in Chinese) [饶长辉, 姜文汉, 凌宁 2000 光学学报 **20** 1323]

Spatial correlation experimental analysis of atmospheric optical turbulence in the near ground layer*

Wang Qian¹⁾²⁾ Mei Hai-Ping^{1)†} Qian Xian-Mei¹⁾ Rao Rui-Zhong¹⁾

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 15 September 2014; revised manuscript received 27 November 2014)

Abstract

Atmospheric optical turbulence means refractive index random fluctuation of atmosphere. In this article, according to the concept of correlation function, the measurement principle, measurement schemes, and data processing method of spatial correlation function are given based on a high-quality fiber optical turbulence sensing array. Determining the statistical time and the calculation principle of the spatial correlation is the main point of current research. Emphasis is put on demonstrating the kinds of structural forms and analyzing the impact elements of spatial correlation function in turbulence as clear as possible. Using the sensing array, experimental measurement is promoted in the near ground layer and many forms of correlation functions are revealed. Results show that there are two main structural forms of the spatial correlation function: the first one shows an isotropy-model form, which tends to decrease with the increase of spatial displacement, and then tends to zero after outer scale, the coincidence rate is about 58.7%. The other one tends to oscillate around zero, and the coincidence rate is about 37.9%. By analyzing the probability and impact elements, it is not difficult to know that the spatial correlation of an optical turbulence mainly depends on the intensity and development degree of the optical turbulence; and the coherent structure is an important factor of oscillation in the correlation functions. On the one hand, the value of correlation coefficient is mainly determined by the intensity of the optical turbulence; and on a certain scale, the stronger the turbulence, the bigger the value of correlation coefficient becomes. On the other hand, the variation tendency of correlation function is not only determined by the intensity of turbulence, but also by the development degree of the optical turbulence. When the atmosphere is in advection or anisotropy, its spatial correlation coefficient will oscillate around zero and be unrelated to the spatial displacement. The spatial correlation function obtained by the sensor array set is not only the foundation of analyzing the spatial structure, but also the beginning of giving non-Kolmogorov model of turbulence.

Keywords: atmospheric optical turbulence, spatial correlation function, fiber optical turbulence sensor, structure form

PACS: 42.68.-w, 47.27.Gs, 07.60.Vg

DOI: 10.7498/aps.64.114212

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41205010, 61107066).

† Corresponding author. E-mail: hpmei@aiofm.ac.cn