

小波分析在近地面湍流相干结构研究中的应用

白士伟^{1,2}, 孙刚^{1*}, 李学彬¹, 刘庆^{1,2}, 翁宁泉^{1,3}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031;

³中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

摘要 基于频域小波分析方法研究了大气湍流相干结构特性, 采用 Mexican Hat 小波函数分析了近地面风速脉动数据资料。根据能量极大值原则识别相干结构主尺度, 利用重构公式提取相干结构波形。结果表明重构相干波形是具有准周期运动的信号, 它反映了原始脉动信号中某个中间尺度上的运动, 两者波形在变化趋势上十分吻合; 小波系数的时间与尺度图可以很好地解释湍流的多尺度性和间歇性, 反映了湍流相干结构的演变过程。在分析时间段内对风速相干结构的主尺度进行统计分析, 发现相干结构的主尺度近似满足正态分布。

关键词 大气光学; 大气湍流; 小波分析; 相干结构

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0501002

Application of Wavelet Analysis in Research of Near-Surface Turbulence Coherent Structure

Bai Shiwei^{1,2}, Sun Gang¹, Li Xuebin¹, Liu Qing^{1,2}, Weng Ningquan^{1,3}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230031, China;

³School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract The coherent structure characteristics of atmospheric turbulence are investigated based on frequency domain wavelet analysis method. The data of wind velocity fluctuation over the ground are analyzed with Mexican Hat wavelet function. According to the maximum energy principle, the principal scale of coherent structure is identified and the coherent structure waveform is extracted by reconstruction formula. Results show that the reconstructed coherent waveform is a signal with quasi-periodic motion, which reflects a middle scale movement of the existing original pulse signal, and their waveforms coincide well with each other in the changing trend. Time and scale maps of wavelet coefficients can well explain the multi-scale and intermittence characteristics of turbulence, and reflect the evolution of turbulence coherent structure. During the analysis period, statistical analysis on the main scale of wind speed coherent structure is carried out, and it's found that the main scale of coherent structure satisfies the normal distribution approximately.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; wavelet analysis; coherent structure

OCIS codes 010.1290; 010.1330; 100.7410

1 引言

通常把湍流中出现的有组织的涡旋结构称为相

干结构^[1]。相干结构的发现表明湍流是无序与有序运动相结合的复杂运动。湍流相干结构是湍流中在时间和空间上具有自组织特性的大尺度脉动结构,

收稿日期: 2017-10-10; 收到修改稿日期: 2017-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(41375017)

作者简介: 白士伟(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气参数测量与分析方面的研究。E-mail: baishiwei0103@163.com

导师简介: 翁宁泉(1966—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气物理方面的研究。E-mail: wnq@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: gsun@aiofm.ac.cn

对湍流的维持、发展和演化具有重要作用^[2]。光波在湍流大气中传输时,湍流引起折射率的随机起伏,导致光波参数随机起伏,产生一系列大气湍流效应,严重制约了光传输、天文观测、光通信等光电工程的应用^[3-8]。研究表明,大气湍流对光束的影响程度不仅与湍流强度有关,还与湍流尺度有关^[9-11]。大气边界层观测到的斜坡结构也是一种相干结构,这种结构的涡旋尺度通常较大,产生的折射率突变面对光传输具有一定的影响^[12]。当光束在弱湍流介质中传输时,常常出现某种影响光束质量的结构,而各向同性湍流传输理论无法解释此类现象^[13],说明仅考虑湍流强度对光传输的影响是不全面的,还需要考虑湍流尺度对光传输的影响。因此,对大气湍流相干结构尺度特性的研究具有重要意义。

早期对湍流相干结构的研究采用流场显示技术法^[1]、条件采样技术法^[14]和谱分析法^[15]。流场显示技术法通常结合可见材料显示技术或者光学显示技术来观察速度场、温度场或密度场,得到湍流相干结构特性图样,此方法原理简单,但是操作起来比较困难,不能对相干结构进行定量描述;条件采样技术法有 mu-level 法、象限分解法和可变时间间隔平均(VITA)法,这几种方法都存在 1~2 个经验参数,这些经验参数的设置很困难,且经验参数设置值不同,所得结果的差异很大;这几种方法带有很大的主观性,无法得到相干结构的全过程^[16]。谱分析通常是将时域信号在频域中展开,适合处理平稳信号。对于非平稳大气信号,其谱分析的分辨率很低,不能识别突变点处的时域信息。

小波分析是一种时频分析方法,小波函数具有快速衰减和有限支撑的特点,能合理模拟原始信号的局部结构特征,并保留信号局部特征。在湍流相干结构应用中,小波分析既能消除条件采样技术法中经验参数所带来的主观影响,又能克服谱分析单分辨率的缺陷,被誉为“数学中的显微镜”。通常情况下,在信号平稳的低频部分采用较低的时间分辨率提高频率的分辨率,在信号非平稳的高频部分采用较低的频率分辨率来获取准确的时间定位。因此,采用小波分析方法来探测湍流信号时,可识别湍流相干结构,并可得到相干结构的主尺度。

本文采用频域连续小波分析的方法,对近地面湍流风速脉动资料进行分析研究。结合能量极大值原则,确定湍流相干结构主尺度与周期,采用统计方法确定了相干结构周期与主尺度比的范围。

2 小波分析方法

小波分析又称子波分析,是近年来基于傅里叶分析发展起来的一种时频分析方法,在时域和频域都能表征信号局部信息。对一维湍流信号 $f(x)$ 在时域中进行连续小波变换:

$$W_f(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) g_{a,b}^*(x) dx, \quad (1)$$

$$g_{a,b}(x) = a^{-\frac{1}{2}} g\left(\frac{x-b}{a}\right), \quad (2)$$

式中: $g_{a,b}(x)$ 为小波基函数,由母小波 $g(x)$ 经平移和伸缩变换后得到; $g_{a,b}^*(x)$ 为 $g_{a,b}(x)$ 的复共轭; $W_f(a, b)$ 为连续小波变换系数; a 为尺度因子; b 为平移因子; x 可以是时间参数,也可以是空间参数。在频域中, $W_f(a, b)$ 可表示为

$$W_f(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(\omega) \hat{g}^*(a\omega) \exp(i b \omega) d\omega, \quad (3)$$

式中: $\hat{f}(\omega)$ 为 $f(x)$ 的傅里叶变换; $\hat{g}^*(a\omega) \exp(i b \omega)$ 为 $g_{a,b}(x)$ 的傅里叶变换; $\hat{g}^*(a\omega)$ 为 $\hat{g}(a\omega)$ 的复共轭。小波变换将一维信号变换成二维信号,以便分析时频特性。正如文献^[16]所述,湍流场中小波函数具有独特的物理意义。如果 x 代表时间参数,则 $g_{a,b}(x)$ 表示在 b 时刻产生了一个时间尺度因子为 a 的湍涡;如果 x 代表空间参数,则 $g_{a,b}(x)$ 表示在位置 b 处产生了一个空间尺度因子为 a 的湍涡。对 $f(x)$ 进行小波分析,实际是将 $f(x)$ 与 $g_{a,b}(x)$ 在位置 b 处进行局部相关分析,如果相关系数(即小波系数)很大,则表明该信号与 $g_{a,b}(x)$ 的相关性很好,说明该信号有该小波的成分,即湍流较强。

尺度为 a 的子波能量为

$$E(a) = \frac{2}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} [W_f(a, b)]^2 db, \quad (4)$$

式中: $C_g = \int_{-\infty}^{\infty} |\omega|^{-1} |\hat{g}(\omega)|^2 d\omega < \infty$, 称为容许条件,其中 $\hat{g}(\omega)$ 为 $g(x)$ 的傅里叶变换。

根据能量极大值原则,能量极大值所对应的尺度 a^* 为相干结构的主尺度。根据小波逆变换公式,通过主尺度下的小波变换系数重构相干结构波形:

$$f(a^*, x) = \frac{2}{C_g} \frac{1}{a^{*1.5}} \int_{-\infty}^{\infty} W_f(a, b) g\left(\frac{x-b}{a^*}\right) db. \quad (5)$$

Mexican Hat 小波的波形与平板湍流边界层中的猝发事件波形非常相似^[16],采用 Mexican Hat 作为母小波来提取大气湍流相干结构, Mexican Hat

小波函数的表达式为

$$g(x) = c(1 - x^2)\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right), \quad (6)$$

式中 $c = 2\pi^{-1/4}/\sqrt{3}$, Mexican Hat 小波函数对应的傅里叶变换为

$$\hat{g}(\omega) = \sqrt{2\pi}c\omega^2\exp\left(-\frac{\omega^2}{2}\right). \quad (7)$$

3 仿真分析

为了证明所提算法的可行性,将均值为 0、方差为 1 的正态分布的白噪声叠加到余弦信号 $f(t) = \cos(2\pi t/100)$ 中,构成含噪信号 $F(t)$ 。利用上述算法,从 $F(t)$ 中提取相干结构信号 $f(a^*, t)$ 。

根据(3)式可以得到小波系数,图 1 为 $F(t)$ 的小波系数时间尺度图,尺度在 22~29 s 区间段的小波系数整体较大,可以初步确定主尺度所在的位置范围。根据(4)式计算出不同尺度下的小波能量,如图 2 所示。在 $a^* = 25$ s 时能量存在极大值,根据能量极大值原则,能量最大值对应的尺度为相干结构的主尺度,则认为 25 s 是含噪信号所对应的主尺度,这与小波系数最大值所处的区间一致。

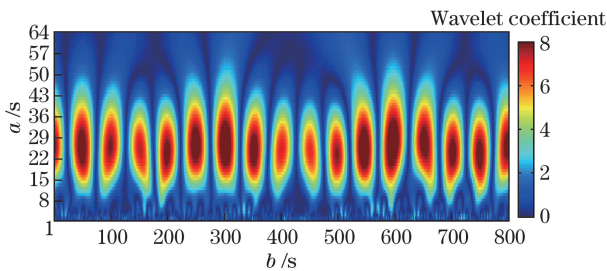


图 1 $F(t)$ 小波系数时间尺度图

Fig. 1 Time scale map of wavelet coefficient of $F(t)$

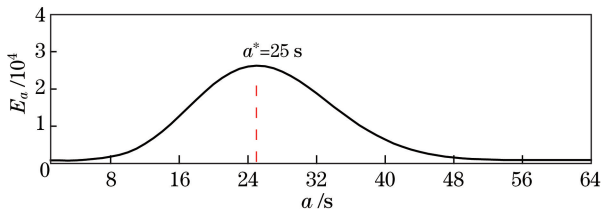


图 2 $F(t)$ 子波能量图

Fig. 2 Wavelet energy diagram of $F(t)$

根据(5)式,利用 $a = 25$ s 时的小波系数重构出 $F(t)$ 的相干波形。图 3(a) 给出了含噪信号 $F(t)$ 与重构相干信号 $f(a^*, t)$ 的比较,可以看出相干信号与含噪信号两者在波形变化趋势上完全一致,相干信号具有准周期运动,其周期为 100 s,周期与尺度的比值为 4:1。图 3(b) 给出了 $f(t)$ 与 $f(a^*, t)$ 的比较,两者基本上完全吻合且周期相等,小波函数的

冗余性使得 $f(t)$ 和 $f(a^*, t)$ 在部分区域具有较小差异。整体来看,所提方法可以准确、有效地提取相干结构。

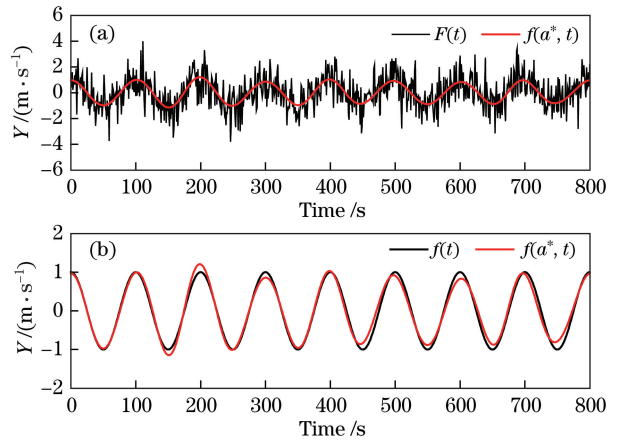


图 3 (a) $F(t)$ 与 $f(a^*, t)$ 的比较;

(b) $f(t)$ 与 $f(a^*, t)$ 的比较

Fig. 3 (a) Comparison of $F(t)$ and $f(a^*, t)$;

(b) comparison of $f(t)$ and $f(a^*, t)$

4 实验测量与分析讨论

2015—2016 年在中国甘肃敦煌地区开展了长期的近地面气象参数测量实验,实验场地的海拔为 1200 m,其下垫面为典型的戈壁砂石地貌,四周地势开阔,当地日照时间较长,全年干旱少雨,昼夜温差较大,属于温带干旱性气候。实验仪器采用 Campbell 公司生产的三维超声风速仪 CAST3,其安装高度距离地面 2 m,采样频率为 20 Hz。

4.1 速度相干结构

选取 2016-01-17T10:00/2016-01-07T10:10 的三维风速 U 、 V 、 W 数据资料进行分析,数据长度为 12000。以 10 min 为平均时间长度来获取风速脉动 U_1 、 V_1 、 W_1 数据资料。近年来,大气边界层湍流相干结构的研究成果表明近地面湍流相干结构尺度大于 1 s,且低于 100 s^[15,17-20],所以仅对 1~100 s 尺度进行分析。

图 4(a) 给出 U_1 在不同尺度下的小波系数,不同的颜色代表小波系数的大小,即不同湍流的能量强弱。图 4(b) 为 U_1 随时间的变化,其中最大的含能湍流出现在 0~150 s 时间段的 20~70 s 尺度上;当尺度低于 20 s 或高于 70 s 时,湍流能量较低,这与大尺度强湍流背景下存在弱的小尺度湍流、大尺度弱湍流背景下存在局部强湍流涡旋的物理图像相一致;随着时间的推移,最大含能湍流逐渐向小尺度扩散,对应湍流中大的湍流破碎成小的湍流的能量传

递过程,揭示了湍流的多尺度性和间歇性结构特点。根据小波函数的性质,有奇点的信号对应的小波系数较大,因此小波变换能根据小波系数大小识别出突变点的位置,在湍流中就是相干结构出现的位置,图 4(a)中下方的箭头指出相干结构出现的位置,与图 4(b)中时序信号产生的突变位置一一对应。

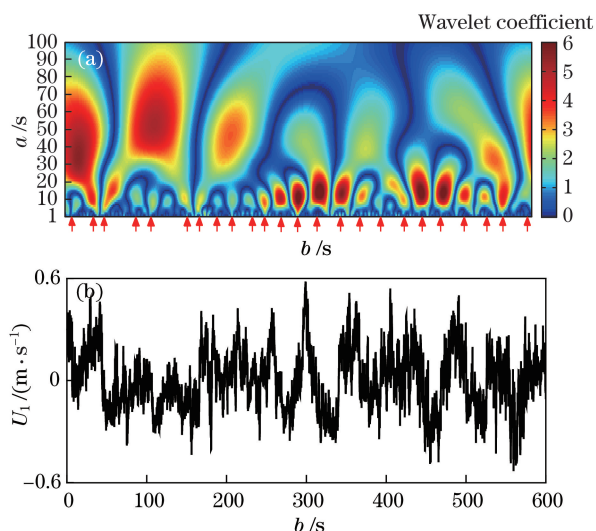


图 4 (a) U_1 的小波系数时间尺度图; (b) U_1 的时间序列
Fig. 4 (a) Time scale map of wavelet coefficient of U_1 ; (b) time series of U_1

图 5(a)给出 V_1 在不同尺度下的小波系数,在前 300 s 时间段内,小尺度湍流涡旋能量较小,大尺度湍流涡旋能量较大。图 5(b)给出 W_1 在不同尺度下的小波系数,整体上,最大含能涡旋出现在小尺度上,故 W 方向呈现小尺度的强湍流,大尺度呈现出弱湍流趋势。三维风速脉动小波系数图很好地显示了湍流的多尺度性和间歇性,也反映了湍流相干结构的演变过程。

图 6(a)~(c)给出了风速脉动小波能量随时间尺度的变化。由图可见, U_1 、 V_1 、 W_1 的时间主尺度分别是 13,12,11 s。根据重构公式,利用主尺度所对应的小波系数提取相干结构波形。

图 7(a)~(c)给出了风速脉动相干结构波形信号与原始信号的比较。由图可见 U 、 V 、 W 方向相干结构能量强度依次减弱,这与陈炯等^[20]在城市冠层提取的大气湍流相干结构中得到的结果一致,与此对应的相干结构时间主尺度在 U 、 V 、 W 方向的持续时间逐渐变短,在量级上,图 7 结果与 Gao 等^[17]在大气与森林交界面处得到的结果一致,比实验室湍流的主尺度大 3 个量级^[21]。

从脉动信号与相干波形信号的比较来看,两者在波形变化趋势上十分吻合,重构相干波形是具有

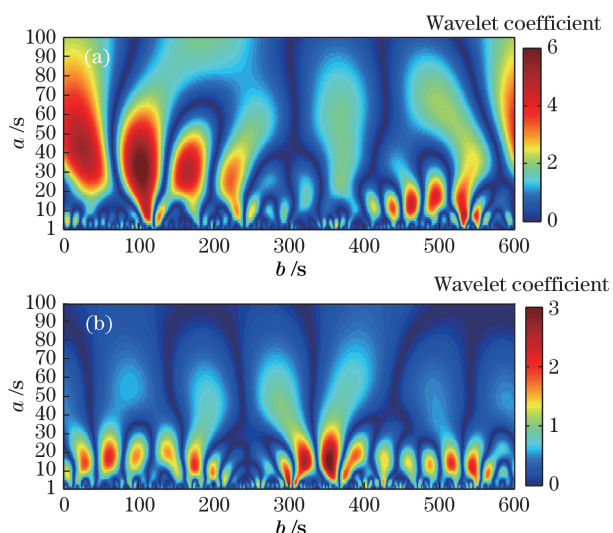


图 5 风速脉动的小波系数时间尺度图。(a) V_1 ; (b) W_1
Fig. 5 Time scale map of wavelet coefficient of wind velocity fluctuation. (a) V_1 ; (b) W_1

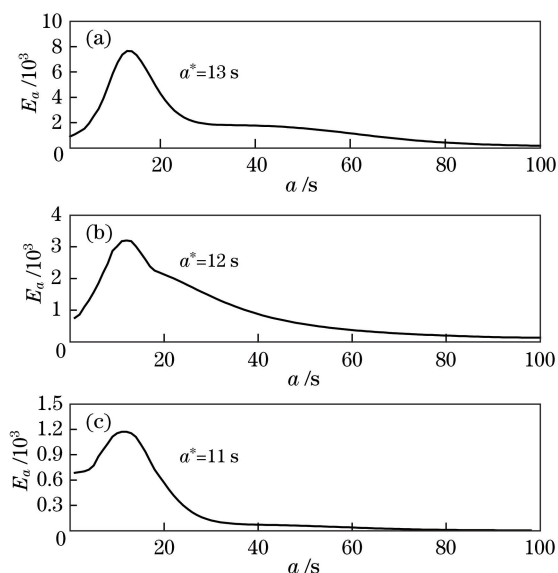


图 6 三维风速脉动小波能量曲线。(a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1
Fig. 6 Wavelet energy curves of three-dimensional wind velocity fluctuation. (a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

准周期运动的信号,反映了原始脉动信号某个中间尺度上的运动。由图 7(a)可知,时间尺度为 13 s 的湍涡在 600 s 内经历了约 12 个正负振荡周期,平均相干周期为 50 s;同理, V_1 、 W_1 的平均相干周期分别为 40 s 和 46 s; U_1 、 V_1 、 W_1 对应的时间主尺度分别为 13,12,11 s。三个方向的相干结构周期与时间尺度的比值分别为 3.85:1、3.33:1 和 4.18:1,并且 U 、 V 、 W 分量的周期与尺度的比值非常接近余弦信号的尺度与周期的比值 4:1。

统计学中通常采用偏度 S 和峰度 K 反映随机变量同正态分布的偏离程度^[22]。 S 描述随机变量总

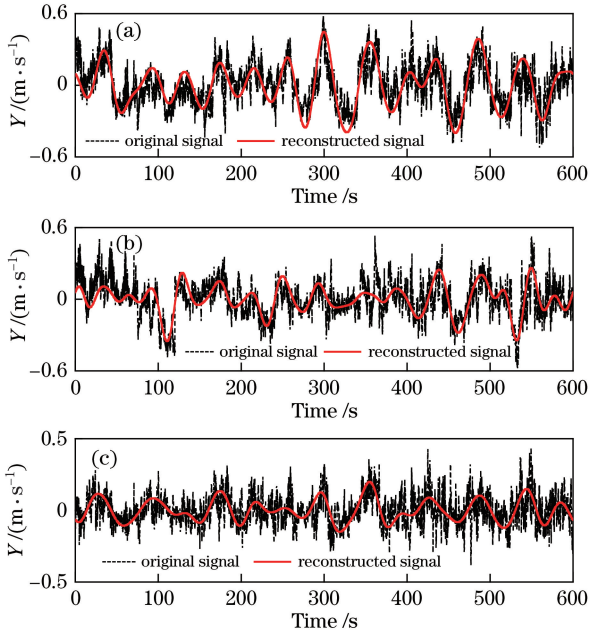


图 7 风速脉动信号与相干波形信号的比较。
(a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

Fig. 7 Comparison of wind velocity fluctuation signal and coherent waveform signal. (a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

体分布的非对称性, K 描述随机变量总体分布的平坦程度。 $S < 0$ 是左偏, 反之是右偏; 对于均值为 μ 、标准差为 σ 的随机变量 X , 其偏差 S 和峰度 K 可分别表示为

$$S = \frac{(X - \mu)^3}{\sigma^3}, \quad (8)$$

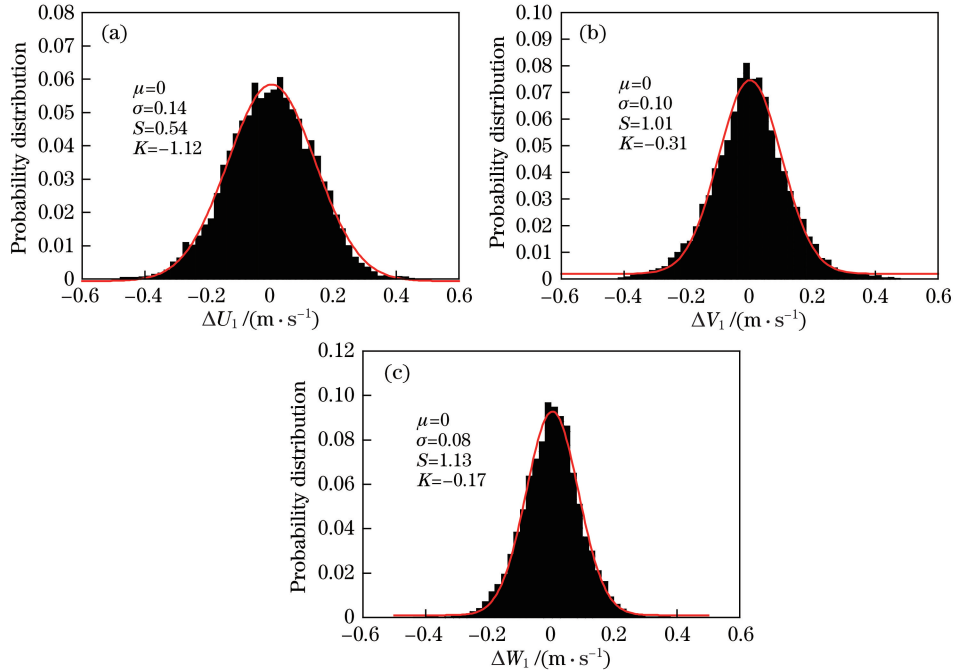


图 8 重构偏差的概率分布。(a) ΔU_1 ; (b) ΔV_1 ; (c) ΔW_1

Fig. 8 Probability distributions of reconstructed deviation. (a) ΔU_1 ; (b) ΔV_1 ; (c) ΔW_1

$$K = \frac{(X - \mu)^4}{\sigma^4} - 3. \quad (9)$$

$K < 0$ 是平峰, 反之是尖峰。对于 $\mu = 0$ 、标准差为 σ 的正态分布, $S = 0, K = 0$ 。如果随机变量 X 服从正态分布, 在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下, 其偏度系数和峰度系数若满足

$$|S| > 1.96 \sqrt{\frac{6(n-2)}{(n+1)(n+3)}}, \quad (10)$$

$$|K| > 1.96 \sqrt{\frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}}, \quad (11)$$

则拒绝假设, 即变量 X 不服从正态分布, 反之服从正态分布, 其中 n 为样本个数^[23]。

为了验证所提方法重构相干信号的合理性和准确性, 将脉动信号与各自相干信号的差值称为重构偏差, 分别记为 $\Delta U_1, \Delta V_1, \Delta W_1$ 。图 8 给出了重构偏差的概率分布, 不同方向上的概率分布中心位置均在零点, U, V, W 方向的重构偏差 $\Delta U_1, \Delta V_1, \Delta W_1$ 的标准差分别为 0.14, 0.10, 0.08; 偏度均大于 0, 属于右偏, 说明大于平均值概率密度; 峰度均小于 0, 属于平峰。经检验可知, 三个方向上重构偏差的概率分布近似服从正态分布, 验证了重构相干信号的合理性和准确性。

4.2 谱分析

谱分析是一种常用的时频信号分析方法, 通常在频域上揭示复杂信号的变化规律, 广泛应用于大

气湍流的研究中。根据维纳-辛钦定理,功率谱密度与自相关函数互为傅里叶变换,通常情况下,通过自相关函数来计算功率谱密度。对脉动信号和相干信号进行功率谱分析,得到功率谱及谱幂率。根据伦奎斯特定律,对于 20 Hz 的数据采样频率,其功率谱的最高频率为 10 Hz。对每组时间序列数据进行傅里叶变换,得到功率谱。采用最小二乘法进行线性拟合,得到谱幂率。

图 9 为风速脉动信号和相干信号的功率谱比

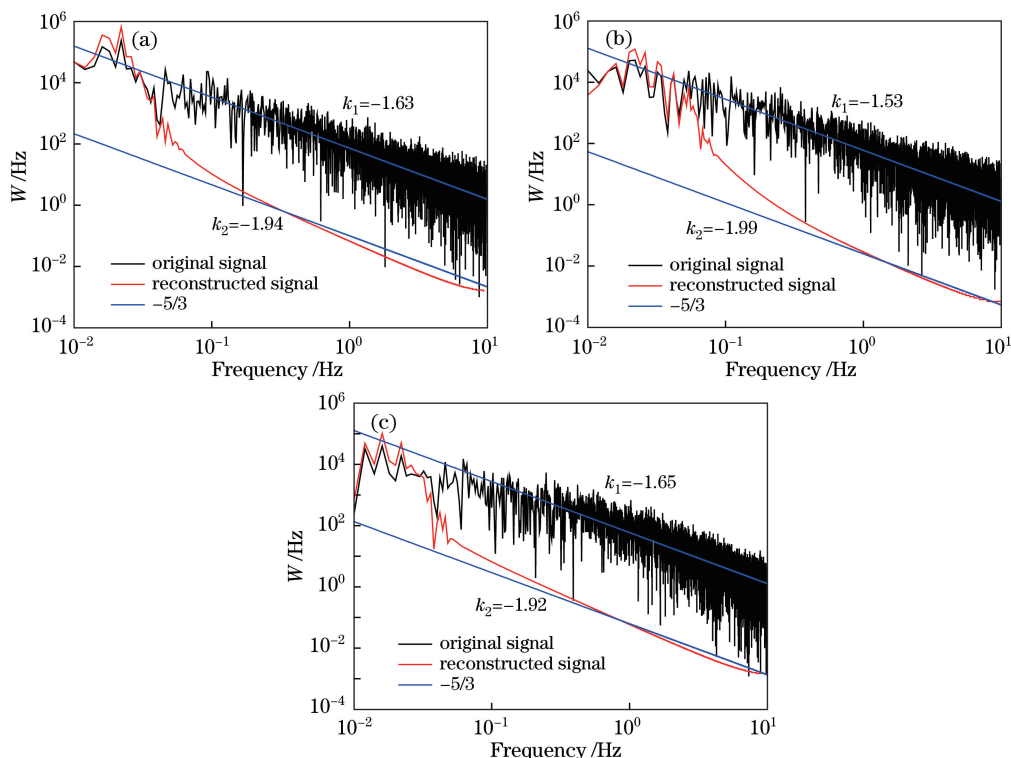


图 9 风速脉动信号和相干信号的功率谱比较。(a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

Fig. 9 Comparison of power spectra of wind velocity fluctuation and coherent signals. (a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

4.3 统计分析

为了更详细地了解相干结构主尺度的概率分布特征,选取了 2016-01-17T00:00/2016-01-18T24:00 的 48 h 三维风速 U 、 V 、 W 的数据资料进行分析,这段时间天气晴朗。以 10 min 的数据资料为一组,共分了 864 组,每组数据个数为 12000。

图 10 给出了三维风速在不同尺度下的相干结构出现的概率分布。风速 U 、 V 分量相干结构主尺度概率分布中心均落在 16~18 s 区间段, W 分量的相干结构主尺度概率分布中心在 10~12 s 区间段,垂直风速的相干结构主尺度小于其他两个方向风速相干结构主尺度; U 、 V 、 W 方向相干结构主尺度的平均值分别为 17.02, 16.67, 3.30 s; 其标准差分别为 4.56, 4.67, 3.30 s; 三个方向的偏度在 0 附近,峰度

较,由图可见,速度脉动湍流谱幂率 k 在 $-5/3$ 附近,曾宗泳等^[24]认为谱幂率在 $-5/3 \pm 0.2$ 区间内的谱符合 Kolmogorov 的 $-5/3$ 定律;相干结构的湍流谱幂率均小于 $-5/3$,在 -2.0 附近,偏离 $-5/3$ 定律,因为相干结构是叠加在均匀湍流场上的大尺度结构,体现为大尺度运动的能量比通常的湍流要强。因此在功率谱的变化趋势上,二者都是随尺度变小功率谱单调减小,且包含相干结构的湍流功率谱的斜率变陡。

均小于 0,属于平峰。经检验可知,三个方向的峰度系数和偏度系数均拒绝假设,说明相干结构的主尺度概率分布近似服从正态分布,这与光学湍流 C_n^2 的概率分布特征一致^[25]。

为了详细了解实验期间湍流相干结构周期与主尺度的关系,图 11 给出了相干结构周期与尺度比值的概率分布。可以看出,概率最大值出现的位置在 3.80 附近,标准差为 0.17,偏度系数为 0.43,峰度系数为 -1.28 ;经检验可知,相干结构周期与尺度比服从正态分布,其取值范围为 3.80 ± 0.50 。相干周期与主尺度不相等,间接说明了湍流存在间歇性。

5 结 论

提出了一种基于频域连续小波变换分析近地面

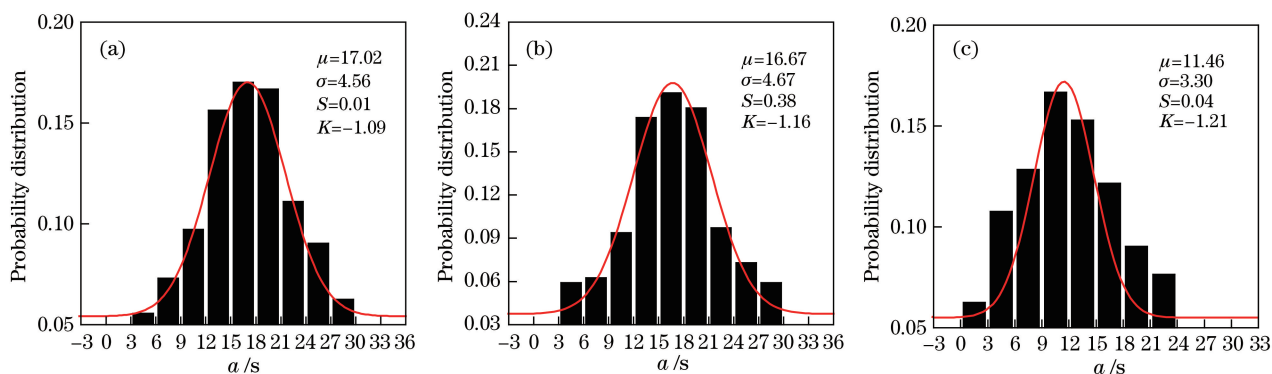


图 10 不同尺度下相干结构出现的概率分布。(a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

Fig. 10 Probability distributions of coherent structure at different scales. (a) U_1 ; (b) V_1 ; (c) W_1

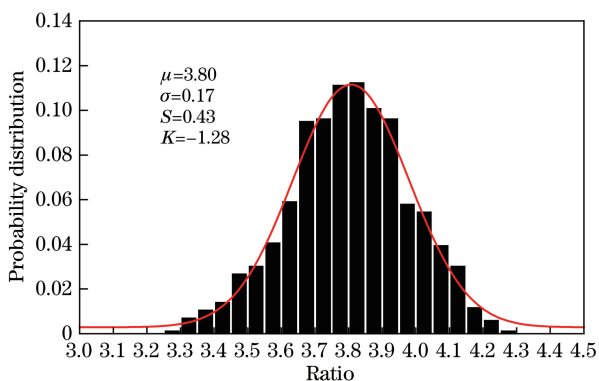


图 11 相干结构周期与尺度比值的概率分布

Fig. 11 Probability distribution of period and scale ratio of coherent structure

大气湍流相干结构的方法,对加有高斯白噪声的余弦信号进行分解与重构,结果表明所提方法是可行的。采用 Mexican Hat 小波对西北干旱地区近地面湍流速度脉动资料进行了统计分析,得到以下结论:

1) 基于频域连续小波变换得到的小波系数时间尺度图可以解释湍流具有多尺度性和间歇性,反映了湍流相干结构的演变过程。

2) 根据能量极大值原则得到相干结构主尺度;依据主尺度下的小波系数,通过重构公式提取相干波形。研究发现重构相干波形是具有准周期运动的信号,反映了原始脉动信号中存在某个中间尺度上的运动。

3) 个例分析表明,风速 U 、 V 、 W 分量的相干周期分别是 50, 40, 46 s, 与之相对应的时主尺度分别为 13, 12, 11 s; 三个方向的周期与时间尺度的比值为 3.85:1, 3.33:1 和 4.18:1。对湍流脉动信号和相干结构信号进行谱分析,发现湍流谱幂率满足 $-5/3$ 定律,相干结构谱幂率偏离 $-5/3$ 定律。

4) 对相干结构主尺度进行统计分析,结果表明

相干结构的主尺度近似满足正态分布,这与 C_n^2 的概率分布特征基本一致。相干结构周期与尺度比服从正态分布,其取值范围为 3.80 ± 0.50 , 间接说明了湍流存在间歇性。

以上结论说明频域连续小波分析方法可以有效识别并提取大气湍流相干结构,研究结果间接证明了湍流多尺度性和间歇性,反映了大气湍流相干结构的演变过程,对于激光大气传输效应的分析具有一定的参考意义。参与小波变换分析的脉动数据资料有限,因此得出的近地面大气湍流相干结构特性还需在今后的实验与分析中进一步验证。

参 考 文 献

- [1] Kline S J, Reynolds W C, Schraub F H, *et al.* The structure of turbulent boundary layer[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1967, 30(4): 741-774.
- [2] Li X, Hu F, Pu Y F, *et al.* Identification of coherent structures of turbulence at the atmospheric surface layer[J]. Advance in Atmospheric Sciences, 2002, 19(4): 687-698.
- [3] Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012: 481-513.
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012: 481-513.
- [4] Feng F, Li C W. Simulation of atmospheric phase screen based on wavelet analysis[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0101004.
丰帆, 李常伟. 基于小波分析的大气湍流相位屏模拟[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0101004.
- [5] Belmonte A, Taylor M T, Hollberg L, *et al.* Effect of atmospheric anisoplanatism on earth-to-satellite time transfer over laser communication links[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 15676-15686.
- [6] Li H S, Sang X Y. SNR and transmission error rate

- for remote laser communication system in real atmosphere channel[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 258: 156-162.
- [7] Tang J C, Qian X M, Miao X K, *et al.* Effects of aberrations on on-axis scintillation propagating properties of focus Gaussian beams in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1101001.
唐军成, 钱仙妹, 苗锡奎, 等. 像差对聚焦高斯光束大气传输轴闪烁特性的影响[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1101001.
- [8] Li Y, Qi J, Chen F N. The propagation quality of semiconductor laser beams in anisotropic non-Kolmogorov turbulence[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0701003.
李燕, 戚俊, 陈斐楠. 激光二极管光束在各向异性激光二极管光束在各向异性非柯氏大气湍流中的传输特性分析[J]. *光学学报*, 2017, 37(07): 0701003.
- [9] Yuan R M, Zeng Z Y. Study of optical of large-scale structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(1): 19-23.
袁仁民, 曾宗泳. 大尺度相干结构的光学特性研究[J]. *光学学报*, 2001, 21(1): 19-23.
- [10] Ke X Z, Xue Y. Effect on the partially coherent beam propagation properties in the atmospheric turbulence considering its scales[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(1): 0101002.
柯熙政, 薛瑶. 大气湍流尺度对部分相干光传输特性的影响[J]. *光子学报*, 2017, 46(1): 0101002.
- [11] Xu D, Duan Y, Chen K J. Influence of small-scale vortex structure on optical transmission in hypersonic turbulence flow field[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 40(1): 2217-2222.
许东, 段玥, 陈科杰. 高超声速湍流场中小尺度涡旋结构对光传输的影响[J]. *红外与激光工程*, 2010, 40(1): 2217-2222.
- [12] Antonia R A, Chambers A J, *et al.* Temperature ramps in the atmospheric surface layer[J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1979, 36(1): 99-108.
- [13] Zeng Z Y. Bursts in the turbulent medium and light propagation[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(4): 376-380.
曾宗泳. 湍流介质中的猝发现象和光传输[J]. *量子电子学报*, 2001, 18(4): 376-380.
- [14] Sun K H, Shu W. On the burst detection techniques in wall-turbulence[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1994, 26(4): 488-493.
孙葵花, 舒玮. 湍流猝发的检测方法[J]. *力学学报*, 1994, 26(4): 488-493.
- [15] Quan L H, Hu F, Cheng X L. Analysing coherent structures of humidity time series by the spectral analysis of the wavelet transform coefficients[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(1): 57-63.
全力红, 胡非, 程雪玲. 用小波系数谱方法分析湍流湿度脉动的相干结构[J]. *大气科学*, 2007, 31(1): 57-63.
- [16] Jiang N, Wang Z D, Shu W. The maximum energy criterion for identifying burst events in wall turbulence using wavelet analysis[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1997, 29(4): 406-411.
姜楠, 王振东, 舒玮. 子波分析识别壁湍流猝发事件的能量最大准则[J]. *力学学报*, 1997, 29(4): 406-411.
- [17] Gao W, Li B L. Wavelet analysis of coherent structures at the atmosphere-forest interface[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(11): 1717-1725.
- [18] Yao H, Sheng L F, He Y, *et al.* Isolating the coherent structure in atmospheric turbulence over the sea using continuous wavelet transform[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2011, 41(5): 7-14.
姚茜, 盛立芳, 贺赟, 等. 利用连续小波提取近海大气湍流中的相干结构[J]. *中国海洋大学学报*, 2011, 41(5): 7-14.
- [19] Coulter R L, Li B L. A technique using the wavelet transform to identify and isolate coherent structures in the planetary boundary layer[C]. 11th Symposium on Boundary Layer and Turbulence. Charlotte, NC: AMS, 1995: 291-294.
- [20] Chen J, Zheng Y G, Hu F. Isolating the coherent structure in atmospheric turbulence in the rough urban canopy layer by using continuous wavelet transform[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(2): 182-190.
陈炯, 郑永光, 胡非. 用连续子波变换提取城市冠层大气湍流的相干结构[J]. *大气科学*, 2003, 27(2): 182-190.
- [21] Wang J S, Zhang J Z, Shu W. The digital filter method of extracting the coherent structure in wall turbulence[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1995, 27(4): 388-405.
汪健生, 张金钟, 舒玮. 提取壁湍流相干结构的数字滤波法[J]. *力学学报*, 1995, 27(4): 398-405.
- [22] Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y, *et al.* Probability theory and mathematical statistics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 250-252.
盛骤, 谢式千, 潘承毅, 等. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001: 250-252.
- [23] Huang J Y. Meteorological statistics and predictive methods[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013: 24-25.
黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法[M]. 北京: 气象

- 出版社, 2013: 24-25.
- [24] Zeng Z Y, Yuan R M, Tan K, *et al.* The spectrum of temperature in the surface layer over complicated terrain[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 134-139.
曾宗泳, 袁仁民, 谭锬, 等. 复杂地形近地面温度谱[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 134-139.
- [25] Weng N Q, Zeng Z Y, Ma C S, *et al.* Atmospheric structure parameter C_n^2 in the boundary layer of Hefei[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(4): 423-428.
翁宁泉, 曾宗泳, 马成胜, 等. 合肥近地面折射率结构常数 C_n^2 分布特征及分析[J]. 量子电子学报, 1998, 15(4): 423-428.