

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2012.01.002

# 三维超声风速仪测量近地面湍流谱及 $C_n^2$ 的初步研究

朱行昕<sup>1,2</sup>, 吴晓庆<sup>1</sup>, 李多扬<sup>1</sup>

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

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 采用2011年1月在合肥地区复杂下垫面上使用超声风速计测得的风速三分量和温度分湍流实验观测数据, 计算分析了合肥地区冬季的不同稳定度条件下的湍流谱特征。并和其他实验进行对比, 得到了湍流特征量在不同稳定度下能量谱的曲线拟合公式以及谱峰的位置变化情况, 温度谱尾部上翘的现象。另外, 比对了超声风速计和温度脉动仪(即单点和双点温度测量法)测得的 $C_n^2$ , 发现二者符合较好。

**关键词:** 湍流; 功率谱; 超声风速计; 折射率结构常数

中图分类号: P425

文献标识码: A

文献编号: 1673-6141(2012)01-0006-07

## Characteristics of ASL Turbulence Spectra and $C_n^2$ using three-dimensional ultrasonic anemometer

ZHU Xing-ting<sup>1,2</sup>, WU Xiao-qing<sup>1</sup>, LI Duo-Yang<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 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Velocity components and temperature data are measured using 50 Hz three-dimensional ultrasonic anemometer during January 2011. Characteristics of the turbulence spectra are calculated and analyzed under different stability over Hefei area. Comparing with other experiment results, curve fitting formulae, diverse instance of the power spectra peak position and tail raising of temperature spectra were obtained. And, two different refractive index structure parameter  $C_n^2$  were measured and compared by hot wire anemometer and sonic anemometer(double-point and one-point method) above a uniform ground. The results obtained by two methods agree well.

**Key words:** turbulence; spectra; three-dimensional ultrasonic anemometer;  $C_n^2$

收稿日期: 2011-04-25; 修改日期: 2011-09-04

基金项目: 科技部基础性工作专项课题(073D2g1391)

E-mail: Januszhu@mail.ustc.edu.cn

## 1 引言

在地球这一大的气候系统中, 地面是大气的边界, 地气间的能量、动量、物质的交换过程, 主要是在 3000 m 以下的大气层 - 大气边界层内的湍流运动完成的。湍流谱分析是研究近地面层湍流特征的重要手段, 它不但可以反应湍流总能量的大小, 而且能反映不同频率区间湍流能量的分布, 这对于揭示湍流微结构有着重要意义。70 年代以来, 国内外大量科研工作者研究了不同下垫面、不同稳定度条件下湍流谱特征。Kaimal 等对丘陵地区的研究<sup>[1]</sup>发现, 地形对湍流谱的低频扰动可使其峰值产生位移; Thompson 对松林上空的观测结果<sup>[2]</sup>验证了在不稳定条件下谱曲线的峰值区比平坦下垫面要窄, 温度谱在稳定条件下在低波数能量相对集中, 而且出现锯齿状谱曲线; 而 Godowitch 的研究结果<sup>[3]</sup>则恰好相反, 证明城市上空的峰值区宽于附近郊区的情况, 城区在很宽的频率范围内垂直方向上湍流能量比郊区大 50% 左右。此外激光大气传输也需要对光学湍流强度  $C_n^2$  及其湍流谱进行深入研究<sup>[4]</sup>。三维超声风速计可以测量径向、横向、垂直方向上的风速分量以及超声虚温, 是研究大气湍流特性的重要仪器。本文采用美国 CAMPBELL 公司的 CSAT3 型三维超声波风速仪测量数据, 分析了合肥地区复杂下垫面不同稳定度条件下的湍流谱特征, 并对超声虚温计算的  $C_n^2$  与温度脉动仪测量的  $C_n^2$  进行了比较。

## 2 实验场地以及测量设备

本文进行湍流谱分析的数据取自合肥市西郊水库旁的实验场地。观测仪器安装在 35 m 铁塔上(图 1)。铁塔西南方向有 200 m 的开阔地。北边 50 m 处有一约 20 m 高的三层楼, 东面 300 m 处有一片 10 m 高的树林。Csat3 型三维超声风速计和 Li7500 型水汽 / 二氧化碳分析仪安装在 10 m 处。超声风速计是利用多普勒效应以及声速是温度和湿度的函数关系, 通过测量三个非正交轴

上一定距离的超声波脉冲传输时间, 通过坐标变换, 得到风速的三个分量以及超声虚温。超声风速计测得超声虚温  $T_s$  与气温  $T$  有如下关系

$$T_s = \frac{c^2}{\gamma_d R_d} - 273.15,$$

$$T = \frac{T_s}{1 + 0.51q}, \quad (1)$$

其中  $c$  为声速,  $\gamma_d$  为干空气定压比热与定容比热之比,  $R_d$  为干空气气体常数,  $q$  为比湿。

水汽二氧化碳分析仪是利用大气中某种气体的压强对红外吸收的影响, 利用一定量的某吸收气体  $u_i$  ( $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 和吸收波带之间的关系反演<sup>[12]</sup>。

$C_n^2$  对比实验仪器安装在安徽光机所大气光学中心的楼顶(图 2), 横梁为南北方向, 离地表面大约 14 m, 距楼顶表面约 2 m, 东边 3 m 处为试用帐篷约 6  $\text{m}^2$ , 高约 1.7 m, 西边为高 8 m 的圆形建筑物。

两套系统所用主要仪器的指标参数: 三维风速计风速测量精度  $u_x, u_y < \pi 4.0 \text{ cm/s}$ ,  $u_z < \pi 2.0 \text{ cm/s}$ , 温度测量精度 0.026  $^\circ\text{C}$ , 水汽 / 二氧化碳分析仪水汽的测量精度 0.5  $\text{g/m}^3$ , 二氧化碳测量精度 0.5  $\text{mg/m}^3$ 。

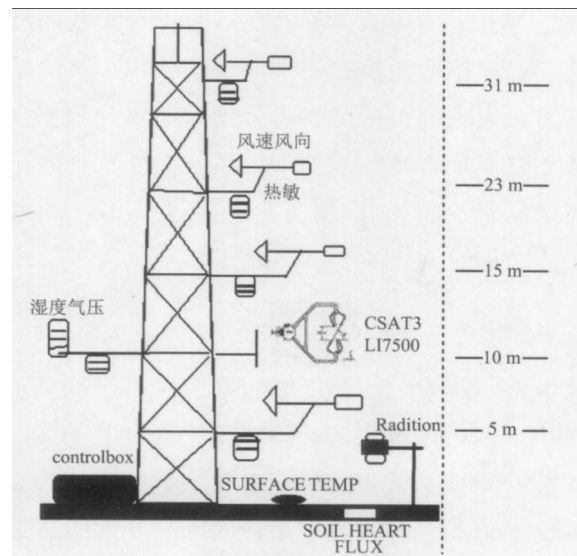


图 1 35 米铁塔传感器分布示意图

Fig.1 Distributing map of sensors over 35m tower

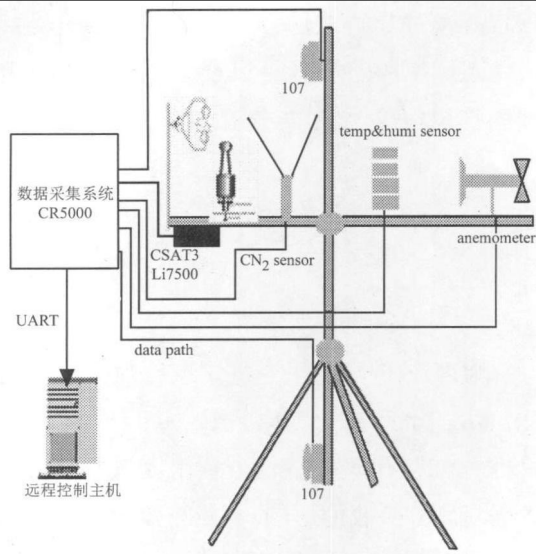


图2 移动式大气参数测量系统

Fig.2 Mobile measuring system of atmospheric parameter

### 3 测量原理

#### 3.1 湍流谱测量

大气边界层中观测到的湍流在时间和空间上具有多尺度结构, 比较理想的分析方法是采用谱分析的方法, 统计学方法是研究湍流能谱特性的有力工具。通过把一系列观测资料分解成频率或波长与能谱的关系, 可发现不同时间和空间尺度的湍流在整个湍流状态中所起的作用。通常是在空间一点上测量的某物理量的时间序列数据, 经傅立叶变换得到时间功率谱  $S(n)$ , 在 Taylor 湍流冻结假定条件下, 得到空间功率谱  $E(k)$ 。频率谱和波数谱的关系式为

$$kE(k) = nS(n), \quad (2)$$

其中  $k = 2\pi n/U$ ,  $n$  是周期频率,  $U$  是平均风速。

求归一化湍流谱具体计算过程如下

- 1) 首先去坏点去除趋势项。
- 2) 进行坐标调整求出各向风速分量及温度脉动量。
- 3) 然后进行快速傅里叶变换, 变换结果求平方得到各自的功率谱  $S(n)$ 。
- 4) 对风速谱采用 Kaimal, et al 的方法<sup>[1]</sup>进行

归一化处理:  $nS_{u,v,w}(n)/A$ , 其中  $A$  为归一化因子  $u_*^2 \phi_\varepsilon^{2/3}$ ; 摩擦速度  $u_* = -\overline{u'w'}^{1/2}$ , Monin-Obukhov 长度  $L = \frac{-\overline{\theta_v} u_*^3}{kgw'q}$ ;

5) 温度谱用方差  $\sigma_T^2$  进行归一化<sup>[5]</sup>:  $nS_T(n)/\sigma_T^2$ 。

6) 对归一化后的谱低频进行滑动平均, 高频进行分段平均<sup>[6]</sup>, 并进行对数化处理即  $\ln \frac{nS(n)}{A} - \ln f$ , 其中  $f$  为无因次频率  $f = nz/U$ 。

需要说明的是采样长度足够长, 不用加汉明窗或者汉宁窗来消除因为采样长度短而造成的谱估计的过量估计, 可以参阅文献<sup>[7]</sup>来进一步了解不同类型的窗对功率谱的影响和修正。大气稳定度参数的定义为:  $\xi = z/L$ , 其中  $z$  为观测高度,  $L$  为 Monin-Obukhov 长度。我们选择  $|z/L| \leq 0.05$  为中性稳定,  $z/L < 0.05$  为不稳定条件,  $z/L > 0.05$  为稳定条件。

#### 3.2 $C_n^2$ 的对比测量

通过测量温度起伏来计算  $C_n^2$ , 第一种为双点温差测量法, 是通过测量空间两点温差的平方平均得到的。对于可见光和近红外光波段, 折射率主要有温度起伏引起的。因此, 均匀各向同性下, 折射率结构常数与温度结构常数的如下计算关系

$$C_n^2 = [79 \times 10^{-6} \frac{p}{T^2}]^2 C_t^2, \quad (4)$$

$$C_T^2 = \langle [T(x) - T(x+r)]^2 \rangle r^{-2/3}, \quad (5)$$

式中:  $p$ (单位 hPa) 为大气压强;  $T$ (单位 K) 为大气温度;  $r$  为两点距离。需要注意的是, 这里的气压和大气温度都是在同一时间同一地点测量的值。如果湍流是平稳的, 当平均时间足够长,  $C_n^2$  可由一定时间平均得到。

另一种是单点温度测量法, 通过超声波测量出的超声虚温脉动值  $T'$  来计算温度结构常数

$$C_T^2 = \frac{\langle [T'(t+\Delta t) - T'(t)]^2 \rangle}{\langle \nu > \Delta t^{2/3}}, \quad (6)$$

式中:  $\Delta t$  为测量气象参数瞬时值之间的时间间隔, 由实测风速确定。  $\langle \cdot \rangle$  表示统计平均。在泰勒假定条件下, 结合风速将时间间隔的温差转换

为空间两点温差的平方平均得到的。如果考虑湿度对  $C_n^2$  的影响, 则有  $C_n^2$  和各结构常数间的关系

$$C_n^2 = A^2 C_T^2 + 2ABC_{Tq} + B^2 C_q^2, \tag{7}$$

$C_T^2$ 、 $C_q^2$  的定义与  $C_n^2$  相同, 把折射率  $n$  换成温度  $T$  或  $q$  即可。对于干湿相关项, 有

$$C_{Tq} = \frac{\langle [T(x) - T(x+r)] \times [q(x) - q(x+r)] \rangle}{r^{2/3}} \tag{8}$$

此处  $q$  为比湿, 即水汽质量与湿空气总质量之比。

### 4 结果与讨论

#### 4.1 湍流谱分析和比较

本文分析的谱采用 2011 年 1 月 14 日至 17 日由 35 m 铁塔 Csat3 型超声风速计测得风速和温度脉动数据。实验期间天气晴朗, 大气条件较为稳定, 风速的标准差小于平均风速的一半, 利用涡旋相关法求出仪器所在地方的稳定度参数  $\xi$ , 经计算发现白天由于大气辐射较夜晚强, 多呈现不稳定和弱稳定状态, 中午大多处于不稳定状态, 夜晚呈现稳定状态。

选取 1 月 15 日 20:00~22:00 中间一段时间数据进行谱计算, 此时天气晴朗, 北风 3 到 4 级。

系统的采样率为 50 Hz, 共约 27 min, 分成连续的 20 小段, 每段数据为 4096( $2^{12}$ ) 进行功率谱计算, 我们选取纵向风速谱作为观察对象, 求得归一化功率谱的值进行集合, 如图 3 示。拟合斜率约为 -1.75, 观察高频区域的谱幂率, 满足 Kolmogorov 的惯性子区中湍流能谱和频率的指数关系。

图 4 给出的是不同的大气稳定条件下归一化功率谱, 此次利用点数为 65536, 取样频率为 50 Hz, 约为 22 min。U 向和 V 向风速谱和温度谱的惯性子区部分基本符合 -2/3 规律 (也即  $S(n)$  的 -5/3 规律), W 向符合情况较差。低频部分较为离散, 低频区域没有出现上翘的现象, 可能不存在地形

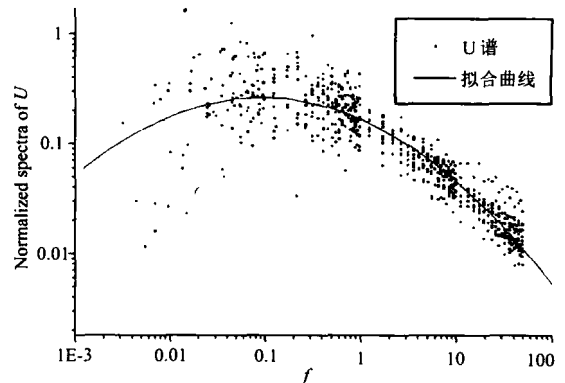


图 3 一簇风速谱的集合

Fig.3 Vertical velocity spectra for one cluster

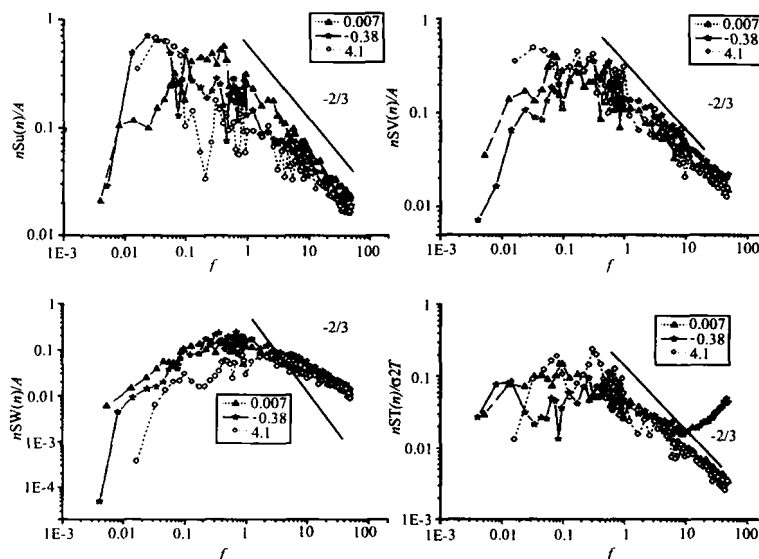


图 4 不同稳定条件速度和温度的谱特征

Fig.4 Velocity and temperature spectra in three dimensions at a range of stabilities

扰动的影响。我们知道谱线所处的位置越高其代表的能量越大,在低频率区间 0.01~1 上,弱不稳定条件下可能因为层结热力作用,使较大尺度的涡流能量增加,谱线的位置较高,而在稳定条件下,含有能量的谱线低处较低位置。从高频处切线斜率在逐渐变大,没有观察到有报道中提到的分段以及双峰现象,这也是比较典型的结果。但在不稳定条件下,温度谱在高频出现谱线上翘现象,有可能是采样率不足,在高频时能量的衰减过快造成的;对气象研究来说,谱峰所处位置的波长的长度尺度比积分长度尺度都要重要,因为它代表了湍流中含有最多能量的尺寸。一般我们认为在稳定均匀的下垫面,当  $z/L > 0$  时  $(f_m)_i (i = u, v, w)$  随着无因次稳定参数增加而增加;当处于不稳定条件下,只有  $(f_m)_w$  随着  $z/L$  有规律的减小。在纵向风速谱中稳定和 unstable 比中性条件下要小,在横向垂向风速谱以及温度谱中谱峰位置相差不大;在三种不同稳定条件下,都可以很明显的看出  $S_u(n) > S_v(n) > S_w(n)$ , 即纵向能量大于横向能量,横向能量大于垂向能量,可以很容易观察到谱峰的位置  $f_u(n) < f_v(n) < f_w(n)$ ; 而且文献 [11]

中提到的  $-5/3$  规律过渡到  $-1$  的情形出现,即出现  $-2/3$  向  $-1$  过渡区间,但注意到与文章中提到的临界频率相比要小的多;可能由于地形较为平坦,湍流没有充分发展而破碎成更小的涡流,所以能量大都集中在大尺度低频段。统计了在稳定和弱稳定条件下的功拟合的谱模式公式为

$$nS_u(n)/A = 46.2f(1 + 26f)^{-5/3}, \quad (9)$$

$$nS_v(n)/A = 15f(1 + 12.2f)^{-5/3}, \quad (10)$$

$$nS_w(n)/A = 2.6f(1 + 10.4f)^{-5/3}, \quad (11)$$

$$nS_T(n)/\sigma^2 = \begin{cases} 6.28f(1 + 23.4f)^{-5/3} & n < 0.15 \\ 1.12f(1 + 7.8f)^{-5/3} & n > 0.15 \end{cases}, \quad (12)$$

垂向风速谱特征和文献 [8] 中提到的森林在弱风条件下非常类似,是作为非各项同性的实例存在的,而且高频处得谱幂率是和风速无关的。谱峰的位置不能很好的确定,也即低频占据了较大范围并不遵循一定的规律,意味着还有其他长度而不仅仅由  $z$  来控制低频谱的行为特征。

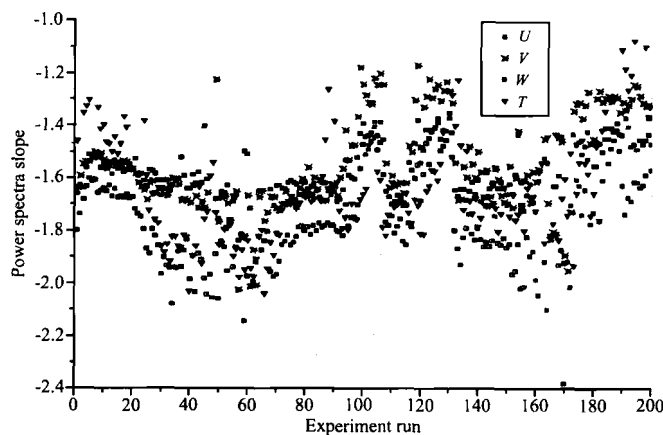


图 5 谱幂率和  $-5/3$  的比较

Fig.5 Comparison of power spectra law with  $-5/3$

我们取临界频率为波数  $K = 1$  (即  $n > U/z$ )<sup>[9]</sup>, 终点位置受到采样频率的限制为 50。统计分析了风速和温度谱的谱幂率如图 5 所示,横坐标为程

序循环运算次数,即每一次循环得到一组风速和温度的谱幂率,共 200 次。所得  $S_{u,v,w}(n)$  和  $S_T(n)$  基本符合  $-5/3$  规律。在稳定条件下,谱幂率的变

化步调基本一致, 不稳定条件下, 变化最大是温度谱, 弱稳定条件下, 分布大致和稳定条件下相差无几; 同时, 注意到径向风速谱大于横向风速谱, 横向风速谱大于垂向风速谱, 温度谱处于横向和垂向风速谱中间。

#### 4.2 $C_n^2$ 比对分析

从 1 月 24 至 2 月 24 日我们进行了约 30 天的  $C_n^2$  超声单点测量和温度脉动双点的对比测量, 发现二者基本符合典型的日变化规律, 并且一致性较好。我们随机选取 2011 年 1 月 25 日全天的数据进行观察, 这天天气状况较好, 风速较小。统计平均时间为 8 分钟, 其比对曲线如图 6 所示。

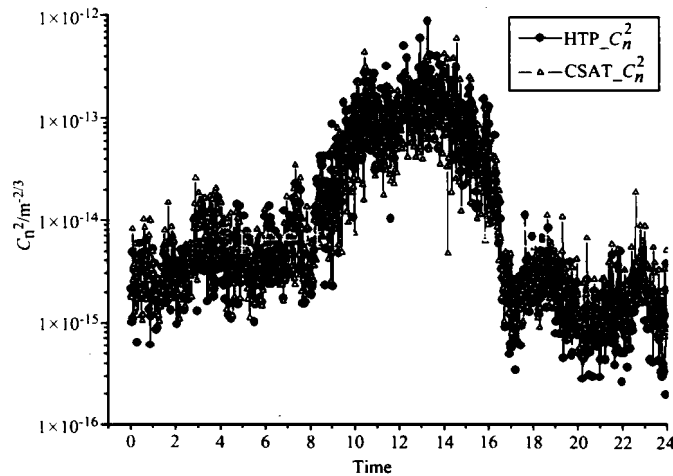


图 6 CSAT3 和温度脉动仪测得值比较

Fig.6 Comparison of  $C_n^2$  measured by CSAT3 and the hot wire anemometer

超声法测得温度为虚温, 在许多边界层条件下, 虚温比真实温度要大是因为湿度产生的浮力贡献项, 特别是在森林地区及沿海地区, 有文献 [11] 很好的研究了戈壁滩和近海边等不同气象条件下的温度, 湿度, 以及温湿相关项对  $C_n^2$  的贡献比重, 发现湿度起伏本身对折射率结构常数的贡献很小, 可以忽略不计, 对光学湍流的影响主要是通过温度的结合来影响光学湍流的。此次实验在楼顶环境开阔, 实验期间合肥地区 100 天左右无明显降水过程, 在此忽略对温度脉动仪的影响, 超声风速仪可以在多种气候条件下使用, 能

从图 6 可以很明显的看到温度脉动仪测得的  $C_n^2$  日变化曲线一般要跨 4 个量级 ( $10^{-16} \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ ), 而超声波测量仪的结果也在 4 个量级的范围内变化 ( $10^{-16} \sim 10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$ ); 在白天和晚上部分时段两者的结果符合较好, 即使在日出日落转换时刻, 两者差别并不大, 适合使用超声波单点温度脉动法来计算白天和夜晚转换时刻或弱湍流条件下  $C_n^2$  ( $10^{-16} \sim 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$ )。白天大部分时间超声测得值要比温度脉动仪稍大, 晚上大部分时间温度脉动要比超声测得值稍大, 这与文献 [4] 提到的结果不同, 说明现在我们使用的超声风速计测温的灵敏度远远高于文献 [10] 的仪器指标。

够得到较好的测量值。

## 5 结 论

通过 2011 年 1 月 14 日至 17 日测得数据, 通过筛选, 整理进行功率谱分析, 发现风速谱中稳定和 不稳定比中性条件下的谱峰位置要小, 在横向垂向以及温度谱的谱峰位置相差不大, 在不稳定条件下, 温度谱在高频出现谱线上翘现象; 在不同稳定条件下, 都有  $S_u(n) > S_v(n) > S_w(n)$ , 纵向能量大于横向能量,  $S_u(n) > S_v(n) > S_w(n)$ , 即纵向能量大于横向能量, 横向能量大于垂向能量,

谱峰的位置  $f_u(n) < f_v(n) < f_w(n)$ ; 而且有  $-5/3$  规律过渡到  $-1$  的情形出现, 但出现临界频率相比波数等于 1 要小的多; 并且也由于地形相对平坦, 湍流没有充分发展而破碎成更小的涡流, 所以能量大都集中在大尺度低频段。超过 30 天的超声风速仪和温度脉动仪作比较发现, 可以使用超声风速仪在复杂环境地区对  $C_n^2$  进行测量。

### 参考文献:

- [1] Kaimal J C, Wyngarard J C, Zui Y I, et al. Spectra characteristics of surface-layer turbulence [J]. *Quart. J. R. Met. Soc.*, 1972, 98: 563-589.
- [2] Thompson N. Turbulence measurements above a pine forest [J]. *Boundary Layer Meteor.*, 1979, 16(3): 293-310.
- [3] Godowitch J M. Characteristics of vertical turbulent velocities in the urban convective boundary layer [J]. *Boundary Layer Meteor.*, 1986, 35(4): 397-407.
- [4] Wu X Q, Ma C S, Wang Y J. Long term measurements and statistics study of surface layer refractive index structure parameter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(4): 551 - 556(in Chinese).  
吴晓庆, 马成胜, 王英俭. 近地面折射率结构常数的长期测量和统计分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(4):551-556.
- [5] Wang Jiemin The spectral characteristics of atmospheric turbulence in an urban area of complex terrain [J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(1): 11-17(in Chinese).  
王介民. 山谷城市的近地层大气湍流谱特征 [J], *大气科学*, 1992, 16(1): 11-17.
- [6] Liu S H, Liu H P, Xu M, et al. Turbulence spectra and dissipation rates above and within a forest canopy [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 2001, 98: 83-102.
- [7] Kaimal J C. Time series tapering for short data samples [J]. *Boundary-Layer Meteor.*, 1991, 57: 187-194.
- [8] Osvaldo L L, Moraes, et al. Comparing spectra and cospectra of turbulence over different surface boundary conditions [J]. *Physica A.*, 2008, 387: 4927-4939.
- [9] Katul G G, et al. Low-wave number spectral characteristics of velocity and temperature in the atmospheric surface layer. *J. of Geoph. Research*, 1995, 100(D7): 14243-14255.
- [10] Wu X Q, Rao R Z. Effects of humidity fluctuation on the structure parameter of the refractive index for visible radiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(12): 1599-1602(in Chinese).  
吴晓庆, 饶瑞中. 湿度起伏对可见光波段折射率结构常数的影响 [J]. *光学学报*, 2004, 24(12): 1599-1602.
- [11] Wu X Q. *Investigation of Optical Turbulence Characteristic and Model in Atmospheric Boundary Layer* [D]. Doctorial Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2004(in Chinese).  
吴晓庆, 大气边界层光学湍流特性与模式研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 2004.
- [12] Wu X Q. Statistical analysis of atmospheric parameter of surface layer in Hefei and estimation of turbulent flux using dissipation methods [J]. *Journal of Atmospheric & Environmental Optics*, 2011, 6(1): 67-74(in Chinese).  
吴晓庆. 合肥地区近地面大气参数统计分析及湍流通量的惯性耗散法估算 [J]. *大气与环境光学学报*, 2011, 6(1): 67-74.

**作者简介:** 朱行昕 (1986-), 男, 安徽宿州, 主要研究方向大气参数测量及模式研究。