

基于风廓线雷达的晴空对流层动力湍流特征研究

张彩云^{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成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
² 中国科学院大学, 北京 100049
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 风廓线雷达作为一种新型遥感设备,其回波信号包含丰富的湍流信息。提出了一种利用风廓线雷达回波信号反演动力湍流的方法,分析了对流层速度结构常数 C_v^2 的变化特征,并根据近地面速度湍流模型研究了对流层湍流速度脉动的特性。结果表明:1) 动力湍流强度随高度增加逐渐减弱,夜间减弱速度大于白天,且在边界层顶处 C_v^2 具有较明显的日变化特征;2) C_v^2 与速度起伏方差 σ^2 的对数值具有较好的线性关系,线性拟合度达 0.896;3) 对流层湍流的速度脉动较弱, σ^2 量级在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 之间。

关键词 大气光学;大气湍流;动力湍流;速度结构常数;湍流耗散率;风廓线雷达

中图分类号 P407.2;P425.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1213003

Research on the Characteristic of Clear-Day Dynamic turbulence in Troposphere Based on Wind Profile Radar

Zhang Caiyun^{1,2} Weng Ningquan^{1,3}

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

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

Abstract Wind profile radar is a new kind of instruments in remote sensing sounding, the echo signals of which contain abundant informations of turbulence. An algorithm for retrieval dynamic turbulence is proposed using the echo of wind profile radar, and the characteristic of velocity structure constant C_v^2 in troposphere is analyzed. Also, the turbulent velocity fluctuation in troposphere is discussed based on the velocity turbulence model. The results show that: 1) the strength of dynamic turbulence decreases along with the increase of the height, the lapse rate of which in the night is more rapid, and the C_v^2 has remarkable diurnal variability at the top of boundary layer; 2) there is good linear relation between C_v^2 and the natural logarithm of velocity fluctuation variance σ^2 , and the closeness of linear fitting could reach 0.896; 3) the velocity fluctuation of turbulence in troposphere is relatively small, and σ^2 distributes between $10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ and $10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ in clear-air.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; dynamic turbulence; velocity structure constant; turbulent dissipation rate; wind profile radar

OCIS codes 010.1290; 010.7330; 280.7060

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-08-15

基金项目: 国家 863 计划(2011AA8061007)、国家自然科学基金(41205023)、中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(Y23D241121)

作者简介: 张彩云(1984—),女,博士研究生,主要从事大气物理与大气环境等方面的研究。

E-mail: cyzhang@aiofm.ac.cn

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

1 引言

高能激光通过大气传输时,大气中的分子和气溶胶粒子对激光能量的吸收作用造成对路径上大气的加热,随之产生大气密度和折射率变化,最终带来非线性的热晕效应^[1-3](通常用热畸变参数来描述)。大气传输的热晕效应与光路上的横向风有密切的关系。大气风场会将激光束加热的大气带走,横向风速增大会引起热畸变参数减小,从而减弱热晕效应,但大气中的风场随着大气湍流总是处于起伏变化中,这使得光路上横向风也几乎总是处在起伏变化中。因此,无论是对大气热晕效应的分析计算还是对大气传输的数值模拟,都需要考虑大气风场的变化。

除了大气中风速在时间上的起伏导致的热晕效应以外,在空间上的起伏也是小尺度热晕不稳定现象出现的主要因素^[4-6],这些都会导致光束质量退化。为了深入研究强激光热晕效应,必须首先对大气风速起伏特性展开研究,特别是得到速度起伏方差 σ^2 等,以进行激光大气传输模式的数值模拟计算。

近地面风速起伏的测量通常采用风杯、超声风速仪或热线风速计等。国内外均有近地层风速起伏特性的研究^[7-8]。高空大气风速起伏特性对于强激光上行传输热晕效应有重要影响,但由于观测手段有限,对高空大气风场起伏特征研究较为缺乏,通常采用气球探空或多普勒雷达等手段。气球探空只能得到单次探空的平均风速廓线,科研工作者们越来越倾向应用微波或激光多普勒雷达作为主要手段探测高空的风场。

风廓线雷达是一种新型的遥感设备,具有长期连续工作、时空分辨率高等优势,它的回波信号中包含了非常丰富的湍流信息,已有文献报道可以利用风廓线雷达的谱宽估算湍流耗散率^[9-10]及折射率结构常数^[11-12]。

本文主要提出一种联合风廓线雷达数据及利用近地面速度湍流模型来研究高空速度湍流的特性。首先采用风廓线雷达谱宽数据,提出一种估算湍流动力特征——速度结构常数 C_v^2 的方法,进一步采用地基超声风速仪测量风速脉动数据,得到不同条件下 C_v^2 与 σ^2 的相互关系,最终给出了风廓线雷达反演高空 σ^2 的方法,为强激光上行传输热晕效应研究提供了依据。

2 测量手段及方法简介

2.1 测量设备

Airda16000型对流层风廓线雷达是由相控阵天线、接收机、发射机和信号处理系统组成。工作频率为450 MHz,具有适用于低空和高空的两个探测模式:低模和高模。天线面积为12 m×12 m,最大探测高度可达16000 m,覆盖边界层与对流层。其技术参数如表1所示,斜杠“/”前后分别代表低模和高模的参数。

表1 Airda16000风廓线雷达技术参数

Table 1 Parameters of Airda16000 wind profile radar

Parameter	Specification
Frequency	450 MHz
Wavelength	66.7 cm
Peak power of transmitter	1600 W×16
Gate number	14/54
Number of coherent integration	86/50
Pulse width	5/27(×333 nm)
Beam width	3°
Range resolution	(150/275) m

2.2 测量方法

对充分发展了的湍流来讲,在惯性区内速度场的纵向结构函数 $D_{rr}(r)$ 可以表示为

$$D_{rr}(r) = \overline{[v_r(r_1+r) - v_r(r_1)]^2} = C_v^2 r^{2/3}, \quad (1)$$

式中 $v_r(r_1+r) - v_r(r_1)$ 为距离为 r 的两点间速度差,速度结构常数 C_v^2 是描述湍流动力特征的物理量。(1)式中 r 适用于大于湍流的内尺度 l_0 (即最小涡旋的尺度),小于湍流的外尺度 L (即最大的非各向同性涡旋的尺度)。两点间的速度差主要由尺度和 r 相当的涡旋产生,表征这类涡旋的唯一参量即为湍流耗散率 ϵ 。因此根据量纲分析,可得

$$C_v^2 = C \epsilon^{2/3}, \quad (2)$$

式中 C 为无因次常数,经实验测量得到 $\sqrt{C} = 1.4$ ^[13]。

湍流耗散率 ϵ 是指能量由大尺度向准平衡区尺度的传输速率,该能量无衰减地逐级传输直到最小尺度。耗散为分子热运动能量^[14],它可以由风廓线雷达的回波谱计算得到。考虑对风廓线雷达回波功率谱谱宽加宽的因素,扣除非大气湍流运动的影响,提取大气湍流引起的谱宽加宽,如(3)式所示:

$$\sigma_{\text{tur}}^2 = \sigma_{\text{observ}}^2 - \sigma_{\text{beam+shear}}^2 = \sigma_{\text{observ}}^2 - \left\{ \frac{(\theta/2)^2}{3} u^2 \cos^2 \alpha - \frac{2(\theta/2)^2}{3} \sin^2 \alpha \left(u \frac{\partial u}{\partial z} R_0 \cos \alpha \right) + \frac{(\theta/2)^2}{24} (3 + \cos 4\alpha - 4\cos 2\alpha) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 R_0^2 + \left[\frac{(\theta/2)^2}{3} \cos 4\alpha + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right] \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \frac{\Delta R^2}{12} \right\}, \quad (3)$$

式中 σ_{observ}^2 为风廓线雷达观测到的回波谱宽, $\sigma_{\text{beam+shear}}^2$ 和 σ_{tur}^2 分别为波束加宽和风切变引起的谱宽以及提取出的湍流谱宽, θ 为雷达的波束宽度, u 为水平风大小, α 为雷达波束天顶角, R_0 为探测高度, ΔR 为距离分辨率。在各向同性湍流的条件下, 湍流谱宽与湍流耗散率的关系如(4)式所示:

$$\epsilon = (\sigma_{\text{tur}}^2)^2 \times \left(\frac{4\pi}{A} \right)^{3/2} \times \left[12\Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} d\phi \sin^3 \varphi \times \left(b^2 \cos^2 \varphi + a^2 \sin^2 \varphi + \frac{L^2}{12} \sin^2 \varphi \cos^2 \phi \right)^{1/3} \right]^{-3/2}, \quad (4)$$

式中 A 为 Kolmogorov 常数, 约为 1.6; $\Gamma\left(\frac{2}{3}\right)$ 为伽玛函数; a 为雷达波束横截面的半径; b 为脉冲长度的一半; L 为平均速度和多普勒时间序列的乘积。经上述分析, 可由(2)~(4)式计算出 C_v^2 , 可知 C_v^2 是与风速及其梯度、湍流谱宽有密切关系。

3 反演结果分析

3.1 湍流耗散率 ϵ 结果分析

利用风廓线雷达回波谱信号反演 C_v^2 , 选用倾斜波束的谱宽反演^[15]。图 1 给出了 2008 年 6 月 4 日对流层湍流耗散率的时空演变图。从图 1 中可以看出, 对流层湍流耗散率随高度增加而减小, 量级在 $10^{-7} \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 之间, 跟理论值符合^[16], 证明该方法的可行性。同时可以看到在 2 km 以下湍流耗散率具有明显的日变化规律, 中午至下午时段湍流耗散率数值较大, 早晨及傍晚较小, 符合湍流在中午强、转换时刻弱的特点。

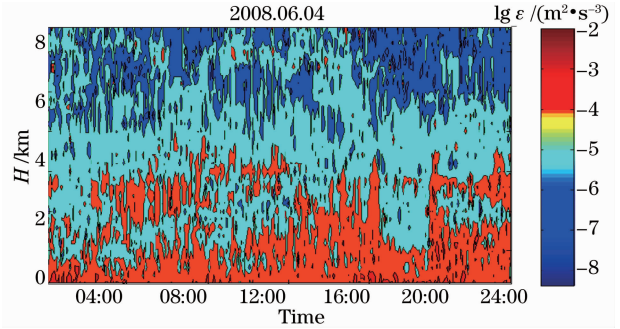


图 1 2008 年 6 月 4 日湍流耗散率的时空演变图
Fig. 1 Drawing of time and spatial variation of turbulent dissipation rate on 4, June, 2008

3.2 C_v^2 结果分析

对利用风廓线雷达谱宽反演的 C_v^2 特征进行分析, 如图 2、3 所示。图 2 的两幅图分别为 2007 年 10 月 10 日与 2008 年 12 月 1 日不同时刻 C_v^2 随高度变化的廓线。从图 2 中可知, C_v^2 的量级一般在 $10^{-4} \sim 1 \text{ m}^{4/3} \cdot \text{s}^{-2}$ 之间, 从整个对流层来看, 动力湍流的强度随着高度的增加逐渐减弱。所选日期内夜间递减速率大于白天, 对该现象的普适性尚需详细分析。

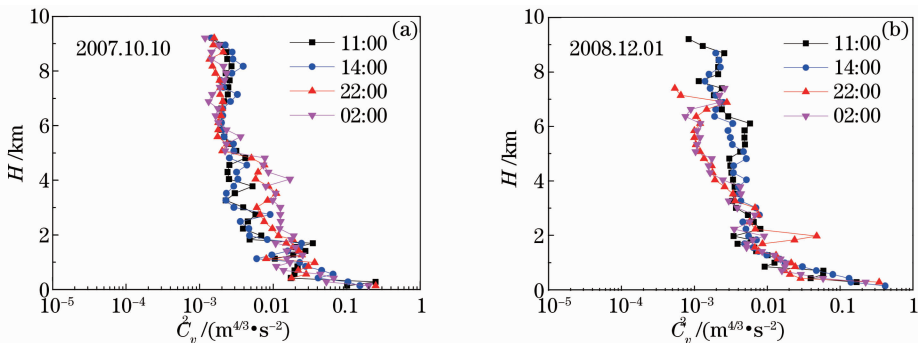


图 2 (a) 2007 年 10 月 10 日和 (b) 2008 年 12 月 1 日不同时刻 C_v^2 的廓线
Fig. 2 Profiles of C_v^2 at the different time. (a) 10, Oct, 2007; (b) 1, Dec, 2008

图 3 为 2008 年 11 月 19 日 C_v^2 的时空演变图, 给出了 300、1150、1550、1850、3000、5050 m 六个代表边界层和对流层的典型特征高度上 C_v^2 的时间演

变特征曲线。由图 3 可见, 随着高度增加 C_v^2 值减小, 并且在 300 m 处出现了明显的日变化特征, 这是由于大气运动动量通过湍流切应力的作用源源不

断向下传递,经大气边界层达到地面,并由于摩擦而部分损耗,因而造成大气边界层内动力湍流的日变化。这与太阳辐射引起的热力湍流日变化不同,因此图 3 中在凌晨 3:00 和晚上 19:00 出现的两个极小值时刻与报道的热力湍流所拥有的日出后和日落前两个转换时刻的特征有所不同。大气边界层顶(如图 3 中 1550 m 和 1850 m)的日变化特征与近地面有所不同,不具备明显的转换时刻,只在正午前后动力湍流增强,这或许与边界层的稳定度有关。由

于近地面以外的大气中湍流特征很难观测,研究资料很少,因此该现象是偶然或有规律可循,需要日后累积更多资料详细研究。在边界层以上的对流层(图 3 中 3000 m 和 5050 m)的自由大气中,地表对大气湍流的发生发展已无直接影响,影响湍流结构的因子有温度层结、风切变、不稳定的大气波动等。这些因子具备随机性,因此湍流强度随机变化,不再具备明显的日变化特性。

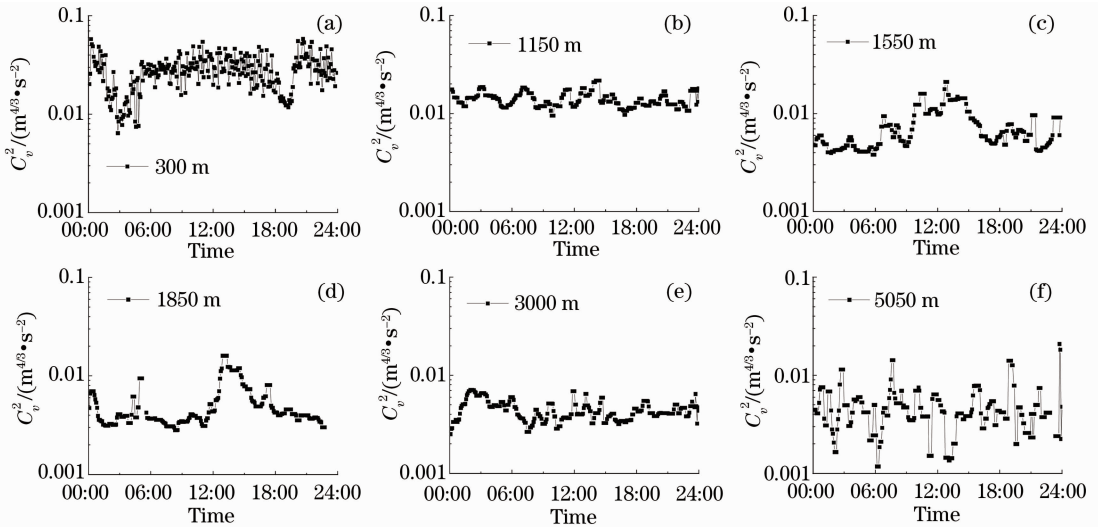


图 3 2008 年 11 月 19 日不同特征高度时 C_v^2 的时空演变图。(a) 300 m; (b) 1150 m; (c) 1550 m; (d) 1850 m; (e) 3000 m; (f) 5050 m

Fig. 3 Drawing of time and spatial evolving of C_v^2 on 19, Nov, 2008 in different characteristic heights. (a) 300 m; (b) 1150 m; (c) 1550 m; (d) 1850 m; (e) 3000 m; (f) 5050 m

4 对流层动力湍流脉动特征分析

目前没有具备高频率采样同时可以直接测量高空速度脉动的设备,因此采用间接方式来了解对流层动力湍流的脉动特征。

4.1 近地面速度湍流模式构建

利用 81000 型杨氏超声风速仪研究近地面 C_v^2 与 σ^2 的关系。实验场地为安徽省合肥市西郊(E117.0°,N31.2°,海拔 31 m)。该实验场地具有典型的各种粗糙源混杂存在的下垫面,非常有利于分析大气边界层湍流的动力结构特性。图 4 为超声风速仪与 QHTP-2 型温度脉动仪联合探测的实验照片,仪器距离地面 3.4 m。超声风速仪测量的风速分辨率为 0.01 m/s,风向分辨率为 0.1°;当风速在 1~30 m/s 之间时,风速和风向的测量精度分别为 $\pm 1\% v_{\text{meas}} \pm 0.05 \text{ m/s}$ 和 $\pm 2^\circ$ 。实验选用的采样频率为 14 Hz。温度脉动仪采样频率为 100 Hz。



图 4 81000 型杨氏超声风速仪与 QHTP-2 型温度脉动仪实验图
Fig. 4 Experimental figure of Young's model 81000 ultrasonic anemometer and QHTP-2 temperature fluctuation instrument

低频部分来说,速度谱基本满足“ $-5/3$ 定律”。由此可知速度湍流满足局地均匀各向同性的假设。

超声风速仪测量的速度湍流谱如图 5 所示。对

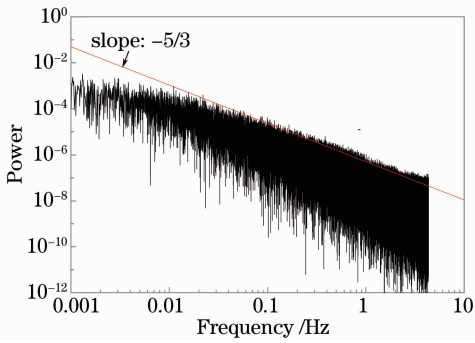


图5 速度湍流谱

Fig. 5 Spectrum of velocity turbulence

4.1.1 近地面 C_v^2 特征

在近地面,可以根据泰勒假设,结合平均风速将时间间隔的风速脉动转换为空间两点风速脉动的平方平均,计算空间间隔为 2 m 的径向风速二阶结构函数,利用(1)式可以计算出 C_v^2 ,如图 6(a)所示。将其与热力量湍流的特征量折射率结构常数 C_n^2 [图 6(b)]比较,可以看出热力湍流与动力湍流强度变化具有一致性,且转换时刻几乎相同。由此可知,在近地面层,大气处在中性条件(如日出后 1 h 和日落前 1 h)热力和动力湍流都不发展,湍流强度很弱,在大气不稳定(白天)或稳定条件下(夜晚)湍流强度增大,且白天强度增加程度大于晚上。

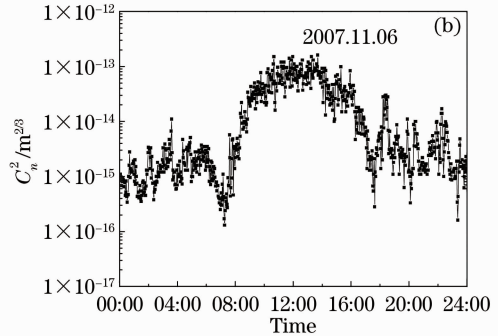
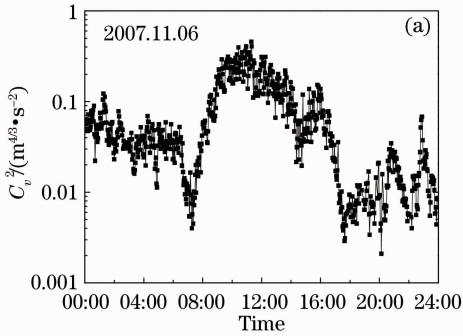


图 6 (a) C_v^2 与(b)折射率结构常数日变化

Fig. 6 Diurnal variation of (a) C_v^2 and (b) refractive index structure constant

4.1.2 近地面速度湍流模式构建

用 σ^2 表征速度脉动量。将实验期间晴空条件下的数据进行统计,共计样本点数为 20407 个。图 7 给出了 σ^2 和 C_v^2 的关系图,据图 7 显示,对二者取自然对数后有简单的线性关系。为此对其进行线性拟合,形式如(5)式所示:

$$\ln \sigma^2 = a + b \ln C_v^2, \quad (5)$$

即

$$\sigma^2 = e^a (C_v^2)^b. \quad (6)$$

(6)式为以 C_v^2 为自变量的速度湍流模式,参数 a 和 b 拟合结果分别为 1.58 和 1.26。拟合的相关系数

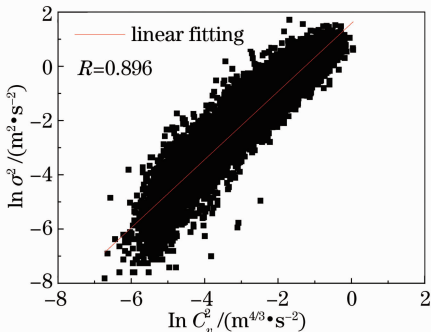


图 7 速度起伏方差与速度结构常数的关系

Fig. 7 Relationship between C_v^2 and σ^2

R 为 0.896。

事实上在图 7 中可以看出,当 C_v^2 的量级较小时 σ^2 有随其指数下降的趋势,但由于湍流状态下的样本数较少,且指数拟合形势复杂,不满足模式简便的原则,因此这里仍然采用线性模型。未来需要累计数据,对参数 a 和 b 进行修正以减小误差,并增加湍流强度较弱情况下的样本以考虑增加参数进行指数拟合,从而使模型更符合实际大气湍流状况。

4.2 对流层速度湍流特征

对 2007 年 6 月到 2009 年 5 月两年间风廓线雷达反演的 C_v^2 的特征进行统计,利用(6)式研究对流

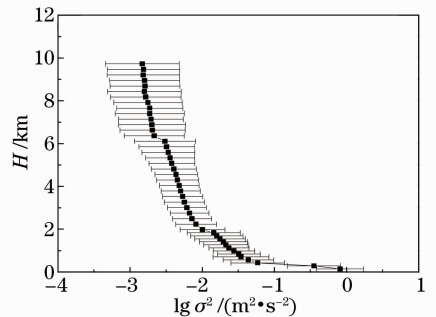


图 8 σ^2 随高度的廓线

Fig. 8 Profile of σ^2 with the change of height

层湍流速度脉动特点。图 8 给出了 σ^2 随高度的廓线与标准偏差,可看出在边界层以下 σ^2 的量级在 $10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 以上,标准偏差也在 1 个量级左右,即速度脉动可达 $0.1 \sim 1 \text{ m/s}$ 的范围;随着高度增加,速度脉动减弱,到对流层, σ^2 在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 之间,这是由于对流层的自由大气气流相对边界层缓慢,湍流尺度变大。

5 结 论

提出一种从风廓线雷达的回波信号提取湍流信息来反演 C_v^2 的方法,分析了对流层 C_v^2 随高度的变化及日变化特征,动力湍流强度随高度增加逐渐减弱,夜间减弱速度大于白天,且在边界层顶 C_v^2 具有较明显的日变化特征,但没有转换时刻。同时,根据近地面层湍流的速度脉动与 C_v^2 之间的关系构建速度湍流模式,结合对流层 C_v^2 的特征来研究对流层动力湍流的脉动特性,结果表明在对流层速度脉动较弱, σ^2 量级在 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 之间。

利用风廓线雷达的回波信号反演湍流廓线是研究高空湍流特征很好的一个间接方法,其回波信号中含有丰富的湍流信息,值得进一步深入挖掘。

参 考 文 献

- 1 Liu Jun, Wu Pengli, Gao Ming. Wander and spreading of polarized and partially coherent laser propagation on slant path in turbulence atmospheric[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1013001.
刘 钧, 吴鹏利, 高 明. 偏振部分相干激光斜程湍流大气传输的漂移扩展[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1013001.
- 2 Zhang Pengfei, Fan Chengyu, Qiao Chunhong, *et al.*. Analysis of scaling laws for phase compensation of focused beam under thermal blooming conditions[J]. Chinese J Laser, 2012, 39(2): 0213002.
张鹏飞, 范承玉, 乔春红, 等. 聚焦光束热晕效应相位补偿定标规律研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0213002.
- 3 Li Rongwang, Chang Xiang, Xiong Yaoheng. Numerical simulation of wander of ranging laser beam[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1101001.
李荣旺, 常 翔, 熊耀恒. 测距光束光斑漂移的数值仿真[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1101001.
- 4 Gong Zhiben, Wang Yingjian, Wu Yi. General theory of small scale thermal blooming [J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1998, 15(2): 175-185.
龚知本, 王英俭, 吴 毅. 小尺度热晕不稳定性线性化普遍理论[J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 175-185.
- 5 Wang Yingjian, Wu Yi. Effects of wind direction and gradient on small scale thermal blooming instability[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1995, 7(3): 449-452.

- 王英俭, 吴 毅. 风速与风向对小尺度热晕不稳定性影响[J]. 强激光与粒子束, 1995, 7(3): 449-452.
- 6 Wu Yi, Wang Yingjian, Gong Zhiben, *et al.*. Study on the small scale thermal blooming instability[J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(8): 824-828.
吴 毅, 王英俭, 龚知本, 等. 热晕小尺度不均匀性的研究[J]. 光学学报, 1994, 14(8): 824-828.
- 7 Liu Shuhua, Li Jie, Liu Heping, *et al.*. Characteristics of turbulence spectra and local isotropy in EBEX-2000[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(2): 213-224.
刘树华, 李 洁, 刘和平, 等. 在 EBEX-2000 实验资料中湍流谱和局地各向同性特征[J]. 大气科学, 2005, 29(2): 213-224.
- 8 Q S Li, Lunhai Zhi, Fei Hu. Boundary layer wind structure from observation on a 325 m tower[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(12): 818-832.
- 9 M C R Kalapureddy, K K Kumar, V ivakumar, *et al.*. Diurnal and seasonal variability of TKE dissipation rate in the ABL over a tropical station using UHF windprofiler [J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2007, 69(4-5): 419-430.
- 10 Zhang Caiyun, Weng Ningquan. Variability of clear-air turbulent dissipation rate in troposphere measured by wind profiler[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2244-2248.
张彩云, 翁宁泉. 对流层晴空湍流耗散率的风廓线雷达测量及特征[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2244-2248.
- 11 Zhang Caiyun, Weng Ningquan, Gao Hui, *et al.*. Research and theoretical simulation on the optical-wave refractive-index structure constant using wind profile radar [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0301004.
张彩云, 翁宁泉, 高 慧, 等. 基于风廓线雷达的光波段折射率结构常数方法研究与理论仿真[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0301004.
- 12 Ruan Zheng, He Ping, Ge Runsheng. Determination of refractive index structure constant with wind profile radar data[J]. Chinese J Atmospheric Sciences, 2008, 32(1): 133-140.
阮 征, 何 平, 葛润生. 风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 133-140.
- 13 V L Tatarski. Wave Propagation in a Turbulent Medium[M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong, *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 1978. 165-170.
塔塔尔斯基. 湍流大气中波的传播理论[M]. 温景嵩, 宋正方, 曾宗泳, 等译. 北京: 科学出版社, 1978. 165-170.
- 14 Zhou Xiuji. Higher Atmospheric Physics (Book One) [M]. Beijing: Meteorology Press, 1991.
周秀骥. 高等大气物理学(上册)[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
- 15 Zhang Caiyun, Dong Debao, Weng Ningquan. Research on Doppler radar spectral width and the variability of turbulent dissipation rate[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009, 4(6): 406-413.
张彩云, 董德保, 翁宁泉. 风廓线雷达的谱宽分析及湍流耗散率的变化特征初步研究[J]. 大气与环境光学学报, 2009, 4(6): 406-413.
- 16 Wen Jingsong, Gu Weiyu, Wei Gongyi. A model of the distribution of turbulent intensity over Shanghai [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1980, 28(2): 160-164.
温景嵩, 顾慰瀚, 魏公毅. 上海湍流强度分布的一个模型[J]. 气象学报, 1980, 38(2): 160-164.

栏目编辑: 王晓琰