

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

张彩云^{1,2} 翁宁泉^{1,3} 高 慧^{1,2} 姚远成^{1,2} 孙 刚¹ 刘 庆¹ 肖黎明¹

(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 湍流对光在大气中的传播有重要影响。光波段折射率结构常数是描述湍流强度的物理量。通过风廓线雷达回波分析是研究湍流强度的新方法。利用风廓线雷达计算出湍流耗散率和平均风的垂直梯度, 结合温度、气压等常规气象参数, 可估算光波段折射率结构常数, 计算的量级在 $10^{-18} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 之间, 符合实际情况, 证明了方法的可行性。同时对不同等压面上压强梯度、温度梯度及湿度对折射率结构常数的影响进行了数值计算。结果表明, 同一等压面上压强梯度改变对 C_n^2 影响很小, 可忽略不计; 而温度梯度改变对结果有较大影响, 故对温度廓线的测量有较高的精度要求; 相对湿度 $10\% \sim 90\%$ 的变化对光波段折射率结构常数的影响低于一个量级, 因此在晴空大气条件下, 湿度项可以忽略。

关键词 大气光学; 折射率结构常数; 风廓线雷达; 位折射率梯度; 湍流耗散率

中图分类号 P412.2; O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0301004

Research and Theoretical Simulation on the Optical-Wave Refractive-Index Structure Constant Using Wind Profile Radar

Zhang Caiyun^{1,2} Weng Ningquan^{1,3} Gao Hui^{1,2} Yao Yuancheng^{1,2}
Sun Gang¹ Liu Qing¹ Xiao Liming¹

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 Scholl of Environmental Sciences and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Turbulence gives effect on the light propagating in the atmosphere. There is an important parameter describing the turbulent strength which is the optical-wave refractive-index structure constant. Analyzing the echo of wind profile radar provides a new method to study turbulent strength. Calculating the turbulent dissipation rate and vertical gradient of mean velocity using wind profile radar, and combining the data of meteorological parameters, the optical-wave refractive-index structure constant C_n^2 can be estimated. The order of magnitude of C_n^2 is $10^{-18} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$. The results are coincident to the actual condition, which proves that the new method is feasible. The effect of pressure gradient, temperature gradient and humidity on the refractive-index structure constant on different isobaric surfaces is simulated simultaneously. The results show that: pressure gradient can be ignored because of its small effect on C_n^2 , while temperature gradient may have large effect on C_n^2 , so there should be higher precision in actual measurement. The variation between 10% and 90% of relative humidity causes less than one order of magnitude of C_n^2 , which demonstrates humidity can be ignored in clear air.

Key words atmospheric optics; refractive-index structure constant; wind profile radar; gradient of potential refractive index; turbulent dissipation rate

OCIS codes 010.0280; 010.1330

收稿日期: 2012-09-28; 收到修改稿日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学基金(41205023)和中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(Y23D241121)资助课题。

作者简介: 张彩云(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事大气光学方面的研究。E-mail: cyzhang@aiofm.ac.cn

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

1 引言

大气湍流会使光在传播过程中产生光束漂移^[1,2]、展宽^[3,4]和闪烁等效应,同时大气湍流会破坏激光的相干性,由湍流引起的折射率涨落而造成的波阵面畸变会造成激光束展宽、方向改变^[5]、光束“重心”改变以及束能量在横截面上的重新分布与由此引起的强度涨落,严重影响光斑质量。因此它作为大气光学领域中重要的一个分支,引起了学者的广泛关注。折射率结构常数 C_n^2 和湍流耗散率都是描述湍流强度重要的物理量。传统测量湍流强度仪器有温度脉动仪等,但是它成本高且无法连续测量。风廓线雷达可长期连续工作,时空分辨率高,回波信号中含有丰富的湍流信息。近年来在国外围绕它展开了一系列研究,主要是针对风廓线雷达回波谱谱宽展宽的研究^[6,7],并在此基础上分析湍流耗散率特征^[8,9]以及研究微波段折射率结构常数的变化规律^[9]。利用风廓线雷达对湍流的研究国内较少出现,张彩云等^[10]曾利用对流层风廓线雷达估算出湍流耗散率的垂直廓线并分析了日变化及季节变化特征。阮征等^[11]曾基于湍流散射理论构建了风廓线雷达强度信息对微波段折射率结构常数 C_n^2 的估算方法。而在激光传输领域中需要的是光波波段的折射率结构常数。

本文在风廓线雷达计算湍流耗散率的基础上,结合探空数据,探讨由风廓线雷达估算垂直路径上光波段 C_n^2 方法的可行性,并进行理论仿真模拟计算。

2 仪器简介

分析合肥西郊 Airdal6000 型低平流层风廓线雷达数据,结合温度、压强等常规气象参数研究。图 1 为雷达的实物图。由 12 m×12 m 的相控阵天线及仓内接收机、发射机及信号处理系统组成。工作频率为 450 MHz,有低模和高模两个工作模式,分别用于探测低空和高空的大气湍流,分辨率分别为 150 m 和 270 m。



图 1 Airdal6000 风廓线雷达各部分结构图

Fig. 1 Structure of Airdal6000 wind profile radar

3 理论分析

根据塔塔尔斯基^[12]关于湍流大气中波的传播理论,在静力稳定条件下,折射率结构常数 C_n^2 的平均值可以由风、温度和湿度等气象要素的平均廓线来表征:

$$\overline{C_n^2} = a^2 \times \frac{\epsilon^{2/3}}{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2} \times M^2, \quad (1)$$

式中 a^2 为无量纲常数,在实验测量其值约为 2.8^[12]。 ϵ 为湍流耗散率,单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,表示扰动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而耗散为分子热运动能量^[13]。 $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ 是平均风随垂直高度的梯度。 M 为位折射率的梯度,通常表示为

$$M = -77.6 \times 10^{-6} \frac{p}{T} \left(\frac{\partial \ln \theta}{\partial z} \right) \times \left[1 + \frac{155500q}{T} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial \ln q / \partial z}{\partial \ln \theta / \partial z} \right) \right], \quad (2)$$

式中 p 为大气压强,单位为 hPa; T 为绝对温度,单位为 K, $T=t+273.16$, t 为摄氏温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; θ 为位温, $\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{0.286}$,为温度和压强的函数, p_0 为参考压强,一般取 1000 hPa。 q 为比湿,单位为 10^{-3} ,其表达式为

$$q = R \times q_s = R \frac{M_v e_s(T)}{M_d P}, \quad (3)$$

式中 q_s 为饱和比湿。 M_v 为水蒸气的摩尔质量, M_d 为干空气的摩尔质量,二者比值为 0.622。在水面上的饱和水汽压 $e_s(T)$ 采用简单的 Tetens^[14] 经验公式计算:

$$e_s(T) = 6.1078 \exp \left[\frac{17.2693882(T - 273.16)}{T - 35.86} \right]. \quad (4)$$

在干洁大气中光波段湿度对 C_n^2 贡献非常微弱,因此忽略湿度项,可以得(2)式写成^[15]

$$M^2 = -77.6 \times 10^{-6} \frac{p}{T} \left(\frac{\partial \ln \theta}{\partial z} \right), \quad (5)$$

对式中几个未知量, p 、 T 、 θ 、 q 可以用探空或借助公式得到;湍流耗散率 ϵ 及平均风速随高度的梯度则需要用风廓线雷达估算^[10]。所用公式主要为

$$\sigma_{\text{tur}}^2 = \sigma_{\text{obs}}^2 - \sigma_{\text{beam+shear}}^2, \quad (6)$$

$$\epsilon = (\sigma_{\text{tur}}^2)^{3/2} \times (4\pi/A)^{3/2} \times I^{-3/2}, \quad (7)$$

$$I = 12\Gamma(2/3) \int_0^{\pi/2} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta \times$$

$$\left(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta + \frac{L^2}{12} \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)^{1/3} d\theta, \quad (8)$$

(6)式中 σ_{obs}^2 指风廓线雷达测量的原始谱宽。 $\sigma_{\text{beam+shear}}^2$

为波束宽度和风切变对谱宽的共同影响, σ_{tur}^2 表示湍流对谱宽的贡献。(7)式中 A 为 Kolmogorov 常数; L 为平均速度和多普勒时间序列的乘积。 a 为波束横截面的半径; $b = \alpha \Delta H = \Delta H / 8 \sqrt{\ln 2}$, ΔH 为脉冲长度。由风廓线雷达计算出湍流耗散率和平均风速随高度的梯度, 再加上常规探空, 即可利用(1)式和(5)式得到折射率结构常数的垂直分布。

4 数据处理及结果分析

4.1 各参数典型廓线

计算湍流耗散率之前采用模糊逻辑识别的方法来去除杂波, 得到干净的湍流回波。计算的湍流耗散率与实际符合^[10]。图2为2009年9月29日(晴天)17:00的湍流耗散率垂直廓线, 如图2(a)所示及

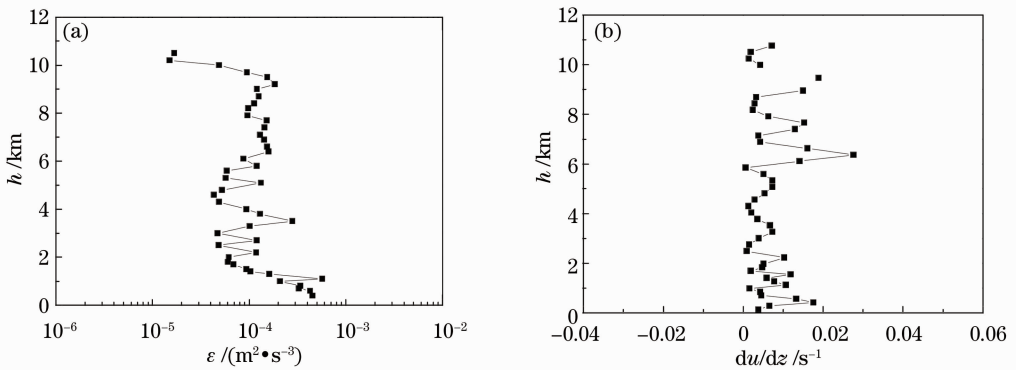


图2 2009年9月29日17:00风廓线雷达计算得到的(a)湍流耗散率垂直廓线及(b)平均风速切变
Fig. 2 (a) Vertical profiles of turbulent dissipation rate and (b) shear of the average wind velocity at 17:00 on 29, Sep., 2009, calculated using wind profile radar

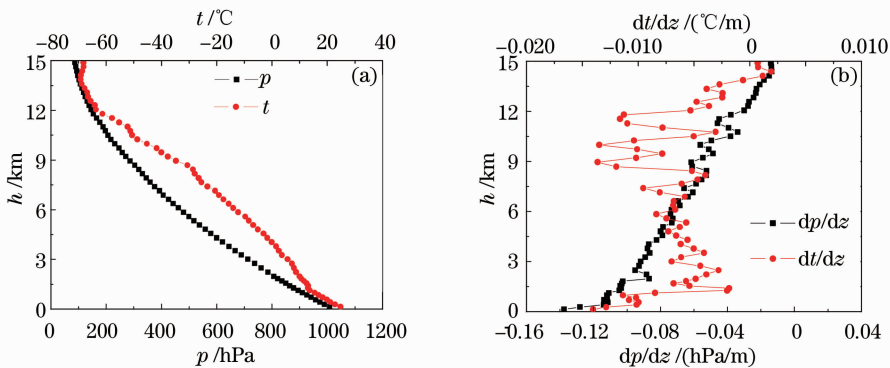


图3 2009年9月29日17:00(a)压强、温度廓线及其(b)梯度

Fig. 3 (a) Profiles of pressure and temperature and (b) their gradients at 17:00 on 29, Sep., 2009

4.2 干洁大气下计算结果

对晴空大气, 光在大气中传播时可忽略湿度的影响, 利用(1)式和(5)式计算位折射率梯度和折射率结构常数。图4分别为计算出的位折射率梯度平方[如图4(a)所示]及光波段折射率结构常数[如

平均风速切变, 如图2(b)所示。湍流耗散率的量级一般在 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ 之间, 随着高度 h 增加有减小的趋势, 在垂直路径上有随机性。速度梯度量级一般小于 0.04 s^{-1} , 具有随机性。

同一时刻的气象参数垂直廓线及其梯度如图3所示。其中图3(a)为压强、温度随高度变化, 图3(b)为二者梯度的垂直廓线。可以看出, 大气压强梯度均小于0, 但随着高度增加递减率会逐步减小, 对流层顶递减率接近0, 递减率最大一般不超过 0.16 hPa/m ; 温度梯度一般为负值, 范围在 $-0.2 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C/m}$ 之间, 对流层顶及以上温度梯度变为正值, 从整层来看, 在对流层以下温度梯度随高度没有明显变化趋势, 随机性比较强。

图4(b)所示]的垂直廓线。从图4(a)中可以看出, 位折射率梯度的平方量级在 $10^{-20} \sim 10^{-15}$ 之间, 一般为 10^{-17} 。随高度增加有减小的趋势, 并伴随明显的随机性。从图4(b)可以看出, 干洁大气下的折射率结构常数量级在 $10^{-18} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$ 之间, 该量级

及变化趋势与实际状况吻合^[16,17],这说明利用风廓线雷达与探空数据估算垂直路径上折射率结构常数

的方法是可行的。

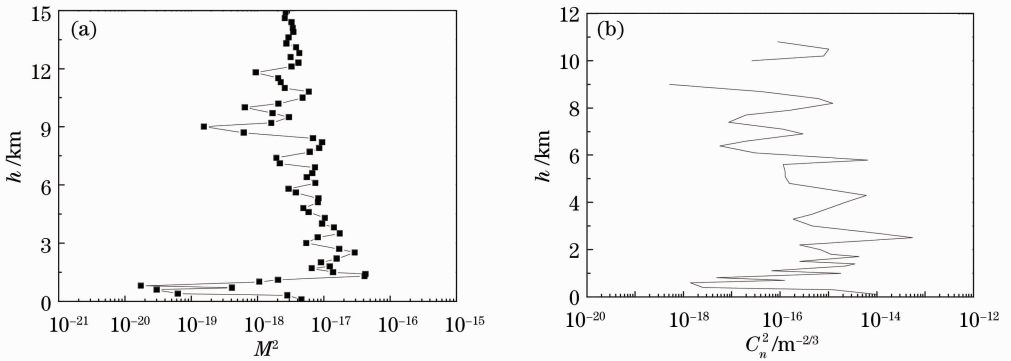


图 4 2009 年 9 月 29 日 17:00 干洁大气条件下(a)位折射率梯度平方廓线及(b)折射率结构常数廓线

Fig. 4 Profiles of (a) the gradient of the potential refractive-index square and (b) refractive index structure constant under the condition of dry-clear air at 17:00 on 29, Sep., 2009

5 理论模拟仿真

为详细了解上述参数对结果的具体影响,对不同高度上压强梯度、温度梯度及湿度对 C_n^2 的影响进行了仿真计算。其他参数选取须符合一般大气状况,湍流耗散率取 $10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,速度梯度取 0.01 s^{-1} ,气压、温度取值参考合肥附近的阜阳站十年间的探空数据,如图 5 所示。黑色和红色点线分别为气压和温度随高度的变化(彩色图可见网络电子版)。对图 5 中描述的从 200~1000 hPa 之间 9 个压强值所代表的典型特征高度分别进行研究。

度时气压梯度取值为 -0.08 hPa/m 。理论计算考虑了湿度项,相对湿度取值 50%。

图 6 中的两幅图分别为气压梯度改变[如图 6(a)所示]与温度梯度改变[如图 6(b)所示]对折射率结构常数的影响。不同颜色的点线分别代表不同高度上的理论计算结果。图 6(a)中可以看出,随着压强递减率的减小折射率结构常数是减小的,但在不同高度上减小的程度不同。气压越低,折射率结构常数减小的越慢。在 1000、925、850 hPa 代表的高度上,气压梯度越大引起的折射率结构常数的改变也越大,但从图 3(b)中可以看出,在 6 km 以下,气压梯度一般低于 -0.06 hPa/m ,因此在实际测量中,气压测量并不会对结果产生较大误差。从图 6(b)可以看出,不同高度上温度梯度对折射率结构常数的影响不同。低空(压强大)随着温度递减率的减小 C_n^2 逐渐增大,高空(压强小)上随温度递减率的减小逐渐减小。温度递减率越大,在不同高度上 C_n^2 的值差别越大,温度递减率接近零时折射率结构常数直接接近,若在某一高度上出现逆温层(即温度梯度大于零)时,其对 C_n^2 的影响也有所差异。因此在实际测量中,对温度精度的要求较高。

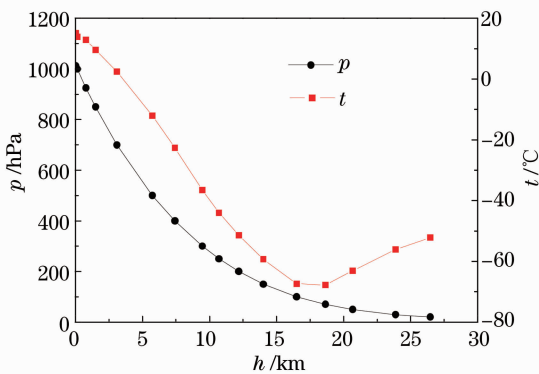


图 5 阜阳气象站气压、温度平均值廓线

Fig. 5 Profiles of mean pressure and temperature on Fuyang meteorological station

5.1 气压梯度与温度梯度

气压梯度与温度梯度对 C_n^2 的影响主要体现在位温对高度的导数这一项,分别模拟了 200~1000 hPa 之间所代表的 9 个典型高度上气压梯度与温度梯度分别改变时折射率结构常数的变化。其中在改变气压梯度值时温度梯度取 $-0.065 \text{ }^\circ\text{C/m}$,改变温度梯

5.2 湿度

对湿度影响数值模拟时,气压梯度取值 -0.08 hPa/m ,温度梯度取 $-0.065 \text{ }^\circ\text{C/m}$ 。图 7 为相对湿度由 10%~90%变化引起的折射率结构常数的变化。其中,不同颜色及形状的点线分别代表了在不同高度的模拟结果。从图 7 中可以看出,在某一特征高度上相对湿度增大, C_n^2 值会逐渐增加,但相对湿度从 10%变化到 90%, C_n^2 变化没有超过 1

个数量级,这个变化量对 C_n^2 而言是非常小的,并且在实际大气中相对湿度的变化跨度不会这么大,同时在晴空条件下 5 km 以上相对湿度很小。从图 7

还可以看出,在不同高度上相同的相对湿度也会得到不同的折射率结构常数。

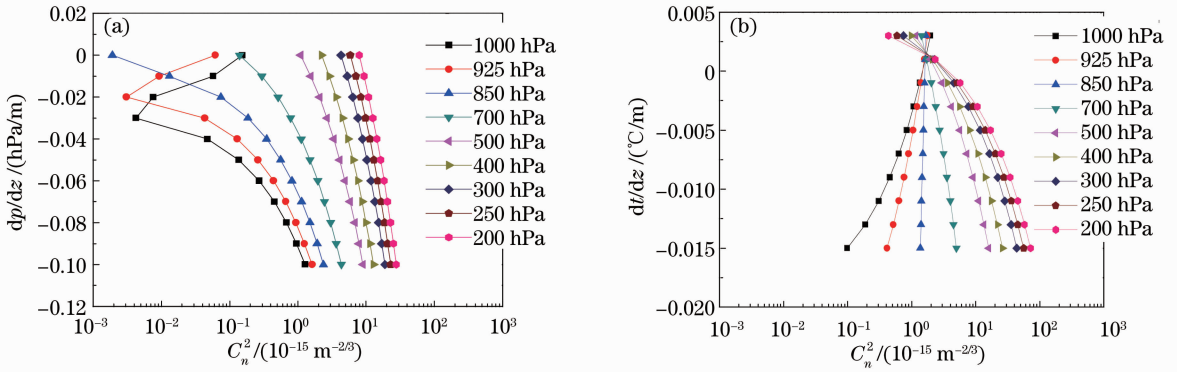


图 6 由不同压强代表的不同特征高度条件下(a)气压梯度与(b)温度梯度对折射率结构常数的影响

Fig. 6 Effect of (a) pressure gradient and (b) temperature gradient on refractive index structure constant under the condition of different feature heights stood for different pressures

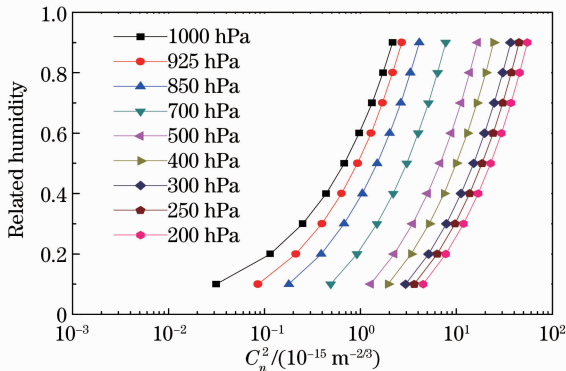


图 7 由不同压强代表的不同特征高度条件下折射率结构常数随相对湿度变化的模拟结果

Fig. 7 Simulated results of refractive-index structure constant along with relative humidity under the condition of different feature heights stood for different pressures

6 结 论

利用塔塔尔斯基关于光在湍流大气中传播理论,从风廓线雷达的基础数据出发,结合探空数据,寻找计算光波段折射率结构常数垂直分布的方法。通过一个典型的例子证明,利用风廓线雷达计算出湍流耗散率和平均风的垂直梯度,并结合温度、气压等常规气象参数及其梯度,可以估算出折射率结构常数的垂直廓线,计算出在光波段折射率结构常数的量级为 $10^{-18} \sim 10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$,该量级和变化趋势与利用其他手段测量的结果接近,说明该新方法的可行性。同时模拟了在不同等压面上(特定高度),压强梯度、温度梯度及湿度改变对折射率结构常数的

影响,结果表明,压强梯度对 C_n^2 影响不大,在实际测量中可以忽略它的误差;而温度梯度则不可忽略,对温度廓线的测量有较高的精度要求;另外相对湿度 $10\% \sim 90\%$ 的变化对光波段折射率结构常数的影响不超过 1 个量级,因此在晴空干洁大气条件下,计算折射率结构常数时湿度项可以忽略。

该方法避免了从雷达方程出发,从而绕开了微波段波的折射率结构常数向光波波段转换的难题,得到的结果可以直接应用于湍流大气中的光传输模式中,具有重要的意义。

参 考 文 献

- 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
- 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
- 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. Lasers*, 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
- Zhang Lu, Wu Zhiyong, Gao Shijie *et al.*. Study of time-domain spreading model of ultrashort Gaussian laser pulses in atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0401001
张璐, 吴志勇, 高世杰等. 大气湍流中超短高斯激光脉冲的时间域展宽模型研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(4): 0401001
- Chen Xiaowen, Li Binzhong, Tang Mingyue. Directionality of

- aperture partially coherent beams propagating through atmospheric turbulence [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0913002
- 陈晓文, 李宾中, 汤明玥. 受光阑限制的部分相干光通过湍流大气传输的方向性[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0913002
- 6 G. D. Nastrom. Doppler radar spectral width broadening due to beamwidth and wind shear[J]. *Ann. Geophysicae*, 1997, **15**(6): 786~796
- 7 David Atlas, R. C. Srivastava, P. W. Sloss. Wind shear and reflectivity gradient effects on Doppler radar spectra: II [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1969, **8**(3): 384~388
- 8 S. Jacoby-Koaly, B. Campistron, S. Bernard *et al.*. Turbulent dissipation rate in the boundary layer via UHF wind profiler Doppler spectral width measurements [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2002, **103**(3): 361~389
- 9 M. C. Reddy Kalapureddy, K. Kishore Kumar, V. Sivakumar *et al.*. Diurnal and seasonal variability of TKE dissipation rate in the ABL over a tropical station using UHF wind profiler [J]. *J. 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 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
- 12 V. L. Tatarski. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Wen Jingsong, Song Zhengfang, Zeng Zongyong *et al.* Transl.. Science Press, 1978
- 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. 科学出版社, 1978
- 13 Zhou Xiuji, Tao Shanchang, Yao Keya. *Higher Atmospheric Physics*[M]. Meteorology press, 1991
- 周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理[M]. 气象出版社, 1991
- 14 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. *Atmospheric Physics*[M]. Peking University Press, 2003
- 盛裴轩, 毛节泰, 李建国 等. 大气物理学[M]. 北京大学出版社, 2003
- 15 Rao Ruizhong. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Anhui Science & Technology Publishing House, 2005
- 饶瑞中. 光在湍流大气中的传播[M]. 安徽科学技术出版社, 2005
- 16 Yan Jixiang, Gong Shunsheng, Liu Zhishen. *Environmental Monitoring of Laser Radar* [M]. Science Press, 2001
- 阎吉祥, 龚顺生, 刘智深. 环境监测激光雷达[M]. 科学出版社, 2001
- 17 Weng Ningquan, Zeng Zongyong, Xiao Liming *et al.*. Profile and characteristic of refractive index structure constant [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(6): 673~676
- 翁宁泉, 曾宗泳, 肖黎明 等. 大气折射率结构常数垂直分布特征[J]. *强激光与粒子束*, 1999, **11**(6): 673~676

栏目编辑: 王晓球