

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.05.002

近地面层湍流大气中光传输到达角起伏实验研究

梅 杰¹, 袁仁民^{1*}, 王 显¹, 吴徐平²

(1 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;

2 安徽建筑大学数理学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为研究不同气象条件下近地面层湍流大气对光传输到达角起伏的影响, 在校园内一块较平坦草地上开展了光传输实验。采用半导体激光器作为光源, 传输 60 m 至接收端, 使用焦距为 1300 mm 的望远镜接收后由 CCD 相机采集光点灰度图片。根据灰度图片上光点位置计算传输路径上的大气湍流折射结构常数 C_n^2 以及垂直、水平两个方向到达角 (Angle of arrival, AoA) 起伏方差的比值。同时测量了传输路径附近的温度、风速等气象数据, 计算稳定度参数 Richardson 数。结果表明, Richardson 数大于临界值 0.25 时, 垂直、水平到达角起伏方差比值均大于 1.0; Richardson 数小于 0.25 时, 垂直、水平到达角起伏方差比值在 1.0 左右起伏。由此可以看到, 稳定层结条件下, 湍流表现为各向异性特征; 不稳定层结条件下, 湍流表现为各向同性特征。

关键词: 近地面层; 湍流大气; 到达角起伏; 大气稳定度; 各向同性; 各向异性

中图分类号: P426

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)05-0330-07

Experimental Investigation of Angle-of-Arrival Fluctuation of Light Propagating in Near Surface Layer Turbulent Atmosphere

MEI Jie¹, YUAN Renmin^{1*}, WANG Xian¹, WU Xuping²

(1 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2 School of Mathematics and Physics, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In order to study the influence of turbulent atmosphere in the surface layer on the fluctuation of the angle of arrival(AoA) of light propagation under different meteorological conditions, an optical transmission experiment was carried out on a flat grass in the campus. A semiconductor laser was used as the light source, and the light signal was received by a telescope with focal length of 1300 mm after transmitting 60 m to the receiving location, then a CCD camera was used to shoot grayscale pictures of the light spot. Ratio of the AoA fluctuations in vertical and horizontal directions was calculated based on the position of the light spot on the photo. The atmospheric turbulent refractive structure constant on the transmission path was

基金项目: Supported by Natural Science Foundation of China (国家自然科学基金, 41775014, 61471003)

作者简介: 梅 杰 (1992 -), 男, 安徽人, 研究生, 主要从事大气边界层光传输方面的研究。

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

导师简介: 袁仁民 (1968 -), 男, 安徽六安人, 博士, 副教授, 研究生导师, 主要从事大气边界层的研究。

E-mail: rmyuan@ustc.edu.cn

收稿日期: 2018-07-03; **修改日期:** 2018-07-29

also calculated. Simultaneously, meteorological parameters near the transmission path, such as temperature and wind speed, were measured so as to calculate the Richardson number as a stability parameter. The results showed that when the Richardson number is greater than 0.25, the ratio of vertical and horizontal AoA variances is greater than 1.0; when the Richardson number is less than 0.25, the ratio of vertical and horizontal AoA variances fluctuates around 1.0. Thus, it can be seen that atmospheric turbulence is anisotropic under stable stratification conditions and isotropic under unstable stratification conditions.

Key words: surface layer; turbulent atmosphere; AoA fluctuation; atmospheric stability; isotropy; anisotropy

1 引言

光波在大气中传输时,光波的振幅、相位与传播方向等参数随着大气折射率的起伏而起伏,从而出现一系列的湍流效应,如闪烁、抖动、光束扩展和到达角起伏等^[1]。大气光传输中出现的湍流效应使得水平路径的自由空间光学通讯系统^[2-4]、激光卫星通讯系统^[5-7]、激光雷达系统^[8]、高能激光传输、激光直接检测、光学成像、天文观测、远程遥感等均受到严重的影响^[9]。大气湍流效应会造成激光雷达对目标判断的错误,增加激光通讯的误码率,使光传输中空间相干性退化,还会减弱高能激光的能量集中度以及影响大气中传送的光学图像的分辨率。

对于湍流效应的描述,当前广泛使用的理论都是基于各向同性湍流,认为湍流的统计特征沿所有的方向都是相同的。然而大量的实验表明湍流经常呈现出各向异性的特征。风廓线雷达后向散射的强度随观测角度的变化表明高空湍流各向异性的程度^[10]。大气边界层室内模拟实验发现在边界层顶部明显的各向异性特征^[11]。室内光传输实验表明,弱湍流的情况下湍流对波阵面在水平方向的倾斜与垂直方向相比差别较大,这种差别随湍流的增强逐渐减小^[12]。数值模拟表明整个大气边界层都表现出各向异性特征,在近地面层和边界层顶部各向异性特征尤为突出^[13]。近地面三维风速的谱分析揭示了近地面层各向异性的程度与大气稳定度有关^[14]。这些实验从多个角度反映了大气中不同高度不同条件下湍流各向异性特征。

到达角起伏是常见的湍流效应,尚未有观测实验系统分析到达角起伏所表现出的各向异性特征。本文设计一个简单的实验在城市近地面开展光传输到达角起伏观测实验,分析城市近地面层湍流各向异性特征。第2部分介绍各向同性条件下的湍流理论,第3部分介绍实验方法,第4部分给出实验结果,最后给出结论。

2 理论分析

实验采用长焦距镜头,对准远处的光源进行拍照,聚焦在焦平面上,从而得到水平方向的到达角 α_x 和垂直方向的到达角 α_y ,

$$\alpha_x = \frac{l_x}{F}, \quad \alpha_y = \frac{l_y}{F} \quad (1)$$

式中, F 为镜头的焦距, l_x 和 l_y 分别为像点距离焦点的水平 and 垂直距离。

考虑孔径平滑后,各向同性湍流场中平面波到达角起伏方差为^[15]

$$\langle \alpha^2 \rangle = 5.675 D^{-1/3} \int_0^L C_n^2(z) dz \quad (2)$$

其中, C_n^2 为折射率结构常数, D 为接收孔径, L 为传输距离, $\langle \alpha^2 \rangle$ 为垂直和水平方向上到达角起伏方差的和,即 $\langle \alpha^2 \rangle = \langle \alpha_x^2 \rangle + \langle \alpha_y^2 \rangle$ 。由公式(2),通过测量到达角起伏方差得到路径平均折射率结构常数。

大气温度层结稳定度有不同的度量参数, 广泛使用的是 Richardson 数。可以通过不同高度上的平均温度和平均风速计算得到 Richardson 数 R_i [16]

$$R_i = \frac{g}{\bar{T}} \left(\frac{\gamma_d - \gamma}{\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}\right)^2} \right) \quad (3)$$

式中, g 为当地的重力加速度, \bar{T} 为平均温度 (单位为 K), γ_d 为大气干绝热温度递减率, γ 为实际的温度垂直变化率, \bar{u} 为平均风速, z 为高度。 R_i 为正, 表示大气温度层结稳定; R_i 数为负, 表示大气温度层结不稳定。

3 实验方法

实验在中国科学技术大学东区北门附近草坪进行, 主要包括光学测量和气象数据采集两部分。

光学测量装置由激光发射端和接收端两部分组成, 见图 1 所示。其中, 图 1(a) 为发射端, (b) 为接收端, (c) 为试验场地俯视图。发射端的光源为半导体激光器, 发光点源尺寸约为 2 mm, 波长为 650 nm。发射端激光器发出的点光经过透镜准直。接收端由接收孔径 100 mm 的长焦镜头、滤光片、 CCD 相机和图像采集计算机等组成。长焦镜头的焦距最大可达 1300 mm。 CCD 相机分辨率为 1280 pixel×1024 pixel, 像素尺寸为 5.2 μm ×5.2 μm 。 CCD 相机的采样频率为 30 Hz。接收端与发射端的距离为 60 m。接收端接收的光斑约为 3 mm, 发散角约为 0.15 mrad。采集图像得到的单帧光斑示例如图 2。

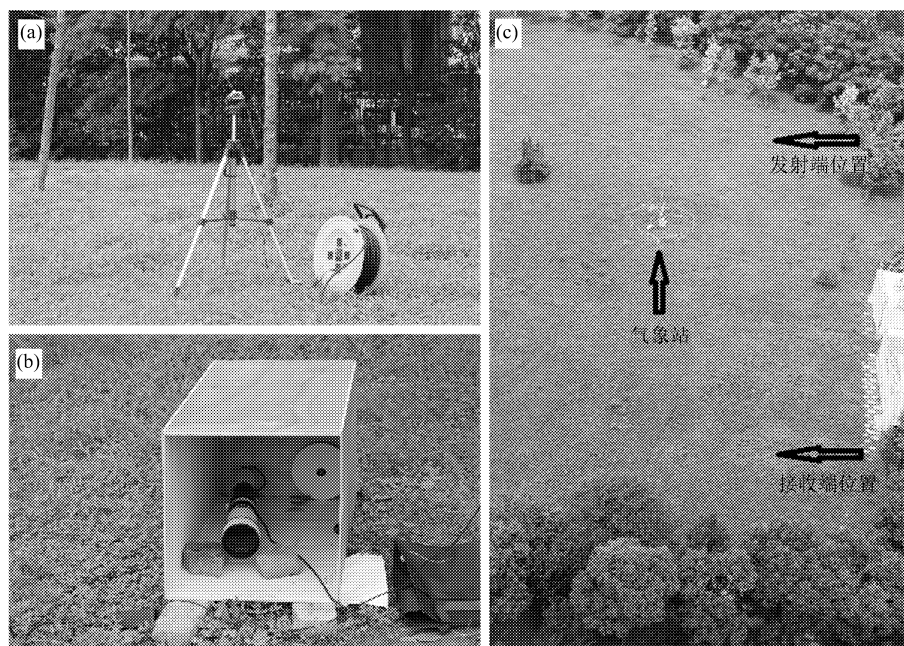


图 1 实验装置实物图片及实际场景。(a) 发射端; (b) 接收端; (c) 试验场地俯视图

Fig.1 Experimental devices. (a) Transmitting terminal; (b) receiving terminal; (c) planform of the test site

气象数据采集由设置在草坪中央位置的气象站完成。主要测量距地面高度为 1 m 和 3 m 处的温度、风速、气压、湿度等数据。温度和风速的采集频率为 10 Hz。

实验过程中, CCD 相机连续拍摄得到接收端光斑的灰度图像, 见图 2 所示。随后取灰度图像的左上角为坐标零点, 水平坐标轴取向右为正, 垂直坐标轴取向下为正, 计算每帧图像重心位置的横纵坐标, 再根据公式 (1) 将坐标换算成到达角。然后根据准则去除野点后, 再利用功率谱方法去除噪声, 然后计算得

到水平和垂直方向的到达角方差。根据式 (2) 得到的 30 min 平均值。随后再分别计算连续 20 min 间隔内水平垂直方向的到达角的方差, 得到 20 min 内垂直、水平方向到达角起伏方差的比值, 作为垂直、水平方向到达角起伏方差的比值。

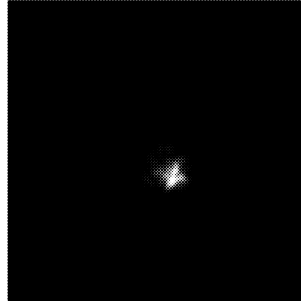


图 2 CCD 相机拍摄的光斑灰度图像示例

Fig.2 Example of grayscale image of the spot captured by the CCD camera

另一方面, 分别对 3 m、1 m 高度的温度和风速数据做 20 min 平均, 然后使用式 (3) 计算得到 Richardson 数, 用以表征大气温度层结稳定度。

这样, 既可以得到测量位置处湍流大气中传播的平面单色光不同方向上到达角起伏的差异, 也能获得大气温度层结稳定度的数据。

4 实验结果分析

开展到达角起伏测量实验临时搭建了观测平台, 实验只能在无雨的时段实施。实验断断续续实施多次。给出 2018 年 4 月 19 日至 20 日和 2018 年 6 月 17 日的实验结果。两次实验期间天气晴朗, 太阳短波辐射、近地面气温都具有明显的日变化特征。

4.1 折射率结构常数的日变化

根据公式 (2) 计算得到两次实验的 C_n^2 结果分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示。

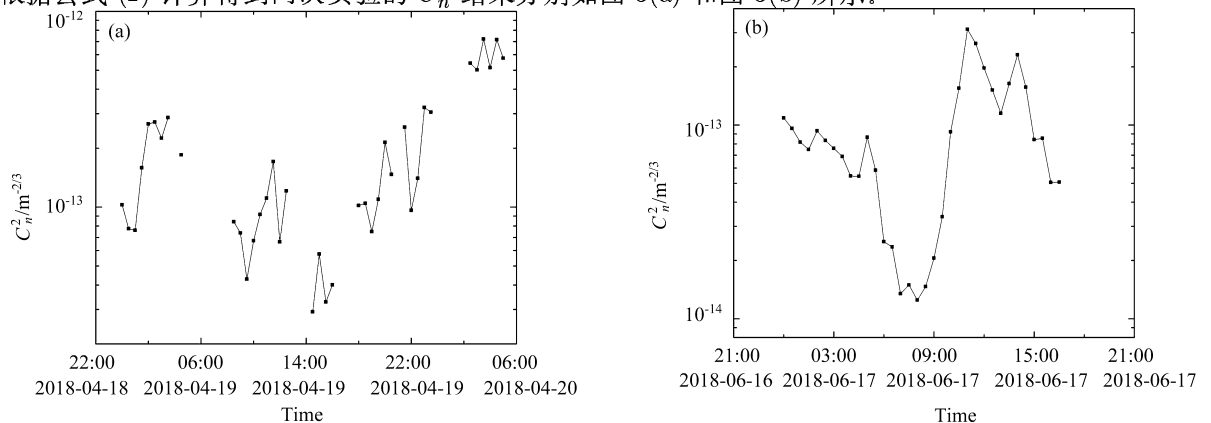


图 3 C_n^2 时间序列。(a) 4 月 19 日; (b) 6 月 17 日

Fig.3 Time series analysis of C_n^2 . (a) On April 19th; (b) on June 17th

图 3(a) 给出 20180419 00:00 至 20180420 05:00 时间段的折射率结构常数, 图 3(b) 给出 20180617 00:00 至 20180617 16:30 时间段的折射率结构常数。由于数据存储的原因, 测量数据不连续。测量得到的 4 月 19 日 C_n^2 早晚较大, 中午较小, 说明 4 月 19 日中午的湍流较弱, 不具有典型的日变化特征。而 6 月 17 日 7:00,

C_n^2 很小, 中午 C_n^2 很大, 然后 C_n^2 又逐渐变小, 具有典型的日变化趋势。可能的原因是 20180414 下雨至 20180419 经历的时间较短, 草地上的水分较大, 地面吸收的净辐射中大部分转换为潜热通量, 对流较弱, 所以未能出现典型的日变化特征。20180610 至 20180618 时段一直没有下雨, 始终保持着晴好天气, 地面吸收的净辐射大部分转换为感热通量, 对流较强, 所以出现了典型的日变化特征。这两天的折射率结构常数 C_n^2 分别代表具有日变化特征和不具有日变化特征的情况, 所以我们选择这两天作为个例进一步分析到达角起伏方差和大气稳定度之间的关系。

4.2 到达角起伏方差比值与 Richardson 数的时间序列

根据公式 (1), 计算 20 min 共约 36000 张图片得到水平方向和垂直方向的到达角起伏方差, 然后得到垂直、水平方向到达角起伏方差的比值。根据公式 (3) 计算得到近地面层大气稳定度 R_i 。

图 4(a) 和图 4(b) 分别给出两次实验得到的到达角起伏方差比值与 Richardson 数日变化的对应关系。其中, 实线为 Richardson 数的日变化曲线, 虚线 (Ratio) 为到达角起伏方差比值的曲线。由图 4(a) 可见, 4 月 19 日 2 时和 20 日 2 时, Richardson 数远大于 0, 表现出强稳定层结, 到达角方差比值远大于 1, 表现出水平垂直方向到达角统计特征完全不同。而白天时段, 特别是正午, 稳定度接近于 0 或小于 0, 为不稳定层结。到达角起伏方差的比值接近于 1。图 4(b) 中给出的整个时间段, R_i 几乎都小于临界值 0.25 (只有 3 个数据大于 0.25), 可见都处于不稳定层结。到达角起伏方差比值在这个时间段都是接近于 1。这说明不稳定层结条件下, 水平和垂直方向的到达角起伏方差相等。

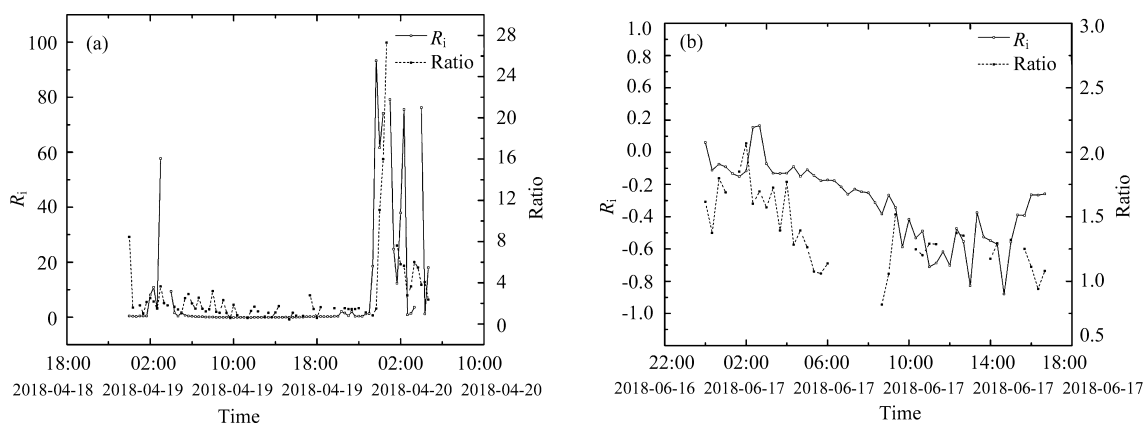


图 4 垂直、水平方向到达角起伏方差比值与 Richardson 数的时间序列。(a) 4 月 19 日; (b) 6 月 17 日

Fig.4 Daily changes of ratio of vertical and horizontal AoA variances and the Richardson number.

(a) On April 19th; (b) on June 17th

4.3 到达角起伏方差比值与 Richardson 数的对应关系

根据上一节的结果可以看到, 稳定层结条件下, 到达角起伏方差比值远大于 1; 不稳定层结条件下, 到达角起伏方差比值接近于 1。

图 5 给出 4 月 19 日和 6 月 17 日垂直水平方向到达角起伏方差比值 (Ratio) 和 Richardson 数之间的对应关系。图 5(a) 是 20180419 00:00 至 20180420 04:40 时间段和 20180617 00:00 至 20180617 16:40 时间段内所有试验数据, 图 5(b) 仅为图 5(a) 中 Richardson 数小于 0.5 的部分。由图 5(a) 可见, Richardson 数大于 0.25 的部分对应时段到达角起伏方差比值总是大于 1.0。图 5(b) 可知, 两次实验中 Richardson 数小于 0.25 时, 到达角起伏方差比值在 1.0 附近起伏, Richardson 数大于 0.25 时, 到达角起伏方差比值总是大于 1.0。因此认为垂直、水平方向的到达角起伏比值与 Richardson 数有关, 也即与稳定度有关; 并且当大气

温度层结稳定时, 这一比值总大于 1.0, 当大气温度层结不稳定时, 这一比值在 1.0 附近起伏。

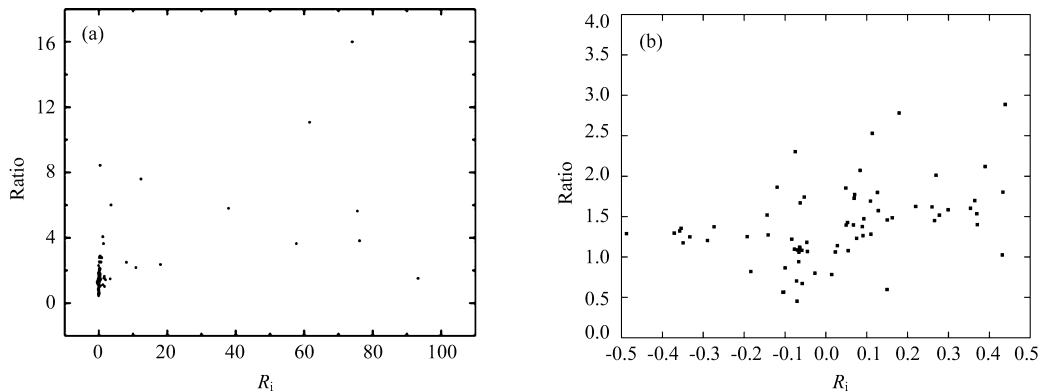


图 5 垂直、水平方向 AoA 比值与 Richardson 数的对应关系。(a) 两天所有数据的结果; (b) R_i 小于 0.5 的结果

Fig.5 Correspondence between ratio of vertical and horizontal AoA variances and the Richardson number.

(a) For all data recorded in the two days; (b) for data with R_i less than 0.5

5 结 论

采用实验测量的方法, 研究了近地面层湍流大气中传输的平面波垂直、水平方向上到达角起伏方差的比值与大气稳定度之间的对应关系。结果表明, 垂直、水平方向上到达角起伏方差的比值与 Richardson 数间的日变化趋势一致。Richardson 数小于临界值 0.25 时, 垂直、水平方向到达角起伏方差的比值接近于 1.0; Richardson 数大于临界值 0.25 时, 垂直、水平方向到达角起伏方差的比值总是大于 1.0。

根据我们的观测结果, 垂直和水平到达角起伏方差的比值有近一半时段远大于 1, 说明各向异性现象在近地面层是经常发生的, 近地面层湍流各向异性与大气稳定度有很好的对应关系。如何定量研究各向异性与大气稳定度之间的关系, 以及如何将湍流各向异性特征与大气光学应用联系起来还需要进行深入的研究。

参考文献 :

- [1] Song Z F. *Elements of Applied Atmospheric Optics* [M]. China Meteorological Press, Beijing, 1990(in Chinese). 宋正方. 应用大气光学基础 [M]. 气象出版社, 北京, 1990.
- [2] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, et al. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12):13195-13200.
- [3] Li J, Zhang Z, Gao J, et al. Bandwidth of adaptive optics system in atmospheric coherent laser communication [J]. *Optics Communications*, 2016, **359**: 254-260.
- [4] Ricklin J C, Davidson F M. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication [J]. *Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science & Vision*, 2002, **19**(9): 1794-1802.
- [5] Comerón A, Rodríguez A, Dios F, et al. Scintillation and beam-wander analysis in an optical ground station-satellite uplink [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(19):3866-3873.
- [6] Borah D K, Boucouvalas A C, Davis C C, et al. A review of communication-oriented optical wireless systems [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2012, **2012**(1):91-118.

- [7] Ma X P, Sun J F, Hou P P, *et al.* Research progress on overcoming the atmospheric turbulence effect in satellite-to-ground laser communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, **51**(12):22-31(in Chinese).
马小平, 孙建锋, 侯培培, 等. 星地激光通信中克服大气湍流效应研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, **51**(12): 22-31.
- [8] Cai Y, Korotkova O, Eyyuboğlu H T, *et al.* Active laser radar systems with stochastic electromagnetic beams in turbulent atmosphere [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(20): 15834-15846.
- [9] Phillips R L. *Laser Beam Propagation through Random Media*, Second Edition[M]// *Laser beam propagation through random media*. SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 2005.
- [10] Hocking A, Hocking W K. Turbulence anisotropy determined by wind profiler radar and its correlation with rain events in Montreal, Canada [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2005, **24**(1):40-51.
- [11] Yuan R, Luo T, Sun J, *et al.* A new method for measuring the imaginary part of refractive index structure parameter in the urban surface layer [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, **14**(15): 21285-21314.
- [12] Gulich D, Funes G, Zunino L, *et al.* Angle-of-arrival variance's dependence on the aperture size for indoor convective turbulence [J]. *Optics Communications*, 2014, **277**(2): 241-246.
- [13] Darbieu C, Lohou F, Lothon M, *et al.* Turbulence vertical structure of the boundary layer during the afternoon transition [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, **14**(23): 10071-10086.
- [14] Liu H, Yuan R, Mei J, *et al.* Scale properties of anisotropic and isotropic turbulence in the urban surface layer [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, **165**(2):277-294.
- [15] Rao R Z. *Light Propagation in the Turbulent Atmosphere* [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Press, 2005(in Chinese).
饶瑞中. 光在湍流大气中的传播 [M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2005.
- [16] Zhou X J, Tao S C, Yao K Y. *Advanced Atmosphere Physics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.225(in Chinese).
周秀骥, 陶善昌, 姚克亚. 高等大气物理学 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.225.