

激光阴影法探测大气湍流中二维风矢量的可行性

沈刘晶^{1,2,4}, 梅海平^{2,4*}, 任益充^{2,4}, 张骏昕^{2,3,4}¹安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230601;²中国科学院安徽光学精密机械研究所大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;³中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;⁴先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

摘要 提出了一种利用激光阴影图像探测大气湍流中二维横向风矢量的方法,并开展了数值模拟和实验研究。通过移动无限长的相位屏模拟光传输路径上的横向风,采用基于归一化互相关原理的整像素搜索算法计算激光阴影的移动速度,并分析了路径上的横向风及其非均匀分布对激光阴影移动速度的影响。100 m 长的激光阴影成像探测对比实验结果表明,在采样频率足够大时,激光阴影的移动速度与平均横向风速之间满足线性关系。超声风速仪的实测值与激光阴影法的拟合值相关系数达到 0.949,这表明利用短曝光激光阴影图像获取路径的平均二维横向风矢量是可行的;且该方法能定量展现激光传输路径上大气湍流涡旋的发展和演化,对于大气湍流风场的遥感监测及相关工程应用具有重要的参考价值。

关键词 大气光学; 激光大气传输; 大气湍流; 横向风; 阴影法

中图分类号 O435

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1304004

1 引言

大气湍流由不同尺度的涡旋构成,是大气中物质和能量传递的主要方式。大气湍流运动是大气与环境科学的核心研究内容,涉及到航空航天、飞行器安全控制、激光能量和信息传输等领域^[1-6]。由于大气湍流中密度和折射率的非均匀分布,当激光经大气湍流传输一定距离后,会出现一系列传输效应^[7-9],最终导致远场接收到的激光光斑呈现出随机起伏的动态变化特征。在光学领域,受大气扰动的激光光斑又被称为激光阴影,该阴影的移动速度与激光传输路径上流场的横向运动密切相关^[10]。

利用激光阴影图像提取流场信息的方法也被称为阴影技术,最早由 Robert Hooke 在 17 世纪提出^[11]。受成像条件和计算速度的限制,直至 20 世纪中期,阴影技术才得到长足的发展。目前,阴影法已被广泛应用于流场显示领域,在风洞测试中阴影

技术也可用于高速事件如冲击波、超声速气流和自由射流喷雾的成像探测^[12-14]。但在自由湍流大气中,利用阴影法进行风矢量成像探测的研究较少。梅海平等^[15-16]在折返路径光学湍流激光成像探测技术的研究中发现,利用 3M 反光膜构建的激光成像系统能清晰显示激光经大气湍流后形成的阴影及其随流场的运动情况,该阴影的移动能体现湍流大气中横向风场的路径积分效应;同时,可利用互相关算法初步计算风矢量的二维涡旋结构。但湍流大气中的激光光斑在移动过程中通常伴随着形变,且光传输路径上风速、风向的非均匀性也会严重影响风矢量的计算结果。因此,利用互相关算法获取激光阴影的移动速度能否正确反映流场的移动速度及计算结果是否受光斑图像采样频率的影响等问题,至今还缺乏定量的分析。

针对上述问题,本文通过数值仿真进行了定量分析和实验验证。首先,介绍了用于计算激光阴影

收稿日期: 2020-12-02; 修回日期: 2021-01-04; 录用日期: 2021-01-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11904369)、中国科学院装备预研联合基金(6141A01130202)

通信作者: *hpmei@aiofm.ac.cn

位移的整像素搜索算法。然后,采用动态相位屏模拟方法,获得均匀和非均匀湍流横向风场路径下移动的激光阴影图像,并在此基础上分析了图像移动速度和风速之间的对应关系以及风场的路径非均匀性和阴影图像采样频率对两者关系的影响。最后,开展了水平路径的激光成像探测实验,并将激光阴影图像位移检测结果与超声风速计同步获取的横向风速进行对比分析,验证了利用激光阴影法获取湍流场二维风矢量的可行性。

2 整像素搜索算法

常见的图像运动检测算法有互相关算法和光流算法,前者假设检测目标和运动速度在时空上不存剧烈波动,后者则假设图像灰度是不变的^[17]。激光

大气传输的闪烁效应使激光阴影图像的灰度值发生变化,而阴影区域的形状和运动速度不会发生突变,因此,实验采用基于归一化互相关的整像素搜索算法计算图像中的阴影位移^[18]。由于激光阴影图像会随时间发生形变,因此,用该算法计算激光阴影位移时,需要确保阴影图像的采样频率足够大,使前后 2 帧图像的形态变化足够小,即 2 帧图像之间能够精确匹配。

图 1 为整像素搜索算法的计算原理,首先,在某帧图像(尺寸为 $N \times N$)的起始位置,选择尺寸为 $n \times n$ 的部分图像作为查询窗口,并将其在第 2 帧图像中对应的搜索窗口(尺寸为 $m \times m, m > n$)内平移,依次计算出不同位置的 Pearson 线性相关系数 $r(l, k)$, $r(l, k)$ 可用有界离散积分的归一化形式表示为

$$r(l, k) = \frac{\sum_l \sum_k [f(l, k) - \bar{f}] \times [g(l + a, k + b) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_l \sum_k [f(l, k) - \bar{f}]^2 \sum_l \sum_k [g(l + a, k + b) - \bar{g}]^2}}, \quad (1)$$

式中, $f(l, k)$ 、 $g(l + a, k + b)$ 分别为前后 2 帧图像中查询窗口的像素灰度分布函数, a 、 b 分别为搜索窗口内的平移量 ($0 \leq a, b \leq m - n$), \bar{f} 、 \bar{g} 分别为 2 帧图像查询窗口内的像素灰度均值。平移量越接近真实位移量, $r(l, k)$ 的值就越大。根据搜索窗口内 $r(l, k)$ 峰值所在位置就可以得到该查询窗口的相对位移量(统计平均值),利用像素尺度将相对位

移转换为实际位移后,可计算出该查询窗口的移动速度。设水平和垂直方向上查询窗口的重叠率均为 50%,按照先水平再垂直的顺序找到下一个查询窗口的位置。重复上述操作,最终可以得到图像中所有查询窗口的速度矢量,将所有速度矢量取平均后作为图像的整体移动速度。

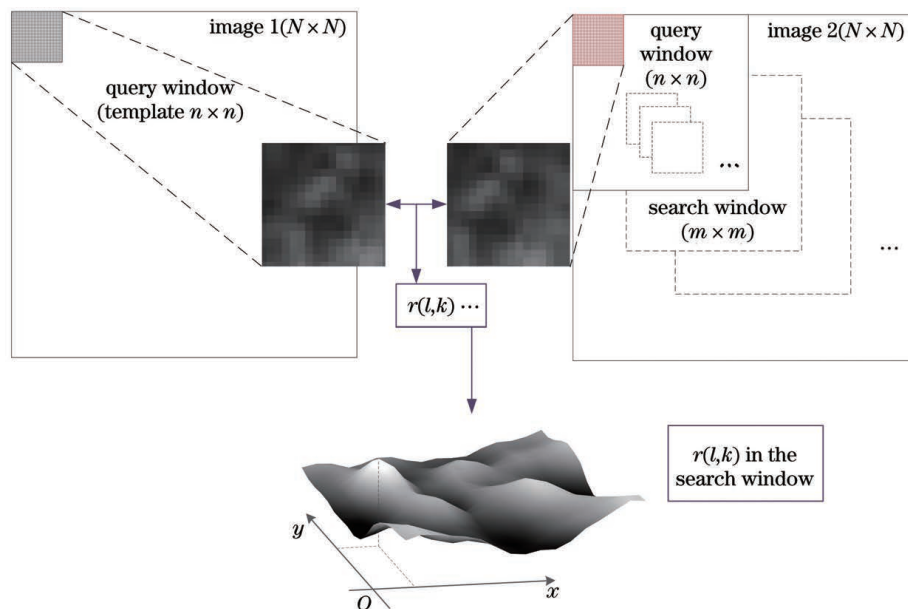


图 1 整像素搜索算法的原理

Fig. 1 Principle of the integral pixel search algorithm

3 数值模拟及分析

受自然条件的约束,无法控制路径上横向风的分布,为了分析光斑阴影移动速度和路径平均横向风速之间的定量关系以及风场的路径非均匀性和阴影图像采样频率对两者关系的影响,运用数值仿真进行分析是极为必要的。在湍流大气中,模拟激光传输效应的核心是生成合适的相位屏,以代替光传输路径上湍流引起的光波相位起伏。多层相位屏法用多个间隔为 Δz 的相位屏代替连续随机介质,模拟光传输时,光场经过多次真空衍射传输和相位调制,最终到达接收平面。实验基于相位协方差产生相位屏^[19-20],借助 Python 环境中的 Scipy、AOtools 等工具包进行建模^[21]。根据泰勒冻结湍流假设,只要在垂直于光路传输平面内移动无限长相位屏^[22],就可以模拟路径上横向风对光波传输的影响,具体过程如图 2 所示。假设光传输路径上存在自上而下的横向风,则需要将相位屏向上平移,即在相位屏的

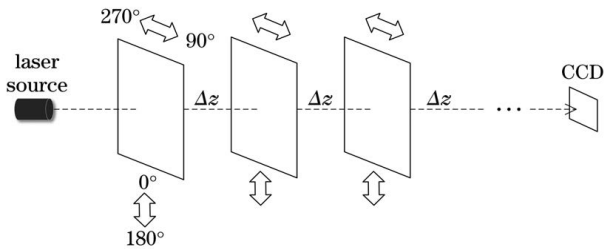


图 2 多层相位屏模拟横向风的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of simulating transverse wind with multilayer phase screens

下方生成若干行相位值,从而构成新相位屏。

3.1 生成动态相位屏的方法

假设相位屏是尺寸为 $N \times N$ 的方形屏,基于快速傅里叶变化 (FFT) 方法计算初始离散相位屏 $\varphi(p, q), 1 \leq p, q \leq N, p, q$ 分别为水平和垂直方向的位置。用矩阵 Z 存储 $\varphi(p, q)$ 的部分相位值,用矩阵 X 表示待生成的新相位值,将 Z 进行延伸,得到一行/列新的数据 X ,假设 X 和 Z 满足^[20,23-24]

$$X = AZ + B\beta, \quad (2)$$

式中, A 为预测矩阵, B 为残余标准差, β 为高斯随机数向量,其均值为 0、方差为 1。由于 Z 与 β 不相关,将(2)式两边同乘 Z^T 并对两端取均值,得到预测矩阵为

$$A = \langle XZ^T \rangle \langle ZZ^T \rangle^{-1}, \quad (3)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 为系综平均。由(2)式还可以得到 $XX^T = AZZ^T A^T + B\beta Z^T A^T + AZ\beta^T B^T + B\beta\beta^T B^T$, 由于 B 与 β 不相关,可以得到

$$BB^T = \langle XX^T \rangle - A \langle ZZ^T \rangle A^T, \quad (4)$$

由于 ZZ^T 为对称矩阵,其逆矩阵也是对称的,即 BB^T 可表示为

$$BB^T = \langle XX^T \rangle - A \langle ZZ^T \rangle \langle ZZ^T \rangle^{-1} \langle ZX^T \rangle = \langle XX^T \rangle - A \langle ZX^T \rangle, \quad (5)$$

式中, $\langle ZZ^T \rangle, \langle XX^T \rangle, \langle XZ^T \rangle, \langle ZX^T \rangle$ 分别为 X 和 Z 的相位协方差。

假设大气湍流遵循 von Karman 统计模型,波前的外尺度为 L_0 ,大气相干长度为 r_0 ,则相位结构函数 $D_\varphi(r)$ 可表示为

$$D_\varphi(r) = \left(\frac{L_0}{r_0}\right)^{5/3} \times \frac{2^{1/6} \Gamma(11/6)}{\pi^{8/3}} \left[\frac{24}{5} \Gamma\left(\frac{6}{5}\right)\right]^{5/6} \times \left[\frac{\Gamma(5/6)}{2^{1/6}} - \left(\frac{2\pi r}{L_0}\right)^{5/6} K_{5/6}\left(\frac{2\pi r}{L_0}\right)\right], \quad (6)$$

式中, $K_{5/6}(\cdot)$ 为第三类修正贝塞尔函数, $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数, r 为任意两点的间距, $D_\varphi(r) =$

$2[\sigma_\varphi^2 - C_\varphi(r)]$, 其中, σ_φ^2 为相位方差, $C_\varphi(r) = \langle \varphi(x)\varphi(x+r) \rangle$ 为相位协方差函数,也可以表示为

$$C_\varphi(r) = \left(\frac{L_0}{r_0}\right)^{5/3} \times \frac{\Gamma(11/6)}{2^{5/6} \pi^{8/3}} \left[\frac{24}{5} \Gamma\left(\frac{6}{5}\right)\right]^{5/6} \times \left(\frac{2\pi r}{L_0}\right)^{5/6} K_{5/6}\left(\frac{2\pi r}{L_0}\right). \quad (7)$$

假设 (p_i, q_i) 和 (p_j, q_j) 为任意两点的坐标,像素尺度为 P , 则 $r_{ij} = [(p_j - p_i)^2 + (q_j - q_i)^2]^{1/2} P$, $\langle ZZ^T \rangle, \langle XX^T \rangle, \langle XZ^T \rangle, \langle ZX^T \rangle$ 项可从 $C_\varphi(r_{ij})$ 中得到,由(3)式、(5)式得到矩阵 A, B , 由(2)式得到新相位值向量 X , 并将 X 加入已有相位值后构成新相位屏。

图 3 为某次模拟的动态相位屏,相位屏的尺寸

为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 。假设风向水平向左,根据风速、前后 2 帧图像的时间间隔和像素尺度,可以计算出相位矩阵右侧需要新增的列数 N_c , 生成 N_c 列新相位值后,将其加入原相位矩阵并去除原矩阵左侧 N_c 列相位值,最终构成尺寸为 $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$ 的新相位矩阵。在移动相位屏的过程中,若相位屏的移动格点不是整数,需要存储其余数,随

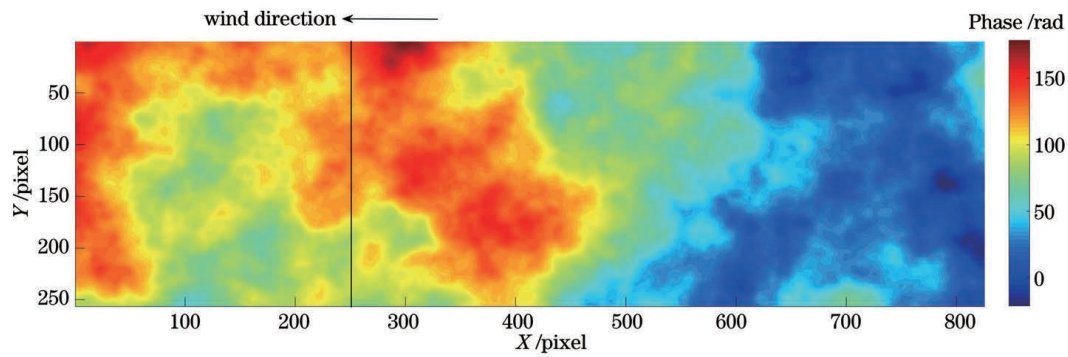


图 3 模拟的动态相位屏

Fig. 3 Dynamic phase screen obtained by simulation

着时间的累积,当余数满足大于 1 的条件时,则移动一次相位屏,同时再次存储新的余数,在下次满足余数大于 1 时重复该步骤。

3.2 仿真结果分析

仿真参数:激光波长为 650 nm,大气相干长度 $r_0=0.1$ m,外尺度 $L_0=50$ m,束腰半径 $\omega_0=0.2$ m,接收面的尺寸为 1 m×1 m,相位屏间距 $\Delta z=100$ m,传输距离 $L=1000$ m。设置了 10 层相位屏,初始相位屏的尺寸为 1 m×1 m (256 pixel×256 pixel)。由于大气湍流中光传输的随机性,需要仿真多组光斑图像后得到统计平均结果。每 2 帧图像的时间间隔为 1 ms,每组模拟 1000 帧连续光斑,利用整像素搜索算法计算每组光斑图像中前后 2 帧图像水平和垂直方向的阴影平均位移,再取均值作为阴影的平均风速(平均风速为传输路径上所有相位屏移速的矢量平均)下的阴影位移值,每层相位屏的位置和移动方向(角度)规则如图 4 所示。

首先,考虑到路径横向风分布均匀的理想情况,设置每层相位屏的移动方向均为 90° 、速度及大小也相同。计算得到水平方向上阴影移速 u 与平均

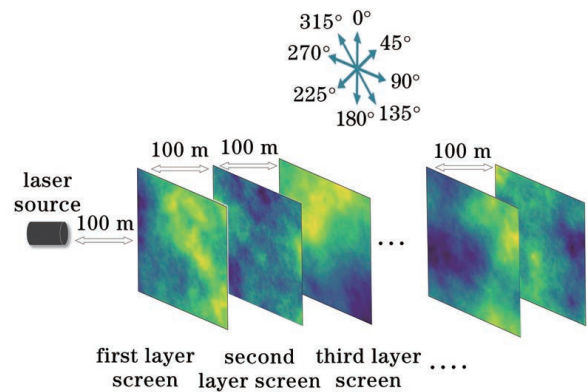


图 4 相位屏的位置和移动方向

Fig. 4 Position and moving direction of phase screens

横向风速 V_{wind} 的关系如图 5(a)所示,拟合得到 $u = 0.995V_{wind} + 0.011$ 。其中,斜率的标准误差为 4.389×10^{-4} ,截距的标准误差为 0.002,水平方向上的阴影移速 u 与平均横向风速 V_{wind} 呈近似 1:1 的线性关系,可认为路径上的横向风使大气湍流结构发生了连续的定向移动。此外,增大水平方向的横向风速后,垂直方向的阴影移速 v 不受影响(均值为 0.009 m/s、标准差为 0.004 m/s),可以认为 v

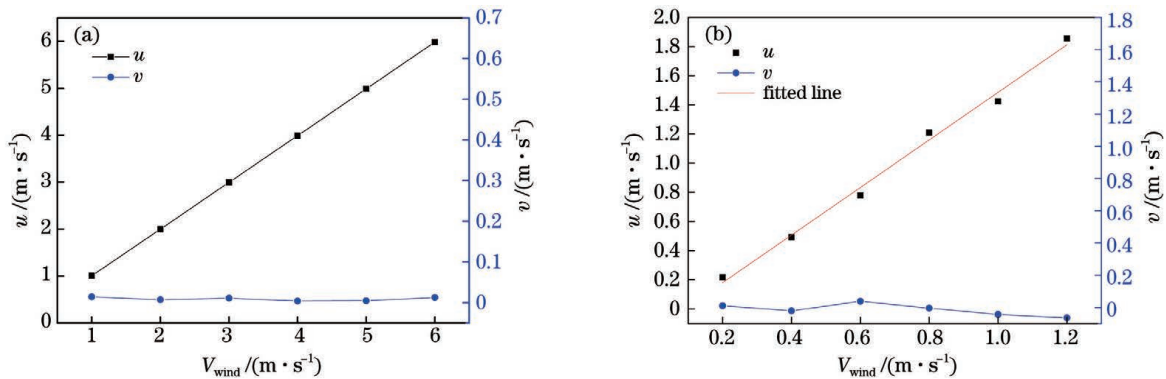


图 5 阴影的移动速度与横向风速的关系。(a)相位屏移动的方向相同;(b)相位屏移动的方向不同

Fig. 5 Relationship between the moving speed of the shadow and the transverse wind speed. (a) Moving direction of the phase screen is the same; (b) moving direction of the phase screen is different

的误差为算法带来的误差,水平方向的横向风不影响垂直方向的阴影位移。但实际情况下路径的横向风分布并不均匀,因此,将 1~10 层相位屏的移动方向依次设置为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 90^\circ, 90^\circ$, 移动速度均相同,得到 u 和 V_{wind} 的拟合曲线如图 5(b) 所示。拟合得到 $u = 1.631V_{\text{wind}} - 0.146$, 斜率和截距的标准误差分别为 0.067、0.052, 均大于图 5(a) 的拟合标准误差。这表明虽然路径上不同方向的横向风会引入拟合误差,但阴影移速和平均横向风速依然呈线性关系;此外,垂直方向上 v 的均值为 -0.014 m/s , 标准差为 0.034 m/s , 其离散程度比图 5(a) 高, 这表明路径上横向风的不均匀分布会增大算法带来的误差。

考虑到路径上不同位置横向风对激光阴影移动速度的影响,设置距离激光光源由近到远 9 层相位屏的移动方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ, 90^\circ$, 移动速度均为 0.1 m/s , 将剩余 1 层

相位屏分别放置在距离光源 z 为 $100 \sim 900 \text{ m}$ 处, 步长为 100 m (图中的数据以步长为 200 m 绘制), 移动方向为 90° , 移动速度 V_{screen} 为 $1 \sim 10 \text{ m/s}$, 平均横向风速 $V_{\text{wind}} = (0.1 + V_{\text{screen}}) / 10$, 仿真得到局部横向风对阴影移动速度的影响如图 6 所示。由图 6(a) 可以发现, 单层相位屏的水平移动速度 $V_{\text{screen}} \leq 4 \text{ m/s}$ 时, u 与 V_{wind} 依然呈线性关系; 当 $V_{\text{screen}} > 4 \text{ m/s}$ 时, 两者之间的线性关系逐渐消失, 原因是局部风速的增加导致相位屏移动格的点数增加, 前后 2 帧相位屏之间的空间相关性不断减小甚至完全不相关, 进而导致图像中阴影位移的计算精度越来越低。由图 6(b) 可以发现, 接近发射端的横向风速引起的阴影移速大于平均风速, 而接近靶面的横向风速引起的阴影移速小于平均风速, 这表明激光阴影具有路径权重, 与文献[25]中“漂移效应对发射端附近的湍流最敏感, 越靠近接收端, 湍流对漂移效应的影响越小”的结论类似。

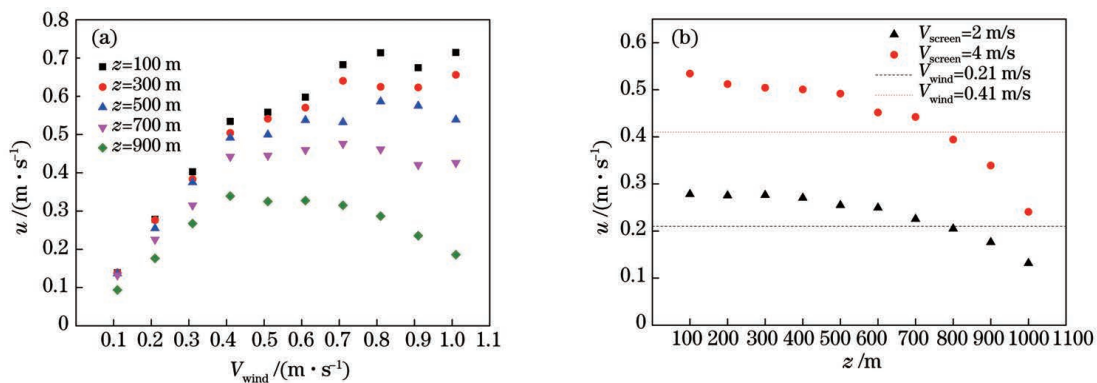


图 6 局部横向风对阴影移动速度的影响。(a) 阴影移动速度与路径平均横向风速的关系; (b) 阴影移动速度与局部横向风位置的关系

Fig. 6 Influence of local transverse wind on the speed of shadow movement. (a) Relationship between the moving speed of shadow and the average transverse wind speed of path; (b) relationship between the moving speed of shadow and the position of local transverse wind

上述仿真结果表明,在传输路径横向风分布均匀的情况下,激光阴影的移动速度可直接反映流场的横向移动速度;如果路径上存在不一致的风向,则会引入拟合误差,但阴影的移动速度与平均风速仍然维持线性关系。此外,接近发射端的横向风速对阴影移动速度的影响大于路径的平均风速,而接近靶面的横向风速对阴影移动速度的影响小于路径的平均风速,这表明激光阴影具有路径权重;阴影图像空间相关性的减小会增大计算结果的误差,且图像的采样频率对计算阴影位移的影响也很大。

3.3 采样频率对计算结果的影响

为了分析采样频率对激光阴影移动速度计

算结果的影响,图 7(a) 模拟了横向风分布均匀时,在不同的采样频率下,水平方向上阴影移动速度与平均横向风速的关系。可以发现,在一定的采样频率下,一旦风速超过某个固定值,计算结果就会出现错误;且采样频率越高,可分辨的风速就越大。图 7(b) 为不同采样频率 F_s 下可分辨的最大风速 V_{maxwind} , 拟合得到 $F_s = 32V_{\text{maxwind}}$ 。如果在风向风速分布极不均匀的情况下, 1000 Hz 的采样频率可分辨的局部最大风速仅为 4 m/s , 因此开展大气湍流激光成像探测实验时需尽可能提高采样频率。

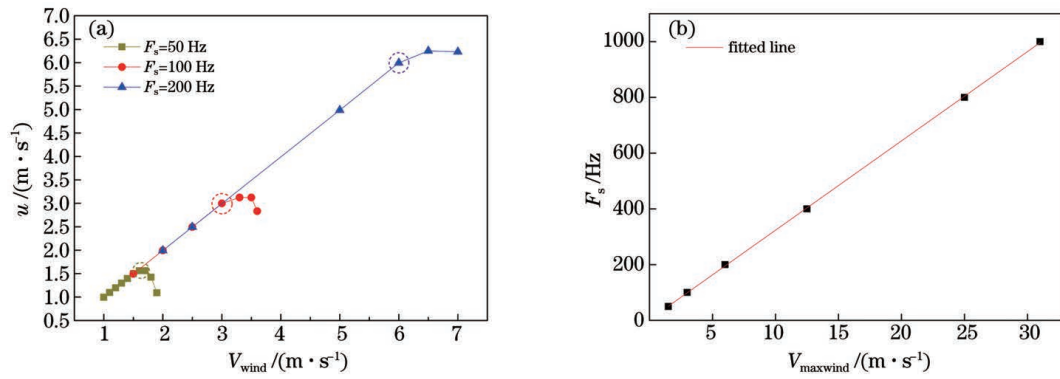


图 7 采样频率对阴影移动速度计算结果的影响。(a)不同采样频率下水平移动速度与风速的关系;(b)不同采样频率可分辨的最大风速

Fig. 7 Influence of sampling frequency on the calculation result of shadow movement speed. (a) Relationship between horizontal movement speed and wind speed at different sampling frequencies; (b) maximum wind speed that can be distinguished at different sampling frequencies

4 实验验证

通过仿真分析论证了在横向风均匀和非均匀分布情况下,激光阴影法和互相关算法探测二维风矢量的可行性,同时对采样频率提出了相应的要求。为了确认仿真分析的结论能得到实验的支持,还需开展激光成像探测实验。在真实的大气中,1000 m 路径上横向风的分布往往是不均匀的,而探测路径上的横向风场比较困难。虽然测风雷达可获得路径上的风速分布,但其测量的是径向风而不是横向风^[26]。因此,将 1000 m 的传输路径均分为 10 段(每段对应 1 层相位屏),在 100 m 的尺度上进行实验验证。此时,可将传感器的单点探测数据作为路径上的平均风速信息,对其进行正交分解后可得到横向风速。最后,将激光阴影水平的移动速度和实测横向的移动速度进行拟合,得到两者之间的定量关系。

4.1 实验系统

实验系统主要由波长为 650 nm 的激光器、3M 微晶棱镜阵列反光膜、长焦镜头(适马 150–600 mm s 版)、ASI 290MM 黑白 CCD 相机、滤光片(去除背景噪音)组成,在 2020 年 7 月 7 日下午 6 时(弱湍流)进行了距离为 100 m 的激光成像实验。实验场景如图 8 所示,设备架设高度约为 1 m,传输路径下垫面为柏油马路,道路两侧的绿植均匀分布,利用 Vaisala WXT520 气象传感器以 3 s 的采样频率记录传输路径中高 1 m 处的风速、风向、温度、压强等信息。靶面的实际尺寸为 1 m × 1 m,CCD 的数据格式为 8 bit 灰度图像,像素尺度约为 1830 pixel/m,曝光时间为 12 ms,采样频率为 338 Hz,选取靶面中

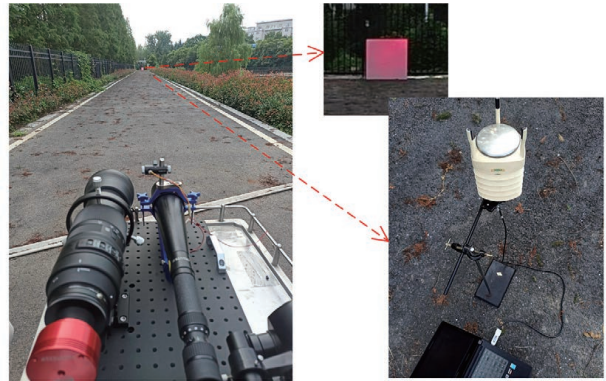


图 8 实验场景

Fig. 8 Experiment scene

间尺寸为 548 pixel × 548 pixel 的区域进行处理分析。

实验时需调整光源方向使其照亮整个靶面,利用长焦镜头和 CCD 相机拍摄 3M 反光膜上的激光散斑图像。根据阴影区域的尺寸,选取的查询窗口尺寸为 170 pixel × 170 pixel,搜索窗口尺寸为 200 pixel × 200 pixel。此外,计算光斑图像的阴影移动速度时,需要剔除边界的异常值。

4.2 实验结果及分析

通过 CCD 相机记录激光阴影图像,图 9 为连续 3 帧激光散斑图像(时间间隔约为 3 ms)。可以发现,图像中存在连续波动的阴影,类似于湖面上不断前进的水波纹。由于实验用 3M 反光膜接收光场,在利用整像素搜索算法计算连续波动的阴影时,散斑图像中的亮点会对阴影的计算产生严重影响,为了更好地区分这种连续的阴影变化与亮点闪烁,将前后 2 帧图像相减后得到阴影图像。

测试期间的平均温度为 30.6 °C,湿度为 57.68%,压强为 1001.3 hPa,计算得到靶面内激

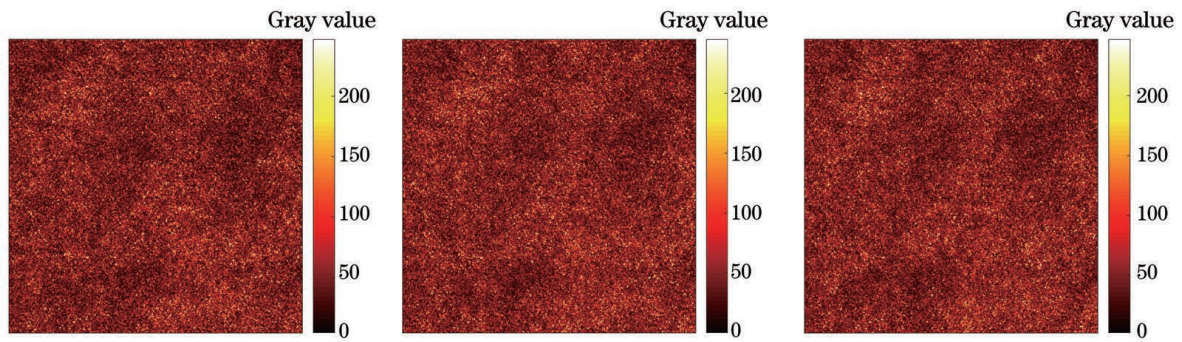


图 9 连续 3 帧激光散斑图像

Fig. 9 Consecutive 3 frames of laser spot images

光阴影移动速度与平均横向风速之间的关系如图 10(a)所示。拟合得到水平阴影移动速度 u 与横向风 V_{wind} 的关系为 $u = 1.088V_{wind} - 0.301$, 斜率与截距的标准误差分别为 0.094 和 0.118, 斜率值接近模拟横向风均匀分布情况下的 0.995; 拟合的数值阴影移动速度 v 与横向风 V_{wind} 无关, 这与数值仿真的结论也是相同的。 v 的值均大于 0, 表明此时

的气流具有上升趋势。图 10(b)为由 u 拟合的横向风速值 V_{fitted} 与实测值 V_{actual} , 可以发现, 拟合值与实测值有较好的一致性, 其相关系数 r 可达到 0.949。这表明拟合公式可以在相同的实验条件下, 利用激光阴影图像得到水平和垂直地面方向的路径平均横向风速, 但实际上依靠单个风速传感器无法获得垂直地面方向的横向风速。

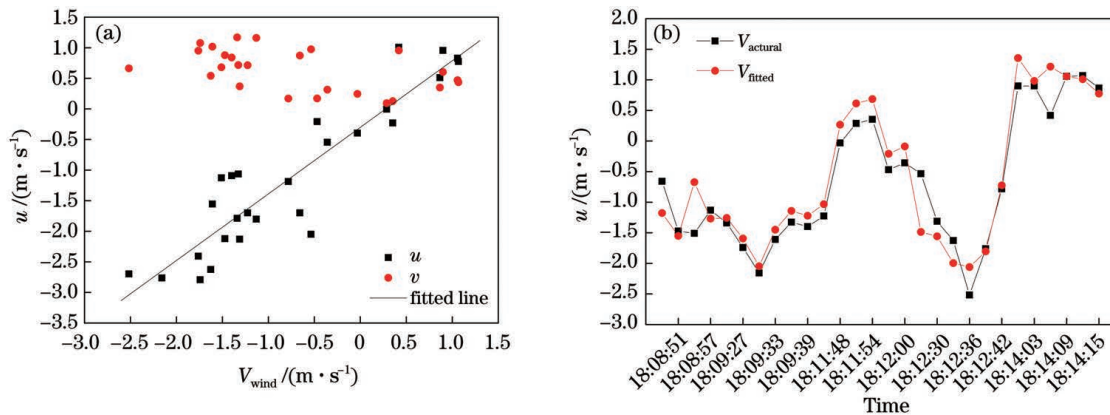


图 10 实验结果。(a)阴影的移动速度与实测风速的关系;(b)拟合风速与实测风速的对比

Fig. 10 Experimental results. (a) Relationship between the moving speed of shadow and the measured wind speed; (b) comparison between the fitted wind speed and the measured wind speed

实测实验的主要误差来源是实验中假设路径上的横向风分布均匀, 将单点探测风速作为整个光路上的平均风速。对比图 10(a)与图 5(a)可以发现, 实际测量中数据点的离散程度比仿真时大得多。仿真分析结果表明, 路径上不同方向的横向风会引入拟合误差, 且不同位置的横向风影响激光阴影移动的权重也不同, 这表明图 10(a)中的数据点离散分布就是路径上部分横向风的风向、风速不同导致的。此外, 实测误差还源于图像数据的预处理和阴影位移算法。相比图 5 中可被视为算法误差的 v , 实测误差还会偏大一些, 可利用采样频率更高的相机及改进算法减少这类误差。

影响, 将查询、搜索窗口的尺寸分别设置为 $70 \text{ pixel} \times 70 \text{ pixel}$ 和 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$, 计算了实验数据中连续 3 帧光斑阴影的位移矢量图, 结果如图 11 所示。可以发现, 激光阴影的位移矢量变化具有一定的时间连续性。从图中的虚线圈可以发现

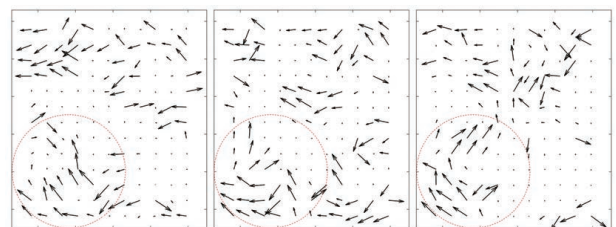


图 11 阴影图像的位移矢量图

Fig. 11 Displacement vector diagram of the shadow image

为了更好地观察横向风场对小尺度湍流结构的

路径上较小尺度内大气涡流发展和演化的动态过程。

5 结 论

主要研究了湍流激光传输路径上的横向风对激光阴影位移的影响,介绍了计算阴影位移的整像素搜索算法和模拟横向风的动态相位屏仿真方法,探寻了激光阴影法探测大气湍流中二维风矢量的可行性。仿真结果表明,在横向风均匀的理想情况下,激光阴影的移动速度与横向风速呈近似 1:1 的线性关系,此时阴影的移动速度能直接反映大气流场的横向移动速度;当部分路段的风向与主风向不一致时会引入少许误差,但阴影的移动速度与平均风速之间仍然维持线性关系。在非均匀路径分布情况下,接近发射端的横向风速对阴影移动速度的影响大于路径的平均风速,而接近靶面的横向风速对阴影移动速度的影响小于路径的平均风速,这表明激光阴影具有路径权重。100 m 均匀路径上的成像探测实验结果表明,实测风速与基于阴影位移拟合风速的相关系数达到 0.949,证实了利用激光阴影法获得二维风矢量在实际测量中的可行性。但计算时假设路径上的横向风分布均匀,用单点探测数据作为平均风速会产生实验误差,且相机的采样频率需要达到 1000 Hz 以上。

采用激光阴影法观测风矢量可以定量展现激光传输路径上大气涡流的发展和演化,呈现出大气湍流中二维风矢量的运动图像,这是传统手段如超声风速计和激光测风雷达不易获取的。同时,横向风与激光大气传输的热晕效应密切相关,近地面垂直方向的风速变化与地表热通量有关,这些都可以作为潜在的应用方向继续研究。

参 考 文 献

- [1] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE, 2005.
- [2] Strohbehm J W. Laser beam propagation in the atmosphere[M]. Heidelberg: Springer, 1978.
- [3] Wen L Y. Multivariable adaptive disturbance rejection methods and aircraft turbulence compensation techniques [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
文利燕. 多变量的自适应扰动抑制方法及飞行器的湍流补偿技术[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [4] Cao M H, Wu X, Wang H Q, et al. Performance of faster-than-Nyquist optical communication system under Gamma-Gamma atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0906003.
曹明华, 武鑫, 王惠琴, 等. Gamma-Gamma 大气湍流下超奈奎斯特光通信系统性能 [J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0906003.
- [5] Chen M, Ke X Z. Effect of atmospheric turbulence on the performance of laser communication system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8): 0822009.
陈牧, 柯熙政. 大气湍流对激光通信系统性能的影响研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0822009.
- [6] Chen D, Lu M M, Liu Y R. Effect of pointing error on adaptive subcarrier modulation performance in turbulent channel [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(22): 2206004.
陈丹, 鲁萌萌, 刘艳蓉. 湍流信道下指向误差对自适应副载波调制性能的影响 [J]. 光学学报, 2020, 40(22): 2206004.
- [7] Yan J W, Yong K L, Tang S F, et al. Comparison of propagation characteristics between super Gaussian and Gaussian vortex beams in air [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0201002.
闫家伟, 雍康乐, 唐善发, 等. 大气中超高斯和高斯涡旋光束传输特性比较 [J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0201002.
- [8] Wang H X, Song B, Wu X J, et al. Experimental analysis of beam wander and beam spreading under different surfaces [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080101.
王红星, 宋博, 吴晓军, 等. 不同下垫面下光束漂移和光斑扩展的实验研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080101.
- [9] Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Beijing: Science Press, 2012.
饶瑞中. 现代大气光学 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [10] Li Z H, Li X Y. Performance of predictive correction for adaptive optics systems with frozen flow turbulence [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(3): 548-555.
李正汉, 李新阳. 冻结大气湍流下自适应光学系统的预测校正性能 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(3): 548-555.
- [11] Rienitz J. Schlieren experiment 300 years ago [J]. Nature, 1975, 254(5498): 293-295.
- [12] Edgerton H E. Shock wave photography of large subjects in daylight [J]. Review of Scientific Instruments, 1958, 29(2): 171-172.
- [13] Zou N. Supersonic nozzle design and its investigation with numerical and experimental methods [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

- 邹宁. 超声速喷管设计及其数值模拟和实验研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [14] Ma Y P. Experimental study on diesel spray and combustion characteristics under low temperature condition[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- 马玉坡. 低温环境下柴油喷雾与燃烧特性试验研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [15] Mei H P, Wu X Q, Rao R Z. Research on technique of fold pass laser imaging and detection for atmospheric optical turbulence[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2018, 13(6): 417-424.
- 梅海平, 吴晓庆, 饶瑞中. 折返路径光学湍流激光成像探测技术研究[J]. 大气与环境光学学报, 2018, 13(6): 417-424.
- [16] Mei H P, Ye H, Kang L, et al. Principle and feasibility of using a 3M reflective film based fold pass laser speckle imaging system for measuring atmospheric optical turbulence[J]. OSA Continuum, 2019, 2(6): 1938-1952.
- [17] Jiang G N. A study on real-time PIV image processing technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- 姜冠楠. PIV图像实时处理技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [18] Xu Y Y, Gao Z, Hu P. Application of whole pixel search algorithm in optical measurement [J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(18): 113-115.
- 徐于洋, 高卓, 胡鹏. 整像素搜索算法在光学测量中的应用[J]. 机电信息, 2019(18): 113-115.
- [19] He W G. Simulation study on laser propagation through the atmosphere in optoelectronic countermeasures [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2012.
- 何武光. 光电对抗中的激光大气传输仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [20] Xiang J S, Zhang X L, Zhang M M, et al. Generation of infinitely long turbulence phase screen [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1071-1075.
- 向劲松, 张孝雷, 张苗苗, 等. 无限长湍流相位屏产生方法[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1071-1075.
- [21] Townson M J, Farley O J D, de Xivry G O, et al. AOTools: a Python package for adaptive optics modelling and analysis[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31316-31329.
- [22] Dios F, Reclons J, Rodríguez A, et al. Temporal analysis of laser beam propagation in the atmosphere using computer-generated long phase screens [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 2206-2220.
- [23] Assémat F, Wilson R W, Gendron E. Method for simulating infinitely long and non stationary phase screens with optimized memory storage[J]. Optics Express, 2006, 14(3): 988-999.
- [24] Wu H L, Yan H X, Li X Y, et al. Generation of rectangular turbulence phase screens based on fractal characteristics of distorted wavefront[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 114-119.
- 吴晗玲, 严海星, 李新阳, 等. 基于畸变相位波前分形特征产生矩形湍流相屏[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 114-119.
- [25] Ma X S, Zhu W Y, Rao R Z. Large aperture laser scintillometer for measuring the refractive index structure constant of atmospheric turbulence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 898-902.
- 马晓珊, 朱文越, 饶瑞中. 测量大气折射率结构常数的大口径激光闪烁仪[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 898-902.
- [26] Hu S S, Liu J Q, Diao W F, et al. Wind profile inversion based on airborne Doppler wind lidar [J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(1): 96-101.
- 胡申森, 刘继桥, 刁伟峰, 等. 机载多普勒激光测风雷达风场反演研究[J]. 气象科学, 2016, 36(1): 96-101.

Feasibility of Laser Shadow Method to Detect Two-Dimensional Wind Vector in Atmospheric Turbulence

Shen Liuqing^{1,2,4}, Mei Haiping^{2,4*}, Ren Yichong^{2,4}, Zhang Junxin^{2,3,4}

¹*Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;*

²*Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;*

³*Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;*

⁴*Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei, Anhui 230037, China*

Abstract

Objective Atmospheric turbulence is a key research topic in the field of atmospheric and environmental science. It greatly influences the development of aerospace, aircraft safety control, and laser communication. Random fluctuations in the refractive index of the atmosphere along the laser propagation path cause a series of transmission effects. Therefore, a laser beam projected onto a large area microcrystalline reflective film appears as irregular dynamic speckles in the far-field plane. In addition, there are constant directional moving shadows in the laser speckle images, which are caused by the path integral effect of transverse wind. Theoretically, two-dimensional (2D) laser shadow images can be used to detect the path transverse averaged wind velocity. However, due to the deformation of laser shadows and uneven transverse wind distribution, it is uncertain whether the moving velocity of laser shadows calculated using a cross-correlation algorithm can accurately reflect the moving velocity of the flow field and how the sampling frequency of images affects the calculation results. To address these problems, a new method for simulating transverse wind in atmospheric turbulence based on the dynamic phase screen theory is developed for quantitative simulation analysis. In addition, simulation results are substantially verified by experiments. We hope that our study will be helpful in the remote sensing detection of wind and other engineering applications.

Methods A complete pixel search algorithm based on normalized cross-correlation is used to calculate the displacement of laser shadows. First, the transverse wind along the laser propagation path is simulated by moving infinitely long and nonstationary phase screens. Images of lasers transmitted through the atmosphere are obtained for uniform and nonuniform transverse wind distributions. Then, the relationships between the velocity of laser shadows and wind speed are analyzed separately when the wind flow field is distributed differently. In addition, the appropriate sampling frame rates of different wind speeds are calculated. Next, a laser propagation experiment on the horizontal path is conducted, and real-time laser shadow images are taken. Finally, the calculated displacement of laser shadow images and transverse wind speed obtained using an ultrasonic anemometer are fitted to obtain their quantitative relationship. The path transverse wind velocity can be calculated directly from laser shadow images using this relation.

Results and Discussions Simulation results show that there is a linear relationship between the moving speed of laser shadows and path transverse wind speed when the distribution is uniform. Although the path transverse wind blowing from different directions introduces errors, this linear relationship still exists (Fig. 5). The shadow displacement caused by the transverse wind near the emission end is greater than the average wind speed; whereas, it is less than the average wind speed near the receiving end, that is, the influence of transverse wind on shadow displacement has a different path weight (Fig. 6). In addition, the sampling frequency of the image has a great influence on the calculation results of shadow displacement. (Fig. 7). Finally, experimental results show that the correlation coefficient between the measured and fitted wind speeds based on shadow displacement reaches 0.949, demonstrating that 2D wind vector can be obtained using laser shadow images in actual measurements. (Fig. 10).

Conclusions Simulation analysis shows that when the path transverse wind is uniformly distributed, the movement speed of laser shadows and transverse wind speed have an approximately 1 : 1 linear relationship, which means that the moving velocity of laser shadows accurately reflects the moving velocity of the flow field. If the path transverse wind is in an inconsistent direction, some fitting errors are introduced, but the linear relationship between the shadow movement speed and average transverse wind speed is maintained. Moreover, the influence of path

transverse wind at different positions on the shadow displacement is slightly different, causing the proportionality coefficient not to be 1. In addition, the minimum sampling frequency of CCD is estimated to ensure sufficient spatial correlation between continuous images and the accurate calculation of laser shadow displacement. Laser propagation experimental results demonstrate that 2D wind vector can be obtained using laser shadow images in actual measurements. We can quantitatively observe the motion of a 2D field and the evolution of an atmospheric vortex on a laser propagation path using laser shadow images, which is difficult to obtain using traditional methods, such as ultrasonic anemometers and wind lidar. In addition, the transverse wind is closely related to the effect of laser atmospheric transmission heat halo, and the change in wind speed in the vertical direction near the ground is related to the surface heat flow, which can be studied as a potential application direction.

Key words atmospheric optics; laser propagation through atmosphere; atmospheric turbulence; transverse wind; shadow method

OCIS codes 010.3310; 010.1330; 110.0115