

湍流大气中折返路径激光成像探测实验

王钰茹^{1,2}, 梅海平¹, 康丽¹, 武鹏飞¹, 崔朝龙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光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘要 采用红光激光器、3M 微晶棱镜阵列反光膜和长焦高速 CCD(电荷耦合器件)构建的折返路径激光成像探测系统,进行典型天气条件下湍流大气中 1 km 传输路径上的激光光斑回波成像探测实验,并配备激光闪烁仪和大气相干长度仪实时监测湍流参数。对激光光斑图像的强度进行了统计分析,获得了不同位置、不同光斑孔径范围内的闪烁指数和光强起伏的空间相关系数,并尝试拟合得出了光斑中心点理想的点闪烁指数。将依据该闪烁指数推算出的湍流折射率结构常数与实时监测数据进行对比分析,结果表明:利用该方法所得的湍流折射率结构常数与激光闪烁仪实测值在变化趋势上具有良好的一致性,并且折返路径激光成像探测方法容易确保傍轴近似条件,理论上更符合实际。该系统不仅可用于观测受大气湍流影响的完整的远场激光光斑,通过定量化理论建模,还有望发展成为一种单端的大气光学湍流参数成像探测新技术。

关键词 大气光学; 折返路径激光传输; 闪烁指数; 微晶棱镜阵列; 大气湍流; 折射率结构常数

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401008

Experimental Investigation on Retro-Reflective Laser Imaging in Turbulent Atmosphere

Wang Yuru^{1,2}, Mei Haiping¹, Kang Li¹, Wu Pengfei¹, Cui Chaolong¹

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

²Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Laser spot echo imaging detection experiment is carried out on a 1 km transmission path in turbulent atmosphere under typical weather conditions using a red laser, a 3M microcrystalline prism array reflector, and a telephoto high speed CCD. Scintilloscope and atmospheric coherence meter are used for real-time monitoring of turbulence parameters. Intensity of the laser spot image is statistically analyzed. Spatial correlation coefficients of the scintillation index and the light intensity fluctuation in different positions and different aperture ranges are obtained, and the ideal point scintillation index of the center point of the spot is obtained with the fitting method. The turbulent refractive index structure constant calculated by scintillation index is compared with the real-time monitoring data, and the results show that the turbulent refractive index structure constant obtained by this method is in good agreement with the measured value of the laser scintillator. The laser imaging detection method of the reentry path can easily ensure the paraxial approximation conditions, which is theoretically more realistic. This system can be used not only to observe the complete far-field laser spot affected by atmospheric turbulence, but also to develop a new detection technology of single-ended atmospheric optical turbulence parameter imaging through quantitative modeling.

Key words atmospheric optics; retro-reflective laser transmission; scintillation index; microcrystalline prism array; atmospheric turbulence; refractive index structure constant

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1330

收稿日期: 2017-09-04; 收到修改稿日期: 2017-11-03

作者简介: 王钰茹(1993—),女,硕士研究生,主要从事大气激光传输方面的研究。E-mail: wangyuru@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 梅海平(1980—),男,博士,副研究员,主要从事大气激光传输与湍流特性方面的研究。

E-mail: hpmei@aiofm.ac(通信联系人)

1 引言

光波在大气中传输时,大气湍流使折射率产生随机变化,导致光强起伏、光斑扩展和光束漂移等效应的产生,从而影响了大气激光通信、天文观测和光学遥感等光电系统的性能^[1-4]。因此,了解和掌握以光学湍流强度的时空分布以及以特征尺度为表征的空间结构特征,并获得对光波大气传输湍流效应的定性和定量描述非常有必要。为此,研究人员研究了多种光学湍流探测方法及设备,包括激光闪烁仪、大气相干长度仪、Shack-Hartmann 波前传感器、温度脉动仪和光纤湍流测量系统等^[5-9]。前三者可用于获取光学湍流的特征参数以及反映受湍流影响的激光光斑局部区域的光强或波前相位变化,后两者仅用于测量光学湍流的特征参数。但这些设备均不能用于湍流的可视化或展现湍流涡旋运动的精细结构,也无法给出受湍流影响的激光光斑的整体形貌。

相关研究表明,在风洞或高超音速飞行器验证实验中,通常利用纹影或阴影技术进行空间流场或冲击波的显示^[10]。该技术采用自然光、灯光或激光光源照射流场,用 CCD 成像系统进行光斑数据采集,通过分析投影光斑或背景纹理的变化来显示或定量探测光传播路径上的流场空间结构。Settles 等^[11-12]对纹影和阴影技术的原理、系统结构及其应用背景和前景进行了系统性总结,并阐述了一种在流场和冲击波波形显示中已取得成功应用的折返路径阴影技术。该技术以 3M 公司生产的微晶棱镜阵列反光膜为合作目标,其反光效率优于高品质的漫反射板数百倍,并且绝大部分反射光沿原路返回到光源端,便于将光源和光探测器集成于一体,实现单端探测。

本文提出一种由激光光源、3M 反射膜和高性能数字 CCD 成像系统构成的折返路径光学湍流激光成像探测系统,该系统能够实时记录经大气湍流作用后返回的完整的远场激光光斑图像。由于大气湍流对光波的影响直接体现在远场光斑上,光斑形态及光强变化、光斑重心的漂移等现象中均包含着丰富的湍流信息,所以利用远场光斑图像,有望在大气光学湍流空间结构的显示及定量化探测中发挥重要作用。

要从折返路径光斑图像中定量地提取光学湍流的有效信息,首先必须解决折返路径光传输模型问题。对于该问题,已有多位学者进行了较深入的研究。Andrews 等^[13-14]考虑大气湍流内、外尺度的影响,分析了高斯光束被有限尺寸平面镜或角反射器反射回波的互相干函数和后向闪烁增强效应;张逸

新^[15]推导出了束状反射回波的到达角起伏表达式,讨论了准直光束入射不同反射器后回波的到达角起伏情况;韦宏艳等^[16]研究了漫射目标的激光波束散射问题,推导出了激光经双斜程传输至接收机处的互相关函数等统计量;王利国等^[17]通过数值模拟,分析了湍流大气中经过几种反射器的高斯波束和高斯-谢尔波束双程传输过程,并对模拟光斑的相干长度和闪烁指数进行了统计计算;柯熙政等^[18]通过理论推导,得出了双程平均光强公式,并数值分析了部分相干光通过角反射器的回波光强特性。

上述研究表明,折返路径光传输效应不仅依赖于反射体的类型,还区别于单程传输的闪烁增强效应和双程传输的折叠效应,其理论模型较为复杂。3M 反光膜与点散射体、漫反射面以及角反射器均有明显的特征差异,目前尚不明确哪些模型适用于描述其对湍流大气中的激光束折返传输过程。本文首先通过建立基于 3M 反光膜的湍流成像探测系统,实验获取 1 km 折返路径上光斑图像的基本特征,包括光斑基本形态、基于像元灰度值的闪烁指数及其空间相关性等;然后通过对比分析基于图像灰度值估算的湍流折射率结构常数与激光闪烁仪或大气相干长度仪实测的折射率结构常数之间的异同,为后续针对该系统详细的理论建模、数值仿真分析和应用潜力的开发提供实验依据。

2 折返路径激光大气传输实验

为了获取折返路径激光大气传输光斑图像并分析光斑特性与湍流状态的对应关系,配置了如图 1 所示的激光成像探测实验系统,包括激光光源、CCD 成像系统以及用于监测湍流状态的激光闪烁仪和大气相干长度仪。系统中各主要部件的参数如表 1 所示。

表 1 激光成像探测系统的主要参数

Table 1 Main parameters of laser imaging detection system

Component	Parameter	Value
Laser source	Wavelength /nm	671
	Output power /mW	20
	Energy stability /%	<1
	Spot diameter /mm	3
	Divergence angle /mrad	<1.5
Telescope	Aperture diameter /m	0.35
	Focus length /m	3.55
CCD camera	Frame frequency / (frame·s ⁻¹)	1000
	Filter bandwidth /nm	10
	Resolution /pixel×pixel	1080×1920
	Depth of color /bit	12
	Size of pixel /μm×μm	8×8

激光器和 CCD 成像系统位于实验室 3 楼靠窗的光学平台上, 距离户外地面高度约 12 m; 尺寸为 1.2 m×1.2 m 的反光膜张贴在距离实验室 1 km 靶点处的铝板上作为合作目标。在激光传输路径上, 靠近发射端的下垫面为陆地, 靠近反射端的下垫面为宽阔的水面。激光从发射端出发, 经 1 km 大气湍流路径后照射到反射膜上, 呈现出含光强起伏和光斑破碎效应的光斑。激光束的全角发散角小于 1.5 mrad, 调节激光光轴使其与反光膜的中心重合, 则大部分激光光斑都能落在反射膜上。激光光斑经反射后, 在反射膜的散斑效应下, 其相干性已大大降低, 因此该成像系

统得到激光回波图像的过程应理解为非相干图像经远程传输后在接收端成像的过程。该实验同时采用经典的湍流测量设备, 即激光闪烁仪(型号 BLS450, 口径 $\Phi=140$ mm, 大气折射率结构常数 C_n^2 的测量精度为 $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^{-2/3}$) 和大气相干长度仪(型号 ATCM-Meade, 口径 $\Phi=350$ mm, 子口径 $\Phi=126$ mm, 相干长度 r_0 在 550 nm 波长处的测量极限为 30 cm, 误差小于 15%), 来实时监测激光传输路径上的湍流状态, 并将闪烁仪的光源放置在激光器位置处, 将相干长度仪的光源放置在靶点处, 使测量原理与光波传输机理相一致。

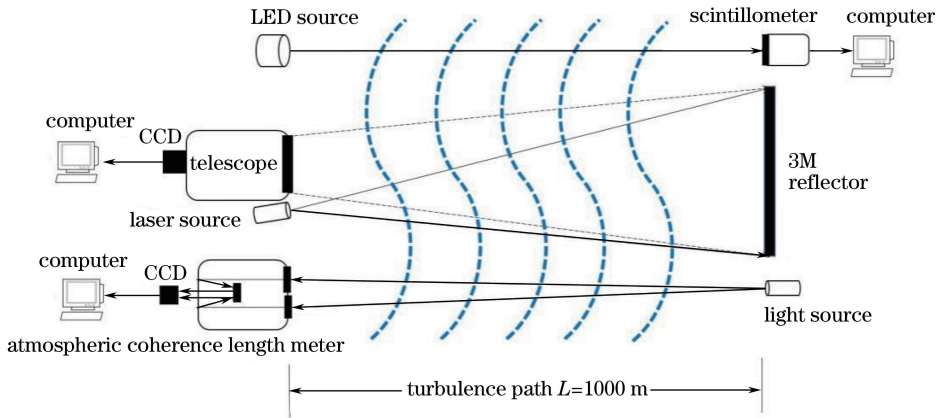


图 1 激光成像探测实验系统示意图

Fig. 1 Diagram of experimental system of laser imaging detection

3M 微晶棱镜阵列反光膜广泛应用于制作高速公路路标、交通警示牌和广告牌等, 具有反光效率高、均匀性好、重量轻和易于拼接成大反射面等特点。采用的红色反光膜与 671 nm 的红光激光器相匹配, 配合带宽为 10 nm 的滤光片以抑制背景光对

激光光斑图像采集的影响。通过数字显微镜, 在不同的放大倍率下观察反光膜的细节, 如图 2 所示。测量结果表明棱镜的间距约为 $0.1 \text{ mm} \times 0.18 \text{ mm}$ 。该反光膜背面涂有胶黏剂, 可以张贴在任意平整干净

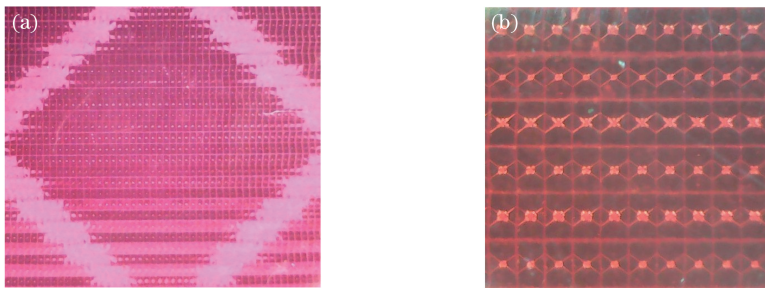


图 2 3M 反光膜的(a)纹理及(b)微晶棱镜的形状

Fig. 2 (a) Texture and (b) microcrystalline prism shape of 3M reflective film

实验数据的采集时间为 2017-07-18 14:30 至 2017-07-19 14:30, 为典型的晴天(气象能见度普遍大于 40 km)。每间隔半小时采集一组数据, 每组数据共有 6155 帧图像, 全天共获得 46 组有效数据。

3 激光光斑图像统计分析

实验获取的激光光斑回波图像如图 3 所示, 为基本对称的圆形光斑。选取含 231×231 个像元的矩形区域作为观察对象(在反光膜上对应约

1 m×1 m的区域,其中每个像元约对应 1000 个微晶反射棱镜),则涵盖了几乎全部的激光光斑。图像灰度值 $D_N(i, j)$ 的大小取决于入射激光光强 $I(i, j)$ 、环境背景光强 $I_b(i, j)$ 和暗噪声 $n(i, j)$ 。由于成像的视场很小,并且该 CCD 的暗噪声比较均匀,取图像中暗像元的灰度值 D_{Nmin} 为 I_b 和 n 的叠加,则入射光强 $I(i, j)$ 正比于有效信号的灰度值,即

$$I(i, j) \propto D_N(i, j) - D_{Nmin} \quad (1)$$

因此,对光斑图像的统计分析实质上就是对有效信号灰度值的统计分析,下文不再区分。

有效信号的灰度值与入射光强相对应,像元的

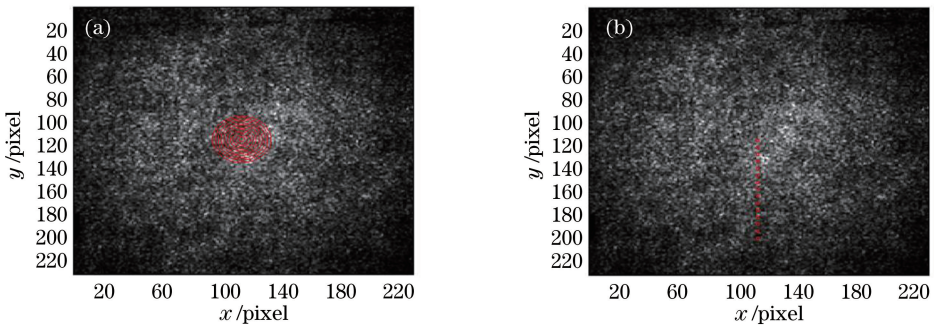


图 3 激光光斑回波图像。(a)以质心为圆心的同心圆采样;(b)远离质心的间隔采样

Fig. 3 Laser speckle echo images. (a) Concentric circular sampling with center of mass; (b) interval sampling away from the center of mass

3.1 光强闪烁指数

闪烁指数定义为归一化光强起伏方差,即 $\beta_I^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1$,其数值与接收口径的大小有关,存在孔径平滑效应^[19]。实验中使用的 3M 反光膜具有一定的散斑效应(即由相邻反射棱镜的随机相位差导致的相干相长和相干相消现象),通常采用构成一定面积的多个像元的灰度值的平均值来计算闪烁指数,以克服散斑效应对计算结果稳定性的影响。

受 1 km 大气湍流的影响,每幅光斑图像中的质心都有随机漂移。对于连续采集的 N 幅光斑图像,首先截取包含激光光斑的像元数为 $M \times M$ ($M = 231$) 的区域作为研究对象,然后通过质心计算公式

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^M [i \sum_{j=1}^M I(i, j)]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M I(i, j)} \quad \text{和} \quad y_c = \frac{\sum_{j=1}^M [j \sum_{i=1}^M I(i, j)]}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M I(i, j)}$$

计算出每幅光斑图像在水平和垂直方向的质心位置,再取其平均值作为光斑的中心位置。最后,对于每幅图像,以光斑中心 (x_c, y_c) 为圆心,取若干个半径以等差数列逐渐增加的同心圆,求取每个同心圆内光强的均值作为孔径平均光强,进而获得对应不同反光面积的不同 CCD

位置与光斑在反光膜上的位置相对应。因此,高频采样的图像时间序列中含有激光束受大气湍流影响后的丰富的时间和空间变化信息,理论上可从中提取出激光光斑上不同区域或不同面积范围内的光强闪烁特性以及光强起伏在空间上的相关性。如图 3 中的红色标记所示,图 3(a)给出了一种以光斑质心为圆心,取不同半径的同心圆且同心圆面积从小到大进行统计分析的情形;图 3(b)给出了一种以光斑质心为起点,取相同的面积且逐渐远离质心进行统计分析的情形。下面分别从基于光斑强度图像的闪烁指数、空间相关系数和湍流折射率结构常数来分析光斑回波的统计特性。

接收面积下的光强闪烁指数。

以大气相干长度仪实测的 r_0 为标记,给出了多种湍流状态下,回波光斑中心点处的闪烁指数随圆域直径 D (以像元尺寸为单位)的变化关系,如图 4 (a)所示。可以看出,随着相干长度的增大,湍流强度减弱,闪烁指数整体减小,表明通过光斑图像计算的闪烁指数能够反映湍流的强弱。在同一湍流状态下,随着 D 的增加,闪烁指数逐渐减小,当 $D = 50$ 时,闪烁指数趋于 0。该结果直观地表现出了湍流大气激光传输理论所描述的孔径平滑效应,即随着接收口径的增加,光斑统计范围内出现接收强度起伏不相关的区域,经过统计求和使得闪烁指数减小。对 $D > 0$ 时各种口径下的闪烁指数进行函数拟合,得出孔径平均因子的函数形式,此时取 $D = 0$,即可得出理想的点闪烁指数。多种拟合算法的结果表明,在任意湍流强度下经 4 阶多项式拟合后的拟合残差都很小,因此采用该算法计算 $\beta_I^2(0)$ 。

湍流大气激光传输的闪烁理论依赖傍轴近似假设条件,主要考虑光轴附近的闪烁指数与湍流参数的对应关系。但传统的湍流探测方法往往无法确保

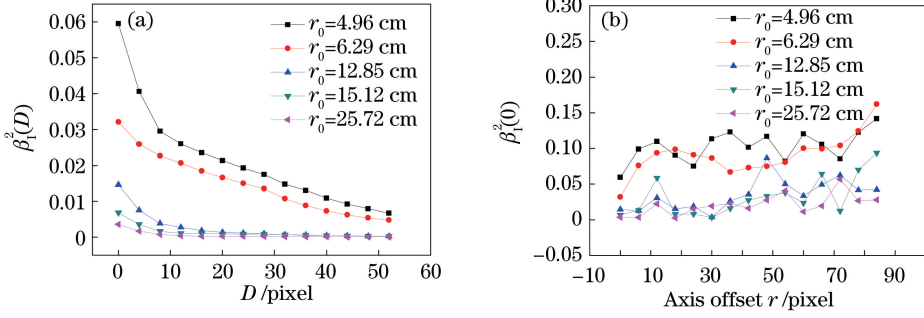


图4 (a) $\beta_1^2(D)$ 随 D 的变化;(b) $\beta_1^2(0)$ 随 r 的变化

Fig. 4 (a) Variation in $\beta_1^2(D)$ with D ; (b) variation in $\beta_1^2(0)$ with r

探测器时刻处于光斑的中心处。为了得到偏离光斑质心不同距离对闪烁指数的影响,图 4(b) 给出了点闪烁指数随离轴距离的变化趋势(算法同上)。根据光闪烁理论,以 Fresnel 衍射尺度 $\sqrt{\lambda L}$ (L 为传播的距离)为判据,一般认为当光斑尺寸 $d < \sqrt{\lambda L}$ 时,在该孔径范围内的光强起伏规律是一致的。671 nm 的激光经 1 km 传输路径后,到达反光膜的 Fresnel 尺度在 CCD 像阵面上对应约 6 个像元。因此选取离轴间距为 6 个像元,以尽量减小各像元之间的强度关联。图 4 表明,随着离轴距离的增加,点闪烁指数有上扬的趋势,总体而言,光斑边缘处的闪烁指数大于其中心处的闪烁指数。不同位置离轴距离上闪烁指数的差别将会导致一定程度的测量误差。

3.2 光强起伏的空间相关系数

以光斑质心为原点,距离原点 r 处的光强起伏与原处光强起伏的空间相关系数

$$C_1(r) = \langle [I(0) - \bar{I}(0)] \times [I(r) - \bar{I}(r)] \rangle, \quad (2)$$

式中 $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均, \bar{I} 表示平均光强。两点处各自的光强起伏方差可分别表示为

$$\begin{cases} \sigma_1(0) = \sqrt{\langle [I(0) - \bar{I}(0)]^2 \rangle} \\ \sigma_1(r) = \sqrt{\langle [I(r) - \bar{I}(r)]^2 \rangle} \end{cases}, \quad (3)$$

则归一化空间相关系数为

$$B_1(r) = C_1(r) / [\sigma_1(0)\sigma_1(r)]. \quad (4)$$

图 5 给出了不同相干长度下 $B_1(r)$ 的计算结果,可见随着 r 的增大, $B_1(r)$ 迅速减小,当 r 达到 15~20 个像素尺寸后, $B_1(r)$ 接近于 0,并在 0 值附近出现微小波动。若定义当 $B_1(r) = 1/e$ 时对应的 r 为空间相关距离(如图 5 中的横线所示),则该距离有随 r_0 的减小即湍流强度的增加而逐渐增大的趋势。同时,在相关距离范围内,当 r 固定时, $B_1(r)$ 也有随湍流强度的增加而增大的趋势。该趋

势与利用传感器阵列直接探测的湍流折射率场空间相关系数的变化趋势相一致^[20],这均表明湍流强度与空间相关系数呈正相关。通过该现象不难理解:从大气湍流的能汇来看,强湍流通常意味着大尺度的能量注入、大尺度的漩涡和湍流脉动量在更大尺度范围内相关。实验获取的光强起伏空间相关距离符合 Tatarskii 关于弱起伏条件下球面波通过湍流大气后的光斑光强起伏相关距离与第一类 Fresnel 尺度 $\sqrt{\lambda L}$ 同量级的理论预期^[21],约为 1~3 倍的 $\sqrt{\lambda L}$ 。

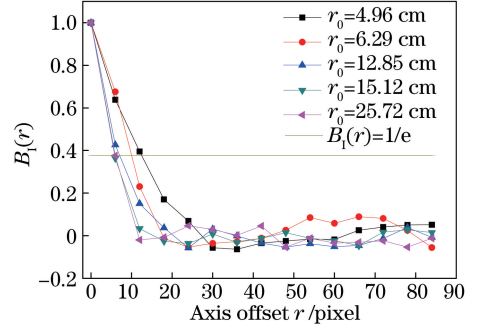


图5 归一化光强起伏相关系数 $B_1(r)$ 随 r 的变化
Fig. 5 Variation in normalized correlation coefficient $B_1(r)$ of intensity fluctuation with r

4 湍流折射率结构常数的计算及验证

在傍轴近似条件下,处理高斯光束在湍流大气中的传输问题时,由于发射波束的宽度较小($D = 3$ mm),传播特性接近球面波,故通常将其当作球面波处理。根据弱起伏条件下 Tatarskii 的湍流大气光传输理论以及 Kolmogorov 的局地均匀各向同性湍流理论,球面波的点闪烁指数可表示为

$$\beta_1^2(0) = 0.496 C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}}, \quad (5)$$

式中 k 为波数。

实验中使用的大口径激光闪烁仪通过内置的孔

径平均因子,将实测的闪烁指数转换为点闪烁指数,再通过(5)式计算输出 C_n^2 ,以有效克服闪烁饱和现象对湍流强度测量的影响。同时,在折返路径成像过程中,所采用的成像透镜口径较大,接收到的闪烁指数可认为仅由发射路径湍流效应引起^[22]。忽略激光回波成像探测过程中湍流对光斑图像统计特性的影响,根据前文拟合得出的光斑质心处的点闪烁指数,并由(5)式计算出 1 km 路径均匀的 C_n^2 。另外,根据大气相干长度仪测得的 r_0 ,并由球面波的 r_0 与 C_n^2 的关系

$$r_0 = (0.423k^2 C_n^2 L)^{-3/5}, \quad (6)$$

也可得到 1 km 路径上的 C_n^2 。

图 6 为分别通过上述 3 种方法获得的 C_n^2 随时间 t 的变化曲线,其中第 10 个数据点和第 35 个数据点的横坐标分别表示 19:00 和 7:00,两者之间的 C_n^2 表示夜晚的测量结果,其他的数据均为白天的 C_n^2 测量值。上述每组数据中,激光闪烁仪的采样时间为 1 min,大气相干长度仪的采样时间为 20 s,激光回波光斑的采样时间为 5 s,它们均与相应仪器的硬件配置相匹配,不能统一设置。从湍流统计理论来看,统计时间通常不影响均值,但较短的时间会增加统计结果的随机性。图中激光闪烁仪的测量数据比较平稳,而成像法所得的 C_n^2 具有较大的波动范围,与理论预期结果相一致。此外,系统本身的结构以及测量原理的不同,包括探测响应速度、背景和噪声等均可能使所得的 C_n^2 产生一定的差异。

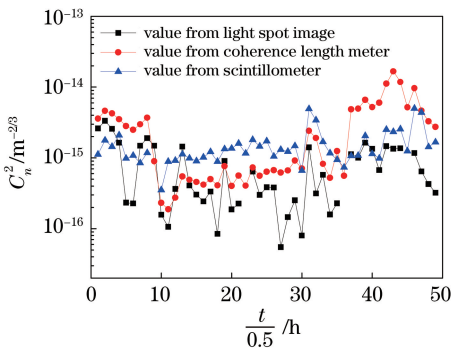


图 6 3 种方法所得的 C_n^2 对比

Fig. 6 Comparison of C_n^2 obtained by three methods

通过比较闪烁仪和相干长度仪测量的 C_n^2 可以发现:白天前者普遍小于后者,而夜晚后者普遍小于前者。激光传输路径的下垫面由陆地与水面组成,光传输路径上湍流强度的不均匀性及路径影响权重的不同,是导致路径均匀假设下两者测量结果昼夜有差别的根本原因。与两种设备得到的 C_n^2 相比,成像法所得的 C_n^2 在大多数时间是偏小的。根据图

4(b)的实验结果,闪烁指数随离轴距离的增加而增大。在利用激光闪烁仪或相干长度仪进行实际湍流探测时,由于不能实时监控激光光斑的位置,无法确保接收望远镜是否时刻处于信号光的中心位置,可能会使得 C_n^2 的测量值偏大。折返路径激光成像探测方法可以实时获取光斑中心点的位置和孔径平均因子拟合函数,从而得到理想的中心点闪烁指数。从这个层面来看,基于该系统测量的 C_n^2 偏小,但也应该更符合实际。虽然 3 种方法测得的 C_n^2 在数值上具有一定的偏差,但仍然表现出较为一致的整体变化趋势。

5 结 论

阐述了一种利用大面阵 3M 微晶棱镜反光膜和长焦 CCD 成像系统构建的折返路径低能量激光光斑远场成像探测系统,用于观察完整的激光光斑受大气湍流的影响。初步的统计分析结果表明,从激光光斑回波光强图像信号中可以提取出闪烁指数、空间相关系数和孔径平均因子等多种湍流大气光传播效应参数。利用回波图像中心点的闪烁指数推算的 C_n^2 与标准的湍流测量仪器测得的 C_n^2 之间在量级和变化趋势上都具有良好的 consistency,并且通过该方法计算湍流强度,能够确保傍轴近似和点闪烁等近似条件,理论上更符合实际。该实验为今后针对该系统详细的理论建模、数值仿真分析和单端湍流成像探测潜力的开发提供了重要的实验依据。

参 考 文 献

- [1] Strohbehn J W. Laser beam propagation in the atmosphere [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1978: 129-170.
- [2] Belmonte A, Taylor M T, Hollberg L. Effect of atmospheric anisoplanatism on earth-to-satellite time transfer over laser communication links[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 15676-15686.
- [3] Li H S, Sang X Y. SNR and transmission error rate for remote laser communication system in real atmosphere channel[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 258: 156-162.
- [4] Vorontsov M A, Lachinova S L, Majumdar A K. Target-in-the-loop remote sensing of laser beam and atmospheric turbulence characteristics [J]. Applied Optics, 2016, 55(19): 5172-5179.
- [5] Ma X S. On the scintillation of laser propagation in atmosphere and a large aperture scintillometer development[D]. Hefei: Hefei Institutes of Physical

- Science, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- 马晓珊. 激光大气闪烁效应研究和大气口径闪烁仪的研制[D]. 合肥: 中国科学院合肥物质科学研究院, 2008.
- [6] Yuan K E, Zhu W Y, Rao R Z, *et al.* Measurement of scintillation effect of light propagating through atmospheric turbulence by Shack-Hartmann sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(z2): 436-439.
苑克娥, 朱文越, 饶瑞中, 等. 基于 Shack-Hartmann 波前传感器的湍流大气光闪烁测量[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(z2): 436-439.
- [7] Zhang L, Zhao X, Tong S F, *et al.* Measurement of atmospheric turbulence parameters on airborne platform based on differential image motion method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44 (3): 0304002.
张雷, 赵馨, 佟首峰, 等. 基于差分像运动法的机载平台大气湍流参数测量[J]. *中国激光*, 2017, 44 (3): 0304002.
- [8] Chen X W, Sun G, Liu Q, *et al.* Contribution of the surface layer to the integral turbulence in northwest plateau [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (11): 1101006.
陈小威, 孙刚, 刘庆, 等. 近地面湍流对整层湍流的贡献及相关研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1101006.
- [9] Mei H P, Yuan K E, Rao R Z. Fiber optical sensing technology and its applications in measuring atmospheric optical turbulence parameters [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, 2(1): 1-5.
梅海平, 苑克娥, 饶瑞中. 光纤传感技术用于大气光学湍流测量[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, 2(1): 1-5.
- [10] Hargather M J, Settles G S. Retroreflective shadowgraph technique for large-scale flow visualization [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(22): 4449-4457.
- [11] Settles G S. *Schlieren and shadowgraph techniques* [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2001.
- [12] Settles G S, Hargather M J. A review of recent developments in schlieren and shadowgraph techniques [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(4): 042001.
- [13] Andrews L C, Miller W B. The mutual coherence function and the backscatter amplification effect for a reflected Gaussian-beam wave in atmosphere turbulence [J]. *Waves in Random Media*, 1995, 5 (2): 167-182.
- [14] Andrews L C, Phillips R L, Miller W B. Mutual coherence function for a double-passage retroreflected optical wave in atmospheric turbulence [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(3): 698-708.
- [15] Zhang Y X. Angle-of-arrival fluctuation of reflected laser beam in atmospheric turbulence [J]. *Laser Technology*, 1997, 21(1): 25-29.
张逸新. 湍流大气中激光回波到达角起伏[J]. *激光技术*, 1997, 21(1): 25-29.
- [16] Wei H Y, Wu Z S, Peng H. Scattering from a diffuse target in the slant atmospheric turbulence [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6666-6672.
韦宏艳, 吴振森, 彭辉. 斜程大气湍流中漫射目标的散射特性[J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6666-6672.
- [17] Wang L G. *Characteristics of reflected wave from targets illuminated by laser beam in turbulent atmosphere*[D]. Xi'an: Xidian University, 2014.
王利国. 湍流大气中激光光波束目标回波特性[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [18] Ke X Z, Wang J. Intensity of reflected wave from corner reflector illuminated by partially coherent beam in the atmospheric turbulence [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1001001.
柯熙政, 王姣. 大气湍流中部分相干光束角反射器的回波光强特性 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (10): 1001001.
- [19] Churnside J H. Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere [J]. *Applied Optics*, 1991, 30(15): 1982-1994.
- [20] Wang Q, Mei H P, Qian X M, *et al.* Spatial correlation experimental analysis of atmospheric optical turbulence in the near ground layer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(11): 114212.
王倩, 梅海平, 钱仙妹, 等. 近地面大气光学湍流空间相关特性的实验研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64 (11): 114212.
- [21] Tatarski V I. *Wave propagation in a turbulent medium*[M]. Wen J S, Song Z F, Zeng Z Y, *et al.* Transl. Beijing: Science Press, 1978: 165-180.
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: 165-180.
- [22] Zhao Q, Cui C L, Huang H H, *et al.* Light scintillation effect on double-pass path of lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026011.
赵琦, 崔朝龙, 黄宏华, 等. 激光雷达双程路径上的光波闪烁效应 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (10): 1026011.