

## 激光主动照明折返路径大气相干长度测量

张骏昕<sup>1,2,3</sup>, 梅海平<sup>1,3\*</sup>, 任益充<sup>1,3</sup>, 饶瑞中<sup>1,3</sup><sup>1</sup>中国科学院合肥物质科学研究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;<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;<sup>3</sup>先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 大气相干长度是衡量积分路径大气光学湍流强度的重要参数。归纳了折返路径大气相干长度的测量理论, 构建了一套基于 3M 反光膜的激光主动照明信标大气相干长度测量系统, 利用 3M 反光膜的反射率高、面积大的特性降低了对探测激光功率的要求, 实现了探测系统单端配置收发一体。通过切换主动照明信标和传统 650 nm 激光信标来测量大气相干长度, 全天对比测量实验结果以及多日主动照明信标成像探测数据表明: 主动照明 3M 反光膜信标的折返路径测量结果与传统方法测量结果的相对偏差小于 2.5%; 得益于系统收发一体, 利用对聚焦光束主动照明信标成像探测的方法也可以较为准确地反演传输路径光学湍流强度。相关实验结果对于验证折返路径光传输模型、探索长程单端光学湍流遥测有一定参考意义。

**关键词** 大气光学; 光学湍流; 大气相干长度; 折返路径光传输; 3M 反光膜

**中图分类号** O436 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS221854

## 1 引言

大气光学湍流导致激光经大气传输后出现激光闪烁、光束漂移、光束扩展和到达角起伏等现象<sup>[1]</sup>。Fried<sup>[2]</sup>提出的大气相干长度 $r_0$ 是与波前相位结构函数相关的参量: 在地基天文观测中, $r_0$ 可以表征天文望远镜在整层大气湍流作用下的衍射极限成像等效口径; 在激光大气传输中, $r_0$ 通常用于衡量路径积分的光学湍流强度。因此, 实时获取大气相干长度对于研究激光大气传输效应和地基天文观测都具有重要意义<sup>[3]</sup>。

目前常用的大气相干长度测量设备为差分像运动监测仪(DIMM), 这种方法从原理上避免了由观测设备振动和跟踪不稳定引起的测量误差。在准水平长距离光学湍流测量的场景下, 往往采用接收望远镜和远端信标光互相跟踪的手段, 以确保信标光成像在 CCD 相机靶面中央。因此, 两端都需要供电和必要的人员值守。近些年, 学者们为了实现单端的光学湍流测量, 将原来的被动信标转换成主动照明信标, 提出了基于 DIMM 的激光主动照明大气湍流探测方法, 为此, 陆续研究了在激光主动照明漫反射目标<sup>[4-6]</sup>、空气柱反射<sup>[7-8]</sup>、角反射器反射<sup>[9]</sup>等条件下利用 DIMM 探测大气湍流强度的可行性。但漫反射目标在测量距离上有限

制, 照明空气柱信标的稳定性受限于大气中气溶胶分子特性, 角反射器目标较难实现长距离的全光斑接收。

3M 反光膜具有反射率高、颗粒细、反光均匀和易拼接成大面积阵列的特点, 如果采用 3M 反光膜作为反射目标, 将减小长程大气湍流测量中的对光难度, 降低探测激光的功率要求。本课题组采用 3M 反光膜作为反射目标, 探究了通过构建折返路径成像系统探测光传播的闪烁效应<sup>[10]</sup>、路径平均风速<sup>[11]</sup>以及折射率结构常数的可行性<sup>[12]</sup>。由于 3M 反光膜和漫反射目标相比可视为具有一定相关长度和均方根高度的反射面<sup>[13]</sup>, 因此利用激光照明 3M 反光膜信标探测 $r_0$ 在理论上是可行的。但是, 采用基于 3M 反光膜主动照明的信标测量 $r_0$ 的结果与传统方法测量结果的符合程度需通过实验验证。此外, 根据 Fried<sup>[14]</sup>的研究, 单孔望远镜因无法消除仪器自身的振动, 所以绝对像运动法测量的 $r_0$ 误差较大。在大面积 3M 反光膜阵列条件下, 照明激光和大口径望远镜位置相对固定, 望远镜无需跟踪功能也可以实现信标光不脱离 CCD 相机视场, 这使得利用绝对像运动漂移法较准确地反演光学湍流成为可能。

本文从实验出发, 对比探究了折返路径大气相干长度测量方法与传统的激光单程传输测量方法。首

收稿日期: 2022-10-20; 修回日期: 2022-11-16; 录用日期: 2022-11-30; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 中国科学院装备预研联合基金(6141A01130202)、国家自然科学基金青年科学基金(11904369)、安徽省自然科学基金青年项目(1908085QA37)、脉冲功率激光技术国家重点实验室主任基金(2019ZR07)

通信作者: \*hpmei@aiofm.ac.cn

先,介绍折返路径下 DIMM 的理论基础;然后,介绍单程 DIMM 和折返路径 DIMM 测量大气相干长度的实验配置和实验环境,通过改变传统 DIMM 信标光产生方式,在不变动硬件测量设备的情况下实现了在传统信标光和主动照明信标光两种条件下的切换测量,并分析了两种测量结果的相对偏差;最后,通过对远场散斑成像的方式,统计分析了在 1.1 km 传输距离上大气湍流和 3M 反射膜共同作用下散斑质心的漂移特性,探究了在大视场条件下利用主动照明的绝对像运动法反演 1.1 km 传输距离上大气折射率结构常数  $C_n^2$  的可行性和准确性。通过对比实验数据,计算相对偏差,明确了在利用激光主动照明 3M 反射膜信标条件下测量大气相干长度是可行的。

## 2 理论基础

### 2.1 基于光束漂移的折返路径光学湍流强度测量原理

Fried<sup>[2,14]</sup>在研究差分到达角起伏和波前相位时,推导出使用单孔望远镜条件下的绝对像运动理论公式。Cavazzani 等<sup>[15]</sup>在进行近地面大气视宁度测试时采用了光斑抖动数据反演水平光传输路径上的光学湍流参数。受此启发,本文利用远场散斑成像方式反演大气折射率结构常数。在激光大气传输中,湍流的有限内尺度对远场散斑像运动的影响较小<sup>[1]</sup>。因此在采用成像方式研究远场光束漂移时,往往忽略湍流内尺度及衍射效应,则光束到达角起伏方差<sup>[2]</sup>可以表示为

$$\langle \sigma_p^2 \rangle = 1.027(3.44/\pi^2)(\lambda/D)^{1/3}(\lambda/r_0)^{5/3}, \quad (1)$$

式中: $\sigma_p$ 为光束到达角; $\lambda$ 为入射光波长; $D$ 为望远镜子孔径的直径; $r_0$ 为大气相干长度。将  $r_0 = (8/3)^{3/5}(0.423C_n^2k^2L)^{-3/5}$  (其中  $k = 2\pi/\lambda$  为波数, $L$  为发射端到反射处的距离)代入式(1)得到  $\langle \sigma_p^2 \rangle = 2.24C_n^2D^{-1/3}L$ 。

### 2.2 基于差分像运动的折返路径大气相干长度测量原理

传统的大气相干长度测量原理和计算公式已被长期使用并形成标准,但在利用激光主动照明方法测量折返路径大气相干长度条件下,利用漫反射面条件适用的理论公式进行计算时,还需要对其结果相对偏差进行理论分析和实验验证。

在折返路径大气相干长度测量中,光束先从发射端到达反射目标,再从反射目标回射到接收端。这种情况下,主动信标光在大气湍流中往返传输了两次,其通过楔镜在望远镜后端的 CCD 焦面上所成像的位移为

$$\alpha_1 = \alpha_E - \alpha_{1,R}, \quad (2)$$

$$\alpha_2 = \alpha_E - \alpha_{2,R}, \quad (3)$$

式中: $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 为两幅图像的质心位置; $\alpha_E$ 表示由出射光束经大气湍流传输产生的波前倾斜造成的光束移动

量; $\alpha_{1,R}$ 和 $\alpha_{2,R}$ 为回波光束经大气湍流传输后产生的波前倾斜分别在两个接收子孔径上造成的光束移动量;负号表示出射光束和回程光束方向相反。将式(2)减去式(3),得到  $\alpha_d = \alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_{2,R} - \alpha_{1,R}$ ,表明单程和折返路径的差分像运动原理是一致的。因此,折返路径到达角起伏方差<sup>[4]</sup>可以表示为

$$\sigma_{\text{foldpath}}^2 = \left\langle \left( \frac{\alpha_d}{f} \right)^2 \right\rangle, \quad (4)$$

式中: $f$ 表示成像系统的焦距; $\alpha_d$ 表示回波光束波前经楔镜分光后成像的差分结果。这意味着在折返路径条件下,可以将传统 DIMM 计算大气折射率结构常数  $C_n^2$  的公式作为折返路径差分像运动测量  $C_n^2$  的计算公式<sup>[5]</sup>,即

$$\sigma_{\text{foldpath}}^2 = S(d/D)D^{-1/3}\overline{C_n^2}, \quad (5)$$

式中: $S(d/D)$ 为包含变量  $d/D$  的函数; $\overline{C_n^2} = \int_0^L C_n^2(z)(1-z/L)^{5/3} dz$ ;  $d$ 为两个子孔径的距离。式(5)是在回程光场为球面波的条件上推导的公式。 $S(d/D)$ 的表达式由 Sarazin 和 Roddier<sup>[16]</sup>给出的下列关系推导得出

$$\sigma_i^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}], \quad (6)$$

$$\sigma_i^2 = 2\lambda^2 r_0^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}]. \quad (7)$$

式(6)、式(7)可以写成如下形式:

$$\sigma_i^2 = S_i(d/D)D^{-1/3}\overline{C_n^2}, \quad (8)$$

$$\sigma_i^2 = S_i(d/D)D^{-1/3}\overline{C_n^2}. \quad (9)$$

由于  $\sigma_{\text{foldpath}}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_i^2$ ,参考式(8)、式(9)可得

$$S(d/D) = 33.2 \left[ 0.325 - 0.242(d/D)^{-1/3} \right]. \quad (10)$$

合并式(5)、式(10)得到

$$\sigma_{\text{foldpath}}^2 = 33.2D^{-1/3} \left[ 0.358 - 0.242(d/D)^{-1/3} \right] \times \int_0^L C_n^2(z)(1-z/L)^{5/3} dz. \quad (11)$$

假设水平传输路径上的  $C_n^2$  均匀分布,则有  $\overline{C_n^2} = \frac{3}{8}LC_n^2$ 。式(11)可以简化成

$$\sigma_{\text{foldpath}}^2 = 12.45D^{-1/3} \left[ 0.358 - 0.242(d/D)^{-1/3} \right] \times LC_n^2. \quad (12)$$

将  $r_0 = (8/3)^{3/5}(0.423C_n^2k^2L)^{-3/5}$ <sup>[17]</sup>代入式(12),可得

$$\sigma_{\text{foldpath}}^2 = 1.983D^{-1/3}r_0^{-5/3}\lambda^2 \left[ 0.358 - 0.242(d/D)^{-1/3} \right]. \quad (13)$$

从式(13)看出,在  $D$ 、 $d$  和  $\lambda$  确定的情况下,已知  $\sigma_{\text{foldpath}}^2$  便可计算出对应的  $r_0$  值。本文中折返路径 DIMM 和传统 DIMM 的计算公式均采用式(13),实验结果的对比差异可视为 3M 反光膜与漫反射面之间性质的差异。

### 3 实验场景及设备

#### 3.1 大气相干长度测量对比实验

为了探究折返路径 DIMM 能否准确测量大气相干长度,使用 3M 微晶棱镜阵列反光膜作为硬反射合作目标,在 1.1 km 的传输距离上开展大气相干长度测

量对比实验。系统主要由 YSL-SC-PRO-M 激光器(输出功率为 1 W)、扩束系统、Meade ACF14F8 卡塞格林式望远镜、两块楔镜、650 nm 滤光片、Allied Vison GT 1920 CCD 等组成。折返路径 DIMM 测量系统实验场景如图 1 所示,设备参数如表 1 所示。

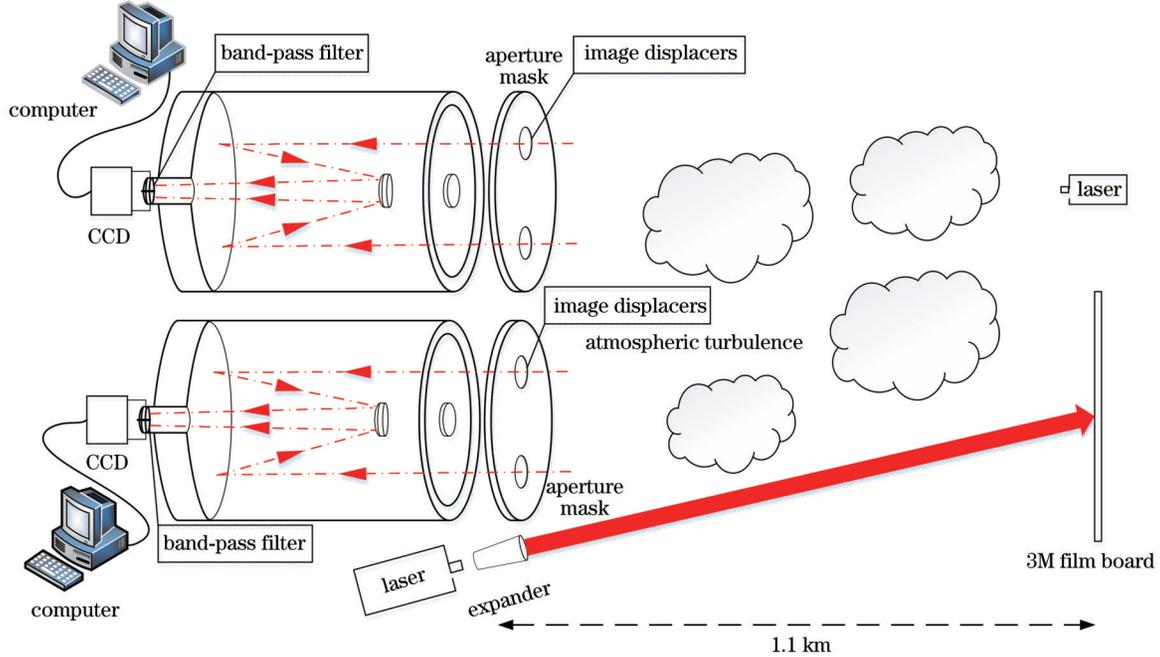


图 1 大气相干长度测量对比实验配置示意图

Fig. 1 Schematic of the  $r_0$  measurement comparison experiment

表 1 折返路径 DIMM 测量系统设备参数  
Table 1 Parameters of fold-path DIMM experiment

Instrument	Parameter
DIMM	Focal length: 2.845 m
	Subaperture diameter: 0.12 m
	Subaperture separation: 0.24 m
	Pixel size: 4.54 $\mu\text{m}$
	Digit: 14 bit
Meade	Exposure time: 200 $\mu\text{s}$
	Model: ACF14F8
	Aperture: 355 mm
Allied Vison GT 1920 CCD	Focal length: 2.845 m
	Exposure range: 10 $\mu\text{s}$ –26.8 s
	Pixel size: 4.54 $\mu\text{m}$
	Sample frequency up to 40.7 frame/s
	Resolution: 1936 pixel $\times$ 1456 pixel

在对比实验中,为了排除不同 DIMM 设备造成的测量误差,使用同一套 DIMM 设备在不同的信标间切换来测量大气相干长度,每种信标下的测量时间均约为 5 min。折返路径 DIMM 所使用的激光光源与望远镜固定在一起,硬反射合作目标位于 1.1 km 外的实验楼窗前。同时,在硬反射合作目标旁放置了一台

650 nm 激光器作为传统 DIMM 测量的信标光源,这也最大限度地保证了两种 DIMM 测量方法获得的是同一路径上的大气相干长度。

实验于 2021 年 10 月 27 日开展,对比测量从 8:30 (UTC+08) 进行到 22:30 (UTC+08)。1.1 km 传输距离内 1/4 的下垫面为草地和柏油混合地面,3/4 为水面。当日气温为 15.2~23.5  $^{\circ}\text{C}$ ,白天大气能见度最高为 33 km,最低为 6.5 km,分别出现在下午和清晨,全天风速小于 2.8 m/s。由于使用同一套 DIMM 系统通过时分复用获得折返路径  $r_{0,\text{fold}}$  和单程  $r_{0,\text{single}}$ ,因此在后期数据预处理中舍弃切换时刻前后 1 min 的光斑质心数据。

#### 3.2 激光主动照明光束漂移成像实验

为了验证基于反射膜的激光照明信标产生的光束抖动<sup>[18]</sup>能否成为监测光学湍流的一种手段,开展了远场主动照明散斑成像实验,探究了利用回波光斑质心漂移方差反演路径平均  $C_n^2$  的准确性,并在 1.1 km 的传输距离内开展了为期 5 d 的激光散斑漂移特性实验。在实验期间,同步使用 DIMM 获得的  $r_0$  来反演路径平均  $C_n^2$ 。实验系统如图 2 所示,发射端主要由 671 nm 激光器(输出功率为 200 mW)、光束扩束及微调结构组成,接收端主要由 BOSMA 卡塞格林式望远镜、ASI

290MM CCD、滤光片和计算机构成,3M 微晶棱镜阵列反光膜位于距离激光发射端 1.1 km 的实验楼二楼。实验中,激光光源离地高度约为 15 m,通过调整扩束

系统和反射镜,使光束瞄准位于 1.1 km 处的 3M 反光膜,再使用望远镜和 CCD 对 1.1 km 处的激光散斑成像并记录。

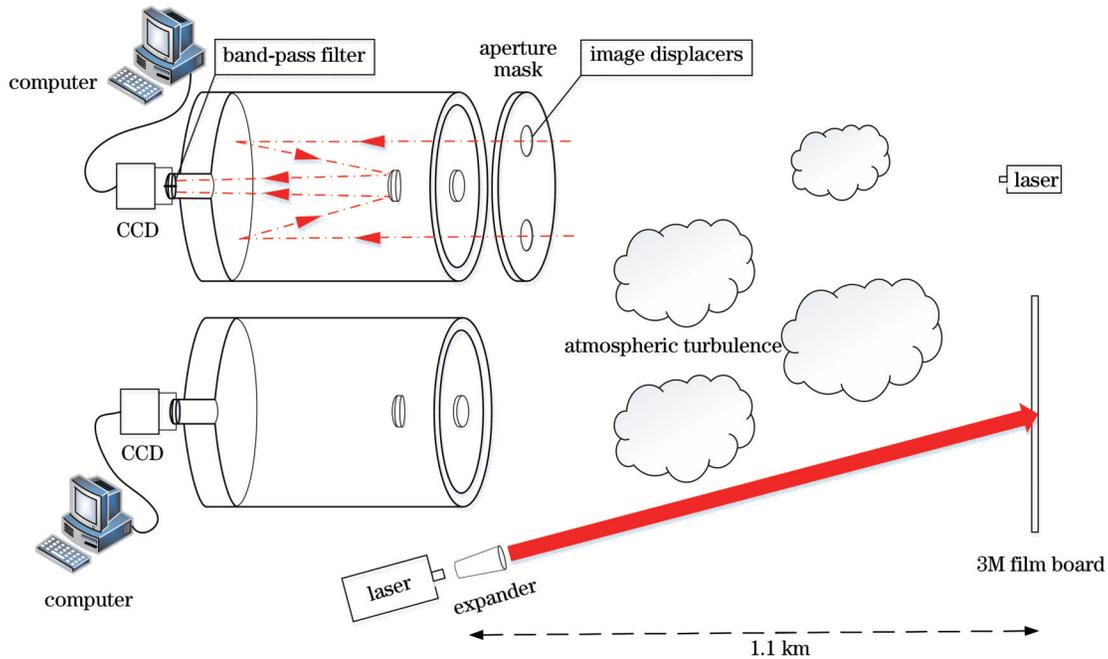


图 2 主动照明光斑成像实验配置示意图

Fig. 2 Schematic of the active illumination laser beam imaging experiment

主动照明光斑成像实验设备参数如表 2 所示。实验期间正值秋季,天气状态在晴、降雨、阴这 3 种状态中切换,整体气温在 21~35 °C,在超过 80% 时间内风速小于 3 m/s。在实验中,分别采用激光准直出射和激光自由出射两种光束状态来计算激光散斑质心漂移方差。在激光准直出射的情况下,CCD 相机采样帧频约为 560 frame/s,保存的图像为 8 bit 的灰度图像,图像大小为 320 pixel×320 pixel,初步标定的像素尺度为 820 pixel/m;在激光自由出射的情况下,CCD 相机

的采样帧频约为 330 frame/s,图像大小变为 544 pixel×544 pixel,其余参数和准直条件下一致。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 全光斑折返路径 DIMM 测量大气相干长度

图 3 所示为 2021 年 10 月 27 日折返路径 DIMM 测量的大气相干长度  $r_{0, \text{fold}, 4\text{th}}$  和传统 DIMM 测量的大气相干长度  $r_{0, \text{single}, 4\text{th}}$  的对比,在当天 16 时加入另一台 DIMM (位于 5 楼,高度约为 15 m) 进行同步测量,其结果记为  $r_{0, \text{single}, 5\text{th}}$ 。在测量过程中,通过切换到不同模式下的 DIMM 获取路径上的  $r_0$ ,因此图 3 所示的数据并未表现出很好的重叠性,但从  $r_0$  数据变化的趋势和数值大小来看,折返路径 DIMM 和单程 DIMM 展示出良好的一致性,即两种方法获得的  $r_0$  数据在时间上展示出一定的跟随性。折返路径 DIMM 获得的  $r_0$  在傍晚“转换时刻”明显增大,反映出湍流在此时很弱,并且其数值与单程 DIMM 获得的数值基本吻合。当日架设在更高处的一台单程 DIMM 的数据表明,即便在夜间传输路径上的大气湍流短期出现由强转弱的变化,折返路径 DIMM 也能很好地测量到这种变化动态。这为分析利用主动照明 3M 反射膜信标进行折返路径大气相干长度测量的准确性和偏差提供了更详实的数据。

传统的 DIMM 将信标光视为球面波或平面波<sup>[2,14]</sup>,从而推导出差分像运动条件下的  $r_0$  解析表达式。当使用 3M 反光膜作为回射介质时,折返路径

表 2 主动照明光斑成像实验设备参数

Table 2 Parameters of the active illumination laser beam imaging experiment

Instrument	Parameter
DIMM	Focal length: 3.55 m
	Subaperture diameter: 0.12 m
	Subaperture separation: 0.24 m
	Pixel size: 3.75 μm
	Digit: 14 bit
BOSMA	Exposure time: 200 μs
	Model: MK24020
	Aperture: 200 mm
	Focal length: 1200 mm
ASI 290MM CCD	Exposure range: 32 μs-2000 s
	Pixel size: 2.9 μm
	Sample frequency: 330 Hz/560 Hz Resolution: 1936 pixel×1096 pixel

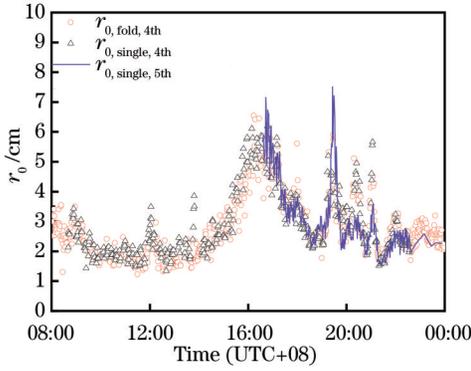


图 3 2021 年 10 月 27 日折返路径 DIMM 和传统 DIMM 测量  $r_0$  结果

Fig. 3  $r_0$  measurement results of fold-path DIMM and traditional DIMM on October 27, 2021

DIMM 的信标光传输路径长度变为原来的 2 倍。与此同时,由于 3M 反光膜表面布满微晶棱镜阵列,当信标光照射到膜表面经过粗糙表面调制后,信标光的相干性严重退化。折返条件下光束漂移方差和单程传输光束漂移方差在实验上是否有明显区别,这是需要研究的问题。实验测量结果表明,折返路径情况下到达角起伏并未产生后向增强现象。

折返路径大气相干长度测量结果与单程测量结果

的对比表明,两种方法有较好的一致性,并且测量结果能够反映在晨昏转换时刻近地面大气湍流的强弱变化。折返路径测量结果与传统的单程测量结果的相对偏差是否在允许的范围内,决定了折返路径测量能否成为有效的大气相干长度测量方法。

由于实验中使用同一套 DIMM 设备切换不同的信标来测量大气相干长度,折返路径和单程测量结果在时间上是不重叠的,每种状态的测量时间长达 5 min,故将两者直接比较存在一定的不确定性。本实验引入另一套完全相同配置的传统 DIMM 进行同步测量,并将对应时段的测量结果与两种方法分别比较来分析测量偏差。受实验窗口的限制,该设备未能放置在同一楼层,而是放在最接近的 5 楼。由于两套系统的测量光路比较接近,其变化趋势基本一致(图 3),但由于 4 楼的高度略低于 5 楼,湍流稍强。图 4 为两种方法测量结果与同一时段 5 楼测量结果的比值,可以看出:4 楼的折返路径测量结果与 5 楼单程测量结果的平均比值  $\bar{R}_{\text{fold/single}} = 0.9681$ ,4 楼单程与 5 楼单程测量结果的平均比值  $\bar{R}_{\text{single/single}} = 0.9931$ ,都接近 1,且与湍流强度随高度下降的趋势对应;进一步,比较 4 楼两种方法测量的  $r_0$  的均值,得到相对偏差

$$\frac{|\bar{R}_{\text{single/single}} - \bar{R}_{\text{fold/single}}|}{\bar{R}_{\text{single/single}}} = 2.5\%$$

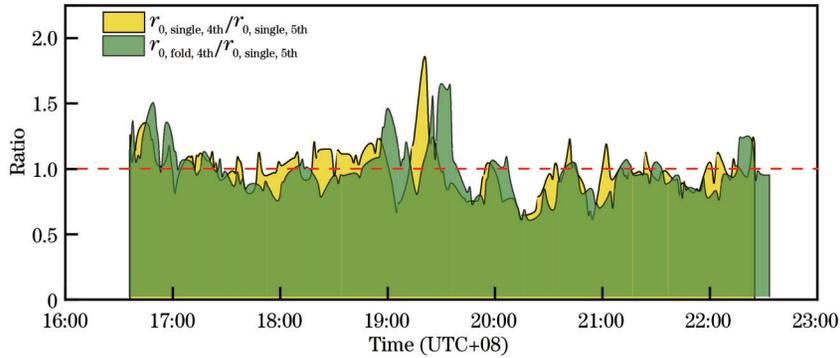


图 4 2021 年 10 月 27 日折返路径 DIMM 和传统 DIMM 测量结果的比值图

Fig. 4 Ratio of fold-path DIMM and traditional DIMM measurement results on October 27, 2021

从图 4 可以看到,折返路径 DIMM 的测量结果略小于传统 DIMM 测量结果,这是因为在折返路径 DIMM 中,CCD 接收的是被具有一定相关长度和均方根高度的高斯随机粗糙面反射的回波光斑,并且 3M 反射膜表面的微晶棱镜颗粒间隔远大于激光波长<sup>[12]</sup>,所以折返路径 DIMM 回波信标表现出与传统 DIMM 相干光源不同的性质。

#### 4.2 基于光束漂移反演折返路径光学湍流强度的结果

将 DIMM 测量的  $r_0$  通过信标光源为球面波的大气

$$\text{相干长度公式}^{[17]} r_0 = \left[ 0.423k^2 \int_0^L C_n^2(z) (z/L)^{5/3} dz \right]^{-3/5} \quad \text{转}$$

化为  $C_n^2$ ,再将其与质心漂移方差  $\sigma_c^2$  反演所得的  $C_n^2$  进行对比。图 5 所示为在激光发散出射条件下反演的大气折射率结构常数  $C_n^2$  与大气相干长度  $r_0$  反演的大气折射率结构常数  $C_n^2$  的对比。发散状态下利用直接出射光束反演的  $C_n^2$  在 2022 年 9 月 11 日夜间到 12 日清晨期间出现与由  $r_0$  反演的  $C_n^2$  相差接近一个数量级的现象。图 6 所示为使用聚焦出射光斑反演的  $C_n^2$  与由大气相干长度  $r_0$  反演的大气折射率结构常数  $C_n^2$  的对比,可以看到,两种方法的反演结果并未出现数量级上的差别。这两次实验的天气条件较为接近,黎明到清晨出现薄雾,日出后薄雾消散,日间相对湿度小于 60%,均为晴好天气。当激光未经扩束镜扩束时,发散角较大,导致只有部分光斑到靶,并且在长距离传输时光束

能量会超出成像区域,这使得远端成像设备只监测到光束的部分能量,在计算光束质心抖动时不可避免地引入了计算误差。特别地,夜间近地面大气湍流较为平静,由于蒙气差,夜间光束质心相较于白日产生了整体偏移,此时一部分光斑在反射膜外,一部分光斑在反

射膜内,造成只有部分光斑被反射,相当于计算了部分光斑的质心,这会引入较大的计算误差。图 5(b)和图 6(b)中的决定系数  $R^2$  分别约为 0.88 和 0.94,从测量结果的统计分析来看,光束聚焦出射状态下的反演结果和 DIMM 测量反演结果较为一致。

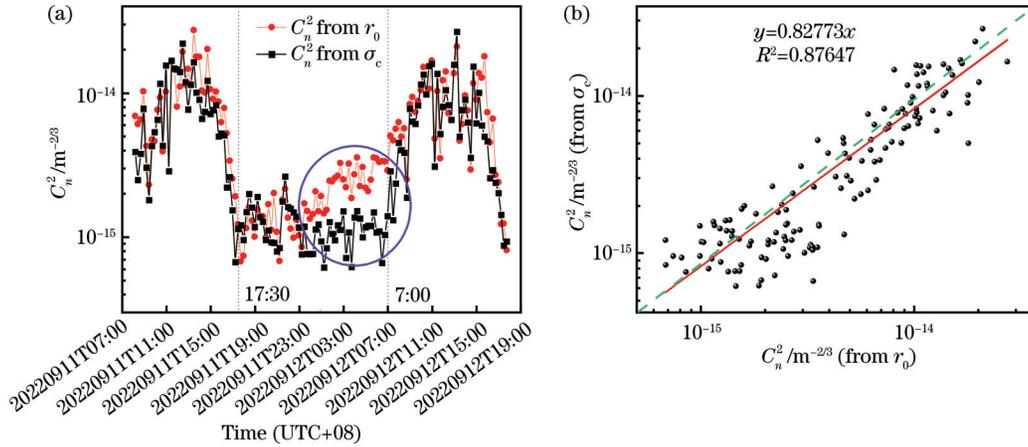


图 5 光束发散条件下质心漂移法与 DIMM 获得的  $C_n^2$  结果对比。(a)测量结果分布图;(b)两种测量结果的相关性分析

Fig. 5 Comparison of  $C_n^2$  inversion by centroid drift and DIMM under the circumstances of unfocused beam. (a) Distribution of measurement results; (b) correlation analysis between two measurements

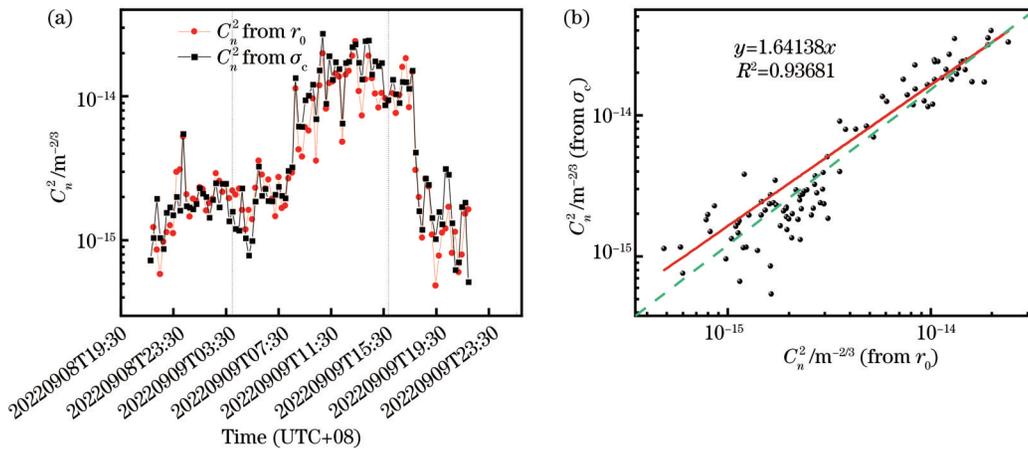


图 6 光束聚焦条件下质心漂移法与 DIMM 获得  $C_n^2$  结果对比。(a)测量结果分布图;(b)两种测量结果的相关性分析

Fig. 6 Comparison of  $C_n^2$  inversion by centroid drift and DIMM under the circumstances of focused beam. (a) Distribution of measurement results; (b) correlation analysis between two measurements

从利用远场散斑成像计算光束抖动反演  $C_n^2$  的结果和由大气相干长度  $r_0$  反演  $C_n^2$  的结果对比来看,这种单端收发测量系统简化了实验光路瞄准的复杂性,减小了外场测量时由外界环境导致光路偏移所造成的影响。具体表现在:激光发射系统和望远镜接收系统的相对位置固定,并且远场光斑图像不会因为振动而轻易偏离 CCD 接收视场。

## 5 结 论

在漫反射合作目标条件的折返路径 DIMM 理论上,将 3M 反光膜视为具有一定相关长度和均方根高度特性的反射面,利用 3M 反光膜反射率高、颗粒细、反光均匀和易拼接成大面积阵列的特点,将其作为主动照明的合作目标,进行 1.1 km 传输距离的大气相

干长度  $r_0$  测量实验。这种单端的  $r_0$  测量方法的测量结果与传统的测量方法相比,全天测量偏差的均值为 2.5%,但所测量的  $r_0$  数值略小于传统方法,这可能是由具有特殊性质的反射面引入额外的光斑质心计算误差导致的。该套单端收发一体的测量系统中激光发射系统和望远镜接收系统的相对位置固定,从而简化了实验光路瞄准的复杂性,结果表明:激光光束聚焦情况下绝对像运动法反演  $C_n^2$  的结果与利用传统大气相干长度仪反演  $C_n^2$  结果的决定系数  $R^2$  约为 0.94。这表明该套系统可以进一步简化,在有限的外场实验条件下实现光学湍流强度遥测。同时,这种收发一体的方法对消除平台振动的影响有优势,结合脉冲激光和高灵敏度相机,可以用来测量不同距离的大气相干长度。

设计该实验的主要目的是提出并检验具有稳定性

质的合作目标,验证折返路径传输条件下的光传输模型的有效性,从而探究单端配置情况下的光学湍流测量方法。从实验结果看,折返路径下的光传输到达角起伏与单程光传输到达角起伏之间的差异很小。进一步地,利用大口径望远镜对 1.1 km 处反射膜上光斑进行成像也可以获得路径上的光学湍流强度,这就为长程遥测光学湍流提供一种便捷的新方法。此外,还可以利用这套系统的成像功能,通过回波成像光斑探究激光大气传输的远场光斑能量分布特性。

## 参 考 文 献

- [1] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
Rao R Z. Modern atmospheric optics[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] Fried D L. Differential angle of arrival: theory, evaluation, and measurement feasibility[J]. Radio Science, 1975, 10(1): 71-76.
- [3] 饶瑞中. 现代大气光学及其在光电工程应用中的问题与展望[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20210818.  
Rao R Z. Analysis and prospect of modern atmospheric optics and its applications in optoelectronic engineering[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210818.
- [4] Belen'kii M S, Roberts D W, Stewart J M, et al. Experimental validation of the differential image motion lidar concept[J]. Optics Letters, 2000, 25(8): 518-520.
- [5] Gimmetstad G, Roberts D, Stewart J, et al. Development of a lidar technique for profiling optical turbulence[C]//Imaging and Applied Optics 2014, July 13-17, 2014, Seattle, Washington. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2014: JTu2C.1.
- [6] Falits A V, Banakh V A. Detection method of highly turbulent regions in the atmosphere using the backscattering enhancement effect[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11560: 115600X.
- [7] Jing X, Hou Z H, Wu Y, et al. Development of a differential column image motion light detection and ranging for measuring turbulence profiles[J]. Optics Letters, 2013, 38(17): 3445-3447.
- [8] 程知. 基于差分光柱激光雷达的大气湍流强度廓线探测方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.  
Cheng Z. Detection methods of atmospheric turbulence profile based on differential light column lidar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [9] Hanna R, Brown D M, Brown A M, et al. Measuring optical turbulence using a laser DIMM in support of characterization of imaging system performance[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11001: 1100110.
- [10] 王钰茹, 梅海平, 康丽, 等. 湍流大气中折返路径激光成像探测实验[J]. 中国激光, 2018, 45(4): 0401008.  
Wang Y R, Mei H P, Kang L, et al. Experimental investigation on retro-reflective laser imaging in turbulent atmosphere[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(4): 0401008.
- [11] 沈刘晶, 梅海平, 任益充, 等. 激光阴影法探测大气湍流中二维风矢量的可行性[J]. 中国激光, 2021, 48(13): 1304004.  
Shen L J, Mei H P, Ren Y C, et al. Feasibility of laser shadow method to detect two-dimensional wind vector in atmospheric turbulence[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(13): 1304004.
- [12] 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.
- [13] 李艳玲, 梅海平, 任益充, 等. 湍流大气中随机粗糙表面激光回波空间相干性仿真[J]. 物理学报, 2022, 71(14): 140201.  
Li Y L, Mei H P, Ren Y C, et al. Simulation of spatial coherence of laser echo light field from random rough surface in turbulent atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(14): 140201.
- [14] Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(11): 1427-1435.
- [15] Cavazzani S, Rodeghiero G, Capraro I, et al. Ground layer laser seeing meter[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2014, 126(937): 312-318.
- [16] Sarazin M, Roddier F. The ESO differential image motion monitor[J]. Astronomy and Astrophysics, 1990, 227: 294-300.
- [17] Fried D L. Optical resolution through a randomly inhomogeneous medium for very long and very short exposures [J]. Journal of the Optical Society of America, 1966, 56(10): 1372-1379.
- [18] Banakh V A, Razenkov I A. Refractive turbulence strength estimation based on the laser echo signal amplification effect[J]. Optics Letters, 2016, 41(19): 4429-4432.

## Fold-Path Atmospheric Coherence Length Measurement by Laser-Active Illumination Imaging

Zhang Junxin<sup>1,2,3</sup>, Mei Haiping<sup>1,3\*</sup>, Ren Yichong<sup>1,3</sup>, Rao Ruizhong<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Optics, Chinese Academy of Sciences, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

<sup>3</sup>Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China

### Abstract

**Objective** Atmospheric turbulence causes laser scintillation, beam wanders, beam spreading, and angle-of-arrival fluctuation. The atmospheric coherence length ( $r_0$ ) proposed by Fried is a parameter related to the wavefront-phase structure function, an important parameter for characterizing the intensity of atmospheric optical turbulence. Hence, ground-based *in-situ* measurement of  $r_0$  is of great significance for studying the optical wave propagation effect in the

atmosphere. The differential image motion monitor (DIMM), a traditional measurement method of  $r_0$ , has been widely studied in that it is capable of avoiding measurement errors caused by the vibration of the observation and the tracking equipment and unstable tracking. However, in the scene of long-distance optical turbulence measurement, DIMM needs a power supply and working staff to maintain light beacon images in the center of CCD image sensors. In this study, the original passive beacon is converted into an active illumination beacon to realize single-ended optical turbulence measurement inspired by DIMM. This lidar-style  $r_0$  measurement still faces the uncertainty of reflecting media in atmospheric turbulence. Therefore, this paper proposes a fold-path  $r_0$  measurement method based on laser-active illumination of a 3M reflective film. With the help of a large-area 3M film, the observed area and distance can be enlarged, and the laser source and CCD imaging system can be integrated into one single-ended unit. Upon the construction of this new layout experiment system, the results of the fold-path  $r_0$  measurement can help validate the fold-path optical wave propagation model and explore long-range single-ended optical turbulence telemetry.

**Methods** First, the theory of atmospheric coherence length on the fold path link is summarized. Then, the results of the all-day laser-active illumination imaging data are analyzed through the switching of the active illumination beacon and conventional 650 nm laser beacon for the measurement of  $r_0$ . In addition, the comparative experiments of the traditional DIMM and fold-path DIMM are conducted on a 1.1 km optical propagation link. The system is mainly composed of the YSL-SC-PRO-M fiber laser, 3M microcrystal prism array, beam expander system, Meade ACF14F8 telescope (the receiver's aperture is  $\Phi=355$  mm, and its sub-aperture is  $\Phi=120$  mm), and Allied Vision GT 1920 CCD. One DIMM device is adopted to switch between different beacons to measure  $r_0$ , so as to eliminate the measurement error caused by different DIMM devices. Echo beam wave wander experiments are carried out on the same 1.1 km optical link with an atmospheric coherence meter recording atmospheric optical turbulence conditions to validate the jitter turbulence inversion methods of the active illumination beacon. A CMOS camera (with a resolution of 1936 pixel $\times$ 1096 pixel) coupled with a telescope ( $\Phi=200$  mm,  $f=1200$  mm) is utilized to record the laser speckle images. A 10 nm optical filter is set up in front of the camera to reduce the sky background radiance. All the above units are mounted on a sturdy platform. A square 1 m 3M film pasted on a flat carbon fiber board is placed at a certain distance perpendicular to the laser beam. After that, turbulence-degraded laser speckle images are obtained by the fold path imaging method, and the multi-day laser-active illumination imaging data is analyzed.

**Results and Discussions** Comparative statistical analysis of fold-path DIMM and traditional DIMM measurement results is shown in Fig. 3. The data of the two different methods exhibit good consistency, and fold-path DIMM can also reveal the turbulence strength variation at the transition moment. The comparison with another traditional DIMM measurement result shows that the deviation of results obtained by the two methods is about 2.5%. The measurement result of fold-path DIMM is slightly smaller than that of traditional DIMM (Fig. 4), which means the laser speckle reflected by the prisms embedded in the film has been severely degraded. Thus, the backward transmitted laser speckle should be non-coherent differing from the coherent beacon employed in traditional DIMM. The comparison results of  $C_n^2$  inversion by centroid drift and DIMM under the circumstances of unfocused and focused beams indicate that the results of the focused beam are consistent with those of DIMM measurement (Figs. 5 and 6). The coefficient of determination  $R^2$  under the unfocused condition is 0.88 while that under the focused condition is 0.94. Therefore, this paper presumes that a large laser divergence angle results in laser energy missing at the observing termination COMS, which is not reflected by 3M films.

**Conclusions** In this paper, the 3M reflective film is regarded as a reflective surface with a certain correlation length and root-mean-square height characteristics. With high reflectivity, fine particles, uniform reflection, and easiness of being spliced into a large-area array, the 3M reflective film is employed as a cooperative target of laser-active illumination imaging. Compared with the results of the traditional DIMM, those of fold-path DIMM have an average deviation of 2.5% throughout the day because backward transmitted laser speckles shall be considered non-coherent. The relative position of the laser emission system and the telescope receiving system is fixed, which simplifies the complexity of the experimental optical path aiming. The results show that the coefficient of determination of the image motion method is ca. 0.94, which allows the system to be further simplified for the telemetry of optical turbulence. Additionally, this transceiver method can eliminate the influence of platform vibration. Combined with a pulsed laser and a high-sensitivity camera, it can be applied to measure the atmospheric coherence length at different distances. Relevant experimental results are conducive to validating the fold-path optical wave propagation model and exploring long-range single-ended optical turbulence telemetry.

**Key words** atmospheric optics; optical turbulence; atmospheric coherence length; fold-path optical wave propagation; 3M reflective film