

极小盲区双视场沙氏激光雷达研究

陈和¹, 徐清玥¹, 郭磐^{1*}, 陈思颖¹, 郝伟¹, 胡芮¹, 李鑫^{2**}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²中国人民解放军军事科学院军事医学研究院, 北京 100071

摘要 沙氏激光雷达是一种可实现近距离高分辨率探测的系统,而室内气溶胶的扩散研究对其探测范围提出了严苛的要求。以沙氏激光雷达技术为基础,提出对远场和近场的气溶胶后向散射信号进行同时探测的双视场技术方案。该方案通过融合双视场的信号获取极小盲区的全路径信号廓线。在室内环境下,利用人工施放的气溶胶对所研制的双视场沙氏激光雷达系统进行了测试实验。实验中,在路径末端 7.1 m 处设置硬靶,提供边界值标定,从而反演得到气溶胶消光系数。实验结果表明:相比单视场探测系统,双视场探测系统的盲区由 1.26 m 缩小到 0.36 m;同时,系统距离分辨率在最近处为 0.1 mm,在最远处为 15 mm;通过对两个视场信号的定标融合,全距离范围内气溶胶反演结果具有较好的时空连续性。

关键词 遥感; 沙氏激光雷达; 双视场; 气溶胶探测; 盲区

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230531

1 引言

在生产生活中,管道破损、火灾、爆炸等意外事故导致的有害气体泄漏会对人员健康和环境安全产生严重影响^[1]。因此,研究气溶胶输运、扩散和沉积等物理过程和运动规律^[2],对采取有效的室内通风预防措施和建立应急响应机制具有重要意义^[3]。虽然数值模拟可以为室内气溶胶流场分析提供有力的支撑,但是真实环境中存在的随机因素难以量化^[4],仍然需要通过实验测量来进一步对气溶胶分布和扩散规律开展研究。接触式探测方法^[5-6]可以对空气中的气溶胶粒子进行采样分析,但受到采样频率和可部署点位数量的制约,数据的空间分辨率十分有限;高速摄影、PLIF 等片状激光成像方法^[7-9]受限于拍摄景深,探测范围只能达到几十厘米,并且强度信息难以转换成光学参数,不能实现定量探测;脉冲激光雷达探测方法^[10-12]的盲区和过渡区一般达几十米,且距离分辨率受到纳秒级的激光脉冲宽度和采集设备的响应时间的限制。对于室内环境的气溶胶探测,探测区域尺度一般为数米;同时,小区域的探测也对距离分辨率提出了更高的要求。

沙氏激光雷达是一种以沙氏成像原理为基础的新型激光雷达^[13-14],使用连续激光器作为激光光源,图像传感器作为探测器,相比脉冲激光雷达,极大地降低了系统的成本,并且具有结构紧凑和体积小的优点。近

年来,沙氏激光雷达在大气探测领域得到了迅速的发展,其中大连理工大学梅亮团队的相关研究在国内外均处于领先地位。从 2016 年至今,他们在研制单波长大气探测沙氏激光雷达^[15]的基础上进行不断改进,扩展波长数量(405/520/808 nm)^[16]、增设偏振通道^[17]、增加扫描功能^[18]等,为研究大气气溶胶粒子特性扩充了多种技术手段。目前大气探测沙氏激光雷达通常针对室外大气的远程探测,以望远镜焦距 800 mm 为例,最远探测距离一般为 5~7 km,通过改变光学元件的参数(焦距 100~200 mm)和沙氏成像参数,沙氏激光雷达对短距离探测能够达到厘米甚至毫米级的分辨率,因此其可用于近程高分辨探测领域。2016 年,瑞典隆德大学研制了用于燃烧诊断的沙氏激光雷达,其探测距离范围为 1.87~5.30 m,使用的线阵 CCD 最高扫描速度可达到 4 kHz,实现对燃烧过程的动态捕捉^[19]。2020 年,中国海洋大学研究团队设计了水体沙氏激光雷达系统,其测量距离范围为 1.31~4.54 m,在长度为 1.5 m 的水槽内测量了三种水体的后向散射强度^[20]。2020 年,华南师范大学研制了用于水下的光谱沙氏激光雷达系统,其实现了对 2.7~5 m 范围内水生生物的光谱探测^[21]。

虽然沙氏激光雷达较传统激光雷达可以大大缩小探测盲区,但是在上述的近程沙氏激光雷达的应用中,盲区还是具有较大的占比。不过在上述应用中,待测

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-03-15; 录用日期: 2023-04-24; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(42005137)

通信作者: *guopan@bit.edu.cn; **285454981@qq.com

目标的散射能力远强于大气,将探测目标限制在探测范围内即可不考虑盲区的影响。然而,对于密闭或半开放空间内气溶胶分布及变化的研究,气溶胶的扩散范围覆盖整个空间,盲区内气溶胶信息的缺失将导致数据完备性无法满足,造成全路径气溶胶光学参数的反演误差^[22],影响气溶胶分布扩散规律的研究。

为满足室内气溶胶分布研究对小盲区和高分辨率的需求,本文设计了极小盲区的双视场沙氏激光雷达。系统采用两个接收视场,分别接收远场和近场的气溶胶散射信号,在拓展近场探测边界的同时,保持沙氏激光雷达短距离探测的高分辨率优势。开展气溶胶探测实验,对系统的可行性进行验证,设置烟花作为气溶胶施放源,硬靶提供边界值标定条件,利用 Klett 法反演气溶胶消光系数,验证双视场沙氏激光雷达的全路径定量探测能力。

2 极小盲区双视场沙氏激光雷达

2.1 原理

作为沙氏激光雷达的理论基础,沙氏成像原理可表述为:当物面、像面及透镜平面相交于一条直线时,可以对物面清晰成像,并且具有无穷远的景深。沙氏激光雷达使用连续激光器作为光源,利用透镜接收激光与粒子相互作用产生的米散射回波。不同探测距离处的后向散射光在经过接收透镜后,以不同入射角度会聚到倾斜放置的面阵图像传感器的不同位置,即可依据角度分辨实现距离分辨。

如引言所述,本文设计的沙氏激光雷达是针对近距离(室内环境,通常 10 m 内)的气溶胶进行高分辨率探测的。而仅使用单视场的沙氏激光雷达进行探测时,无论如何调整参数,盲区面积均会达到室内探测范围的 15% 左右^[23],从而导致近场气溶胶信息的缺失,影响定量探测的准确性。因此,在主视场的基础上,增

加副视场补偿其近场盲区,从而尽可能实现对近距离气溶胶的全覆盖式探测,如图 1 所示。

沙氏激光雷达中图像传感器的像素点位置与探测距离的关系的表达式为

$$z_i = \frac{L_i [L_{n,i} + P_{l,i} (\sin \theta_i - \cos \theta_i \tan \varphi_i)]}{L_{n,i} \tan \varphi_i + P_{l,i} (\cos \theta_i + \sin \theta_i \tan \varphi_i)}, i = 1, 2, \quad (1)$$

式中:下标 1 代表主视场,即远场;下标 2 代表副视场,即近场; $L_{n,i}$ 为图像传感器中心到透镜平面的距离; φ 为接收透镜的偏转角; θ 为图像传感器相对透镜的倾角; L 代表接收透镜与激光光束中心的距离; P_l 为每个像素点相对中心像素点的位置; z 为探测距离,探测距离的起点是透镜中心在激光束上的投影,在图 1 中标注为 G 。两视场探测起点的间距为 l_{12} 且 $z_1 - z_2 = l_{12}$ 。本文以主视场的探测起点 G_1 作为基准点。对式(1)进行微分,可以进一步得到距离分辨率 dz 。

沙氏激光雷达的回波信号功率 $P(z)$ 遵循激光雷达方程:

$$P(z) = C \frac{O(z) dz}{z^2} \beta(z) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z') dz' \right], \quad (2)$$

式中: C 为与距离无关的常数项,包含激光功率、接收透镜面积、光学效率等系统参数; $O(\cdot)$ 为几何重叠因子; $\beta(\cdot)$ 为气溶胶后向散射系数; $\alpha(\cdot)$ 为大气消光系数。与传统脉冲激光雷达相比,沙氏激光雷达的距离分辨率 $dz \propto z^2$, 结合式(2)可知,其回波信号强度不随距离平方衰减,并且沙氏激光雷达的 $O(z)$ 可看作 1,于是可以将激光雷达方程简化为系统常数 K 、后向散射系数 $\beta(z)$ 及大气透过率项的乘积,则本文中的沙氏激光雷达方程^[24]可以写作

$$P_i(z_i) = K_i \beta(z_i) \exp \left[-2 \int_0^{z_i} \alpha(z') dz' \right]. \quad (3)$$

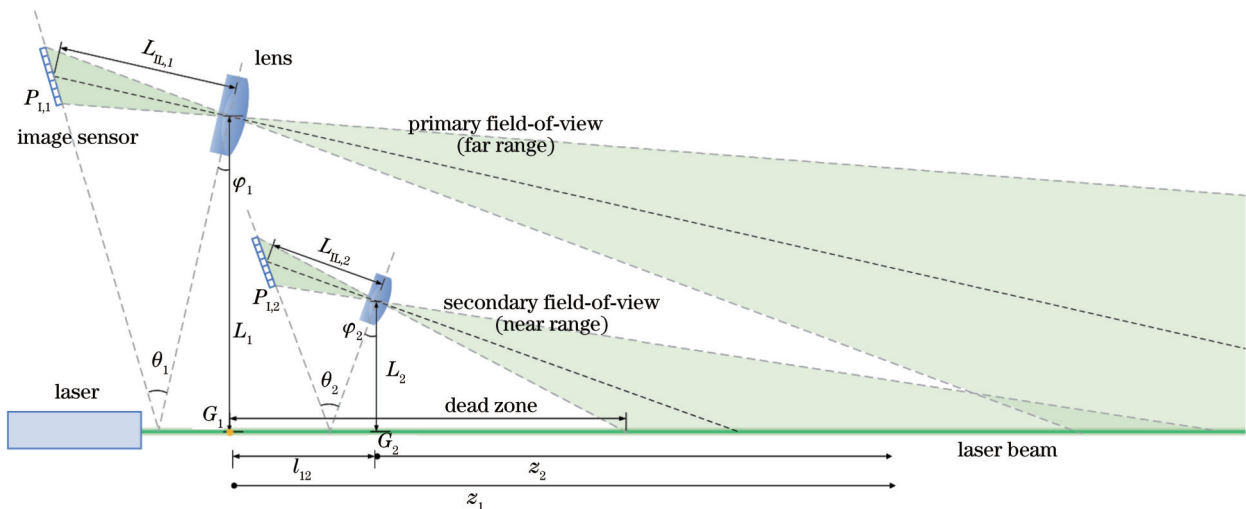


图 1 双视场沙氏激光雷达探测原理

Fig. 1 Principle of the dual-FOV Scheimpflug lidar

2.2 系统设计

所设计的双视场沙氏激光雷达以室内气溶胶探测为应用场景。室内空间边界限制了远端探测边界,而盲区限制了近端探测边界。将主视场远端探测距离设置为 7.5 m,在主视场近端盲区的基础上进一步调整副视场参数,使系统的整体盲区尽可能小。

双视场沙氏激光雷达发射连续激光,与待测气溶胶作用产生米散射,不同距离范围的后向散射光分别由主副视场的透镜接收,由 CMOS 相机同步采集信号,形成光束图像。系统使用 520 nm 激光器作为发射光源。在该波段 CMOS 传感器的量子效率较高,有利

于系统信噪比的提升。两视场均使用镀膜双胶合透镜,主视场透镜口径 $D_1=50$ mm,焦距 $f_1=100$ mm;副视场透镜口径 $D_2=25$ mm,焦距 $f_2=45$ mm。虽然透镜尺寸 $D_2 < D_1$,但是距离分辨率与距离平方的比值 $dz_2/z_2^2 > dz_1/z_1^2$,所以在式(3)中两视场的系统常数 K 基本相当,理论计算的比值 $K_2/K_1=1.11$ 。两视场使用参数相同的 CMOS 相机,型号为海康 MV-CA050-20GM,分辨率为 2592×2048 ,像素尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$,两视场均满足像素点景深大于像素点距离分辨率的条件^[20],即成像弥散圆小于单个像素点大小。系统参数如表 1 所示。

表 1 双视场沙氏激光雷达系统参数

Table 1 System specification of the dual-FOV Scheimpflug lidar

Parameter	Specification		
	Primary FOV (far range)	Secondary FOV (near range)	
Laser (in common)	Type	Laser diode	
	Wavelength	520 nm	
	Power	150 mW	
	Beam diameter at the aperture	2 mm	
	Beam divergence	0.7 mrad	
Receiver	Type	Doublet lens	Doublet lens
	Diameter	$D_1=50$ mm	$D_2=25$ mm
	Focal length	$f_1=100$ mm	$f_2=45$ mm
Detector (same parameter)	Type	CMOS	
	Pixel resolution	2592(H) \times 2048(V)	
	Pixel size	$4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$	
	Dynamic range	8 bit	
	Readout rate	21.6 frame/s	
Scheimpflug condition	Tilt angle	$\theta_1=34^\circ$	$\theta_2=32^\circ$
	Swing angle	$\varphi_1=4.0^\circ$	$\varphi_2=8.3^\circ$
	Distance between lens and object plane	$L_1=153$ mm	$L_2=77$ mm

系统的整体尺寸由主视场决定。为了避免与主视场器件在结构上产生冲突,在最小化盲区的基础上对副视场的参数优化了布局设计,最终使系统的外部尺寸不大于 $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$,实现了系统的小型化。

根据式(1)得到的两视场的像素-距离关系如图 2(a)所示,可以看到主视场探测范围为 1.26~7.51 m,副视场探测范围为 0.36~2.23 m。副视场可以有效填补盲区,拓展近场探测边界;而两视场的探测重叠区域可以用于对比验证以及信号拼接。图 2(b)为两视场的探测距离-距离分辨率关系,虽然沙氏激光雷达的距离分辨率随距离平方增加而迅速增大,但系统的理论距离分辨率在探测范围最远处也小于 15 mm,可以实现短距离内的精细探测。设计中使用的两个相机的靶面尺寸均为 12.4 mm,与直接采用 29.9 mm 大靶面的传感器相比(盲区约 0.6 m),仍然具有小盲区的优势。

3 极小盲区双视场沙氏激光雷达气溶胶探测

3.1 实验方案

为验证双视场沙氏激光雷达系统的定量化探测能力,设计如图 3 所示的气溶胶探测实验。图 3 中使用阴影标注了主副视场的探测视场范围,可看到副视场有效弥补了主视场的盲区,并且有部分探测重叠区域。

实验在夜间进行,与仪器相距 4.5 m 处放置烟花作为气溶胶源,7.1 m 处为硬靶。为了防止燃烧火光对信号的干扰,使用遮光罩遮住烟花光源,仅收集烟花燃烧产生的烟尘信号,遮光罩洞口与激光束的垂直距离为 0.3 m。硬靶表面贴有黑色绒面纸,以避免硬靶散射过强导致 CMOS 相机饱和。在采集软件中设置触发信号,使两个 CMOS 相机同步采集数据图像。

在无气溶胶施放、大气能见度条件较好时,可以认

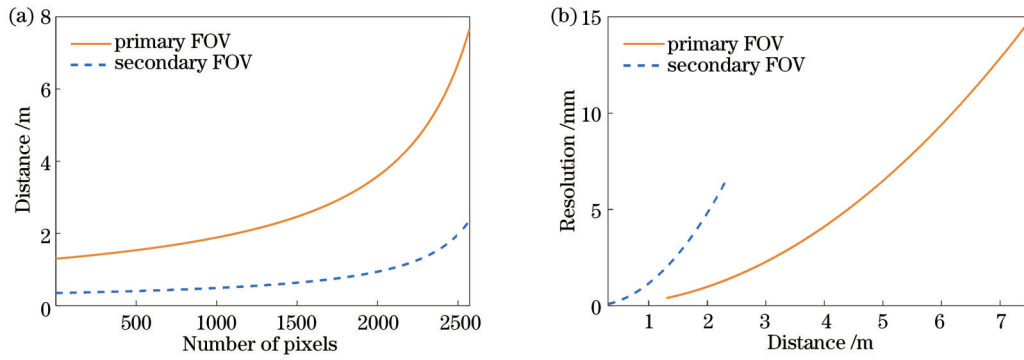


图 2 系统探测距离及分辨率。(a) 像素点与探测距离关系;(b)探测距离与距离分辨率关系

Fig. 2 Measurement distance and range resolution of the lidar system. (a) Pixel-distance relationship; (b) distance-resolution relationship

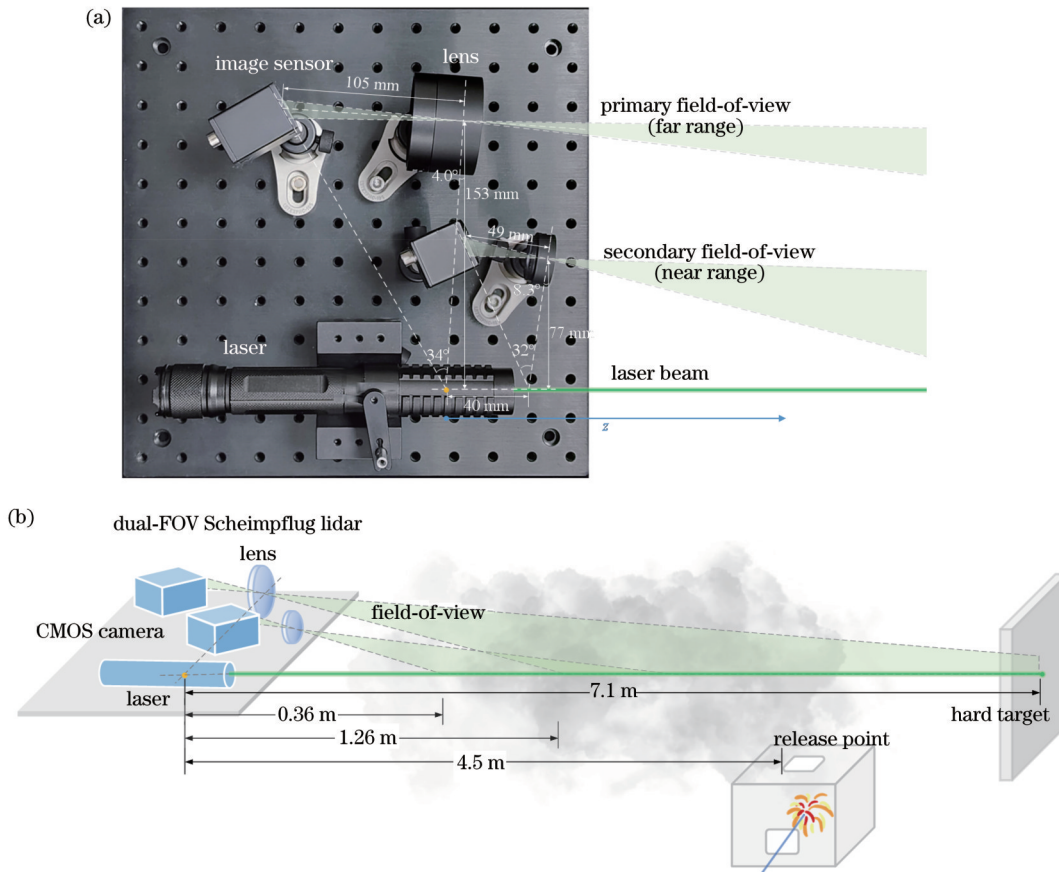


图 3 系统结构及实验方案。(a) 双视场沙氏激光雷达结构;(b) 气溶胶探测实验示意图

Fig. 3 System configuration and measurement arrangement. (a) Photograph of the dual-FOV Scheimpflug lidar; (b) schematic of the aerosol detection experiment

为大气透过率接近 1;而在气溶胶施放过程中,激光在穿过浓烟的过程中受到衰减,硬靶处的信号强度变化反映了路径上气溶胶光学厚度的变化。曝光时间太短会导致图像信噪比过低,而曝光时间过长容易使 CMOS 相机饱和,经过多次实验测试,设置系统曝光时间为 1.5 ms,可以保证在测量过程中硬靶与气溶胶施放点的信号均不饱和。

在上述的气溶胶探测实验中,探测总时长 81 s,共采集 1752 组数据。图 4(a)和图 4(b)给出了副视场和

主视场采集到的一组原始数据图像,图 4(b)中的两处标记点分别与图 3 中的施放点和硬靶位置对应。可以看到图 4(a)和图 4(b)中激光束的有效信号集中在虚线框内,占据垂直方向的宽度为 120 像素,另外还能看到虚线框外背景杂散光带来的噪声非常均匀,因此可以认为信号条带与其邻近的条带所接收到的背景光相同。于是,对宽度为 120 像素的光束条带信号进行纵向累加^[12-13]并取均值后,扣除邻近条带的背景均值信号,再经 Savitzky-Golay 滤波^[25]后获取两视场的信号

强度廓线,如图 4(c)和图 4(d)所示。从图 4 可以看出,自然气溶胶的信号强度几乎为 0,而人工施放的气溶胶可以产生较为明显的信号,这是由于施放的气溶胶浓度远高于自然气溶胶,受限探测器的动态范围,在

曝光时间较短的情况下自然气溶胶无法达到探测器的灵敏度下限,且因为散射信号强度远高于背景噪声水平,所以即使未使用滤光片,背景杂散光的影响也并不显著。

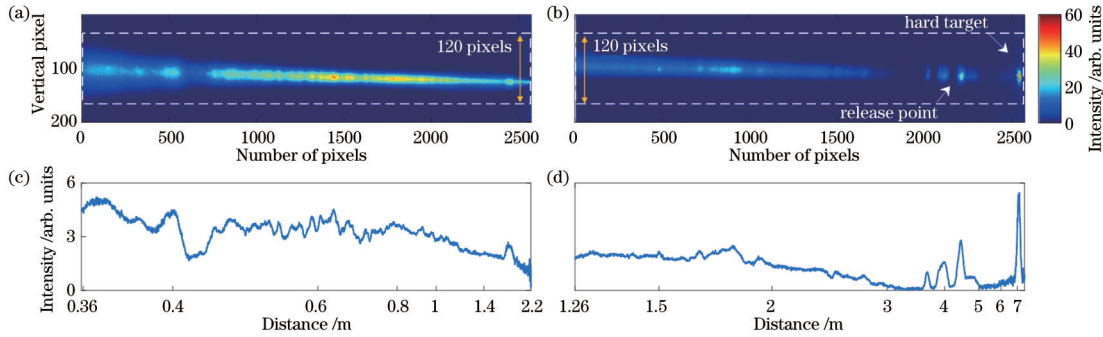


图 4 光束图像及后向散射强度廓线。(a)副视场图像;(b)主视场图像;(c)副视场距离-强度廓线;(d)主视场距离-强度廓线
Fig. 4 Images of laser beam and backscattering intensity profiles. (a) Image of secondary FOV; (b) image of primary FOV; (c) distance-intensity profile of secondary FOV; (d) distance-intensity profile of primary FOV

3.2 双视场数据预处理

由于主副视场独立接收回波信号,需要对信号进行拼接,以获得全路径的信号廓线,本处理过程可分为信号强度修正、距离分辨率插值和拼接融合 3 个步骤。

首先通过标定实验获取两视场的系统常数比值。在空气良好的天气条件下,进行长曝光水平大气探测实验,近程探测时大气分子和气溶胶的消光可以忽略,两视场获取的信号强度廓线近似为常函数,于是两视场平均信号的比值即为系统常数的比值,即 $\text{mean}[P_2(z)/P_1(z)] = K_2/K_1 = 1.09$,与理论计算值

1.11 接近,误差可能是因为未考虑到两视场相机倾角不同所导致的量子效率差异。利用系统常数的比值对两视场信号强度进行修正,实现两视场信号强度的数值统一。经过像素点与距离的转换后,典型时刻(施放气溶胶后第 32.7 s)的主副视场的修正后信号强度如图 5(a)所示。两视场探测重叠区间为 1.26~2.23 m。在所有廓线数据中,两视场在重叠区间的信号强度相关系数 R 的均值为 0.872,证明了主副视场距离关系的准确性,且信号强度具有较好的相关程度和一致性。

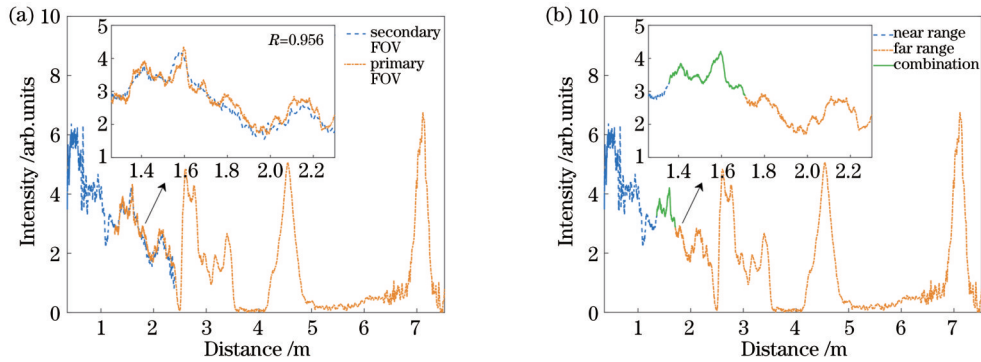


图 5 拼接前后的信号强度廓线。(a)主副视场的独立信号;(b)双视场拼接信号
Fig. 5 Intensity profile of the signal before and after splicing. (a) Separate signals of primary FOV and secondary FOV; (b) combined signal of dual-FOV

之后需要进行分辨率的插值匹配。由于沙氏激光雷达的距离分辨率不均匀,在重叠区间内主视场的距离分辨率小于副视场,如图 2(b)所示,所以需要对副视场信号进行插值,使其与主视场分辨率匹配。最后是数据的拼接融合。设置窗口宽度为 500 个点,在重叠区间内搜索一段相关系数最高的区域,即为最佳拼接区间^[26-27]。最终选取的最佳拼接区间为 1.37~1.57 m,所有廓线在该区间的相关系数的平均值为

0.81。拼接后的廓线如图 5(b)所示,近端使用副视场信号,远端使用主视场信号,为保证拼接后的信号在衔接处平滑过渡,拼接区间的信号值使用两视场信号的平均值。

经过数据预处理后,获取的信号强度的时空演化过程如图 6 所示。在采集开始的同时点燃烟花,气溶胶从施放点开始扩散,燃烧持续 32 s;燃烧结束后,气溶胶逐渐扩散沉降。在 7.1 m 附近的信号来源于硬

靶,可以看出,在气溶胶浓度变化的不同阶段,硬靶处的信号强度也发生了非常显著的变化。从图 6 也可以初步看到,通过双视场沙氏激光雷达系统,成功实现了

气溶胶的扩散、停留以及消散过程的观测。双视场的融合探测显著缩小了系统的整体盲区,且主副视场的拼接区域过渡自然,具有很好的空间连续性。

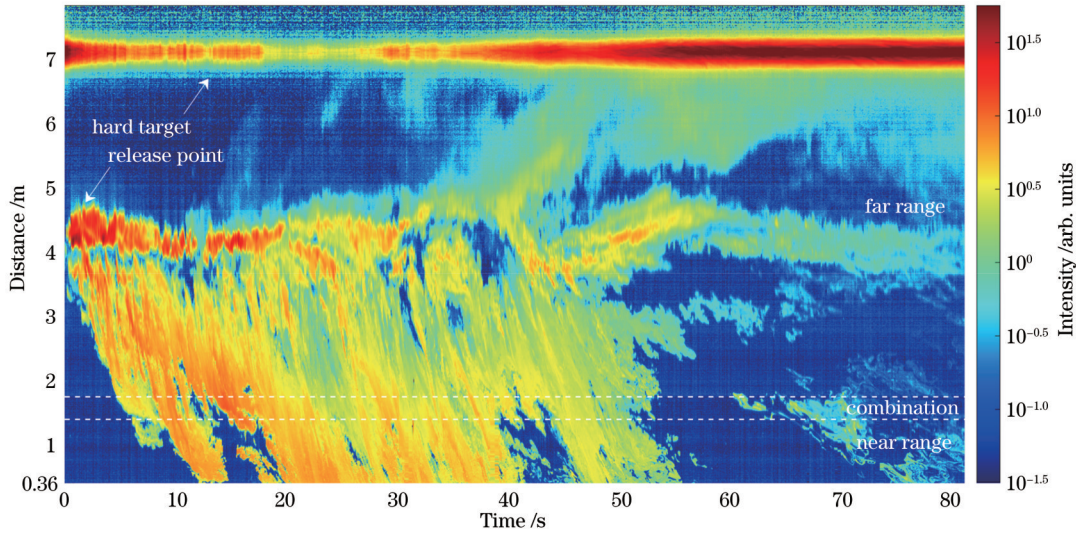


图 6 双视场沙氏激光雷达探测的气溶胶后向信号强度时空图

Fig. 6 Time-space map of aerosol backscattering signal measured by the dual-FOV Scheimpflug lidar

3.3 反演和结果分析

利用大气气溶胶反演算法,可以求解气溶胶消光系数, Klett 方法是最常用的方法之一,适用于气溶胶浓度较大的情况。该方法假设后向散射系数与消光系数之间存在指数关系 $\beta = \text{const} \cdot \alpha^k$, 其中 k 与波长和实际的大气光学特性有关,取值范围为 0.67~1.0,通常取经验值 1.0。于是大气消光系数^[28]可以表示为

$$\alpha(z) = \frac{\exp[(S - S_0)/k]}{\left\{ \alpha_0^{-1} - \frac{2}{k} \int_{z_0}^z \exp[(S - S_0)/k] dz' \right\}}, \quad (4)$$

式中: $S = \ln P(z)$, 是回波信号强度的对数值; z_0 和 α_0 分别为参考点的位置和该点的消光系数值。传统脉冲雷达一般选取不含气溶胶的洁净层作为边界值点,但对于近程探测,洁净层法将不再有效。探测路径的末端设置了硬靶,不同气溶胶浓度产生的大气衰减不同,于是硬靶处信号强度也随之发生变化,与大气洁净时的硬靶处强度相除即可得到路径透过率。当路径透过率已知时,边界值具有唯一解,因此可以使用透过率约束法对边界值进行迭代^[29-30],进而求取气溶胶消光系数廓线。

图 7 给出了 3 个典型时刻的信号强度及气溶胶消光系数廓线。施放刚开始时(第 2.2 s),气溶胶集中在施放点 4.5 m 附近,峰值位置的消光系数达到 1.2 m^{-1} ;施放结束后(第 36.6 s),气溶胶已经扩散至整条探测路径,路径传输透过率(T)低至 13.1%,峰值位置仍出现在施放点附近,但峰值消光系数已明显降低;施放结束后一段时间(第 53.7 s),大部分气溶胶已经缓慢散去,路径透过率回升至 60.6%,但施放点仍有

少量气溶胶飘出。反演结果表明,在不同气溶胶浓度条件下,双视场沙氏激光雷达的探测结果均能够较好地反映气溶胶的变化趋势,并且拼接区域的反演结果也具有连贯性。

图 8 展示了透过率曲线和反演的消光系数的时空分布。刚开始时仅施放点附近的信号较强;之后在空气对流的影响下,气溶胶快速扩散至 0~4 m,透过率在 10 s 内急剧下降至 10%,消光系数峰值达到 3.2 m^{-1} ;随着气溶胶的持续施放,在空气中形成较大范围的气溶胶场,气溶胶消光系数趋于稳定,透过率保持在 3%~15%,直至 29 s 时燃烧结束;燃烧停止后,施放点处消光系数明显减小,路径透过率逐渐上升,同时由于风场变化,气溶胶也逐渐向 5~6.5 m 扩散;最后,探测路径上的气溶胶消光系数不断减小,仅气溶胶施放口还有少量气溶胶产生,透过率回升至 90% 以上。在整个探测过程中,消光系数峰值始终出现在气溶胶施放口附近,与实际情况相符;虽然相机帧率仅为 21 frame/s,曝光时间为 1.5 ms,有效探测时间占比很低,但在时空图未出现明显的中断,表现出较好的时间连续性。

在图 8 右侧标注了近场、远场和拼接区域的距离范围。在 15 s、43 s、70 s 等时刻,近场约 1 m 处的气溶胶消光系数均出现了明显的跃变,正是由于副视场对近场探测范围的延伸,才得以获取近场丰富的气溶胶信息,能够为空气动力学、流体力学等气溶胶扩散模型研究提供更完整的数据支持。

为了验证反演结果的可靠性,对消光系数和信号强度的相关性进行分析。在 0.36 m 处(接近探测近

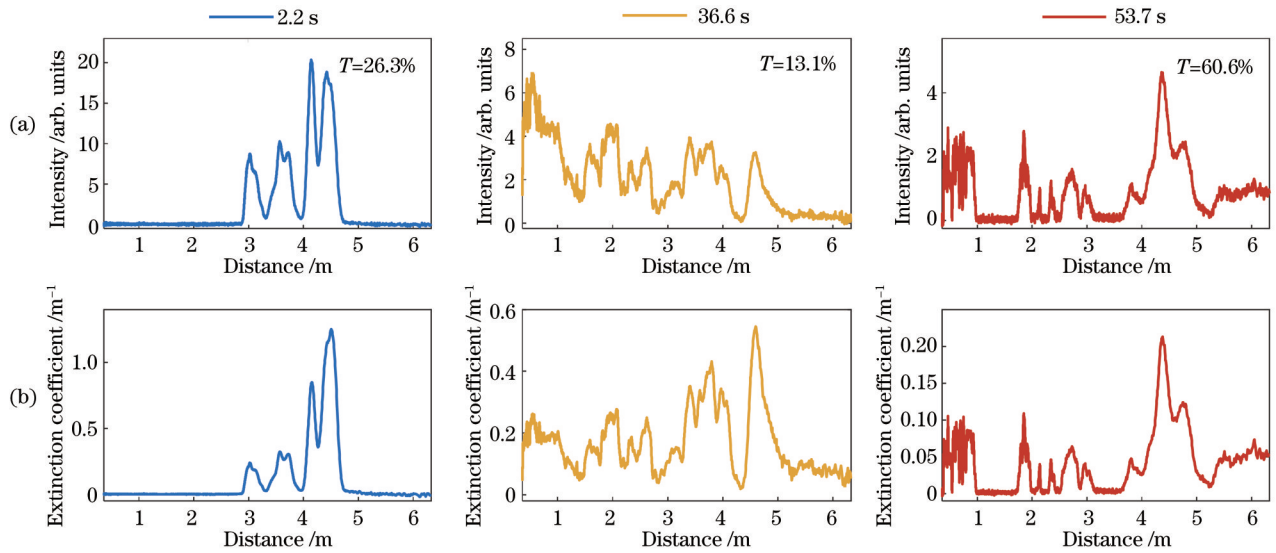


图 7 典型时刻的信号强度及气溶胶消光系数反演结果。(a)信号强度廓线;(b)消光系数廓线

Fig. 7 Intensity profiles and inversion results of aerosol extinction coefficient at typical time. (a) Intensity profiles; (b) aerosol extinction coefficient profiles

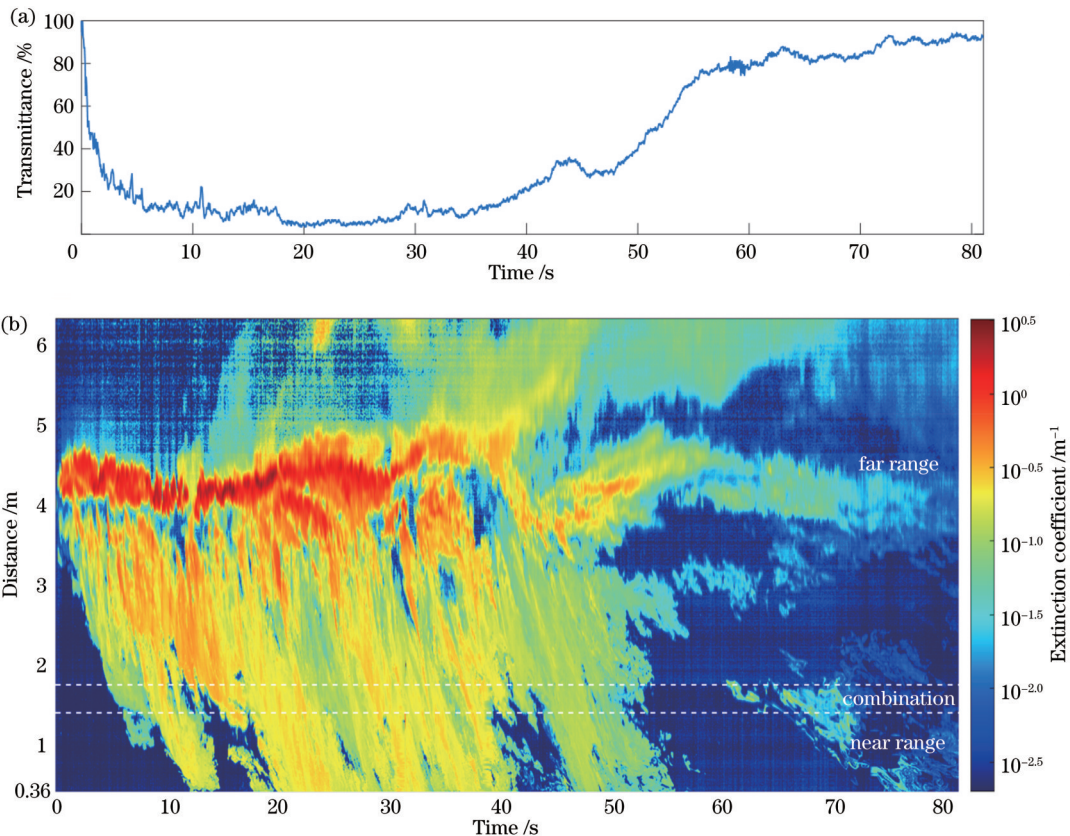


图 8 施放的气溶胶的时空变化过程。(a)透过率;(b)气溶胶消光系数时空图

Fig. 8 Temporal-spatial variation of released aerosols. (a) Transmittance; (b) time-space map of aerosol extinction coefficient

端), 激光传输距离较短, 可以几乎不考虑衰减, 若假设激光雷达比(消光系数与后向散射系数的比值)相同, 则信号强度与消光系数之间应当存在近似线性的关系。将 0.36 m 处的所有信号强度值及对应的消光系数绘制成散点图, 以强度值 4 为气溶胶浓度值高低的分界点, 如图 9 所示, 并使用线性函数分别对低浓度情

况、高浓度情况及全部散点进行拟合。从图 9 可以看到, 气溶胶浓度较低时的拟合函数(点划线)更加接近正比例函数, 且信号强度与消光系数的相关系数达到 0.993; 而气溶胶浓度较高时, 拟合函数(虚线)与坐标轴的交点也偏离原点, 相关系数则降至 0.828。这是由于反演方法依赖作为边界值约束条件的路径透过

率,而系统仍存在 0.36 m 的盲区,盲区内气溶胶引起的衰减会在反演中引入误差,因而当盲区内的气溶胶浓度较高而产生了更剧烈的衰减时,散点与线性函数曲线的偏移也相应增大。总体来说,信号强度与反演的消光系数具有很好的线性度(实线),相关系数 R 达到 0.991,证实了利用硬靶信号强度作为边界值约束条件的可行性,验证了双视场沙氏激光雷达探测数据的可靠性和准确性。

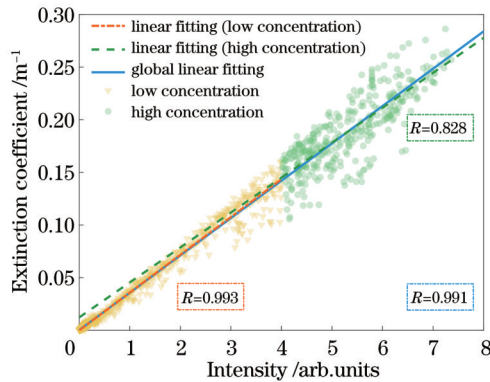


图 9 探测距离 0.36 m 处信号强度与消光系数的散点分布及线性拟合

Fig. 9 Scatter plot and linear fitting of signal intensity and extinction coefficient at a distance of 0.36 m

4 结 论

以沙氏激光雷达技术为基础,针对室内近程气溶胶探测,提出了极小盲区双视场沙氏激光雷达系统设计方案,并完成系统的集成和气溶胶实验。利用双视场沙氏激光雷达对施放的气溶胶进行探测,通过信号融合拼接获取全廓线信号。实验结果表明,系统探测范围覆盖 0.36~7.1 m,相比单视场结构,将盲区缩短了 0.9 m,有效地补充了近场的气溶胶扩散及变化的信息;同时,系统的距离分辨率可达 0.1~15 mm,具有盲区极小、分辨率极高的优势。通过硬靶信号提供边界值约束条件,无须边界值假设即可实现动态的自标定,使用 Klett 法反演气溶胶消光系数廓线,反演结果具有较好的空间连续性和时间连续性,实现了对近程气溶胶分布的高精度量化反演。双视场沙氏激光雷达具有小盲区高分辨优势,具备对近程气溶胶的精细探测能力,为小范围的气溶胶流场探测提供了新的技术手段。

参 考 文 献

[1] Liu Z J, Zhuang W B, Hu X Q, et al. Effect of equipment layout on bioaerosol temporal-spatial distribution and deposition in one BSL-3 laboratory[J]. *Building and Environment*, 2020, 181: 107149.
 [2] 顾有林, 陈国龙, 胡以华, 等. 气溶胶沉降扩散研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(7): 20220313.
 Gu Y L, Chen G L, Hu Y H, et al. Research progress on the deposition and diffusion of aerosols(invited) [J]. *Infrared and*

Laser Engineering, 2022, 51(7): 20220313.
 [3] 殷越, 李永曦, 符昊, 等. 室内密闭与通风空间气溶胶扩散特性[J]. *环境工程*, 2021, 39(4): 79-85.
 Yin Y, Li Y X, Fu H, et al. Aerosol diffusion characteristics in closed and ventilated spaces[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(4): 79-85.
 [4] Noh K C, Kim H S, Oh M D. Study on contamination control in a minienvironment inside clean room for yield enhancement based on particle concentration measurement and airflow CFD simulation[J]. *Building and Environment*, 2010, 45(4): 825-831.
 [5] 张延泽, 肖凯涛, 宋伟伟, 等. 防暴弹室内爆炸扩散试验及刺激剂浓度预测[J]. *爆破*, 2021, 38(4): 163-172.
 Zhang Y Z, Xiao K T, Song W W, et al. Indoor explosion diffusion experiment of anti-riot bomb and prediction of irritant concentration[J]. *Blasting*, 2021, 38(4): 163-172.
 [6] Liu X, Cheng S T, Liu H, et al. A survey on gas sensing technology[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 9635-9665.
 [7] Dhand R, Malik S K, Balakrishnan M, et al. High speed photographic analysis of aerosols produced by metered dose inhalers[J]. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 2011, 40(6): 429-430.
 [8] Chen Y, Young P M, Murphy S, et al. High-speed laser image analysis of plume angles for pressurised metered dose inhalers: the effect of nozzle geometry[J]. *AAPS PharmSciTech*, 2017, 18(3): 782-789.
 [9] Chen S Y, Chen Y Y, Zhang Y C, et al. The 3D modeling system for bioaerosol distribution based on planar laser-induced fluorescence[J]. *Sensors*, 2021, 21(8): 2607.
 [10] 王欣红, 狄慧鸽, 王娅娅, 等. 基于气溶胶光学参数的拉曼激光雷达重叠因子校正方法[J]. *光学学报*, 2023, 43(6): 0601005.
 Wang X H, Di H G, Wang Y Y, et al. Correction method of Raman lidar overlap factor based on aerosol optical parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(6): 0601005.
 [11] 张寅超, 马扬程, 陈思颖, 等. 一种水平探测荧光激光雷达系统常数标定方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1828006.
 Zhang Y C, Ma Y C, Chen S Y, et al. Method for calibrate system constants of horizontal detection fluorescent lase radar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1828006.
 [12] 赵强, 苏红超, 易明建, 等. 激光雷达探测建筑基坑开挖阶段气溶胶水平分布[J]. *中国激光*, 2021, 48(20): 2010001.
 Zhao Q, Su H C, Yi M J, et al. Aerosol horizontal distribution detected by lidar in excavation stage of construction site foundation pit[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(20): 2010001.
 [13] Mei L, Brydegaard M. Continuous-wave differential absorption lidar[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 629-636.
 [14] Mei L, Brydegaard M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): A1613-A1628.
 [15] Mei L, Guan P, Yang Y, et al. Atmospheric extinction coefficient retrieval and validation for the single-band Mie-scattering Scheimpflug lidar technique[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): A628-A638.
 [16] Kong Z, Ma T, Chen K, et al. Three-wavelength polarization Scheimpflug lidar system developed for remote sensing of atmospheric aerosols[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(31): 8612-8621.
 [17] Kong Z, Ma T, Cheng Y, et al. A polarization-sensitive imaging lidar for atmospheric remote sensing[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 271: 107747.
 [18] Yang Y, Guan P, Mei L. A scanning Scheimpflug lidar system developed for urban pollution monitoring[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2018, 176: 01013.
 [19] Malmqvist E, Brydegaard M, Aldén M, et al. CW-laser radar for combustion diagnostics[C]//*Imaging and Applied Optics 2016*, July 25-28, 2016, Heidelberg, Washington, D.C.: Optica

- Publishing Group, 2016: LW2G.2.
- [20] 张元帅, 张洪玮, 吴松华. 测量小角度后向散射的水体沙氏激光雷达技术设计[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101004.
Zhang Y S, Zhang H W, Wu S H. Design of water Scheimpflug lidar technology used for measuring small angle backscattering [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(11): 1101004.
- [21] Duan Z, Yuan Y, Lu J C, et al. Underwater spatially, spectrally, and temporally resolved optical monitoring of aquatic fauna[J]. Optics Express, 2020, 28(2): 2600-2610.
- [22] Léon J F, Derimian Y, Chiapello I, et al. Aerosol vertical distribution and optical properties over M'Bour (16.96° W; 14.39° N), Senegal from 2006 to 2008[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(23): 9249-9261.
- [23] Malmqvist E, Brydegaard M, Aldén M, et al. Scheimpflug lidar for combustion diagnostics[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 14842-14858.
- [24] 刘子凡, 车昊, 宫振峰, 等. 沙氏激光雷达探测水体衰减系数[J]. 中国激光, 2022, 49(12): 1210003.
Liu Z F, Che H, Gong Z F, et al. Detection of attenuation coefficient of water body by Shack lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(12): 1210003.
- [25] Liu Z F, Yang C G, Gong Z F, et al. Adaptive digital filter for the processing of atmospheric lidar signals measured by imaging lidar techniques[J]. Applied Optics, 2020, 59(30): 9454-9463.
- [26] 李俊, 龚威, 毛飞跃, 等. 探测武汉上空大气气溶胶的双视场激光雷达[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1201001.
Li J, Gong W, Mao F Y, et al. Dual field of view lidar for observing atmospheric aerosols over Wuhan[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1201001.
- [27] 黄立峰, 龚威, 李俊, 等. 大气遥感双视场米散射激光雷达信号拼接[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 705-719.
Huang L F, Gong W, Li J, et al. Signal splicing of dual-receiver Mie scattering lidar in atmospheric remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16(4): 705-719.
- [28] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [29] 豆晓雷, 常建华, 刘振兴, 等. 基于 Mie 散射激光雷达的气溶胶消光系数反演方法[J]. 激光与红外, 2019, 49(9): 1047-1053.
Dou X L, Chang J H, Liu Z X, et al. An aerosol extinction coefficient inversion method based on Mie-scattering lidar[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(9): 1047-1053.
- [30] Kunz G J. Transmission as an input boundary value for an analytical solution of a single-scatter lidar equation[J]. Applied Optics, 1996, 35(18): 3255-3260.

Dual Field-of-View Scheimpflug Lidar with Small Dead Zone

Chen He¹, Xu Qingyue¹, Guo Pan^{1*}, Chen Siying¹, Hao Wei¹, Hu Rui¹, Li Xin^{2**}

¹*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

²*Academy of Medical Sciences, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China*

Abstract

Objective Indoor aerosols are known to have a significant influence on atmospheric environment and human health. Therefore, it is meaningful to study the physical processes and movement patterns of them, such as transport, diffusion, and deposition. Although numerical simulations can provide strong support for the analysis of indoor aerosol flow field, it remains challenging to quantify the random factors in real environments. Thus, further research is needed through experimental measurements. Conventional measurement methods, such as high-speed photography and pulsed lidar, are difficult to meet the range and resolution requirements for indoor aerosol research due to their inherent limitations. The Scheimpflug lidar, a type of lidar technology based on the Scheimpflug principle, has the potential to provide high-resolution detection at short range. However, the dead zone of a single field-of-view (FOV) Scheimpflug lidar still occupies a large proportion, hindering accurate studies of indoor aerosol distribution and diffusion patterns. Therefore, we propose a dual-FOV Scheimpflug lidar.

Methods The proposed dual-FOV Scheimpflug lidar emits a continuous laser beam that interacts with the aerosol particles and produces elastic scattering. The backscattering signals from different ranges are collected respectively by two FOVs and then simultaneously captured by the corresponding image sensors (Fig. 1). In our study, a dual-FOV Scheimpflug lidar is developed with a 520 nm laser diode as the laser source. The lens for the primary FOV has a focal length of 100 mm and is designed to receive aerosol scattering signals from the far range, while the secondary FOV lens with a focal length of 45 mm is adopted to receive near-range signals. Two identical CMOS cameras serve as detectors for each FOV. In an indoor environment, we experiment to test the performance of the dual-FOV Scheimpflug lidar system (Fig. 3), with the artificially released aerosol source placed at 4.5 m. As the aerosol concentration along the path changes during the experiment, the signal intensity at the hard target at 7.1 m varies accordingly. By calibrating the system constants, interpolating the range resolution in the overlapping area, and splicing signals of the two FOVs, a full path signal profile with a very small dead zone can be obtained (Fig. 5). The signal intensity variation observed at the hard target is considered to be indicative of the changes in aerosol optical depth, which provides a constraint for the iterative determination of the boundary value. Subsequently, by utilizing the Klett method, the aerosol extinction coefficient profile is retrieved by employing the determined boundary value.

Results and Discussions The dual-FOV Scheimpflug lidar has a detection range of 0.36 – 7.1 m, which reduces the dead zone from 1.26 m to 0.36 m compared with a single FOV structure. The system's range resolution is 0.1 mm at the nearest distance and 15 mm at the farthest, enabling high-resolution detection at short distances. The accuracy of the pixel-distance relations for both FOVs is verified by comparing signals in the overlap area. The high correlation coefficient of 0.872 indicates a good correlation and consistency between the signals of the two FOVs. Through the signal calibration and fusion of the two FOVs, the obtained signal profiles exhibit sound spatiotemporal continuity over the entire coverage range (Fig. 6). The inversion results at typical moments demonstrate that the dual-FOV Scheimpflug lidar effectively and accurately describes the aerosol variation trends in different aerosol concentration conditions (Fig. 7). The time-space map of the extinction coefficient shows good spatiotemporal continuity throughout the detection process (Fig. 8), enabling high-precision quantitative inversion of the short-range aerosol distribution. The correlation between signal intensity and extinction coefficient at the near end of 0.36 m is analyzed (Fig. 9), with a correlation coefficient of 0.991. This confirms the feasibility of adopting the signal of a hard target as a boundary value constraint and verifies the reliability and accuracy of the dual-FOV Scheimpflug lidar data.

Conclusions We propose a dual-FOV Scheimpflug lidar for indoor aerosol detection, which features a small dead zone and extremely high resolution. The system comprises two FOVs, one designed for receiving near-range aerosol backscattering signals and the other for far-range signals. The dual-FOV Scheimpflug lidar system is employed to detect artificially released aerosols, and the full path signal profile is obtained by combining the signals from two separate FOVs. The system achieves dynamic self-calibration with the boundary value provided by a hard target, enabling the retrieval of the aerosol extinction coefficient profile without boundary value assumptions. The experimental results demonstrate that the secondary FOV supplements the aerosol information in the near range, and the inversion results show good spatiotemporal continuity. These results suggest that the dual-FOV Scheimpflug lidar can realize fine detection of indoor aerosols and provide a new technical means for detecting small-scale aerosol flow fields.

Key words remote sensing; Scheimpflug lidar; dual field-of-view; aerosol detection; dead zone