

大气湍流廓线特性探测的地基激光雷达技术综述

苏练^{1,2}, 罗曦^{1,2}, 黄林海^{1,2}, 李新阳^{1,2*}, 江浦³, 袁金龙⁴, 夏海云^{3,4}¹自适应光学全国重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209;³中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026;⁴南京信息工程大学大气物理学院, 江苏 南京 210044

摘要 激光在大气中传输的过程中,受湍流扰动影响会产生光强闪烁、到达角起伏、相干性退化、光束漂移及光束扩展等复杂光学湍流效应,这些效应制约着自适应光学、自由空间激光通信及气象探测等领域的应用发展。大气折射率结构常数作为表征光学湍流效应的核心物理量之一,其垂直分布特性直接决定了大气湍流廓线的形态特征,而地基激光雷达凭借其抗干扰能力强、多参数协同探测、高时空分辨率等优势,已成为该领域的重要研究工具。详细梳理了地基激光雷达在大气湍流探测领域的研究进展,重点剖析了其核心原理以及各技术的优缺点。在交叉应用领域方面,探讨了地基激光雷达与自适应光学校正技术的融合应用前景及存在的挑战。最后,结合当前研究现状,展望了地基激光雷达在大气湍流廓线探测中的发展方向。

关键词 遥感; 激光雷达; 大气湍流; 自适应光学; 大气遥感

中图分类号 TN958.98; P427.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL251431

1 引言

大气湍流作为大气边界层中大气运动谱的一部分,是全球环流、天气系统、区域环流、强风暴、云层、大气边界层以及植物冠层中的重要组成部分^[1]。在大气光学领域中,大气湍流主要表现为由局部温度、压力等气象要素随机涨落引起的大气折射率不规则波动。这种波动会导致光波在传输过程中产生光强闪烁、到达角起伏、相干性退化、光束漂移及扩展等一系列光学湍流效应^[2]。这些效应在多个领域产生了显著影响:在自适应光学(AO)系统中,大气湍流不仅制约了天文望远镜分辨率的提升,导致成像光斑出现模糊和抖动,还会对天文台址的评估与选择产生重要影响^[3];在激光通信领域,大气湍流影响了激光信号的稳定性及其长距离传输性能^[4];在气象探测领域,大气湍流降低了信号质量,并对风廓线、大气边界层高度、气溶胶浓度、风切变、后向散射系数等关键数据的探测精度造成干扰^[5-7]。

衡量大气湍流效应的主要核心物理量包括大气折射率结构常数 C_n^2 、大气相干长度 r_0 、等晕角 θ_0 、光强闪烁指数 β_I^2 、湍流动能耗散率 ϵ 等。其中,大气折射率结构常数 C_n^2 直接表征大气折射率起伏的强度,是量化大气湍流强度的关键参数,其沿垂直高度的分布特性构

成了完整的大气湍流廓线 $C_n^2(h)$ 。目前,基于测量原理差异,大气湍流廓线探测技术可分为非光学与光学两大体系。非光学方法通过微温脉动探测^[8]、声波传播分析^[9]及微波散射测量^[10]实现;光学探测技术则聚焦于光强闪烁监测与波前相位/振幅解析,通过光学信号反演获取湍流参数分布。光学探测法可进一步细分为两类技术路径^[11]:一类是通过观测月亮等自然导星反演湍流廓线的被动探测技术,如双自然导星的 SCIDAR (scintillation detection and ranging)^[12]、SLODAR (slope detection and ranging)^[13]与 G-SCIDAR (generalized SCIDAR)^[14],以及单自然导星的 MASS (multi-aperture scintillation sensor)^[15]、LuSCI (lunar scintillation)^[16]与 SSS (single star SCIDAR)^[17];另一类则是基于激光导星(LGS)等人造导星的技术实现湍流参数测量的主动探测技术,其典型代表就是激光雷达探测技术。

随着 AO、激光通信、航空航天与环境科学等交叉领域的迅猛发展,现代光学技术对大气湍流测量提出了支持高时空分辨率、全向域($0^\circ \sim 360^\circ$)精准测量等更为严苛的要求。而探空式微温脉动探测存在探测路径固定、探测效率低、实时性和时空性受限等问题;微波和声雷达在探测距离、测量精度以及非光波波段测量等方面存在不足;自然导星的被动探测存在天空覆盖

收稿日期: 2025-10-23; 修回日期: 2025-11-26; 录用日期: 2025-12-11; 网络首发日期: 2025-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(U2141255, 62175241)

通信作者: *xyli@ioe.ac.cn

率低与非等晕误差等问题^[18],受选择的测量方向、时段和场景等因素制约。激光雷达系统作为主动探测技术,通过向大气发射具有高相干度、高亮度且方向性优异的激光束,在探测区域内聚焦形成参考信标,并分析后向散射信号来获取大气湍流参数。该技术具有抗干扰能力强、探测模式多样、多参数协同测量、连续廓线数据获取、全天候工作、高时空分辨等显著优势^[19-20],能够实现对全向域大气湍流廓线精细结构的测量。目前,激光雷达已在地基、车载^[21]、机载^[22]、船载^[23]、空载^[24]、星载^[25]等多样化载体上完成理论验证与工程应用,逐渐成为大气湍流探测的有效解决方案。

本文详细综述了地基激光雷达探测大气湍流廓线的关键技术原理,解析了激光雷达系统的组成架构,并分析了各类技术的性能优势与局限性。同时,探讨了激光雷达在 AO 领域的应用前景与发展潜力。最后,针对当前技术瓶颈,展望了激光雷达大气湍流廓线探

测研究方向。

2 地基激光雷达大气湍流廓线探测技术

激光雷达凭借其高亮度光束与多样化的扫描探测模式,以及不受信标光源限制的优势,具备了获取全向域远距离大气湍流信息的能力。本节重点阐述基于波前探测技术的差分像移激光雷达(DIM LiDAR)、差分光柱激光雷达(DCIM LiDAR)、差分波前激光雷达(DW LiDAR)、Cross-path 激光雷达、基于光强探测技术的闪烁激光雷达(RTS LiDAR)等设备在大气湍流廓线探测中的原理、系统架构及各自优劣。此外,还介绍了多普勒测风激光雷达(DWL)通过多普勒频移测量三维风场,并基于湍流动能耗散率模型反演 C_n^2 。代表性的地基激光雷达性能如表 1 所示,其中部分参数为实验列举(如 DCIM LiDAR)^[26-33]。

表 1 大气湍流探测地基激光雷达性能表^[26-33]

Table 1 Performance of ground-based LiDAR for atmospheric turbulence detection^[26-33]

Type	Pulse energy	Resolution (temporal; spatial)	Detection range	Scan range (azimuth; pitch)
DIM LiDAR ^[26]	300 mJ@355 nm	$\Delta t=0.33\text{--}10\text{ min}$; $\Delta h=0.25\text{--}1\text{ km}$	$\leq 10\text{ km}$	—
DIM LiDAR	300 mJ@1064 nm, 260 mJ@532 nm, 110 μJ @1550 nm	$\Delta t \leq 1\text{ s}$; $\Delta h=7.5\text{ m}$ (@1064 nm). $\Delta t \geq 20\text{ s}$; $\Delta h=0.1\text{--}1\text{ km}$ (@532 nm). $\Delta t \leq 1\text{ s}$; $\Delta h \leq 30\text{ m}$ (@1550 nm)	$\geq 6\text{ km}$ @1064 nm, $\geq 6\text{ km}$ @532 nm, $\geq 3\text{ km}$ @1550 nm	A: $0^\circ\text{--}360^\circ$; P: $-30^\circ\text{--}120^\circ$
	DIM LiDAR ^[28]	260 mJ@532 nm	$\Delta h \geq 0.75\text{ m}$	$\geq 10\text{ km}$ A: $0^\circ\text{--}360^\circ$; P: $0^\circ\text{--}90^\circ$
	DCIM LiDAR ^[29]	180 mJ@532 nm	$\Delta t=4\text{ min}$; $\Delta h=2\text{--}250\text{ m}$	1.3–14 km
	DW LiDAR ^[30]	500 mJ@532 nm	$\Delta h \geq 10\text{ m}$	$\geq 10\text{ km}$
	RTS LiDAR ^[31]	60–300 mJ@532 nm	$\Delta h=3\text{ m}$	$\geq 10\text{ km}$
	Cross-path LiDAR ^[32]	532 nm	$\Delta t=1\text{--}2\text{ min}$	$\geq 15\text{ km}$
	DWL ^[33]	130 μJ @1550 nm	$\Delta t=1\text{ s}$; $\Delta h=30\text{ m}$	$\leq 13.5\text{ km}$ A: $0^\circ\text{--}360^\circ$; P: 70°

Δt : temporal resolution; Δh : spatial resolution; A: azimuth; P: pitch.

2.1 差分像移激光雷达

图像的质量与入射波前的扰动统计特性密切相关^[34]。基于该特性,研究学者通过瞳孔平面双小孔径设计,分别记录不同光路下由大气湍流引起的子波前像的相对像移运动。通过分析该像移的抖动方差即可计算视宁度,此即差分像运动监测仪(DIMM)的核心原理^[35]。差分像移激光雷达正是基于 DIMM 原理演化而来。Sarazin 等^[34]使用 DIMM 估算视宁度时给出了纵向和横向的光斑质心抖动方差与大气相干长度的关系:

$$\sigma_l^2 = 2\lambda^2 r_{0l}^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.0968d^{-1/3}] \quad (1)$$

$$\sigma_t^2 = 2\lambda^2 r_{0t}^{-5/3} [0.179D^{-1/3} - 0.145d^{-1/3}] \quad (2)$$

式中: σ_l^2 为纵向抖动方差; σ_t^2 为横向抖动方差; r_{0l} 和 r_{0t} 分别为两个方向上的大气相干长度; D 为子孔径的直径; d 为两个子孔径的间距; λ 为出射激光波长。

在局地各向同性湍流假设条件下,源于同一激光光源的相干光,其相位起伏将转化为双光斑质心位置的抖动方差。联立式(1)和式(2),从而建立大气相干长度与双光斑质心抖动方差的关系^[36]:

$$r_0 = (r_{0l} + r_{0t})/2 \quad (3)$$

$$r_0 = \{ [2f^2(0.358(\lambda/D)^{1/2} - 0.242(\lambda/d)^{1/3})\lambda^{5/3}] / \sigma^2 \}^{3/5} \quad (4)$$

式中: σ^2 为在采样周期内,基于多帧图像分析得到的双光斑质心位置抖动方差; f 为焦距。

在弱起伏条件下,在垂直探测路径上,球面波的大气相干长度与大气折射率结构常数的关系^[37]为

$$r_0 = [0.423k^2 \int_0^L C_n^2(h)(1-h/L)^{5/3} dh]^{-3/5} \quad (5)$$

式中: L 为光程的长度; $k=2\pi/\lambda$ 为波数。

联立式(4)和式(5)得到光斑质心抖动方差与大气

折射率结构常数的关系^[26]:

$$\sigma^2 = 33.2D^{-1/3} [0.358 - 0.242(d/D)^{-1/3}] \cdot \int_0^L C_n^2(h)(1-h/L)^{5/3} dh \quad (6)$$

Belen'kii 等^[38]在 2000 年提出的差分像移激光雷达概念,通过与 300 m 外水平路径上的闪烁仪对比实验,

验证了该概念的可行性。后续其团队中的 Gimmetstad 等^[39]先后进行了大量的改进研究和实验验证,比如在 2004 年在埃格林空军基地进行样机测试,优化了成像帧率参数;在 2007 年首次实现大气湍流廓线测量^[40];2012 年完成样机参数升级并进行实机测试验证^[26]。其原理图如图 1 所示。

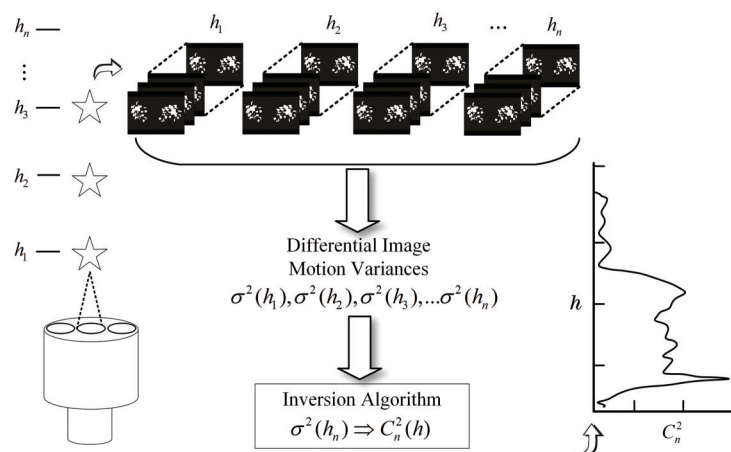


图 1 差分像移激光雷达原理示意图^[40]

Fig. 1 Schematic of differential image motion LiDAR's principles^[40]

经过持续的技术迭代,我国差分像移激光雷达技术已实现从样机研制向多参数集成扫描系统的跨越式发展。早期工作包括 2006 年中国科学院安徽光学精密机械研究所侯再红等^[41]和中国科学院武汉物理与数学研究所戴阳等^[42]的样机研制与实验验证,此后有中国科学技术大学郭洁等^[43]的测量误差分析和周颖捷等^[44]实现的 0.2~8 km 湍流廓线数据的获取,以及西北核技术研究所 Qiang^[45]将激光雷达系统改进为收发一体式结构。2022 年,中国科学技术大学杨昊^[27]通过光机一体化设计,研制了一套能够同时在一条光路上实现对大气湍流@532 nm、大气透过率@1064 nm 和风场@1550 nm 的大气透过率、相干长度和风综合测量激

光雷达系统(ACW-LiDAR)。该设备通过准直发射技术实现了全向域湍流探测,大气相干长度探测高度大于 6 km。其与三维超声风速仪的对比实验显示,测量结果总体相关性达 0.63,验证了数据的可靠性。基于前期结果,2024 年该团队优化了湍流方向探测技术,研制出扫描差分像运动激光雷达^[28],在保持 10 km 以上有效探测距离的同时,总体相关性达到了 0.69 以上。该系统的技术原理图如图 2 所示。中国科学院安徽光学精密机械研究所的 Hu 等^[46]研发的集成式激光雷达也实现了在同一路径上大气透过率、湍流及风速参数的同步测量。实验表明,该系统测得的 C_n^2 结果与超声波风速仪的标准差小于 $7.15 \times 10^{-14} \text{ m}^{-2/3}$,验证了

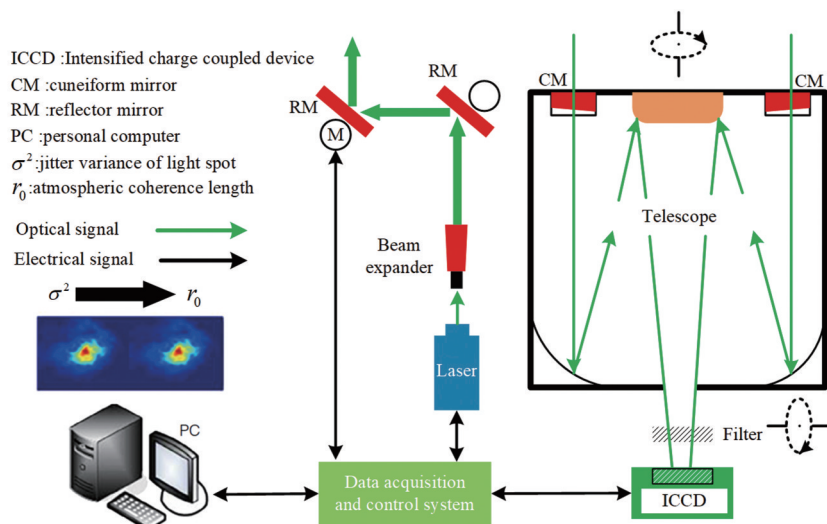


图 2 探测大气相干长度的 DIM-LiDAR 技术原理图^[28]

Fig. 2 Schematic diagram of detecting atmospheric coherence length by DIM-LiDAR^[28]

测量结果的可靠性,并初步揭示了这三个参数间的耦合作用机制。

差分像移激光雷达的误差主要源于光斑图像处理(分割/去噪/质心计算)、电荷耦合器件(CCD)相机性能(像素/采样/曝光/门控延时)、扩束器聚焦精度等关键环节,其存在手动聚焦导致的时间分辨率较低、所测湍流数据受地面扰动较大、空间分辨率不足等问题。然而,该技术具有振动不敏感、抗离焦和伪影干扰等独特优势^[26,47]。随着多参数集成扫描系统等技术的发展,差分像移激光雷达逐渐成为大气湍流廓线探测的主流解决方案。

2.2 差分光柱激光雷达

DCIM 激光雷达的概念由中国科学院安徽光学精密机械研究所的 Jing 等^[48]于 2013 年提出。该技术采用倾斜焦平面成像原理,通过激光光柱的焦平面成像,实现对特定高度范围内大气相干长度的分层测量。同年, Huang 等^[29]验证了该技术的可行性。其原理图如图 3 所示。

由相似三角形原理,高度为 h 的激光导星的焦点位置可表示为

$$z = \{h + f - h[1 + (\Delta/h)^2]^{1/2}\}x/\Delta + f \quad (7)$$

式中: f 为焦距; Δ 为接收与发射望远镜之间的中心间距; z 和 x 分别为焦平面位置坐标。

当系统的参数 $\Delta/h \leq 1$ 并且 $h \geq \Delta^2/f$ 时,根据泰勒展开有

$$z \approx fx/\Delta + f \quad (8)$$

因此,焦平面成像坐标中位置 z 与 x 呈近似线性关系。此时 X 轴与焦平面之间的夹角 θ 为

$$\theta = \arctan[(f/\Delta) - (\Delta/2h)] \quad (9)$$

以此为依据,采用 CCD 与 X 轴成 θ 夹角的倾斜安

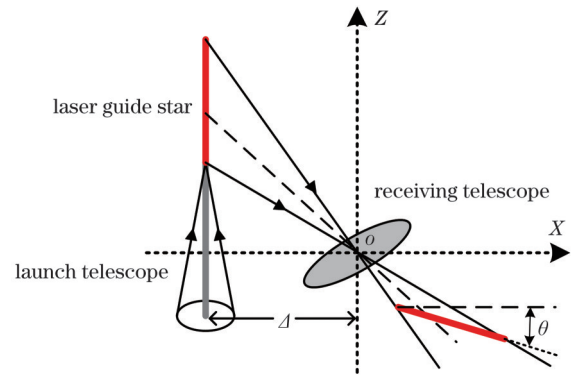


图 3 DCIM 激光雷达原理示意图。 θ 代表 X 轴与焦平面之间的夹角; Δ 为接收与发射望远镜之间的中心间距^[48]。

Fig. 3 Schematic of DCIM LiDAR's principles. θ denotes angle between X axis and focal plane; Δ is center-to-center distance between receiving and launch telescopes^[48]

装方案,使 CCD 沿 Z 轴方向以光柱形式成像。通过将成像光带进行空间分割形成若干独立检测区域,从而实现在指定高度范围内对各子高度光带信息的精准提取。大气湍流廓线的测量原理与 DIM LiDAR 一致,通过子光带纵向质心抖动的方差分析实现。

基于此原理,2014 年中国科学院安徽光学精密机械研究所的黄克涛等^[49]提出 DCIM 激光雷达湍流廓线反演算法,经数值仿真验证具有普适性。中国科学技术大学的程知等^[50-52]对该种技术做了大量扩展研究,包括大气湍流廓线反演算法优化^[51]、降噪处理^[52]等。其 DCIM 激光雷达示意图如图 4 所示。2022 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所的 Yao 等^[53]使用自适应分割技术实现了自动跟踪激光信标的功能。2024 年,中国科学技术大学的李双良^[54]针对此种激光雷达的光柱图像自动调焦、激光垂直控制及望远镜指向控制等关键技术开展研究,以推动工程化应用。

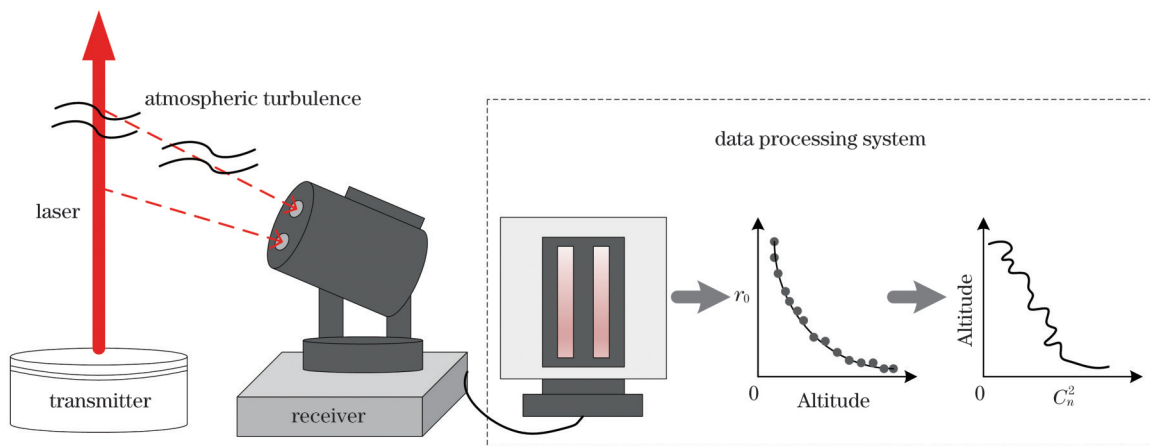


图 4 DCIM 激光雷达示意图^[50]

Fig. 4 Schematic of DCIM LiDAR^[50]

DCIM 激光雷达采用旁轴采样结构,具有系统简洁、多高度湍流同步测量的优势,有效解决了传统 DIM 激光雷达分时测量的局限,其时间分辨率可达

22.5 s^[51],在弱、中、强湍流条件下均能稳定工作。然而,CCD 倾斜安装精度直接影响数据可靠性,且探测范围受接收望远镜视场角约束,存在低空湍流测量盲

区,高层大气探测空间分辨率较低,无法实现任意路径观测,这些因素共同构成了 DCIM 激光雷达当前的技术局限。

2.3 差分波前激光雷达

基于 DIM 和 DCIM 等激光雷达技术基础,中国科学技术大学的王彩玉等^[30,55-56]开展了基于差分波前原理探测大气湍流廓线的激光雷达技术研究。此种激光雷达原理图如图 5 所示。激光扩束后经望远镜的中心 C 孔准直出射,两侧 L/R 孔同步接收经大气湍流扰动后的后向散射信号。后续通过楔形镜实现双通道回波信号的空间分离,并在增强型电荷耦合器件 (ICCD) 焦平面形成特征双光斑。最终通过精确调控 ICCD 门控延迟来实现不同高度的回波信号获取,并基于双光斑波前抖动方差完成大气湍流廓线的反演。

根据相关的变换公式得到双光斑质心抖动方差 $\sigma_r^{2[55]}$ 为

$$\sigma_r^2 = (F^2/2k^2) \times [4D_\phi(d)/d^2 - D'_\phi(u)/u - D''_\phi(u)] \quad (10)$$

式中: F 为系统焦距; $k=2\pi/\lambda$ 为波数; d 为望远镜直径; ϕ 为入射至望远镜双孔处的相位; $D_\phi(d)=\phi(x_1+d, y_1)-\phi(x_1, y_1)$ 为相位结构函数; u 为 L 孔和 R 孔的间距。

根据相位结构函数与大气相干长度的关系^[57]有

$$D_\phi(\rho) = 6.88(\rho/r_0)^{5/3} \quad (11)$$

式中: ρ 为测量的各点之间的距离。

由此得到大气相干长度 r_0 :

$$r_0 = \{((27.5F^2) \times [1 - (25/36) \times (d/u)^{1/3}] / (k^2 d^{1/3} \sigma_r^2))\}^{3/5} \quad (12)$$

最后通过式(5)完成对大气湍流廓线的计算。

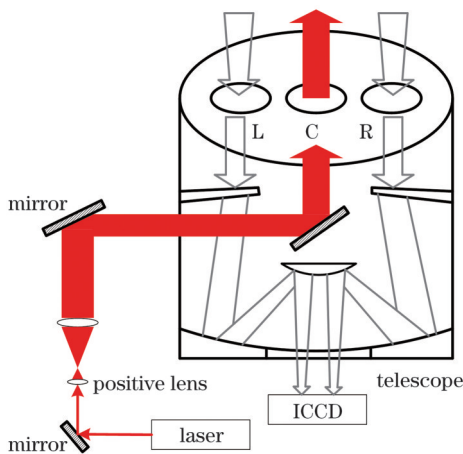


图 5 差分波前激光雷达光路示意图^[55]

Fig. 5 Schematic diagram of optical path of differential wavefront LiDAR^[55]

2021 年,王彩玉等^[56]对该技术进行了展望,并通过仿真实验对其性能进行了系统评估与优化^[30]。实验数据显示,经拟合后的仿真结果与 Hufnagel-Valley

5/7(HV_{5/7})模型理论值的复相关系数为 0.91,初步验证了该技术的可行性。该技术采用准直发射方案,有效规避了传统聚焦系统的焦移问题;结合 ICCD 门控延迟的自由调控特性,能够实现较高空间分辨率探测;同时,光斑质心扰动算法在湍流廓线反演中展现出独特优势。然而,此方案仍存在以下局限性:反演精度在 6 km 以上高度出现显著波动;垂直固定路径探测;尚未开展外场实验验证。这些因素表明,该技术从实验室到工程化应用仍需进一步优化与测试。

2.4 光强闪烁激光雷达

大气湍流对光波振幅的调制作用会导致后向散射回波光强闪烁。使用归一化的光强起伏方差即闪烁指数 β_I^2 来描述光强起伏的强度^[58]:

$$\beta_I^2 = \langle I^2 \rangle / \langle I \rangle^2 - 1 \quad (13)$$

式中: I 为光强; $\langle \rangle$ 代表集平均。

在弱起伏条件下($\beta_I^2 < 1$),闪烁指数约等于对数振幅起伏方差 σ_x^2 的 4 倍^[2]:

$$\beta_I^2 \approx 4\sigma_x^2 \quad (14)$$

在局地各向同性的 Kolmogorov 谱下,垂直路径上球面波的对数振幅起伏方差^[59]为

$$\sigma_x^2(L) = 0.5631k^{7/6} \int_0^L C_n^2(h) [h(L-h)/L]^{5/6} dh \quad (15)$$

式中: L 为光程; h 为垂直坐标。

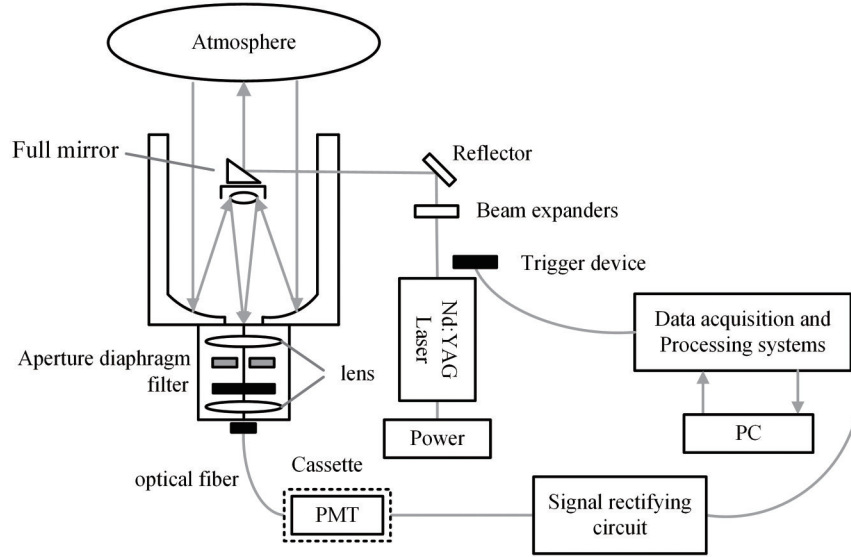
由式(14)和式(15)得

$$\beta_I^2(L) = 2.25k^{7/6} \int_0^L C_n^2(h) [h(L-h)/L]^{5/6} dh \quad (16)$$

由此得到光强闪烁指数与大气湍流廓线之间的关系。

Belen'kii 等^[60]在 1994 年首次提出了基于光强闪烁的激光雷达测量大气湍流的设想,其建立的残余湍流闪烁效应理论^[61],为该技术的发展奠定了理论基础。2014 年,Henriksson 等^[62]基于时间相关单光子计数激光雷达系统提出了两种修正闪烁指数的方法。哈尔滨工业大学的 Jiang 等^[63]基于残余湍流闪烁效应理论在水平路径上实现了 11.8 km 的大气结构函数的计算。2010 年,中国科学院安徽光学精密机械研究所倪志波等^[64]使用微脉冲激光雷达完成了该方法的可行性验证和初步实验。2012 年,崔朝龙^[65]成功研制了一台光强闪烁激光雷达,并系统研究了该系统的背景噪声特性、探测灵敏度及数据质量等关键性能指标。2018 年,赵琦^[66]进一步深化了激光后向散射增强效应等理论基础研究,揭示了影响探测精度的因素。2024 年,北方民族大学 Lu 等^[31]基于残余湍流闪烁效应,验证了米散射激光雷达在大气湍流廓线探测中的适用性,其雷达示意图如图 6 所示。

光强闪烁激光雷达的实现原理与大口径闪烁仪器相似,具备探测直观、结构相对简单、技术难度较低等优势;同时,其后向散射增强效应可提升回波信号强

图 6 米散射激光雷达结构图^[31]Fig. 6 Structure diagram of Mie LiDAR system^[31]

度。然而,该技术受闪烁饱和效应^[67]、孔径平滑效应、激光双程路径传输等因素的影响,易导致闪烁指数计算误差,进而降低探测精度。此外,闪烁指数在弱起伏区受湍流内尺度影响明显,且易受近地面湍流扰动。相比光斑质心扰动方法,激光雷达的稳定性及设备振动等因素也对其探测精度构成挑战。

2.5 Cross-path 激光雷达

Cross-path 激光雷达概念由 Belen'kii 等^[32]在 2007 年提出,其原理示意图如图 7 所示。基于双激光导星探测原理,采用脉冲激光在指定高度生成空间夹角为 θ 的共轭激光导星对,通过其回程光路在湍流探测层形成的重叠采样区域,利用子孔径直径为 d 的夏克-哈特曼波前传感器(SHWFS)结合门控 ICCD 相机同步获取湍流诱导的波前斜率动态畸变,最后基于分层波前斜率互相关函数与折射率结构函数的耦合反演算法重构大气湍流强度廓线。路径 1 和路径 2 的波前斜率互相关函数 $\langle \delta_1 \delta_2 \rangle$ 为

$$\langle \delta_1 \delta_2 \rangle = D_s(r_i - d, \theta) + D_s(r_i + d, \theta) - 2D_s(r_i, \theta) \quad (17)$$

式中: δ_i 为双路径光波在第 i 个子孔径处产生的相位差; $D_s(r_i, \theta)$ 为双子孔径间隔为 r_i 时,导星分离角 θ 的双激光信标所对应的波前相位空间结构函数。

在满足 Kolmogorov 湍流谱下各向同性假设的条件下,垂直路径上的波前相位空间结构函数为

$$D(\rho_i, \theta) = 1.45k^2 \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) [(1 - h/L)\rho_i - h\theta]^{5/3} dh \quad (18)$$

式中: $\rho_i = r_i \pm d$; L 为激光导星与接收望远镜的距离; $H_{\max}$ 为探测高度。

假设 d 和 r_i 都与 θ 平行,归一化的斜率互相关函数 $b(r_i, \theta)$ 与湍流廓线的关系为

$$b(r_i, \theta) = \langle \delta_1 \delta_2 \rangle / \langle \delta^2 \rangle = 1.45k^2 \int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) W(r_i, \theta, h) dh \quad (19)$$

式中: $W(r_i, \theta, h)$ 为路径权重函数。

该技术具有较高的空间分辨率(d/θ)和时间分辨率(60~120 s),对闪烁饱和效应具有鲁棒性。但其空间分辨率由子孔径直径和双激光导星夹角共同决定,且测量湍流廓线为倾斜分布,目前国内外对该技术的报道较少。

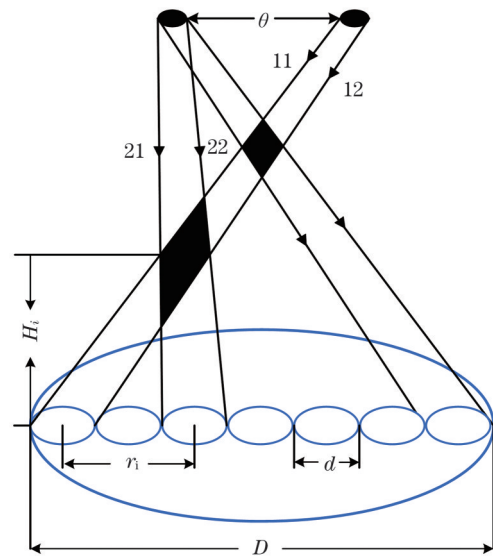


图 7 Cross-path 激光雷达技术示意图。其中 D 为望远镜直径, d 为子孔径直径, θ 为两颗激光导星夹角, r_i 代表每对子孔径之间的间距, H_i 为湍流层探测高度^[32]

Fig. 7 Schematic of cross-path LiDAR technique. D is telescope diameter, d is subaperture diameter, θ is angular separation between two laser guide stars, r_i denotes separation between each pair of subapertures, and H_i is detection altitude of turbulent layer^[32]

2.6 多普勒测风激光雷达

近年来,随着激光雷达技术的突破性发展,国内外相继涌现出多种大气湍流探测技术,包括基于双孔差分闪烁法的方案^[68]、采用后向散射增强原理的系统^[69]、类似 DIMM 原理的差分式湍流测量仪(DTM)^[70]、以及依托光纤耦合效率原理^[71]等的探测手段。多普勒测风激光雷达也是探测大气湍流信息的技术手段之一。

根据 Taylor 冻结湍流假设,风速增大会缩短大气湍流的冻结时间,进而影响 ICCD 曝光时间并导致大气相干长度波动^[27,46]。基于 Kolmogorov 理论,湍流动能耗散率通过表征动能从大尺度向小尺度涡旋的级联

传递过程,可有效反映湍流强度。而 DWL 在获取驱动大气湍流的风参数(风切变、风廓线、风场等)并解析中小尺度湍流结构(山谷环流、阵风锋、低空急流等)的同时,还具备反演湍流动能耗散率的能力。此外,DWL 可同步获取大气湍流作为“高效搬运工”形成的边界层高度、作为“信号阻断器”的云参数(云高云厚)、作为湍流与云“调制器”的大气气溶胶(冰核、云凝结核等)分布状况[后向散射系数、载噪比(CNR)],并追踪污染物扩散路径。正是这种从探测到现象解析的完整能力路径,构成了 DWL 在湍流探测中的优势。典型测风激光雷达光路图如图 8 所示。

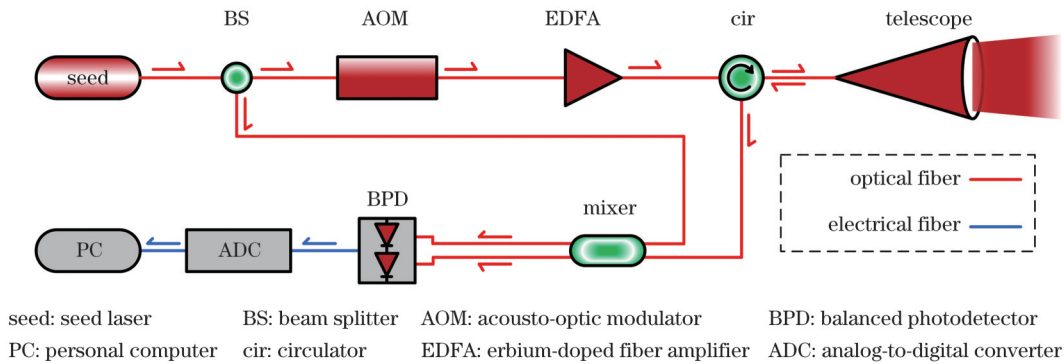


图 8 典型多普勒测风激光雷达光路图

Fig.8 Optical layout of typical Doppler wind LiDAR

在算法反演方面,俄罗斯科学院祖耶夫大气光学研究所的 Banakh 等^[72]采用 VAD (Velocity azimuth display) 扫描方式,通过构建方位结构函数 $\overline{D_L}(\varphi_l)$,实现了 DWL 对湍流动能耗散率 ϵ 的估算:

$$\epsilon = \{ [\overline{D_L}(\varphi_l) - \overline{D_L}(\varphi_1)] / [A(\Delta y_k) - A(\Delta y_k)] \}^{3/2} \quad (20)$$

式中: L 为 VAD 扫描激光束编号; $l=1,2,3,\dots,L$;方位角 $\varphi_l = l\Delta\theta$, $\Delta\theta$ 为方位角分辨率;距离门为 $k=1,2,3,\dots$ 时的探测体积的横向尺寸为 Δy_k ; $A(\Delta y_k)$ 由 Kolmogorov 模型中的二维湍流谱计算得到。

同时也可采用径向风速二阶结构函数 $D_{uu}(r)$ 进行估算^[73]:

$$D_{uu}(r) = \langle [u(x+r) - u(x)]^2 \rangle = 2\epsilon^{2/3} r^{2/3} \quad (21)$$

式中: $\langle \rangle$ 代表集平均; $u(x+r) - u(x)$ 代表相隔距离为 r 时的径向风速差。

多普勒谱宽也能反演湍流动能耗散率^[74]:

$$\epsilon = 2\pi(2/3a)^{3/2} \sigma_v^3 (L^{2/3}/L_1^{2/3})^{-3/2} \quad (22)$$

式中: σ_v 为多普勒谱宽; a 为 Kolmogorov 常数, $a=0.55$; 长度尺度 $L = NU_t$ 为 N 个采样间隔内的平均水平风速 U 与采样时间 t 的乘积; 单个采样的长度尺度定义为 $L_1 = U_1 t_1 + 2z \sin(\theta/2)$, 其中 U_1 为实测水平风速, t_1 为脉冲宽度, z 为探测高度, θ 为波束发散半角。

根据 Tatarskii 理论,在惯性子区内,有

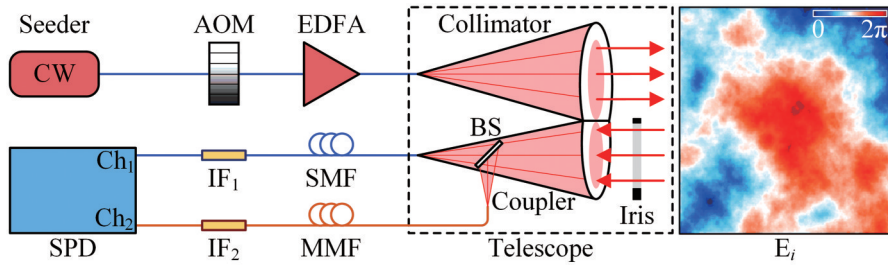
$$C_n^2 = a^2 L_0^{4/3} M^2 = a^2 M^2 [\epsilon / (1 - \beta R_g)]^{2/3} / S^2 \quad (23)$$

式中: a 为常数, $a^2=2.8$; L_0 为湍流外尺度; M 为位势折射率梯度; R_g 为梯度理查森系数; β 为热的混合系数比值; S 为风切变。

由此可知,通过 DWL 测得的风场数据与大气气象参数的结合可反演 C_n^2 。

2022 年,中国科学技术大学的江浦(Jiang)等^[75]基于上述理论实现了 C_n^2 水平探测。其所在的团队在塔克拉玛干沙漠站点^[33,76]、南海探索二号科考船^[77]、机场^[78]等多领域开展应用研究^[79-80],并同时推进了单模和多模光纤耦合效率反演水平 C_n^2 的研究^[72],如图 9 所示。2021 年,中国海洋大学的靳翔等^[81]结合模型和地面气象站数据,估算了 C_n^2 和 ϵ 。2020 年,北京城市气象研究院程志刚等^[82]使用 3 台测风激光雷达协同观测(光束在一点交汇),有效规避了 VAD 扫描模式中风场水平均匀性假设导致的湍流强度与三维风场探测误差。2013 年,丹麦科技大学的 Sathe 等^[83]对该技术的优缺点进行了讨论。2017 年,美国科罗拉多大学博尔德分校的 Bonin 等^[84]通过对比 VAD、RHI (range-height indicator) 及 6 光束 DBS (Doppler beam swinging) 等 DWL 扫描模式,系统验证了其对湍流强度与湍流动能参数探测的可靠性。

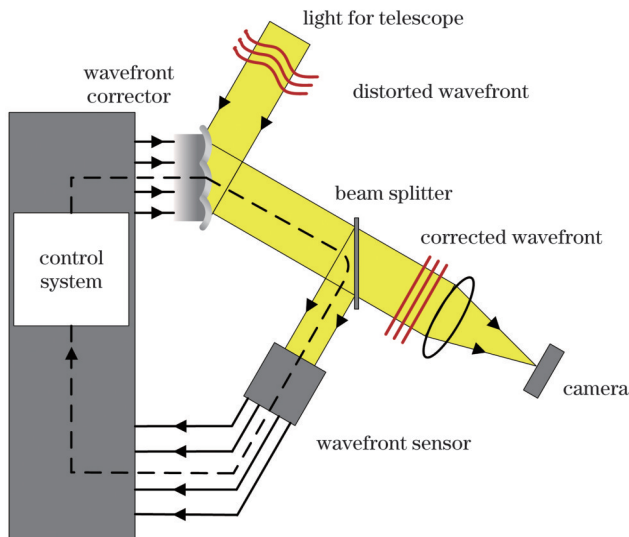
DWL 采用 VAD 扫描反演湍流动能耗散率时,需满足 Taylor 冻结湍流假设,同时受信噪比、探测体积(扫描角分辨率)等因素影响;横向风效应、风切变及粒子分布不均等因素导致谱宽参数评估偏差;此外, C_n^2

图 9 单光子湍流探测激光雷达系统光路图^[72]Fig. 9 Optical layout of single-photon turbulence detection LiDAR system^[72]

反演还需依赖外部气象数据或仪器支持,并对雨雾等环境敏感。但DWL凭借其结构简单、经济高效、多参数检测及多扫描模式等优势,在气象科学、环境污染监测、可再生能源开发、航空安全保障及低空经济等领域的快速发展发挥了重要作用,也为湍流与风场的耦合机制研究提供了重要实验支撑。

3 地基激光雷达与自适应光学系统

为克服大气湍流对光学系统的干扰,AO技术通过实时调整光学系统状态来维持最优性能。在此过程中,大气湍流廓线作为表征湍流强度垂直分布的核心参数,既构成系统运行基准又是算法优化的关键约束条件。针对大气湍流对光学系统的动态干扰问题,中国科学院光电技术研究所天文望远镜^[85]、太阳望远镜^[86]、激光通信^[87]、激光传输^[88]等领域开展了大量系统性研究。典型的AO系统工作原理图如图10所示,其核心架构包含波前传感器(WFS)、控制处理单元以及波前校正器三个功能模块。

图 10 自适应光学系统原理图^[3]Fig. 10 Principle of adaptive optics system^[3]

扫描式多波长地基激光雷达凭借其高时空分辨率的多参数协同测量、高亮度输出等特性,能够为AO系统提供多维度的协同补偿机制。在与多层共轭自适应光学(MCAO)系统结合应用中,自然导星受限于观测

方向、时间窗口和观测场景等客观条件,激光导星系统固有的“锥效应”问题不容忽视,传统AO系统则不可避免地面临校正视场(FOV)受限和非等晕性等技术瓶颈。MCAO系统通过引入大气层析技术,实现了对大气湍流的三维波前重构,并基于大气廓线数据,采用多变形镜(DM)分层校正策略,有效克服了上述技术难题^[89]。这一机制凸显了湍流廓线参数探测在MCAO技术中的核心作用。首先是在湍流层高度优化方面,变形镜的最佳共轭高度应精准匹配湍流强度峰值区域。湍流廓线反映了湍流强度的垂直分布特征,据此可优化变形镜的数量配置与空间排布方案,提升MCAO的校正性能^[90]。其次是导引星空间配置直接影响层析重构精度。当视场覆盖不足时,重构残差会显著增大。通过地基激光雷达获取的湍流廓线数据,可优化导引星的布局策略,这一策略在针对地表层湍流校正的地表层自适应光学(GLAO)系统中具有显著效益^[91]。最后,湍流分层数量与校正误差也存在直接关联。当实际测量湍流层数超过重建层数时,系统校正性能提升依赖于廓线垂直分辨率、精确的廓线测量技术以及优化的采样方法。值得注意的是,湍流廓线结构参数[如半高全宽(FWHM)]与层析成像误差正相关,FWHM值越大,系统误差越显著^[92]。星向MCAO与扫描式多波长地基激光雷达协同作用示意图如图11所示。总之,地基激光雷达提供的湍流廓线不仅表征了波前畸变的统计特性,其精确测量数据更是层析重建过程中的关键信息,为MCAO系统的参数优化提供了数据依据。

在基于SHWFS的AO系统中,SHWFS通过微透镜阵列测量各子孔径光波质心偏移量来重构波前斜率分布。然而,当遭遇高强度湍流扰动时,光斑偏移量可能超出传感器的动态测量范围,导致测量精度显著下降甚至完全失效。地基激光雷达通过监测强湍流扰动主要发生位置即对流层中下部的大气边界层,能够为AO系统提供实时失效预警。同时多波长的技术还能有效识别云层遮挡引发的孔径缺光现象,避免系统误差的级联传递^[93]。从像差校正角度来看,不同高度湍流层产生的波前畸变具有显著差异:由于地表层存在强湍流区域,高阶Zernike像差(如彗差等)表现尤为突出,因此需要系统具备更高阶的校正能力;而在高层大

气中,湍流强度相对较弱,故以低阶像差校正为主。鉴于湍流廓线是表征湍流强度垂直分布的关键参数,其精确测量对于优化 SHWFS 的校正策略具有重要指导意义,能够有效提升波前传感器的校正效率和系统整体性能。

在 AO 系统选址方面,多参数激光雷达(如 ACW-LiDAR、DWL)通过长时间监测选址地点的大气湍流参数、能见度、云覆盖时长、降雨及焚风等气象条件(优先选择大气折射率波动小且天气良好的地点),为 AO 系统选址实施提供科学依据。

风切变是导致湍流产生的重要因素,风向和风速的垂直分布决定了湍流的空间分布和强度。监测大气风廓线对 AO 系统也至关重要。首先,对于大视场自

适应光学(WFAO)系统而言,湍流层风速矢量的精确探测是核心参数之一,这些风场数据能够为倾斜变形镜的实时控制提供关键的前瞻性补偿依据,从而实现光学系统校正精度的提升^[94]。其次,地表强风可能引发望远镜振动,且横向风速增大会导致光斑漂移量增加,直接影响成像质量与通信链路的稳定性。更关键的是,AO 系统运行带宽与风速呈线性关系^[95],基于风廓线数据的补偿作用,可优化系统运行带宽,平衡响应速度与噪声^[96],从而更精准地评估 AO 系统对湍流的补偿能力。多参数集成式激光雷达和 DWL 等激光雷达能够通过实时监测大气风场运动,并提供高时空分辨率(如 0.9 m/0.5 s^[97])的三维风场数据,为 AO 系统提供风况保障。

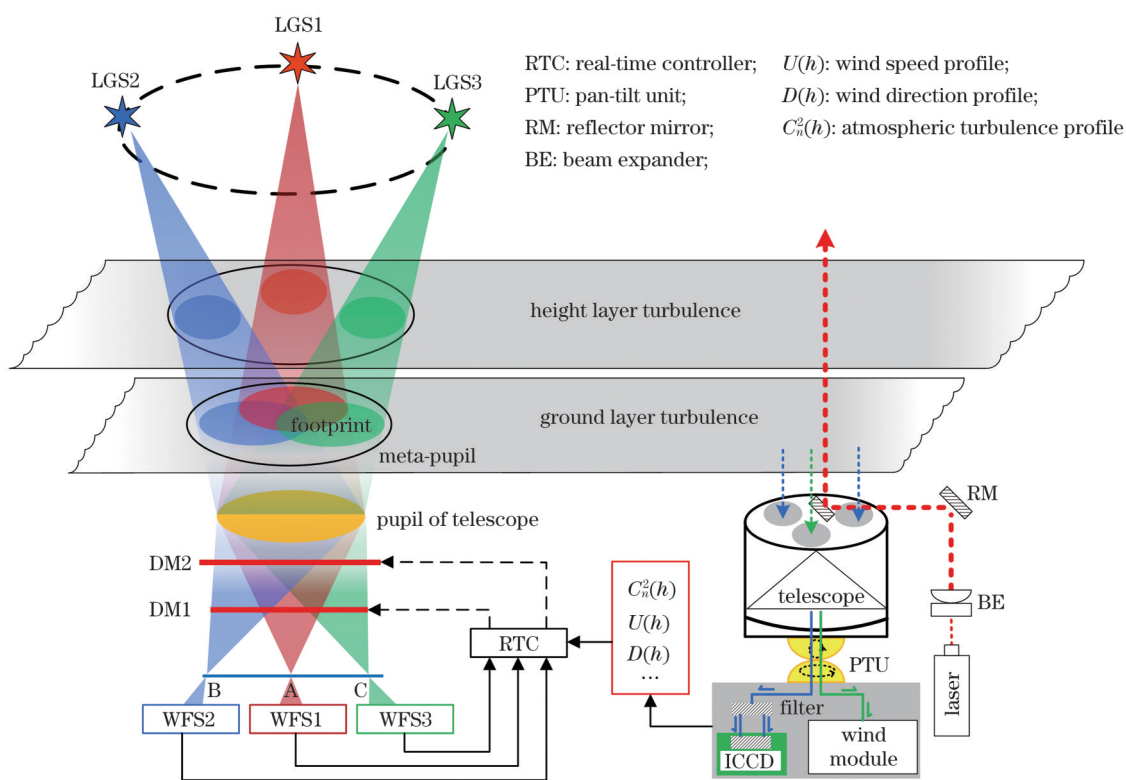


图 11 星向 MCAO 与扫描式多波长地基激光雷达协同作用示意图

Fig. 11 Cooperation mechanism of star oriented MCAO and scanning multi-wavelength ground-based LiDAR

当前技术也面临着多维度挑战:双仪器光路未同路径与算法反演差异导致数据基准不一致;地基激光雷达需兼顾全向域探测、实用性和生物安全性,小型化设计(功率降低、望远镜口径缩小、体积和质量减少)牺牲了探测高度,普遍采用的瑞利激光导星方案受聚焦非等晕效应制约,显著影响自适应校正精度;同时,高带宽的 AO 系统进一步加剧了多源数据融合与实时共享的难度。

4 结束语

地基激光雷达凭借其高时空分辨率、强抗干扰能力等特性,在湍流探测中正从传统观测手段(如微

温脉动、微波)的有效补充升级为核心的支撑技术之一。各种湍流探测地基激光雷达的优缺点如表 2 所示。

本研究详细梳理了当前主流地基激光雷达(如多波段扫描式的差分像移激光雷达、倾斜平面成像原理的差分光柱激光雷达、多参数多普勒测风激光雷达等)在大气湍流廓线探测中的技术原理、优劣势及发展动态,并从大气湍流廓线和风廓线两个方面探讨了地基激光雷达在 AO 技术融合中的应用潜力,同时指出了大气湍流廓线探测地基激光雷达与 AO 系统交叉应用中存在的数据基准不一致、系统带宽差及聚焦非等晕误差等现存挑战。

表 2 典型的大气湍流探测地基激光雷达利弊

Table 2 Advantages and disadvantages of typical ground-based LiDAR for atmospheric turbulence detection

Ground-based LiDAR	Advantages	Disadvantages
DIM LiDAR	Vibration-insensitive; resistant to defocus and artifact interference	Poor temporal resolution; susceptible to ground clutter; insufficient spatial resolution
DCIM LiDAR	Concise design; high temporal resolution; synchronous multi-altitude turbulence profiling; robust operation across turbulence regimes	CCD tilt sensitivity affecting data integrity; FOV-bound detection range; lower-altitude turbulence blind spots; attenuated spatial resolution at upper layers
DW LiDAR	Focal shift elimination via collimated emission; enhanced spatial resolution; DIM LiDAR technology integration	Accuracy variance above 6 km; vertical fixed-path detection; pending field validation
RTS LiDAR	Intuitive detection; simple structure; low complexity; stronger backscattering boosting echo signal	Scintillation index accuracy depending on saturation, aperture averaging, double-pass propagation, vibration, and near-surface turbulence
Cross-path LiDAR	High spatiotemporal resolution; robustness against scintillation saturation effects	Spatial resolution depending on subaperture size and dual-laser guide star spacing; skewed turbulence profile distribution
DWL	Structurally simple; cost-effective; multi-parameter detection; multi-mode scanning	VAD-retrieved ϵ facing CNR/sampling volume limits; wind and aerosol effects skewing spectral width; $C_n^2(h)$ needing weather data; weather/rain impacts

从长远来看,地基激光雷达的大气湍流探测技术正通过多波段协同、多参数耦合、多功能集成与任意扫描的智能化系统架构革新,推动下一代系统实现低功耗、低成本、小型化、易操作和高精度探测的跨越式突破,并深度融合自适应光学^[98]、人工智能^[99]、云计算及协同观测技术构建“空-天-地”一体化网络,结合卫星遥感、再分析资料及地面观测站数据提升湍流预测精度,为气象预报、航空安全、天文观测等领域提供可靠决策支持并拓展新型应用场景^[100]。

参 考 文 献

- [1] Wyngaard J. *Atmospheric turbulence*[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1992, 24: 205-233.
- [2] 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.
Rao R Z. Light propagation in the turbulent atmosphere [M]. Hefei: Anhui Science & Technology Publishing House, 2005.
- [3] 姜文汉. 自适应光学发展综述[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 170489.
Jiang W H. Overview of adaptive optics development[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 170489.
- [4] 刘宇韬, 王星奇, 党雪婷, 等. 星地动态大气湍流中的激光传输数值模拟[J]. 中国激光, 2025, 52(17): 1706001.
Liu Y T, Wang X Q, Dang X T, et al. Numerical simulation of laser propagation in dynamic atmosphere turbulence between satellite and ground[J]. Chinese Journal of Lasers, 2025, 52(17): 1706001.
- [5] 卜令兵, 方静怡, 毛志华, 等. 大气环境监测卫星二氧化碳探测激光雷达研究进展及应用展望(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(18): 1801001.
Bu L B, Fang J Y, Mao Z H, et al. Research progress and application prospects of carbon dioxide detection lidar for atmospheric environment monitoring satellite (invited) [J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(18): 1801001.
- [6] 成远, 余纪恒, 宫振峰, 等. 气溶胶光学特性对宽谱差分吸收激光雷达 NO_2 质量浓度反演结果的影响[J]. 光学学报, 2024, 44(6): 0601016.
Cheng Y, Yu J H, Gong Z F, et al. Influence of aerosol optical properties on retrieval results of NO_2 mass concentration in broadband differential absorption lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(6): 0601016.
- [7] 刘庆, 朱文越, 金效梅, 等. 大气湍流对相干测风激光雷达探测性能影响分析及验证[J]. 光学学报, 2026, 46(12): 1201002.
Liu Q, Zhu W Y, Jin X M, et al. Impact analysis and experimental verification of atmospheric turbulence effects on coherent wind lidar detection performance[J]. Acta Optica Sinica, 2026, 46(12): 1201002.
- [8] Barletti R, Ceppatelli G, Moroder E, et al. A vertical profile of turbulence in the Atlantic air mass measured by balloon-borne radiosondes[J]. Journal of Geophysical Research (1896-1977), 1974, 79(30): 4545-4549.
- [9] Travouillon T. SODAR calibration for turbulence profiling in TMT site testing[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 626720.
- [10] Gossard E E, Wolfe D E, Moran K P, et al. Measurement of clear-air gradients and turbulence properties with radar wind profilers[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1998, 15(2): 321-342.
- [11] 刘东, 姬小航, 崔少航, 等. 大气光学湍流廓线探测及预测技术(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(12): 1200002.
Liu D, Ji X H, Cui S H, et al. Detection and prediction technology of atmospheric optical turbulence profile (invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(12): 1200002.
- [12] Vernin J, Roddier F. Experimental determination of two-dimensional spatiotemporal power spectra of stellar light scintillation evidence for a multilayer structure of the air turbulence in the upper troposphere[J]. Journal of the Optical Society of America, 1973, 63(3): 270-273.
- [13] Butterley T, Wilson R W, Sarazin M. Determination of the profile of atmospheric optical turbulence strength from SLODAR data[J]. Monthly Notices of the Royal

- Astronomical Society, 2006, 369(2): 835-845.
- [14] Fuchs A, Tallon M, Vernin J. *Focusing on a turbulent layer: principle of the “generalized SCIDAR”* [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1998, 110(743): 86-91.
- [15] Tokovinin A, Kornilov V. *Accurate seeing measurements with MASS and DIMM* [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2007, 381(3): 1179-1189.
- [16] Rajagopal J, Tokovinin A, Bustos E, et al. *LuSci: a lunar scintillometer to study ground layer turbulence* [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7013: 70131P.
- [17] Habib A, Vernin J, Benkhaldoun Z, et al. *Single star SCIDAR: atmospheric parameters profiling using the simulated annealing algorithm* [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, 368(3): 1456-1462.
- [18] 罗曦, 李新阳, 胡诗杰, 等. *人造钠信标角度非等晕性的实验研究* [J]. 物理学报, 2018, 67(9): 099501.
- Luo X, Li X Y, Hu S J, et al. *Experimental investigation of angular anisoplanatism for sodium beacon* [J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(9): 099501.
- [19] Liang C, Wang C, Xue X H, et al. *Meter-scale and sub-second-resolution coherent Doppler wind LIDAR and hyperfine wind observation* [J]. Optics Letters, 2022, 47(13): 3179-3182.
- [20] 袁金龙. *大气多参数探测多普勒激光雷达反演技术及应用* [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- Yuan J L. *Inversion technology and application of atmospheric multi-parameter detection Doppler lidar* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [21] 倪志波. *大气湍流强度廓线的光学测量方法研究* [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010.
- Ni Z B. *Optical techniques for atmospheric turbulence profile measurement* [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [22] Diskin Y, Whiteley M, Grose M, et al. *Aircraft to ground profiling: turbulence measurements and optical system performance modeling* [J]. AIAA Journal, 2021, 59(11): 4610-4625.
- [23] 仇陈祥. *应用于船载平台的湍流廓线激光雷达研制* [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
- Qiu C X. *Development of lidar system for monitoring turbulent profiles on shipborne platform* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.
- [24] Bedka K, Cooney J, Emmitt G D, et al. *3-D lidar wind airborne profiling using a coherent-detection Doppler wind lidar designed for space-based operation* [R]. Maryland: NOAA Institutional Repository, 2025.
- [25] 孙学金, 张传亮, 方乐, 等. *星载激光测风技术体制及其评估方法综述* [J]. 遥感学报, 2022, 26(6): 1260-1273.
- Sun X J, Zhang C L, Fang L, et al. *A review of the technical system of spaceborne Doppler wind lidar and its assessment method* [J]. Journal of Remote Sensing, 2022, 26(6): 1260-1273.
- [26] Gimmestad G, Roberts D, Stewart J, et al. *Development of a lidar technique for profiling optical turbulence* [J]. Optical Engineering, 2012, 51(10): 101713.
- [27] 杨昊. *大气透射率、相干长度和风综合测量激光雷达系统研制* [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- Yang H. *Development of lidar system for comprehensive measurement of atmospheric transmittance, coherence length and wind* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2022.
- [28] Qiu D Y, Yang H, Xu X, et al. *Research on atmospheric turbulence observation by LiDAR based on imaging detection technology* [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2024, 27(3): 37-42.
- [29] Huang H H, Cui C L, Zhu W Y, et al. *Measuring atmospheric turbulence strength based on differential imaging of light column* [J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(12): 120101.
- [30] 王彩玉, 苑克娥, 时东锋, 等. *差分波前激光雷达探测大气湍流廓线仿真* [J]. 光学学报, 2021, 41(10): 1001002.
- Wang C Y, Yuan K E, Shi D F, et al. *Simulation of atmospheric turbulence profile measured by differential wavefront lidar* [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(10): 1001002.
- [31] Lu Y Q, Mao J D, Zhang Y N, et al. *Simulation and analysis of Mie-scattering lidar-measuring atmospheric turbulence profile* [J]. Sensors, 2022, 22(6): 2333.
- [32] Belen’kii M S, Bruns D, Hughes K A, et al. *Cross-path LIDAR for turbulence profile determination* [C]// Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, September 12–15, 2007, Maui, Hawaii, USA. Hawaii: AMOS, 2007: 248-257.
- [33] Su L, Lu C S, Yuan J L, et al. *Measurement report: the promotion of the low-level jet and thermal effects on the development of the deep convective boundary layer at the southern edge of the Taklimakan Desert* [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2024, 24(18): 10947-10963.
- [34] Sarazin M, Roddier F. *The ESO differential image motion monitor* [J]. Astronomy and Astrophysics, 1990, 227(1): 294-300.
- [35] Vernin J, Munoz-Tunon C. *Measuring astronomical seeing: the DA/IAC DIMM* [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1995, 107: 265.
- [36] Waldie A H, Soules D B, Drexler J J, et al. *A new high speed two-dimensional ccd atmospheric turbulence monitor* [J]. Proceedings of SPIE, 1988, 926: 335-346.
- [37] Tatarski V I. *Wave propagation in a turbulent medium* [M]. New York: Courier Dover Publications, 2016.
- [38] 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.
- [39] Gimmestad G G, Dawsey M W, Roberts D W, et al. *Field validation of optical turbulence lidar technique* [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5793: 10-16.
- [40] Gimmestad G G, Roberts D W, Stewart J M, et al. *Testing of LIDAR system for turbulence profiles* [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6951: 695109.
- [41] 侯再红, 吴毅, 张守川, 等. *湍流廓线激光雷达的研制* [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1602-1604.
- Hou Z H, Wu Y, Zhang S C, et al. *Development of turbulence profile lidar* [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1602-1604.
- [42] 戴阳, 林兆祥, 张文艳, 等. *激光雷达大气湍流测量方法研究* [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(11): 1769-1773.
- Dai Y, Lin Z X, Zhang W Y, et al. *Method of atmospheric turbulence measurement by lidar* [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(11): 1769-

- 1773.
- [43] 郭洁, 孙东松, 强希文, 等. 差分像移湍流廓线激光雷达测量误差分析[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0801004.
Guo J, Sun D S, Qiang X W, et al. Error analysis of differential image motion lidar[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0801004.
- [44] 周颖捷, 周安然, 孙东松, 等. 差分像移大气湍流廓线激光雷达的研制[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1130001.
Zhou Y J, Zhou A R, Sun D S, et al. Development of differential image motion LiDAR for profiling optical turbulence[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(11): 1130001.
- [45] Qiang X W. Remote sensing of atmospheric turbulence profiles by laser guide stars[J]. EPJ Web of Conferences, 2020, 237(6): 06014.
- [46] Hu Y L, Xie C B, Zhou H, et al. Research on integrated LiDAR and multi-parameter detection of atmospheric transmittance, turbulence, and wind[J]. Physica Scripta, 2024, 99(9): 095541.
- [47] Gimmetstad G G, Dawsey M W, Roberts D A, et al. LIDAR system for monitoring turbulence profiles[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62671V.
- [48] 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.
- [49] 黄克涛, 吴毅, 侯再红, 等. DCIM 激光雷达测量湍流廓线反演算法及数值仿真研究[J]. 量子电子学报, 2014, 31(3): 348-354.
Huang K T, Wu Y, Hou Z H, et al. Inversion algorithm and numerical simulation of DCIM lidar measurement turbulence profile[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2014, 31(3): 348-354.
- [50] 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.
- [51] Cheng Z, Tan F F, Jing X, et al. Retrieval of C_n^2 profile from differential column image motion lidar using the regularization method[J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(2): 020101.
- [52] Cheng Z, Jing X, He F, et al. Denoising differential column image motion lidar signal using singular value decomposition[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10462: 104623O.
- [53] Yao C, Xu W Q, Zhu W Y, et al. Research on automatic control technology of differential wavefront lidar[C]// Proceedings of the 2022 4th International Conference on Robotics, Intelligent Control and Artificial Intelligence, December 16-18, 2022, Dongguan, China. New York: ACM Press, 2022: 315-321.
- [54] 李双良. 湍流激光雷达的控制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
Li S L. Research on control technology of turbulent lidar [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024.
- [55] 王彩玉. 激光雷达探测大气湍流廓线数值仿真与实验分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
Wang C Y. Numerical simulation and experimental analysis of lidar monitoring atmospheric turbulence profile [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [56] 王彩玉, 苑克娥, 时东锋, 等. 大气光学湍流廓线探测方法研究进展[J]. 大气与环境光学学报, 2021, 16(1): 2-17.
Wang C Y, Yuan K E, Shi D F, et al. Atmospheric optical turbulence profile measurement: a review[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2021, 16(1): 2-17.
- [57] Fried D L. Statistics of a geometric representation of wavefront distortion[J]. Journal of the Optical Society of America, 1965, 55(11): 1427-1435.
- [58] Andrews L C, Phillips R L, Hopen C Y, et al. Theory of optical scintillation[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1999, 16(6): 1417-1429.
- [59] Coulter R L, Wesely M L. Estimates of surface heat flux from sodar and laser scintillation measurements in the unstable boundary layer[J]. Journal of Applied Meteorology, 1980, 19(10): 1209-1222.
- [60] Belen'kii M S, Gimmetstad G G. Design considerations for a residual turbulent scintillation (RTS) lidar[J]. Proceedings of SPIE, 1994, 2222: 628-632.
- [61] Belen'kii M S. Effect of residual turbulent scintillation and a remote-sensing technique for simultaneous determination of turbulence and scattering parameters of the atmosphere [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1994, 11(3): 1150-1158.
- [62] Henriksson M, Sjöqvist L. Scintillation index measurement using time-correlated single-photon counting laser radar[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 081902.
- [63] Jiang Y J, Ma J, Tan L Y, et al. Measurement of optical intensity fluctuation over an 11.8 km turbulent path[J]. Optics Express, 2008, 16(10): 6963-6973.
- [64] 倪志波, 黄宏华, 黄印博, 等. 基于闪烁法的大气湍流廓线测量技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 160-165.
Ni Z B, Huang H H, Huang Y B, et al. Atmospheric turbulence profile measurement techniques based on scintillation method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 160-165.
- [65] 崔朝龙. 基于闪烁效应的大气湍流廓线激光雷达测量技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
Cui C L. Lidar for atmospheric turbulence profile measurement based on scintillation effect[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [66] 赵琦. 利用闪烁激光雷达探测大气湍流的方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
Zhao Q. Atmospheric turbulence measurement with scintillation lidar[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018.
- [67] Clifford S F, Ochs G R, Lawrence R S. Saturation of optical scintillation by strong turbulence[J]. Journal of the Optical Society of America, 1974, 64(2): 148-154.
- [68] 程知, 谭逢富, 靖旭, 等. 双孔差分闪烁法测量大气湍流的理论与实验研究[J]. 物理学报, 2016, 65(7): 074205.
Cheng Z, Tan F F, Jing X, et al. Theoretical and experimental study of atmospheric turbulence measurement using two-aperture differential scintillation method[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(7): 074205.
- [69] 李仕春, 王宇轩, 宋程, 等. 基于后向散射增强效应的双

- 望远镜大气湍流激光雷达[J]. 光学学报, 2024, 44(24): 2401009.
- Li S C, Wang Y X, Song C, et al. Double-telescope atmospheric turbulence lidar system based on backscattering enhancement effect[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(24): 2401009.
- [70] Antoshkin L V, Botygina N N, Emaleev O N, et al. Path-averaged differential meter of atmospheric turbulence parameters[J]. Optics and Spectroscopy, 2010, 109(4): 635-640.
- [71] Jiang P, Xia H Y, Hu J D, et al. Estimation of atmospheric refractive index structure constant using an InGaAs/InP single-photon detector[J]. Optics Letters, 2023, 48(23): 6104-6107.
- [72] Banakh V A, Smalikho I N. Lidar studies of wind turbulence in the stable atmospheric boundary layer[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8): 1219.
- [73] 吴晓庆, 聂群, 方强. 近地面大气湍流平均动能耗散率测量与分析[J]. 力学学报, 2007, 39(6): 721-726.
- Wu X Q, Nie Q, Fang Q. Measurement and analysis of turbulent mean kinetic energy dissipation rate in the atmospheric surface layer[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(6): 721-726.
- [74] O'Connor E J, Illingworth A J, Brooks I M, et al. A method for estimating the turbulent kinetic energy dissipation rate from a vertically pointing Doppler lidar, and independent evaluation from balloon-borne *in situ* measurements[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(10): 1652-1664.
- [75] Jiang P, Yuan J L, Wu K N, et al. Turbulence detection in the atmospheric boundary layer using coherent Doppler wind lidar and microwave radiometer[J]. Remote Sensing, 2022, 14(12): 2951.
- [76] Su L, Xia H Y, Yuan J L, et al. Study on daytime atmospheric mixing layer height based on 2-year coherent Doppler wind lidar observations at the southern edge of the Taklimakan Desert[J]. Remote Sensing, 2024, 16(16): 3005.
- [77] Wang L, Yuan J L, Xia H Y, et al. Marine mixed layer height detection using ship-borne coherent Doppler wind lidar based on constant turbulence threshold[J]. Remote Sensing, 2022, 14(3): 745.
- [78] Yuan J L, Xia H Y, Wei T W, et al. Identifying cloud, precipitation, windshear, and turbulence by deep analysis of the power spectrum of coherent Doppler wind lidar[J]. Optics Express, 2020, 28(25): 37406-37418.
- [79] Shangguan M J, Xia H Y, Wang C, et al. All-fiber upconversion high spectral resolution wind lidar using a Fabry-Perot interferometer[J]. Optics Express, 2016, 24(17): 19322-19336.
- [80] Shangguan M J, Qiu J W, Yuan J L, et al. Doppler wind lidar from UV to NIR: a review with case study examples[J]. Frontiers in Remote Sensing, 2022, 2: 787111.
- [81] 靳翔, 宋小全, 刘佳鑫, 等. 基于多普勒激光雷达的边界层内湍流参数估算[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1110001.
- Jin X, Song X Q, Liu J X, et al. Estimation of turbulence parameters in atmospheric boundary layer based on Doppler lidar[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1110001.
- [82] 程志刚, 李炬, 张鑫宇, 等. 基于三台测风激光雷达的大气湍流和三维风场研究[J]. 气象学报, 2020, 78(6): 1021-1036.
- Cheng Z G, Li J, Zhang X Y, et al. A study on turbulence and three-dimensional wind field based on observations of three wind lidars[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2020, 78(6): 1021-1036.
- [83] Sathe A, Mann J. A review of turbulence measurements using ground-based wind lidars[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6(11): 3147-3167.
- [84] Bonin T A, Choukulkar A, Brewer W A, et al. Evaluation of turbulence measurement techniques from a single Doppler lidar[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(8): 3021-3039.
- [85] Rao C H, Zhong L B, Guo Y M, et al. Astronomical adaptive optics: a review[J]. Photonix, 2024, 5(1): 16.
- [86] 王婵, 张兰强, 冉弦, 等. 基于实际采集图像的日珥波前探测方法(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(18): 1828015.
- Wang C, Zhang L Q, Ran X, et al. Wavefront detection methods for solar prominence based on real collected images (invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(18): 1828015.
- [87] 刘超, 李学莹, 张开河, 等. 深空激光通信研究进展及发展方向(特邀)[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(7): 0706007.
- Liu C, Li X Y, Zhang K H, et al. Research progress and future directions in deep space optical communication (invited)[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(7): 0706007.
- [88] 罗曦, 李新阳, 王彩霞, 等. 强天光背景下基于钠导星的大气波前像差探测研究[J]. 中国激光, 2024, 51(8): 0804002.
- Luo X, Li X Y, Wang C X, et al. Atmospheric wavefront aberration detection using sodium laser guide star under strong skylight background[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(8): 0804002.
- [89] 李仕春, 王宇轩, 宋程, 等. 基于后向散射增强效应的双望远镜大气湍流激光雷达[J]. 光学学报, 2024, 44(24): 2401009.
- Li S C, Wang Y X, Song C, et al. Double-telescope atmospheric turbulence lidar system based on backscattering enhancement effect[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(24): 2401009.
- [90] 张兰强. 太阳高分辨力成像多层共轭自适应光学技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2014.
- Zhang L Q. Solar multi-conjugate adaptive optics for high resolution imaging[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [91] 李彩凤, 贾鹏, 蔡冬梅. 地面层自适应光学系统多颗激光导引星位置优化研究[J]. 光电工程, 2020, 47(9): 190515.
- Li C F, Jia P, Cai D M. Optimizing the location of multiple laser guide stars in ground layer adaptive optical systems[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(9): 190515.
- [92] Fusco T, Costille A. Impact of C_n^2 profile structure on wide-field AO performance[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7736: 77360J.
- [93] 魏平, 李新阳, 罗曦, 等. 部分子孔径缺光对夏克-哈特曼波前传感器波前复原的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0409002.

- Wei P, Li X Y, Luo X, et al. Influence of lack of light in partial subapertures on wavefront reconstruction for Shack-Hartmann wavefront sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409002.
- [94] 陈前宇, 许唐, 刘志强, 等. 一种集成近红外 SPAD 阵列的激光雷达测距系统[J]. 光学学报, 2024, 44(12): 1228001.
- Chen Q Y, Xu T, Liu Z Q, et al. LiDAR ranging system with integrated near-infrared SPAD array[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(12): 1228001.
- [95] Bolbasova L A, Lukin V P. Atmospheric research for adaptive optics[J]. Atmospheric and Oceanic Optics, 2022, 35(3): 288-302.
- [96] 郭友明, 马晓燠, 饶长辉. 自适应光学控制系统对 Kolmogorov 湍流补偿的修正有效带宽[J]. 物理学报, 2013, 62(13): 134207.
- Guo Y M, Ma X Y, Rao C H. Modified effective bandwidths of adaptive optical control systems for compensation in Kolmogorov turbulence?[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(13): 134207.
- [97] Zhang Y P, Yuan J L, Wu Y B, et al. Sub-meter wind detection with pulsed coherent Doppler lidar[J]. Physical Review Fluids, 2023, 8(2): L022701.
- [98] 于千茜, 李阳阳, 秦明, 等. Shack-Hartmann 波前传感器研究进展及应用(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(21): 2100001.
- Yu Q Q, Li Y Y, Qin M, et al. Advances and applications of Shack-Hartmann wavefront sensors (invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(21): 2100001.
- [99] 李自强, 李新阳, 高泽宇, 等. 基于深度学习的自适应光学波前传感技术研究综述[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(8): 081001.
- Li Z Q, Li X Y, Gao Z Y, et al. Review of wavefront sensing technology in adaptive optics based on deep learning[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33(8): 081001.
- [100] Wang Z E, Menenti M. Challenges and opportunities in lidar remote sensing[J]. Frontiers in Remote Sensing, 2021, 2: 641723.

Review of Ground-Based LiDAR Techniques in Atmospheric Turbulence Profiling

Su Lian^{1,2}, Luo Xi^{1,2}, Huang Linhai^{1,2}, Li Xinyang^{1,2*}, Jiang Pu³, Yuan Jinlong⁴, Xia Haiyun^{3,4}

¹National Laboratory on Adaptive Optics, Chengdu 610209, Sichuan, China;

²Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, Sichuan, China;

³School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

⁴School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract

Significance During atmospheric transmission, laser beams are affected by turbulent disturbances, leading to complex optical turbulence effects, such as intensity scintillation, angle-of-arrival fluctuations, coherence degradation, beam wander, and beam expansion. These effects significantly impair the performance of adaptive optics (AO) systems, free-space laser communication, meteorological detection, and other applications. The refractive index structure constant, a key parameter for quantifying optical turbulence, fundamentally determines the vertical morphology of atmospheric turbulence profiles. While traditional methods, including microthermal radiosondes and microwave radar, are plagued by constraints such as poor spatiotemporal resolution and limited detection range. Passive detection using natural guide stars faces limitations due to low sky coverage and anisoplanatism errors. Ground-based LiDAR, characterized by its robust anti-interference capability, multi-parameter collaborative detection, and high spatiotemporal resolution, has emerged as a pivotal technology for atmospheric turbulence profile measurement. This paper provides a comprehensive review of the research progress in ground-based LiDAR for atmospheric turbulence detection, with a focused analysis of its core principles and the advantages and disadvantages of various technologies. Additionally, within the framework of cross-disciplinary applications, this study explores both the potential and the challenges associated with integrating ground-based LiDAR and adaptive optical correction techniques. Finally, this paper outlines future directions for ground-based LiDAR in atmospheric turbulence profile detection.

Progress This paper comprehensively reviews six major ground-based LiDAR technologies, detailing their technical principles, development status, performance metrics, and respective advantages and limitations: differential image motion (DIM) LiDAR, which retrieves atmospheric coherence length and turbulence intensity via dual-aperture image motion variance based on the differential image motion monitor (DIMM) principle; differential column image motion (DCIM) LiDAR, which utilizes tilted focal plane imaging technology to achieve synchronous multi-altitude turbulence measurements; differential wavefront (DW) LiDAR, which employs dual-

channel wavefront jitter variance to invert atmospheric turbulence parameters; residence turbulence scintillation (RTS) LiDAR, which derives turbulence intensity by measuring the scintillation index of echo signals; cross-path LiDAR, which reconstructs turbulence profiles through cross-correlation analysis of dual-laser guide star wavefront slopes; and Doppler wind LiDAR (DWL), which estimates turbulence kinetic energy dissipation rate and atmospheric turbulence profiles based on parameters such as wind shear and spectral width. Finally, the prospects and current limitations of integrating adaptive optics systems with ground-based LiDAR technologies are discussed.

Conclusions This study offers a comprehensive overview of the technical principles, strengths, limitations, and evolving trends of mainstream ground-based LiDAR systems used for atmospheric turbulence profiling. The application potential of such LiDAR systems in conjunction with adaptive optics is examined from two key aspects: atmospheric turbulence profiling and wind profiling. Furthermore, the study addresses several persistent challenges in the integrated use of ground-based LiDAR and AO systems, including inconsistencies in data benchmarks, mismatches in system bandwidth, and focus anisoplanatism errors. In the long term, ground-based LiDAR for atmospheric turbulence detection is undergoing transformative progress, enabled by intelligent system architectures that support multi-band collaboration, multi-parameter coupling, multi-functional integration, and arbitrary scanning. These innovations are paving the way for a new generation of systems that achieve breakthroughs in low power consumption, cost-effectiveness, miniaturization, ease of operation, and high-precision detection. Moreover, through deep integration with adaptive optics, artificial intelligence, cloud computing, and collaborative observation technologies, these systems are helping to build an integrated space-air-ground network. By incorporating satellite remote sensing, reanalysis data, and ground-based observations, the network significantly improves turbulence prediction accuracy. This, in turn, offers reliable decision-making support for applications such as weather forecasting, aviation safety, and astronomical observation, while also enabling new application scenarios.

Key words remote sensing; LiDAR; atmosphere turbulence; adaptive optics; atmospheric remote sensing