

基于连续激光器的侧向拉曼散射激光雷达无盲区探测大气温度技术

杨帆, 高飞*, 高雄, 李晓莉, 汪丽, 闫庆, 石冬晨, 宋跃辉, 李仕春, 华灯鑫**

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 提出一种新型的侧向纯转动拉曼散射激光雷达探测技术,其采用双基地的收发系统结构,利用侧向接收系统的俯仰扫描功能实现对与温度具有相反依存关系的高低量子数的侧向纯转动拉曼散射光谱的探测,该技术为从地表到特定高度大气温度的无盲区探测提供了技术支持。侧向纯转动拉曼散射激光雷达的初步观测实验采用整段等距离分辨率和分段等距离分辨率两种云台转动方案,反演结果表明侧向纯转动拉曼散射激光雷达可实现1400 m高度范围内大气温度的精细探测,且分段等距离分辨率云台转动方案在近地表312 m高度范围内能够获得更为精细的大气温度空间分布特征。

关键词 大气光学; 激光雷达; 近地表大气温度; 侧向纯转动拉曼散射; 无盲区探测; 俯仰扫描

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231243

1 引言

大气温度是大气冷热程度的表征参数,其时空分布和变化对于大气的压力、风、湿度以及天气、气候等具有重要影响,是大气热平衡、大气物理与化学、天气预报以及环境监测等方面研究的重要参数^[1-2]。大气温度由于受到地表的辐射冷却、冷暖锋等因素影响,时常产生逆温层,特别是近地表的大气温度,其变化相当复杂,这与近地表大气中发生的热力过程和水汽凝结现象有着密切关系,也与大气水循环和大气中污染物的分布、扩散及传输等具有密切的关系^[3]。由于近地表面层大气温度变化与人类活动密切相关,因此针对近地表大气分布特征,开展对大气温度精确探测技术的研究工作,包括其时空分布规律,这对于深入研究全球变暖与极端天气的相关性具有非常重要的意义^[4]。

纯转动拉曼散射激光雷达是一种能够实现大气温度探测的重要遥感工具,其基于大气中 N_2 和 O_2 分子的纯转动拉曼散射高低量子数谱线与温度的敏感性原理来探测大气温度^[5-6]。由于纯转动拉曼散射信号比较微弱且其谱线靠近弹性散射光谱会导致精细分离提取难度较大,研究人员在专注于大功率的脉冲激光器、大口径的接收望远镜的研究,以提升激光雷达的探测能力和探测性能之余,还会特别关注激光雷达分光系统

的研制,设计了超窄带滤光片、法布里-珀罗标准具和闪耀光栅与光纤 Bragg 光栅组成的两级并行多通道拉曼分光系统等,这些都能够满足纯转动拉曼谱线精细提取的需求^[7-9]。同时,全天时大气温度探测、数据反演和数据修正等能提升激光雷达实际应用能力的技术,也是近些年的研究热点^[10]。然而,上述研究均采用传统激光雷达同轴或平行轴的单基地配置模式,其发射系统和接收系统间的匹配程度较低导致激光雷达系统存在几何重叠因子,严重限制了激光雷达对近地表大气温度的探测能力^[11]。近年来,同轴激光雷达自准直系统、几何重叠因子校准算法等相继被人们所采用,以减小激光雷达几何重叠因子对激光雷达探测性能的影响,但是各种方法均未能有效地解决收发系统之间的匹配问题,在后向散射激光雷达探测近地表大气参量过程中仍具有相当的局限性^[12-13]。

为有效打破后向散射激光雷达因几何重叠因子的存在导致无法对近地表大气参量进行探测这一技术壁垒,侧向散射激光雷达技术被提出,其采用 CCD 图像传感器作为接收装置与激光发射器共同构建出双基地的侧向图像激光雷达系统,可实现对近地表大气气溶胶光学参量的探测^[14-16]。在国内,侧向图像激光雷达的研究人员对系统搭建、回波信号噪声的分析和提取、CCD 像元角宽度和探测高度间的关系、大气总散射相

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2023-08-07; 录用日期: 2023-08-14; 网络首发日期: 2023-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(42175149,42275148)、陕西省自然科学基金(2023JCQN0308)、陕西省教育厅科研计划项目(23JY055)、西安理工大学博士创新基金(310-252072205)

通信作者: *gaofei@xaut.edu.cn; **dengxinhua@xaut.edu.cn

函数探测以及后向散射激光雷达联合探测实验等方面的研究取得了一定的成果^[17-22]。但是考虑到纯转动拉曼散射信号强度比米氏-瑞利(Mie-Rayleigh)散射信号弱了2~3个数量级,因此很难使用图像传感器作为接收器件对近地表大气温度敏感性相关的纯转动拉曼散射高低量子数谱线进行探测。

本文以近地表大气温度的精细探测为目标,提出了一种新型的侧向扫描纯转动拉曼散射激光雷达探测技术,有效解决了后向纯转动拉曼散射激光雷达受几何重叠因子影响而无法对近地表大气温度进行有效探测的难题。该技术的最大优势是采用连续激光器作为激励光源,还具有轻量化、低成本、便于移动以进行户外观测的优势。将基于双望远镜和超窄带干涉滤光片的侧向接收系统置于云台上,利用云台的俯仰扫描功能实现高低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号廓线的收集。实验初步设计了两种扫描探测方案,均验证了侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统可实现0~1400 m范围内的大气温度探测。

2 侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统设计

图1为侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统结构及其无盲区探测大气温度的原理,其中, r 为光学望远镜所接收探测高度 z 处的斜程距离, φ 为光学望远镜指向激光束的俯仰角, θ 为散射角, γ 为光学望远镜的接收视场角。激光发射系统选用波长为532.1 nm的连续激光器作为激励光源,向大气垂直发射激光功率为200 mW的连续激光,使其与大气中大气分子和颗粒

物发生散射作用。其中,侧向接收系统与激光发射系统的水平距离 D 为60 m,采用两支直径为90 mm、焦距为900 mm的开普勒光学望远镜作为接收光学装置,并在其尾部设计由超窄带干涉滤光片IF和顶窗式光电倍增管PMT组成的光谱分光和光电检测系统,使其分离并提取高低量子数的侧向纯转动拉曼散射回波信号。为实现对大气廓线参量的探测,将光学望远镜及其配套的光谱分光和光电检测系统置于具有水平框架的云台上,可实现 $0^\circ\sim 90^\circ$ 的俯仰扫描,转动精度为 0.1° 。在水平框架上,两台光学望远镜之间的距离 $2L$ 为600 mm,telescope 1和telescope 2的倾斜角 ϵ 为 89.71° ,使二者朝向同一激光束区域。

在温度测量中,考虑到波长为532.1 nm的可见光激发的荧光效应极其微弱,并且纯转动拉曼谱线的Stokes分支强度比Anti-Stokes分支强,因此选择强度较强的Stokes分支。同时为了提高探测灵敏度并减少弹性散射信号的干扰,实验采用的高低量子数通道的中心波长由温度不确定度确定。选取Stokes分支低量子数通道的三条氮气谱线($J=4, J=5, J=6$),中心波长为533.24 nm;选取高量子数通道的三条氮气谱线($J=14, J=15, J=16$),中心波长为535.52 nm。在侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统中,低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射信号被光学望远镜telescope 1接收,经透镜lens 1准直后,再经中心波长为533.24 nm、带宽为0.45 nm的干涉滤光片IF 1进行滤波,作为侧向纯转动拉曼散射低量子数探测通道;高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射信号被光学望远镜telescope 2接收,经透镜lens 2准直后,再经中心波长为

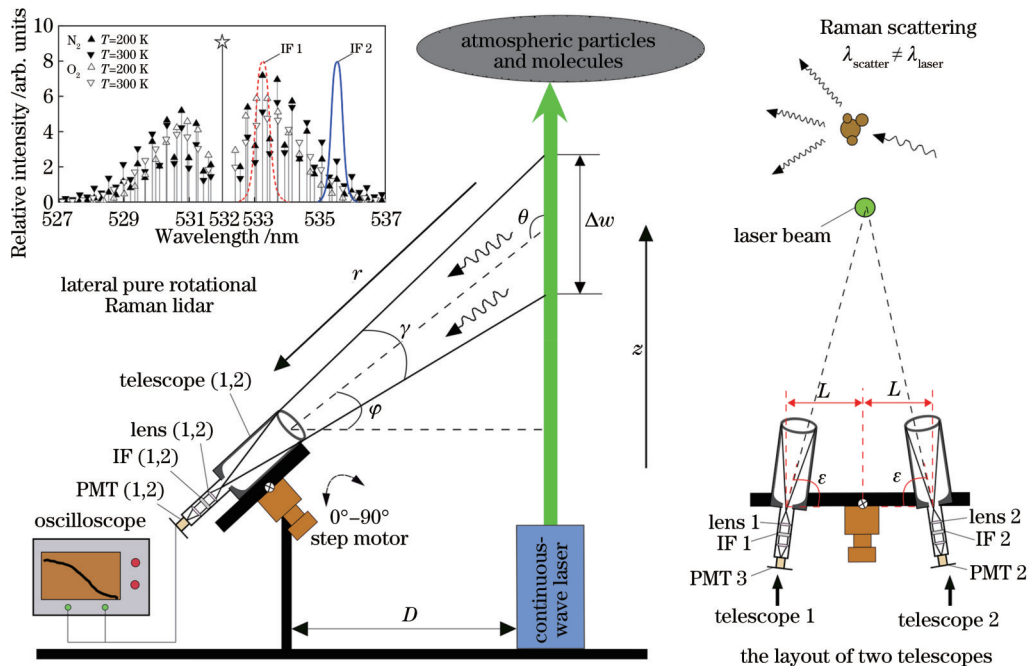


图1 基于连续激光器的侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统结构及探测原理图

Fig. 1 Structure and detection principle diagram of lateral pure rotational Raman scattering lidar system with continuous-wave laser

535.52 nm、带宽为 0.45 nm 的滤光片 IF 2 进行滤波，作为侧向纯转动拉曼散射高量子数探测通道。各通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号由 PMT 进行光电转换，并送入数据采集系统。NI 示波器对每个俯仰角下的侧向纯转动拉曼散射回波信号进行 20 s 时间

累积的数据采集和数据存储。值得注意的是，侧向纯转动拉曼激光雷达的分光系统集成在每个光学望远镜的出光口处，便于户外移动并进行野外观测。基于连续激光器的侧向纯转动拉曼散射激光雷达的系统参数如表 1 所示。

表 1 基于连续激光器的侧向纯转动拉曼散射激光雷达的系统参数

Table 1 Parameters of lateral pure rotational Raman scattering lidar system based on continuous-wave laser

Parameter	Value	Parameter	Value
Transmitter	Continuous-wave laser	Polychromator system	IF 1/IF 2
Wavelength /nm	532.1	Center wavelength /nm	533.24/535.52
Divergence angle /mrad	<0.5	Bandwidth /nm	0.45
Lateral receiver	Optical telescope	Rotational system	Step motor
Diameter /mm	90	Angle accuracy /($^{\circ}$)	± 1
Focal length /mm	900	Elevation angle /($^{\circ}$)	0-90
Data acquisition system	Tektronix MSO46	Detector	Hamamatsu PMT H11901
Sampling rate /(MSa/s)	125	Quantum efficiency	$\sim 25\%$ @532.1 nm
Record length /M	0.01	Gain	2×10^6

3 侧向纯转动拉曼散射激光雷达探测大气温度技术

3.1 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的探测原理及大气温度反演算法

侧向纯转动拉曼散射激光雷达探测大气温度技术基于纯转动拉曼散射原理，其中，激光雷达发射系统和

侧向望远镜接收系统采用双基地模式，侧向望远镜接收系统通过俯仰扫描实现对不同高度处激光束的扫描探测，有效解决了后向纯转动拉曼散射激光雷达受几何重叠因子影响而无法对近地表大气温度进行探测的问题。根据收发分置的双基地侧向散射激光雷达系统结构，侧向纯转动拉曼散射激光雷达回波信号可表示为

$$E(z, \lambda_0, \lambda_x, \theta) = E_0 AK \frac{\gamma}{D} N(z) \sum_{i=N_2, O_2} \left[\tau_i(\lambda_x) \eta_i \frac{d^r \sigma_X(J, T)}{d\Omega} \right] f(\theta) T_z(z, \lambda_0) T_X(z, \lambda_x, \theta), \quad (1)$$

式中： $E(z, \lambda_0, \lambda_x, \theta)$ 是当探测高度为 z 且散射角为 θ 时的侧向纯转动拉曼散射回波信号的接收功率； E_0 是连续激光器的初始功率； A 是光学望远镜的有效接收面积； K 是包含望远镜接收光学效率和 PMT 量子效率的系统常数； D 是发射系统和接收系统之间的水平距离； $\tau_i(\lambda_x)$ 是分子各转动拉曼谱线对应波长下滤光片的透过率； η_i 为 N_2 和 O_2 分子所占大气体积比； $d^r \sigma_X(J, T)/d\Omega$ 为分子各条纯转动拉曼散射光谱的后向散射截面； $N(z)$ 为大气分子密度； $f(\theta)$ 为归一化的侧向散射相函数； $T_z(z, \lambda_0)$ 为激光发射波长为 λ_0 的激光束射向高度为 z 的去程大气透过率； $T_X(z, \lambda_x, \theta)$ 为纯转动拉曼波长 λ_x 下侧向望远镜所接收的高度 z 处的斜程大气透过率，下标 X 表示高低量子数通道的纯转动拉曼散射光谱。

侧向纯转动拉曼散射激光雷达的去程大气透过率和斜程大气透过率分别表示为

$$T_z(z, \lambda_0) = \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_{aer}(z, \lambda_0) + \alpha_{mol}(z, \lambda_0)] dz \right\}, \quad (2)$$

$$T_r(z, \lambda_x, \theta) = \exp \left\{ \frac{1}{\cos \theta} \int_0^z [\alpha_{aer}(z, \lambda_x) + \alpha_{mol}(z, \lambda_x)] dz \right\}, \quad (3)$$

式中： $\alpha(z, \lambda_0)$ 和 $\alpha(z, \lambda_x)$ 是激光初始波长 λ_0 和纯转动拉曼光谱 λ_x 处的消光系数；下标 aer 和 mol 分别代表气溶胶粒子和大气分子。

根据侧向拉曼散射原理，侧向纯转动拉曼散射高量子数通道和低量子数通道的激光雷达方程可分别表示为

$$E_{High}(z, \lambda_0, \lambda_{High}, \theta) = E_0 AK \frac{\gamma}{D} N(z) \sum_{i=N_2, O_2} \left[\tau_i(\lambda_{High}) \eta_i \frac{d^r \sigma_{High}(J, T)}{d\Omega} \right] f_{High}(\theta) \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_{aer}(z, \lambda_0) + \alpha_{mol}(z, \lambda_0)] dz + \frac{1}{\cos \theta} \int_0^z [\alpha_{aer}(z, \lambda_{High}) + \alpha_{mol}(z, \lambda_{High})] dz \right\}, \quad (4)$$

$$E_{\text{Low}}(z, \lambda_0, \lambda_{\text{Low}}, \theta) = E_0 AK \frac{\gamma}{D} N(z) \sum_{i=N_2, O_2} \left[\tau_i(\lambda_{\text{Low}}) \eta_i \frac{d^\pi \sigma_{\text{Low}}(J, T)}{d\Omega} \right] f_{\text{Low}}(\theta) \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_0) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_0)] dz + \frac{1}{\cos \theta} \int_0^z [\alpha_{\text{aer}}(z, \lambda_{\text{Low}}) + \alpha_{\text{mol}}(z, \lambda_{\text{Low}})] dz \right\} \quad (5)$$

利用纯转动拉曼散射激光雷达探测大气温度的时候,通过构建两个温度灵敏度相反的高量子数通道和低量子数通道的信号强度之比 $Q(T, z)$ 来反演大气温度的信息。侧向纯转动拉曼激光雷达反演近地表大气温度的算法可表示为

$$Q(T, z) = \frac{E_{\text{Low}}(z, \lambda_0, \lambda_{\text{Low}}, \theta)}{E_{\text{High}}(z, \lambda_0, \lambda_{\text{High}}, \theta)} = \Delta T_r(z, \lambda_{\text{Low}}, \lambda_{\text{High}}, \theta) \Delta f_{\text{Low/High}}(\theta) \frac{\sum_{i=N_2, O_2} \left[\tau_i(\lambda_{\text{Low}}) \eta_i \frac{d^\pi \sigma_{\text{Low}}(J, T)}{d\Omega} \right]}{\sum_{i=N_2, O_2} \left[\tau_i(\lambda_{\text{High}}) \eta_i \frac{d^\pi \sigma_{\text{High}}(J, T)}{d\Omega} \right]}, \quad (6)$$

式中: $\Delta f_{\text{Low/High}}$ 是大气分子散射相函数的校正系数,考虑到散射角 θ 是影响大气分子散射相函数的唯一参数,而利用双望远镜接收时其散射角保持一致,因此可认为 $\Delta f_{\text{Low/High}}$ 等于 1; $\Delta T_r(z, \lambda_{\text{Low}}, \lambda_{\text{High}}, \theta)$ 是在斜程路径上因纯转动拉曼散射高低量子数通道的波长差所引起的大气透过率的差异,但是考虑到两个通道的波长差极小 ($\sim 2.28 \text{ nm}$) 且距离侧向接收系统的斜程距离是一致的,因此在近地表大气温度的反演算法中忽略了气溶胶分布对探测结果的影响。

在大气温度反演算法中,高低量子数通道的信号强度之比 $Q(T, z)$ 与温度 $T(z)$ 之间的关系式可进一步表示为

$$Q(T, z) = \exp \left[a + \frac{b}{T(z)} \right], \quad (7)$$

式中: a, b 为侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统的校

正参数,可通过无线电探空仪进行标定。本文中对 $Q(T, z)$ 添加多次项构成非线性关系以提高对大气温度的反演精度,同时引入了新的校正参数 c, d ^[23]。

3.2 标定函数的优化

在实验过程中,使用滤光片对两路温度灵敏度相反的高低量子数纯转动拉曼散射信号进行提取,考虑到滤波器存在一定的带宽,在提取单条谱线的时候往往会混入所提取谱线周围相邻的 N_2 和 O_2 分子的拉曼谱线,因此不能单一使用式(7)表示温度和纯转动拉曼信号比值之间的复杂关系。由于 $x=1/T$ 和 $y=\ln Q$ 为线性关系,拟合函数可表示为 $x=a+by$ 或 $y=a+bx$ 。为提高对大气温度的反演精度,采用较为复杂的标定函数来描述纯转动拉曼信号比值 $Q(T, z)$ 与温度 $T(z)$ 之间的关系,可在式(7)中引入 $x=1/T$ 和 $y=\ln Q$ 多次项构成非线性关系式。表 2 为新拓展的标定函数表达式。

表 2 添加 $x=1/T$ 和 $y=\ln Q$ 的标定函数

Table 2 Add the calibration function of $x=1/T$ and $y=\ln Q$

Calibration function	Add the calibration function of $x=1/T$	Calibration function	Add the calibration function of $y=\ln Q$
CF 1	$y = a + bx + cx^2$	CF 5	$x = a + by + cy^2$
CF 2	$y = a + bx + c/x$	CF 6	$x = a + by + c/y$
CF 3	$y = a + bx^{1/2} + cx$	CF 7	$x = a + by + c/y + d/y^2$
CF 4	$y = a + bx^{1/2} + c/x^{1/2}$	CF 8	$x = a + by + cy^2 + dy^3$

在温度测量过程中,通过表 2 中的 8 种标定函数进行多项式拟合,分析由纯转动拉曼信号比值 $Q(T, z)$ 反演温度 $T(z)$ 中各标定函数引入的误差,如图 2 所示。

在第一类标定函数 CF 1~CF 4 中,标定函数 CF 1 的引入误差最小。在第二类标定函数 CF 5~CF 8 中,标定函数 CF 8 的引入误差最小。对比 CF 1 和 CF 8,其中 CF 8 的引入误差较小,因此采用 CF 8 作为标定函数,具体温度表达式为

$$T(z)_{\text{CF8}} = \frac{1}{a + b \ln Q(T, z) + c [\ln Q(T, z)]^2 + d [\ln Q(T, z)]^3}. \quad (9)$$

4 实验观测

在完成侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统设计的基础上,搭建了侧向扫描纯转动拉曼散射激光雷达系统,并开展了初步的实验观测研究。图 3 为基于连续激光器的侧向纯转动拉曼散射激光雷达实验系统图。

系统实验设计了两种不同的云台俯仰扫描转动方案,以满足近地表无盲区大气温度的精细探测的不同需求。方案一为整段等距分辨率云台转动方案,从 37 个角度进行采样,探测高度可达 1296 m,整个采样周期保持 36 m 的距离分辨率,云台俯仰角度从 0° 变化到 87.4° 完成对一整条廓线的完整采样。方案二是分段

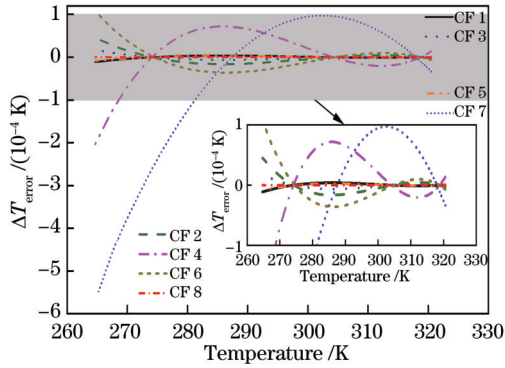


图 2 八种标定函数的引入误差

Fig. 2 Introduction error of eight calibration functions

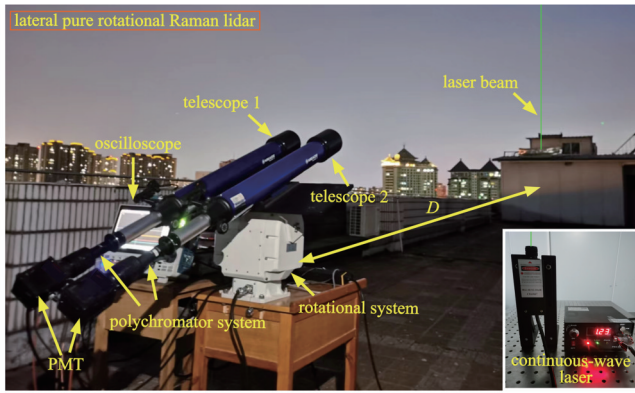


图 3 基于连续激光器的侧向纯转动拉曼散射激光雷达实验系统

Fig. 3 Experimental system of lateral pure rotational Raman scattering lidar with continuous-wave laser

等距分辨率云台转动方案,共设置 41 个俯仰角度来实现 1332 m 的采样探测高度。第一个俯仰扫描阶段探测高度为 0~72 m,云台从 0°转动至 50.2°,距离分辨率为 7.2 m,采样点为 11 个;第二个俯仰扫描阶段探测高度为 72~312 m,云台从 50.2°转动至 79.1°,距离分辨率为 24 m,采样点为 10 个;第三个俯仰扫描阶段探测高度为 312~732 m,云台从 79.1°转动至 85.3°,距离分辨率为 42 m,采样点为 10 个;第四个俯仰扫描阶段探测高度为 732~1332 m,云台从 85.3°转动至 87.4°,距离分辨率为 60 m,采样点为 10 个。方案二与方案一相比,云台在低层大气探测时俯仰扫描转动角的变化相对更小,可实现对低层大气温度垂直结构更为精细的探测。两种云台转动方案在各角度采样时间均为 20 s 的情况下,采用整段等距分辨率云台转动方案完成一次大气廓线的采集时间为 14.3 min,采用分段等距分辨率云台转动方案完成一次大气廓线的采集时间为 16.0 min。在方案一和方案二的各实验探测结果(图 4~7)中:水平误差棒为虚拟脉冲长度范围内测量信号的标准差,表示信号的波动范围;垂直误差棒表示该高度上的虚拟激光脉冲长度。将数据反演结果与距离激光雷达观测点 18 km 处的西安大气探测中心(108.97°

N,34.43°E) 当日 19:15 发射的无线电探空仪所得到的数据进行对比,以验证侧向纯转动拉曼散射激光雷达实验系统探测大气温度的可行性。西安大气探测中心采用 GTS1 型数字探空仪,可获得高精度的大气垂直剖面温度、湿度、气压等数据信息。

1) 基于整段等距分辨率云台转动方案的实验探测结果

侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统采用整段等距分辨率的云台转动方案可实现 0~1296 m 高度范围内的大气温度探测,整条廓线具有相同的 36 m 的距离分辨率。图 4 为 2023 年 4 月 26 日 19:30 CST (Chinese standrad time) 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的大气温度探测结果。

图 4(a) 给出了高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度变化的廓线,可以看出高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度的增加波动较为剧烈,特别是在 480~840 m 的探测高度范围内,高量子数通道的信号出现明显波动增强的趋势;图 4(b) 为低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度变化的廓线,可以看出低量子数通道廓线的整体趋势与高量子数通道类似,但在 50、200、600、1100 m 高度附近区域出现相反的变化趋势情况,这是由于纯转动拉曼光谱的高量子数跃迁强度和低量子数跃迁强度分别随着温度的升高而减小和增大,因此呈现出不同的趋势;图 4(c) 为反演所获得的近地表大气温度垂直廓线,可以看出侧向纯转动拉曼散射激光雷达所探测的近地表大气温度与无线电探空仪所得到的数据具有较好的一致性,在 0~54 m 和 480~840 m 高度范围内可以明显地观测到逆温层。

图 5 为 2023 年 5 月 15 日 19:30 CST 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的大气温度探测结果。

图 5(a) 给出了高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度变化的廓线,可以看出高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度的增加波动较为剧烈,在 0~288 m 和 530~864 m 高度范围内高量子数通道的信号出现明显波动且增强的趋势;图 5(b) 为低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度变化的廓线,可以看出低量子数通道廓线的波动较为平缓,整体趋势与高量子数通道类似,但在高量子数通道信号增强的区域低量子数通道出现相反的变化趋势,这是因为高低量子数跃迁强度对大气温度的变化具有不同的依赖性;图 5(c) 为反演所获得的近地表大气温度垂直廓线,可以看出侧向纯转动拉曼散射激光雷达所探测的近地表大气温度与无线电探空仪所得到的数据具有较好的一致性,在 0~45 m 和 365~540 m 高度范围内可以明显地观测到逆温层。

2) 基于分段等距分辨率云台转动方案的实验探

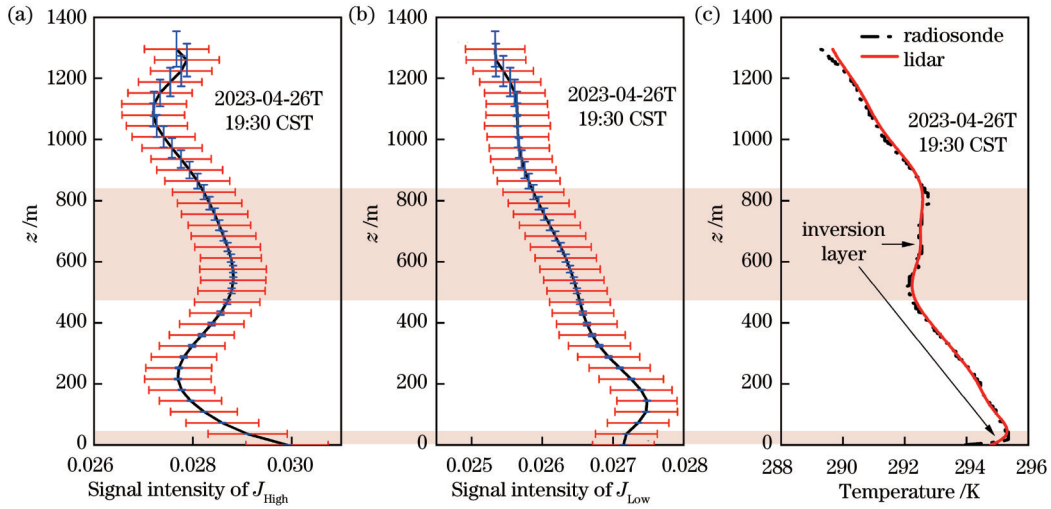


图 4 2023 年 4 月 26 日 19:30 CST 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的大气温度探测结果。(a) 高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(b) 低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(c) 大气温度的反演结果

Fig. 4 Detection results of atmospheric temperature with lateral pure rotational Raman scattering lidar at 19:30 CST on April 26, 2023. (a) Lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of high-quantum-number channel; (b) lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of low-quantum-number channel; (c) inversion results of atmospheric temperature

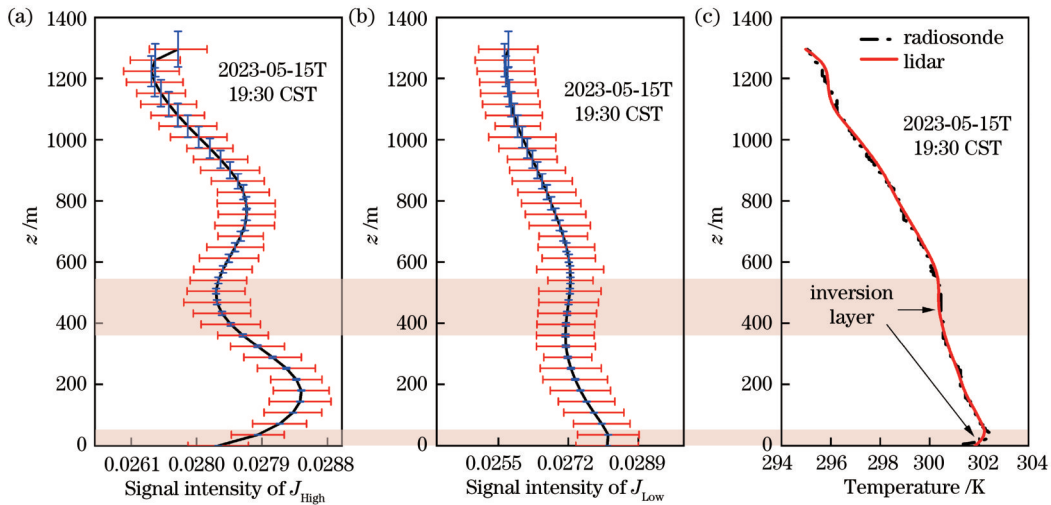


图 5 2023 年 5 月 15 日 19:30 CST 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的大气温度探测结果。(a) 高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(b) 低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(c) 大气温度的反演结果

Fig. 5 Detection results of atmospheric temperature with lateral pure rotational Raman scattering lidar at 19:30 CST on May 15, 2023. (a) Lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of high-quantum-number channel; (b) lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of low-quantum-number channel; (c) inversion results of atmospheric temperature

测结果

侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统采用分段等距分辨率的云台转动方案可实现 0~1332 m 高度范围内的大气温度探测, 整条廓线采用 4 段不同的距离分辨率, 能够更加精细地探测出近地表大气温度的波动情况。图 6 为 2023 年 5 月 12 日 19:30 CST 采用分段等距分辨率云台转动方案的侧向纯转动拉曼散射激光雷达探测大气温度的结果, 其中, 不同深浅的色带代表不同的距离分辨率。相比于整段等距分辨率云台转动方

案的探测结果, 分段等距分辨率云台转动方案可以表现出更多近地表区域的温度波动变化细节。

图 6(a) 是高量子数通道的回波信号强度随着探测高度变化的廓线, 在近地表 0~72 m 高度范围内展现出较多的波动细节。随探测高度的增加, 在 1100 m 以上区域, 出现较强的信号波动。图 6(b) 为低量子通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度变化的廓线, 随着探测高度的增加, 信号强度变化较为平缓。可以清晰地看到在近地表 0~72 m 和 72~312 m 高度

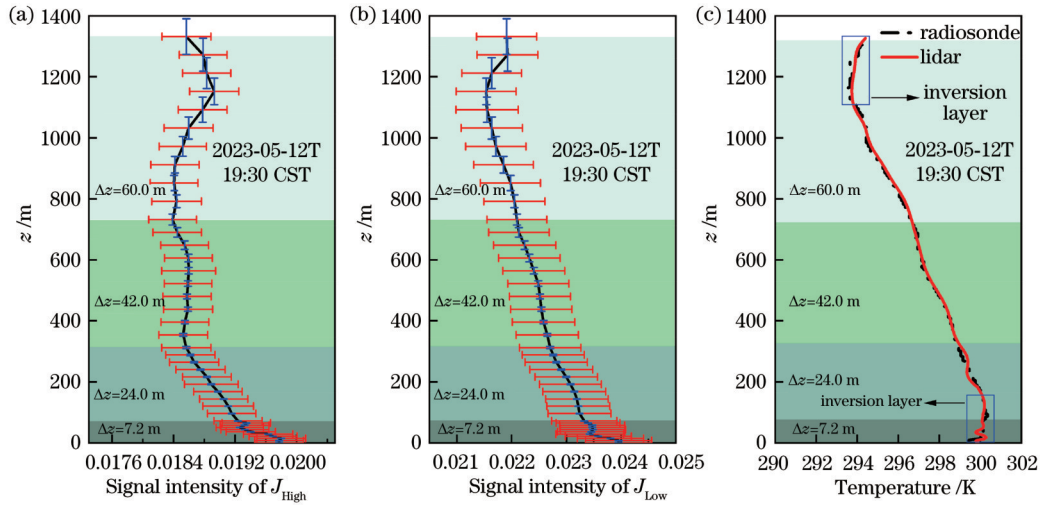


图 6 2023 年 5 月 12 日 19:30 CST 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的大气温度探测结果。(a) 高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(b) 低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(c) 大气温度的反演结果

Fig. 6 Detection results of atmospheric temperature with lateral pure rotational Raman scattering lidar at 19: 30 CST on May 12, 2023. (a) Lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of high-quantum-number channel; (b) lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of low-quantum-number channel; (c) inversion results of atmospheric temperature

范围内侧向高量子数通道回波信号和侧向低量子数通道回波信号的波动情况, 这两段区域的距离分辨率都比采用整段等距分辨率采样方案所获得的距离分辨率低, 可展现出更多近地表大气温度信号的变化细节, 在 1100 m 以上高度区域中出现高低量子数通道变化趋势相反的信号波动。图 6(c) 为反演所获得的近地表大气温度垂直廓线, 与当日的无线电探空仪所得

到的数据进行对比, 可以看出近地表 0~72 m 高度范围内大气温度信号出现微小的连续波动情况, 在 0~156 m 和 1100 m 以上高度范围内出现逆温层, 与无线电探空仪所得到的数据具有较好的一致性。

图 7 为 2023 年 5 月 17 日 19:30 CST 采用分段等距分辨率云台转动方案的侧向纯转动拉曼散射激光雷达大气温度的探测结果。

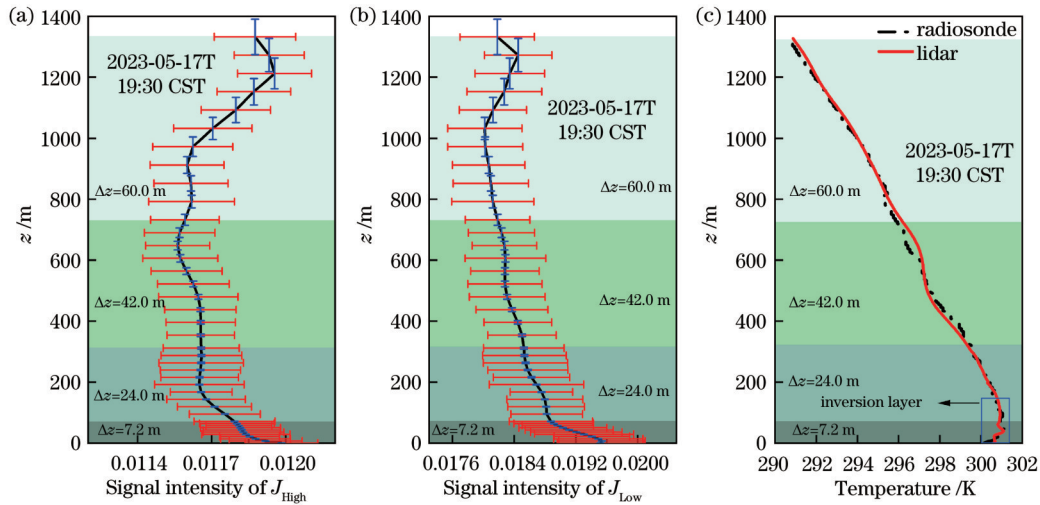


图 7 2023 年 5 月 17 日 19:30 CST 侧向纯转动拉曼散射激光雷达的大气温度探测结果。(a) 高量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(b) 低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度；(c) 大气温度的反演结果

Fig. 7 Detection results of atmospheric temperature with lateral pure rotational Raman scattering lidar at 19: 30 CST on May 17, 2023. (a) Lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of high-quantum-number channel; (b) lateral pure rotational Raman scattering echo signal intensity of low-quantum-number channel; (c) inversion results of atmospheric temperature

图 7(a) 是高量子数通道的回波信号强度随着探测高度变化的廓线, 可以看出随着高度的增加变化较为剧烈。图 7(b) 为低量子数通道的侧向纯转动拉曼散射回波信号强度随高度变化的廓线, 随着高度的增加, 信号强度变化较为平缓。由于近地表区域分辨率较低, 可以清晰地看到在该区域两个通道回波信号的波动。图 7(c) 为反演所获得的近地表大气温度垂直廓线, 与当日无线电探空仪所得到的数据进行对比, 可以看出侧向纯转动拉曼散射激光雷达所探测的近地表大气温度与无线电探空仪所得到的数据具有较好的一致性, 近地表 0~72 m 高度范围内出现了微小的温度波动情况, 在 0~150 m 高度范围内出现逆温层, 随着高度的增加, 在 320~800 m 高度范围内出现了大气温度波动。

5 结 论

提出一种新型的侧向纯转动拉曼散射激光雷达技术, 可实现无盲区探测低层大气温度的廓线分布, 有效解决后向拉曼散射激光雷达因几何重叠因子的存在而对低层大气探测结果产生影响的问题。考虑到侧向纯转动拉曼散射激光雷达系统探测大气温度廓线可通过侧向接收系统的俯仰扫描实现, 且该方法的最大优势是使用低成本的连续激光器作为激励光源, 能够简化系统, 降低成本。同时该系统也可以与后向纯转动拉曼散射激光雷达共用脉冲激光器, 构建侧向+后向纯转动拉曼散射激光雷达, 以实现从地表到任意高度大气温度的精细探测。系统初步实验探测结果表明, 系统在收发装置距离为 60 m 的条件下, 可以实现 1400 m 高度以下的大气温度的精细探测, 且分段等距分辨率云台转动方案相比于整段等距分辨率云台转动方案可得到更为精细的温度廓线分布结构。

参 考 文 献

- [1] Wulfmeyer V, Hardesty R M, Turner D D, et al. A review of the remote sensing of lower tropospheric thermodynamic profiles and its indispensable role for the understanding and the simulation of water and energy cycles[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 819-895.
- [2] Tamarin-Brodsky T, Hodges K, Hoskins B J, et al. A dynamical perspective on atmospheric temperature variability and its response to climate change[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(6): 1707-1724.
- [3] 龚少华, 陈伟鹏, 杨国韬, 等. 基于 Rayleigh 激光雷达实验观测的中层大气温度反演与重力波事件识别[J]. *光学学报*, 2023, 43(24): 2428006.
Gong S H, Cheng W P, Yang G T, et al. Retrieval of temperature structure and identification of gravity wave events in the middle atmosphere from Rayleigh lidar observations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(24): 2428006.
- [4] Munguira A, Hueso R, Sánchez-Lavega A, et al. Near surface atmospheric temperatures at Jezero from Mars 2020 MEDA measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2023, 128(3): e2022JE007559.
- [5] Whiteman D N. Examination of the traditional Raman lidar

- technique. I. Evaluating the temperature-dependent lidar equations[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2571-2592.
- [6] 刘东, 姚清睿, 张思诺, 等. 拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 243-257.
Liu D, Yao Q R, Zhang S N, et al. Research progress of temperature, humidity and pressure detection technology using Raman lidar[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 243-257.
- [7] Weng M, Yi F, Liu F C, et al. Single-line-extracted pure rotational Raman lidar to measure atmospheric temperature and aerosol profiles[J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27555-27571.
- [8] Pan X L, Yi F, Liu F C, et al. Diurnal temperature variations in the lower troposphere as measured by an all-day-operational pure rotational Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(28): 8688-8696.
- [9] 李启蒙, 李仕春, 秦宇丽, 等. 绝对测温转动拉曼激光雷达分光系统设计与性能[J]. *物理学报*, 2018, 67(1): 014207.
Li Q M, Li S C, Qin Y L, et al. Design and performance of spectroscopic filter of rotational Raman temperature lidar for absolute measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(1): 014207.
- [10] 高飞, 黄波, 石冬晨, 等. 全天时大气温度探测的纯转动拉曼激光雷达系统设计与仿真[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0301004.
Gao F, Huang B, Shi D C, et al. Design and simulation of pure rotational Raman lidar system for daytime detection of atmospheric temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0301004.
- [11] Sassen K, Dodd G C. Lidar crossover function and misalignment effects[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(17): 3162-3165.
- [12] 宋跃辉, 鲁雷雷, 华灯鑫, 等. 同轴米散射激光雷达自准直系统设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0710001.
Song Y H, Lu L L, Hua D X, et al. Design of auto collimation system for coaxial Mie lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0710001.
- [13] 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.
- [14] Barnes J E, Bronner S, Beck R, et al. Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2647-2652.
- [15] Wang Z Z, Tao Z M, Liu D, et al. New experimental method for lidar overlap factor using a CCD side-scatter technique[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1749-1752.
- [16] Ma X M, Wang Z Z, Zhang H, et al. Detecting aerosol backscattering coefficient across the whole troposphere by the sidescattering lidar system with three CCD cameras[J]. *Optics Express*, 2022, 30(17): 29969-29978.
- [17] 孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD 激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801003.
Meng X Q, Hu S X, Wang Z Z, et al. Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801003.
- [18] 孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与大气能见度的研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 0901001.
Meng X Q, Hu S X, Wang Y J, et al. Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0901001.
- [19] 陶宗明, 刘东, 麻晓敏, 等. 基于 CCD 的侧向激光雷达系统研制及探测个例[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(10): 3282-3286.
Tao Z M, Liu D, Ma X M, et al. Development and case study of side-scatter lidar system based on charge-coupled device[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3282-3286.
- [20] 麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0201001.

- Ma X M, Tao Z M, Ma M J, et al. Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201001.
- [21] 麻晓敏, 史博, 单会会, 等. 基于 CCD 成像的侧向散射激光雷达几何标定方法[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0201002.
- Ma X M, Shi B, Shan H H, et al. Geometric calibration method of side-scatter lidar based on charge-coupled device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0201002.
- [22] Bian Y X, Zhao C S, Xu W Y, et al. Development and validation of a CCD-laser aerosol detective system for measuring the ambient aerosol phase function[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(6): 2313-2322.
- [23] Gerasimov V V, Zuev V V. Analytical calibration functions for the pure rotational Raman lidar technique[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5136-5151.

Non-Blind Zone Detection of Atmospheric Temperature Using Lateral Raman Scattering Lidar Based on Continuous-Wave Laser

Yang Fan, Gao Fei*, Gao Xiong, Li Xiaoli, Wang Li, Yan Qing, Shi Dongchen,
Song Yuehui, Li Shichun, Hua Dengxin**

*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048,
Shaanxi, China*

Abstract

Objective Pure rotational Raman scattering lidar is an important remote sensing tool for atmospheric temperature measurement. However, traditional backward pure rotational Raman scattering lidar has limitations in achieving effective atmospheric temperature detection in the lower atmosphere due to the overlap function effect of lidar systems. We present a novel technique of lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar for accurate measurement of atmospheric temperature without the influence of blind zones and transition zones, which employs the bistatic structure of lidar systems. The atmospheric temperature profiling is realized by the detection of high- and low-quantum-number transitions of lateral pure rotational Raman scattering spectra at different heights, which is performed by elevation angle scanning of the lateral receiver system. The biggest advantage of this technique is the utilization of continuous-wave lasers as the excitation source, which not only significantly reduces equipment costs but also facilitates convenient mobility for outdoor observations.

Methods The lateral pure rotational Raman scattering lidar technique is studied in the accurate measurement applications of atmospheric temperature from the ground to the height of interest. First, a novel lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar technique is proposed and systematically designed. Each telescope combined with a narrow-band interferometric filter is adopted to detect the lateral scattering signals of the low- and high-quantum-number transitions of pure rotational Raman scattering spectra. Then, the atmospheric temperature inversion algorithm for lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar is established and the calibration function is optimized to improve the inversion accuracy of atmospheric temperature. Finally, the experimental system is constructed, and the preliminary experiments are conducted using the lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar. Two different rotation schemes including the continuous equidistant resolution and segmented equidistant resolution are employed during the experimental observations.

Results and Discussions The detection principle of the proposed Raman scattering lidar is innovatively presented. It breaks through the traditional backward pure rotational Raman scattering lidar using a monostatic transceiver system structure, which produces blind and transition zones that cannot realize effective detection of near-surface atmospheric temperature. Meanwhile, this technology can leverage a continuous-wave laser, which features light weight, portability, mobility, and low cost (Fig. 1). By analyzing the eight newly expanded calibration functions, the calibration function that introduces the smallest error is selected as the expression for atmospheric temperature detection by a lateral pure rotational Raman scattering lidar (Fig. 2). Based on completing the lateral pure rotational Raman scattering lidar system design, the lateral Raman scattering lidar system is constructed (Fig. 3). Preliminary experimental observational studies of a lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar are performed by two different rotation schemes of the continuous equidistant resolution and segmented equidistant resolution, which are employed during the experimental observations. The experimental results show that the lateral scanning pure rotational Raman scattering lidar has precise detection capability of atmospheric temperature up to a height of 1400 m. Furthermore, the segmented equidistant resolution rotation scheme provides a finer spatial distribution of temperature within the height interval of 0–312 m (Figs. 4–7),

compared with the continuous equidistant resolution rotation scheme.

Conclusions We propose a novel lateral pure rotational Raman scattering lidar technique to realize non-blind detection of the temperature profile distribution in the lower atmosphere. The profiling of lidar returns in the lateral pure rotational Raman scattering lidar is performed by elevation angle scanning of the lateral receiving system. Meanwhile, the intensities of the lateral Raman scattering signals at each setting of elevation angles are sampled and analyzed, and the biggest advantage of this technique is that a low-cost continuous laser can be employed as the excitation light source to simplify the system and reduce costs. Additionally, the pulsed laser in the backward pure rotational Raman scattering lidar can be adopted as the transmitter to construct a lateral + backward pure rotational Raman scattering lidar for finely detecting the atmospheric temperature from the ground to the height of interest. The preliminary experimental results show that the atmospheric temperature below the height of 1400 m can be detected finely with the 60 m distance between the transmitter and receiver. The segmented equidistant resolution rotational scheme can realize a more refined temperature profile than the whole continuous equidistant resolution rotation scheme.

Key words atmospheric optics; lidar; near-surface atmospheric temperature; lateral pure rotational Raman scattering; non-blind zone detection; elevation angle scanning