

光学学报

基于碘分子吸收池的新型瑞利多普勒激光雷达

谭智强^{1,2}, 卜令兵^{1,2*}, 杨彬^{1,2}

¹南京信息工程大学大气物理学院中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 江苏 南京 210044;

²南京信息工程大学气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044

摘要 研制了一套使用种子源直接放大激光器和时分复用收发新型瑞利多普勒激光雷达。激光器通过对种子源进行多级光纤和固体功率放大, 获得了稳定的 60 W 高平均功率脉冲激光输出。脉冲激光通过时分复用发射系统向垂直、正西和正北方向交替发射进入大气, 从三个方向接收到的激光大气回波信号经过光纤合束后送入同一套碘分子吸收池中进行多普勒鉴频。基于上述系统设计开展了系统探测性能仿真研究和实验验证对比分析, 仿真结果表明, 系统能够在时间分辨率为 30 min、垂直高度分辨率为 1 km 条件下完成大气温度和经纬向水平风速的同步测量, 其中 60 km 高度处温度理论测量误差为 1.99 K, 经纬向水平风速理论测量误差为 4.78 m/s。系统的验证实验结果表明, 60 km 高度处大气温度的实测误差为 2.4 K, 经纬向水平风速的实测误差分别为 8.7 m/s 和 8.5 m/s, 反演结果与大气模式和卫星探测结果进行对比呈现了较好的一致性。

关键词 传感器; 激光雷达; 中高层大气; 瑞利散射; 碘分子吸收池; 多普勒效应

中图分类号 N958.98; P425.7; P423.6

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230500

1 引言

中高层大气中复杂的动力耦合过程会对平流层天气和气候产生影响。大气温度和风速是表征中高层大气状态的基本参量, 故对中高层大气的温度和风速进行高时空分辨率连续观测将有助于研究中高层大气环流的耦合机制和提高中长期天气预报的准确率^[1-2]。瑞利多普勒激光雷达通过接收激光与大气分子相互作用产生的瑞利散射信号可以实现 30 km 高度以上的大气温度和风场探测, 其探测范围补充了常规探测手段的空缺高度, 并具备高时空分辨率观测能力, 因此是一种监测中高层大气状态的理想工具^[3-4]。然而, 设计和建造中高层大气瑞利多普勒激光雷达是一项极具挑战性的工作。

高空大气较低的空气密度和较远的探测距离会使瑞利多普勒激光雷达接收到的中高空瑞利后向散射信号信噪比(SNR)极低, 为了增大信噪比以减小风速测量误差, 目前的常见方法是增加信号积分时间、增大空间分辨率和优化激光雷达系统的信号收发效率。例如, 挪威 ALOMAR 瑞利多普勒激光雷达系统分别使用两套平均功率为 14 W、重复频率为 30 Hz 的激光器和两套信号收发通道同时测量经纬向风速, 在时间分辨率为 2 h 和距离分辨率为 2 km 的测量条件下, 80 km

高度上的水平风速测量误差为 20 m/s^[5]。法国 Haute-Provence 瑞利多普勒激光雷达系统中使用了一套平均功率为 24 W、重复频率为 30 Hz 的激光器, 单路激光通过振镜以分时复用方式切换至垂直、北向和东向三个收发通道周期性发出, 该系统的水平风速测量时间分辨率为 5 h、距离分辨率为 2 km, 60 km 高度上水平风速的测量误差为 8 m/s^[6]。

多普勒频移风速测量对出射激光的频率稳定性要求较高, 种子注入 Nd:YAG 激光器中后, 谐振腔模式匹配原理会使得放大后输出激光的频率与注入种子激光频率不能严格保持一致, 同时还存在一定种子注入失败的风险, 这将会给风速测量引入较大的系统误差^[7-8]。ALOMAR 激光雷达使用的激光器的中心频率随机抖动幅度最高可达到 ±17.5 MHz, 对应引入的水平风速测量误差约为 ±4.7 m/s, 其解决措施是增加信号积分时间对激光频率抖动进行平均, 进而消除激光频率随机抖动引入的风速测量误差^[5]。中国科学技术大学研制的移动式瑞利多普勒激光雷达通过三通道法布里-珀罗(F-P)标准具对激光频率进行锁定, 以及对种子激光器和 F-P 标准具实施高精度温控等方法, 有效提高了出射激光的频率稳定性和降低了系统器件的频率漂移^[9-10]。中国科学院安徽光学精密机械研究所研制的旋转台式瑞利多普勒测风激光雷达通过闭环控

收稿日期: 2023-02-03; 修回日期: 2023-03-02; 录用日期: 2023-03-12; 网络首发日期: 2023-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(42175145)、江苏省研究生实践创新计划(SJCX22_0362)

通信作者: *lingbingbu@nuist.edu.cn

制的方法调节 F-P 标准具腔长,使 F-P 标准具的双边缘光谱交叉点主动跟踪激光频率的变化,实现例如 ±50 MHz 范围内的光谱主动跟踪和锁定^[11]。中国科学院国家空间科学中心研制的车载瑞利多普勒激光雷达通过测量输出激光的脉冲宽度监控种子注入状态,并在数据反演中主动剔除种子注入失败的激光大气回波信号,进而消除激光器种子注入失败引入的风速测量误差,该系统在时间分辨率为 2 h 和距离分辨率为 3 km 条件下,70 km 高度上的水平风速测量误差为 10 m/s^[12]。

综上所述,激光器性能在很大程度上影响了瑞利多普勒激光雷达的大气温度和风速的测量时空分辨率和测量误差。因此,本文设计了一套基于稳频种子源直接放大激光器和多通道时分复用信号收发新型瑞利多普勒激光雷达系统,基于种子源直接放大的激光器获得了频率一致性较好的高重复频率和高单脉冲能量激光输出,并应用基于偏振分光的时分复用发射系统实现了高效的多通道信号收发,解决了瑞利多普勒

激光雷达信号积分时间过长的问题。同时,对上述系统开展了探测性能的模拟仿真研究和实验探测结果的验证对比工作。

2 激光雷达系统

该新型瑞利多普勒激光雷达系统的组成如图 1(a)所示。系统配备一套种子源多级光纤和固体功率放大器输出脉冲激光,并通过时分复用系统将激光依次从垂直、西向和北向发射进入大气,大气回波信号接收系统接收后向散射信号后将其汇聚耦合进入多模光纤中并传输至碘池鉴频接收机中进行光电测量。大气回波信号接收系统由三台接收口径为 1 m 的光学望远镜组成,其中两台望远镜以天顶角 30° 倾斜正交放置,分别指向正西(WT)和正北(NT)方向用于测量纬向和经向水平风速,垂直指向(VT)的望远镜用于测量大气温度并兼具垂直方向风速测量功能。系统的主要配置参数在表 1 中给出,其中 E_{RMS} 为均方根误差。

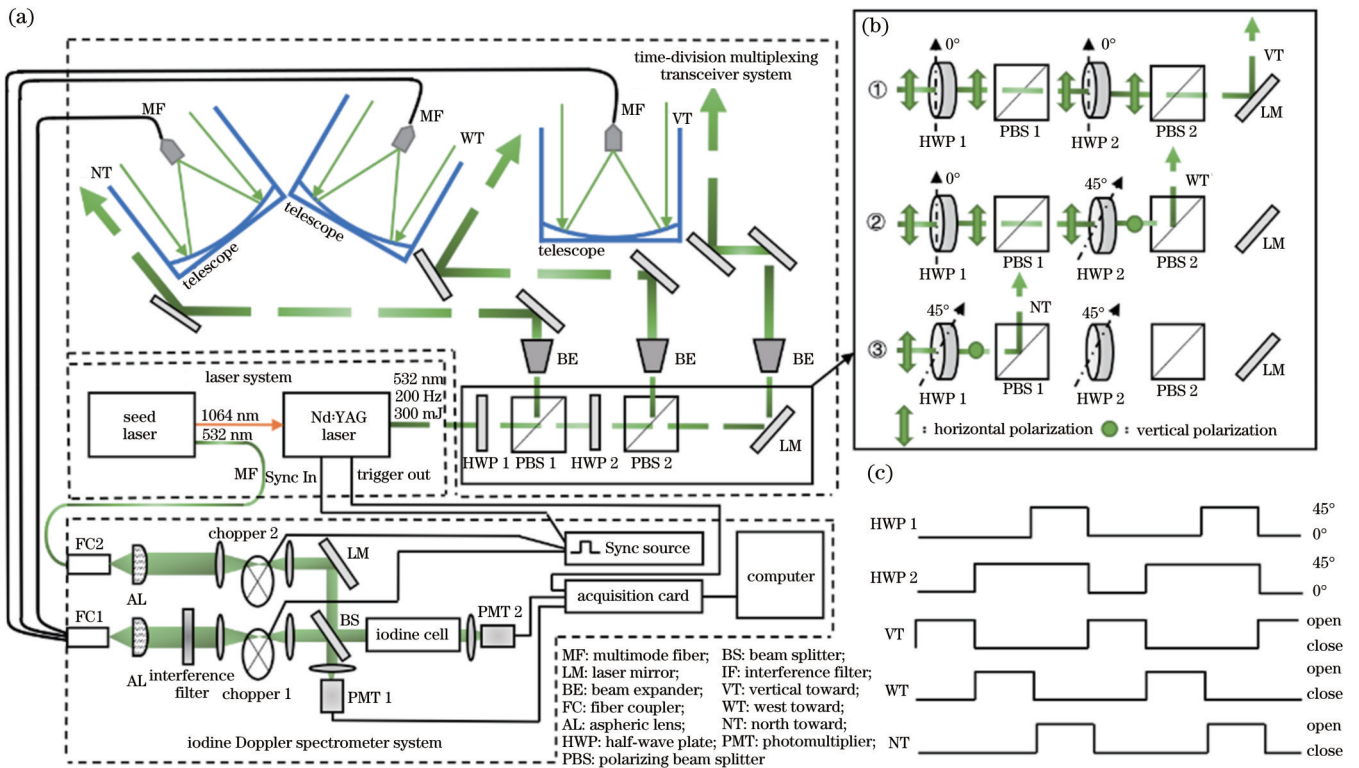


图 1 瑞利多普勒测风激光雷达系统设计。(a)系统光路设计;(b)时分复用发射光路通道切换原理;(c)时分复用发射光路控制时序
Fig. 1 Design of Rayleigh Doppler wind measurement lidar system. (a) Optical design of system; (b) principle of transmitting optical path channel switching in time-division multiplexing; (c) timing control of transmitting optical path channel switching in time-division multiplexing

2.1 种子直接放大激光器

将种子源多级串联光纤和固体放大再倍频架构激光器应用在地基瑞利多普勒激光雷达系统中进行中层大气探测。如图 2 所示,种子直接放大激光器由固体放大单元和种子激光单元系统组成。如图 2(b)所示,

种子激光单元采用碘池稳频技术实现激光频率锁定,1064 nm 种子激光由分布反馈式(DFB)激光器发出,输出激光通过分束器后被分为两路,一路进入固体放大单元中进行功率放大,另一路经过倍频晶体倍频后送入碘池闭环反馈控制系统中进行 DFB 激光器输出

表 1 瑞利多普勒激光雷达系统的主要配置参数

Table 1 Main configuration parameters of Rayleigh Doppler lidar system

Device	Parameter	Value
Laser	Wavelength /nm	532. 259
	Average power /W	60
	Pulse repetition frequency /Hz	200
	Pulse Width /ns	7
	Pulse energy /mJ	300 @532 nm
	Pulse laser linewidth /MHz	185
	1064 nm seed laser frequency stability /MHz	$E_{RMS} < 1.5 @16 h$
Receiver	Diameter of telescope /mm	1000
	Field of view /mrad	0. 4
	Diameter of optic fiber /mm	0. 6
	Numerical aperture of optic fiber	0. 37
Time-division multiplexing system	Transmission efficiency /%	95
	Channel switch transition time /s	5
Iodine doppler spectrometer system	Transmission efficiency /%	30
	3-in-1 fiber efficiency /%	90
	Band width(FWHM)of narrowband filter /nm	0. 15
	Maximum efficiency of narrowband filter /%	80
	Quantum efficiency of PMT /%	40(H7422)
	Iodine cell length /cm	10
	I ₂ cell temperature control accuracy /°C	±0. 01
	Maximum acquisition sampling rate /MHz	800
	Sampling raw range resolution /m	150

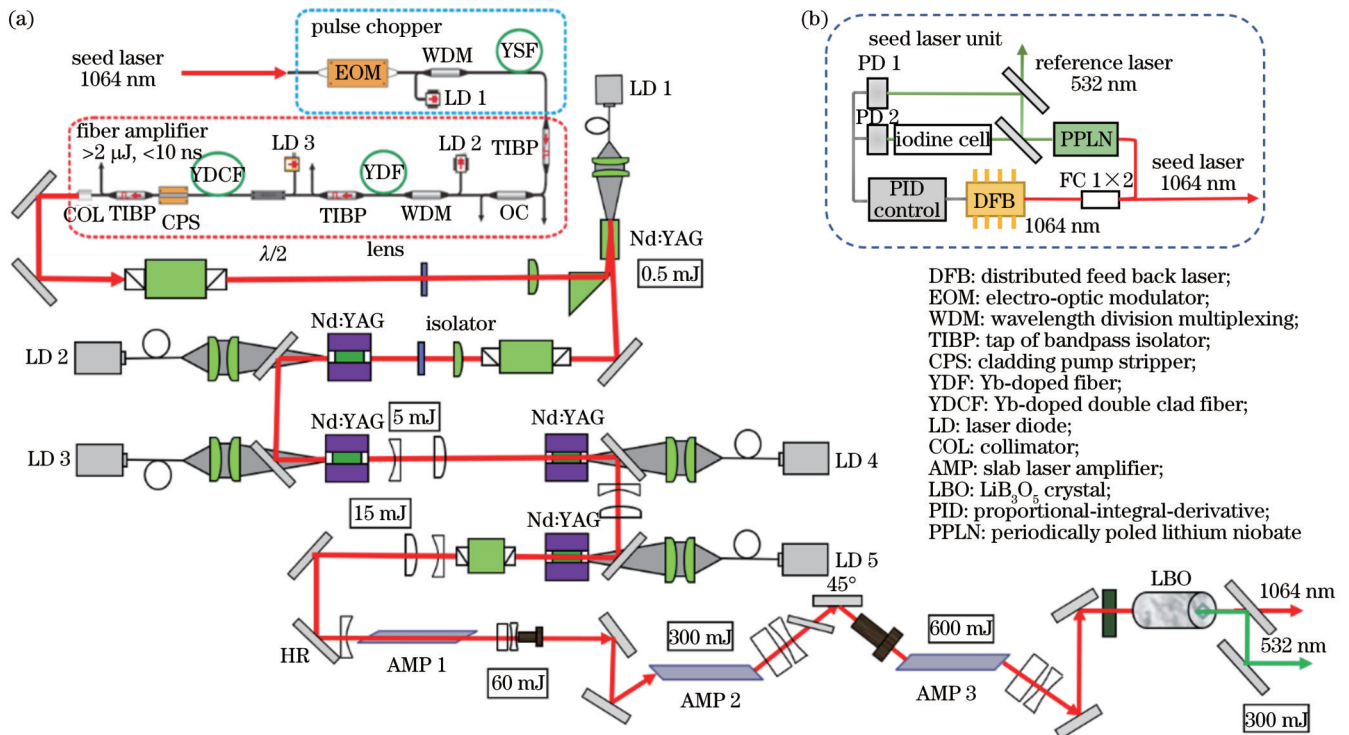


图 2 种子源直接放大激光器的组成。(a)稳频种子激光单元；(b)固体功率放大单元

Fig. 2 Components of seed source direct amplification laser. (a) Frequency-stabilized seed laser unit; (b) solid-state power amplifier unit

激光频率锁定^[13-15]。固体放大单元结构如图 2(a)所示,种子激光进入固体放大单元后,先通过电光调制器将连续光斩波为重复频率为 200 Hz、脉冲宽度为 7 ns 的脉冲激光,再利用三级串联光纤放大器将输入激光能量放大至 2 μ J,随后进一步利用五级串联端泵和三级串联板条放大器将输入激光能量放大至 600 mJ,最后经过 LiB₃O₅ 晶体倍频后输出单脉冲能量为 300 mJ、重复频率为 200 Hz 的 532 nm 窄线宽激光。利用串联固体放大器对种子源进行直接功率放大能够获得稳定的高重复频率和高单脉冲能量激光输出,在功率放大过程中激光频率会与注入种子激光保持一致^[16-17]。

2.2 时分复用发射系统

激光从激光器发出后会先进入时分复用发射系统中选择发射通道。时分复用发射系统由两组包含半波片和偏振分束立方体的偏振分光光路组成,其中半波片安装在压电旋转镜架上。如图 1(b)所示,旋转镜架可以改变半波片的旋转夹角从而使透过激光的偏振方向变为垂直偏振或水平偏振,激光进入偏振立方后会因偏振方向不同而被全反射或透过,通过两级串联的偏振分光光路即可实现三路发射方向的选通。在实际工作中,压电旋转镜架将根据图 1(c)所示的控制时序定时改变两片半波片的旋转角度,使激光按照垂直、西向、北向顺序输出。利用 10 倍扩束镜将从偏振分光光路输出的激光的发散角压缩至 0.15 mrad 后,借助安装在望远镜筒壁上的反射镜将其发射进入大气中。

2.3 多通道合束碘池鉴频接收机

在激光大气回波信号进入鉴频系统后,先利用三合一光纤合束器(FC 1)对其进行合束处理,使三路分立的信号能够沿同一条光路进入同一套碘池中进行多普勒鉴频。合束后的光信号经过非球面透镜准直后,利用带宽为 0.15 nm 的干涉滤光片滤除背景杂散光,再利用斩波器截断 30 km 以下的低空强回波信号,光信号通过斩波器后将进入到碘池鉴频光路中进行频率测量。在碘池鉴频光路内光信号被分光平板以恒定分光比分为两路,其中 30% 的光信号直接进入光电倍增管 1(PMT 1)中,70% 的光信号穿过碘池后进入光电倍增管 2(PMT 2)中。为了获得实时的激光固体放大单元输出脉冲激光频率,从种子激光单元中引入一路稳频 532 nm 连续光送入碘池鉴频光路中进行频率测量,并作为风速反演中零多普勒频率基准。最后,光电倍增管输出的光子脉冲信号通过采集卡采集计数后送至工控机中进行数据的存储和反演。

3 测量原理和模拟仿真

高光谱光学器件被广泛应用于气溶胶和多普勒风速测量研究,其中碘分子在可见光波段中存在一系列具有陡峭光谱边缘的吸收谱线,本系统使用碘分子 1109 吸收谱线进行单边沿多普勒鉴频风速测量^[18-21]。碘池多普勒鉴频原理如图 3 所示,瑞利散射信号通过

碘池后瑞利散射光谱的不同强度分量被 1109 吸收谱线选择性吸收,故透射后的瑞利散射信号强度会发生衰减。在吸收谱线的陡峭边缘范围内,瑞利散射信号的碘池相对透过率与信号中心频率具有单调的映射函数关系。

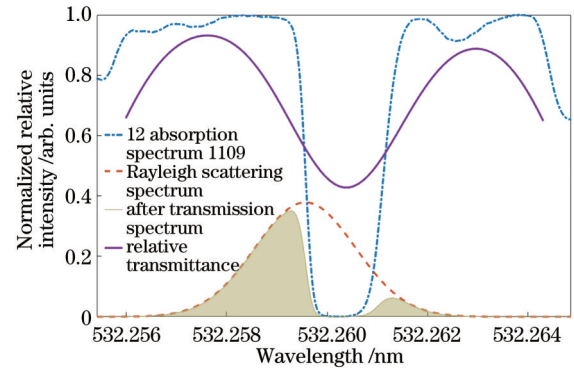


图 3 分子吸收谱线单边边缘多普勒鉴频原理

Fig. 3 Principle of single-edge Doppler frequency detection of iodine molecular absorption spectral lines

在高空中空气气压很低的情况下,大气分子的瑞利-布里渊散射光谱中的布里渊散射分量可以忽略不计,故可以使用简化的高斯模型表示瑞利-布里渊散射光谱^[22-23]。中心频率为 $\nu_0 + \Delta\nu$ 的瑞利后向散射信号通过碘池后的相对透过率 F 可以表示为

$$F(\nu_0 + \Delta\nu, T) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\nu') \mathfrak{R}(\nu' - \nu_0 - \Delta\nu, T) d\nu', \quad (1)$$

$$\mathfrak{R}(\nu, T) = \frac{1}{\Delta\nu_D(T)} \cdot \left(\frac{4 \ln 2}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\frac{-4 \ln 2 (\nu - \nu_0 - \Delta\nu)^2}{\Delta\nu_D^2(T)} \right], \quad (2)$$

$$\Delta\nu_D(T) = 4(\nu_0 + \Delta\nu) \cdot \left(\frac{2kT \ln 2}{mc^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

式中: ν_0 为激光中心频率; $\Delta\nu$ 为多普勒频移; I 为碘分子吸收光谱; \mathfrak{R} 为瑞利散射光谱; $\Delta\nu_D$ 为瑞利散射光谱的半峰全宽; m 为大气分子质量; k 为玻尔兹曼常数; c 为真空中的光速; T 为大气温度。

190~270 K 大气温度、 ± 80 m/s 视线风速测量范围内碘池鉴频器的相对透过率和灵敏度如图 4 所示。由于碘池鉴频器的相对透过率 F 是与多普勒频移 $\Delta\nu$ 和大气温度 T 有关的二元函数,因此在反演风速之前需要通过垂直通道测量的大气温度 T 确定碘池相对透过率 $F(\nu_0 + \Delta\nu, T)$ 与多普勒频移 $\Delta\nu$ 的映射函数。其中,视线方向的水平风速 V_{HLOS} 和测量误差 ϵ_{HLOS} ^[24] 可以表示为

$$V_{\text{HLOS}} = \frac{2}{\lambda \sin \gamma} \Delta\nu = \frac{2}{\lambda \sin \gamma} F^{-1} \left(\frac{N_{\text{R}, 1\epsilon}}{N_{\text{R}, \text{REF}}}, T \right), \quad (4)$$

$$\epsilon_{\text{HLOS}} = \frac{1}{\theta \cdot R_{\text{INT}}} \frac{1}{\sin \gamma}, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{2}{\lambda} \frac{1}{F(v_0 + \Delta v, T)} \frac{dF(v_0 + \Delta v, T)}{dv}, \quad (6)$$

$$R_{\text{INT}} = \sqrt{f_{\text{PRF}} t} \cdot \left[\left(\frac{N_{\text{R}, I_2}}{\sqrt{N_{\text{R}, I_2} + N_{\text{D}, I_2} + N_{\text{B}, I_2}}} \right)^{-2} + \left(\frac{N_{\text{R}, \text{REF}}}{\sqrt{N_{\text{R}, \text{REF}} + N_{\text{D}, \text{REF}} + N_{\text{B}, \text{REF}}}} \right)^{-2} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (7)$$

式中: λ 为出射激光的波长; γ 为望远镜指向的天顶角; $F^{-1}(\cdot)$ 为碘池相对透过率与多普勒频移 Δv 的反函数; N_{R, I_2} 和 $N_{\text{R}, \text{REF}}$ 分别为碘池测量通道和参考测量通道输出的瑞利后向散射光子数; θ 为灵敏度, 代表不同温度 T 下风速变化 1 m/s 对应的相对透过率变化百分比; R_{INT} 为信号时间积分后的碘池相对透过率信噪比; t 为信号积分时间; f_{PRF} 为激光器的脉冲激光重复频率; N_{D} 和 N_{B} 分别为光电倍增管的暗计数噪声和天空背景噪声光子数。

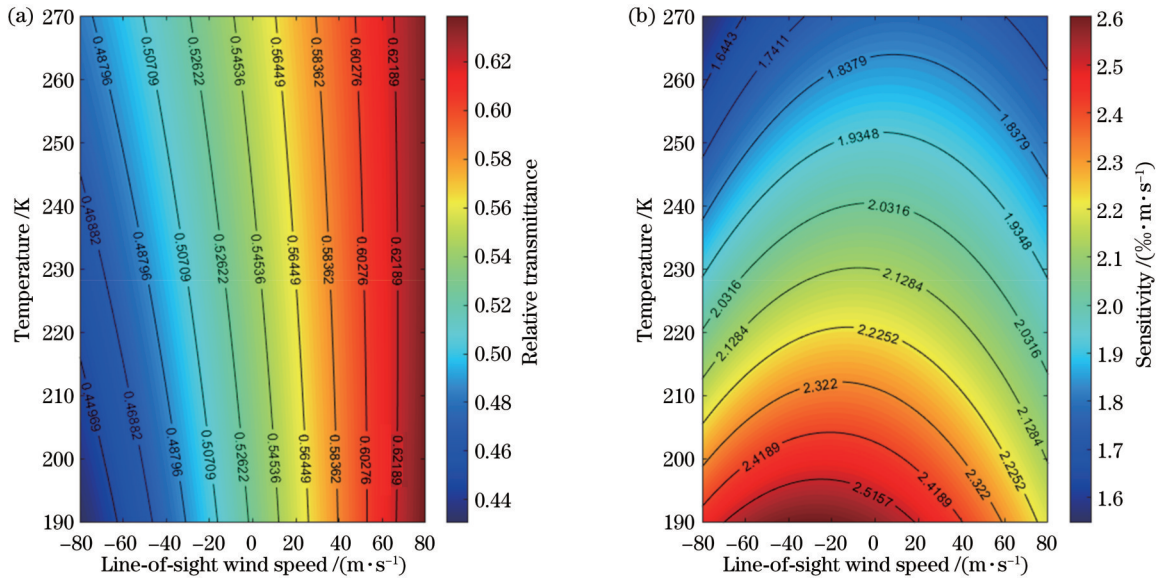


图 4 测量范围内的碘池鉴频器响应。(a)相对透过率;(b)灵敏度

Fig. 4 Response of iodine cell discriminator in measurement range. (a) Relative transmittance; (b) sensitivity

30 km 以上高度的后向散射均为分子瑞利散射, 故高度 z 处的大气回波信号将正比于大气分子体积密度。选取激光大气回波信噪比较高的高度 z_* 作为参考高度, 并从大气模式中获得参考高度 z_* 上的大气密度绝对值 ρ_* , 最后通过比值的方法计算出任意高度 z 上的相对大气密度 ρ , 其计算公式为

$$\rho(z) = \frac{\alpha^2}{z_*^2} \cdot \frac{N_{\text{R}, \text{REF}}(z)}{N_{\text{R}, \text{REF}}(z_*)} \cdot \rho_*. \quad (8)$$

根据流体静力平衡假设和理想气体状态方程, 对瑞利散射信号进行后向积分反演得出大气温度 T , 以复合梯形公式形式表达的大气温度反演公式^[25]为

$$T(z) = \frac{\rho_* T_*}{\rho(z)} + \frac{M}{R} \cdot \frac{1}{\rho(z)} \cdot \frac{\Delta z}{2} \left(\rho_* T_* + \sum_{i=0}^{n-1} \rho_i T_i \right) + \frac{M}{R} \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot g(z), \quad (9)$$

式中: R 为普适气体常数, 取值为 $8.314 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$; M 为大气分子摩尔质量, 取值为 $28.96 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mol}^{-1}$; ρ_* 为参考高度 z_* 的质量密度; T_* 为参考高度 z_* 的大气温度, 具体取值可以从大气模式产品中获取; Δz 为距离分辨率; $g(z)$ 为不同高度处的重力加速度。对大气密度和温度反演公式求微分可得到大气密度的相对误差 $\delta\rho$ 和大气温度的绝对测量误差 σ_T , 即

$$\delta\rho = \frac{\sigma_\rho}{\rho} = \frac{\Delta N_{\text{R}, \text{REF}}}{N_{\text{R}, \text{REF}}} = \frac{\sqrt{N_{\text{R}, \text{REF}} + N_{\text{D}, \text{REF}} + N_{\text{B}, \text{REF}}}}{N_{\text{R}, \text{REF}}}, \quad (10)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{\rho_*}{\rho} \cdot \sigma_{T_*} \right)^2 + \left[\left(T_* + \frac{M}{R} \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot g_* \right) \cdot \frac{\sigma_{\rho_*}}{\rho} \right]^2 + \left[\left(T_{z-1} + \frac{M}{R} \cdot \frac{\Delta z}{2} \cdot g_{z-1} \right) \cdot \frac{\rho_{z-1}}{\rho} \cdot \frac{\sigma_\rho}{\rho} \right]^2 + \sum_{i=1}^{z-1} \left(\frac{M}{R} \cdot \Delta z \cdot g_i \cdot \frac{\sigma_{\rho_i}}{\rho} \right)^2}. \quad (11)$$

为了验证系统设计的可行性, 根据系统测量原理

对系统的大气温度和水平风速测量性能进行仿真计

算。单脉冲激光发出后碘池测量通道和参考测量通道输出的大气回波光子数为

$$N_{I_2}(z) = \frac{E_0}{hc/\lambda} \cdot \frac{\pi D^2}{4z^2} \cdot \kappa \cdot \xi \cdot F \cdot \eta_{RX} \cdot \eta_{TX} \cdot \Delta z \cdot \beta_m(z) \cdot \exp\left[-2\sec\gamma \cdot \int_0^z \alpha_m(z') + \alpha_a(z') dz'\right], \quad (12)$$

$$N_{REF}(z) = \frac{E_0}{hc/\lambda} \cdot \frac{\pi D^2}{4z^2} \cdot (1 - \kappa) \cdot \xi \cdot \eta_{RX} \cdot \eta_{TX} \cdot \Delta z \cdot \beta_m(z) \cdot \exp\left[-2\sec\gamma \cdot \int_0^z \alpha_m(z') + \alpha_a(z') dz'\right], \quad (13)$$

式中: E_0 为激光单脉冲能量; h 为普朗克常量, 取值为 6.6260×10^{-34} J·s; c 为光速, 取值为 3×10^8 m/s; D 为望远镜接收口径; κ 为碘池鉴频光路的分光比; ξ 为光电倍增管的量子效率; η_{RX} 为多通道合束碘池鉴频系统的光学效率; η_{TX} 为时分复用发射系统的光学效率; β_m 为大气分子的后向散射系数; α_m 和 α_a 分别为大气分子和气溶胶的消光系数。由于不同地区之间气溶胶的含

量存在分布差异^[25], 故为准确获得激光雷达部署在中国华东地区的测量性能, 仿真将从 CALIPSO 卫星 L3 级月平均气溶胶廓线产品中直接获取到仿真目标地区气溶胶的后向散射系数 β_a 和消光系数 β_m 廓线^[27-28]。从 NRLMSIS-00 模式中获取仿真目标地区的年平均大气分子密度 ρ_{model} 廓线, 大气分子的后向散射系数 β_m 和消光系数 α_m ^[29-30] 为

$$\sigma_m = 5.45 \times 10^{-32} \left(\frac{550 \times 10^{-9}}{\lambda} \right)^4, \quad (14)$$

$$\beta_m = \frac{\rho_{model}}{m} \cdot \sigma_m, \quad (15)$$

$$\alpha_m = S_m \cdot \beta_m, \quad (16)$$

式中: σ_m 为单个大气分子的瑞利后向散射截面; m 为单个大气分子的质量, 其取值为 4.81×10^{-26} kg; S_m 为大气分子的激光雷达比, 取值为 $8\pi/3$ 。仿真中使用的大气模型参数廓线如图 5 所示。

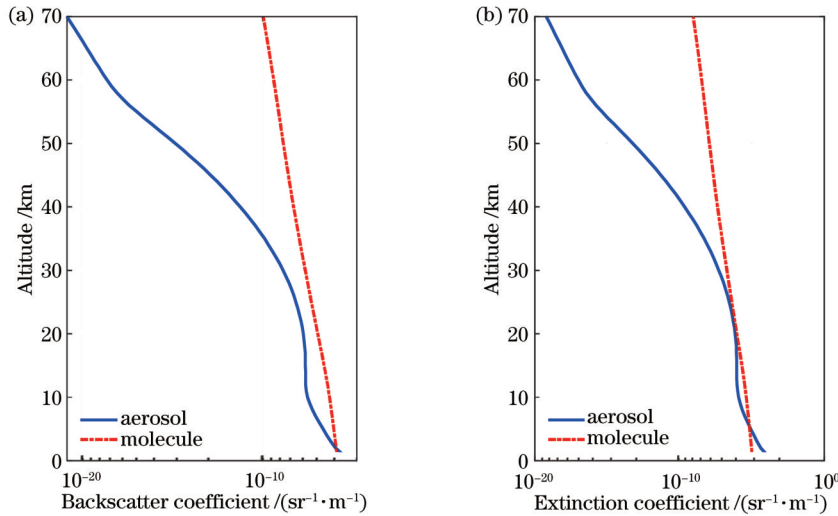


图 5 仿真大气模型。(a)后向散射系数廓线;(b)消光系数廓线

Fig. 5 Simulation atmospheric model. (a) Backscatter coefficient profile; (b) extinction coefficient profile

根据表 1 中的系统配置参数和仿真大气模型, 对系统的单脉冲激光大气回波光子计数率和信噪比廓线进行模拟仿真。如图 6 所示, 通过仿真获得 30~70 km 高度范围内垂直和倾斜通道的光子计数率, 测量区间内信号动态范围跨越约 3 个数量级, 在距离分辨率为 1 km 的条件下, 60 km 高度上垂直通道和倾斜通道的单脉冲激光回波信噪比仿真结果分别为 0.75 和 0.54。需要特别说明的是, 垂直通道的信噪比为式 (10) 所述参考通道的瑞利散射回波信号与噪声比值, 而西向和北向倾斜通道的信噪比则为式 (7) 所述的双通道合成信噪比。

不同积分时间下大气温度和经纬向水平风速的测量误差仿真结果如图 7 所示。当三个通道积分时间均为 10 min 时, 60 km 高度处大气温度和经纬向水平风速的仿真测量误差分别为 1.77 K 和 5.34 m/s, 说明该系统有能力在垂直分辨率为 1 km、大气温度和水平风

速同步测量时间分辨率为 30 min 条件下, 获得 60 km 高度处经向和纬向水平风速测量误差优于 10 m/s、温度测量误差优于 10 K 的测量结果。还能看出, 随着积分时间的增加, 温度测量误差的递减率在减小, 积分时间从 5 min 增加到 10 min 后 60 km 高度处的温度测量误差仅减小 0.22 K, 说明对于温度测量而言, 在超过一定积分时间后继续增加积分时间对减小温度测量误差的效果有限。为了减小风速测量误差, 在保持大气温度和经纬向水平风速同步测量时间分辨率为 30 min 的前提下, 通过优化时分复用通道收发分配时间将垂直通道的积分时间减少至 5 min, 并增加西向和北向倾斜通道的积分时间至 12.5 min, 调整后大气温度和经纬向水平风速的理论仿真测量误差分别 1.99 K 和 4.78 m/s。与调整前相比, 经纬向水平风速的仿真测量误差减小了 0.56 m/s。

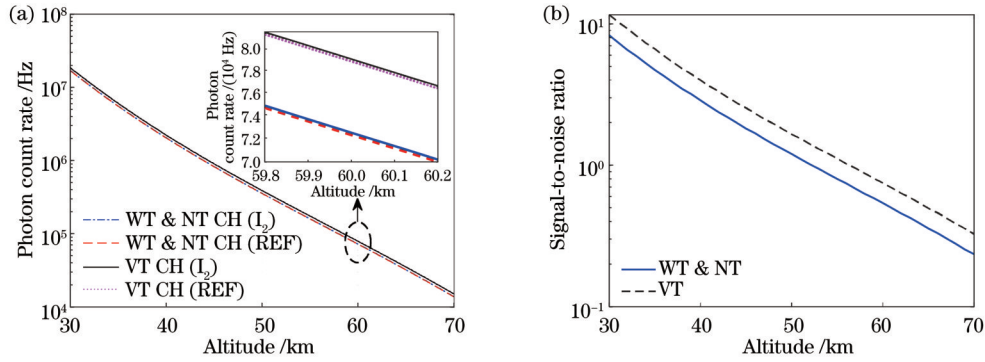


图 6 单脉冲激光大气回波信号仿真。(a)光子计数率;(b)信噪比

Fig. 6 Simulation of atmospheric echo signal of single pulse laser. (a) Photon count rate; (b) signal-to-noise ratio

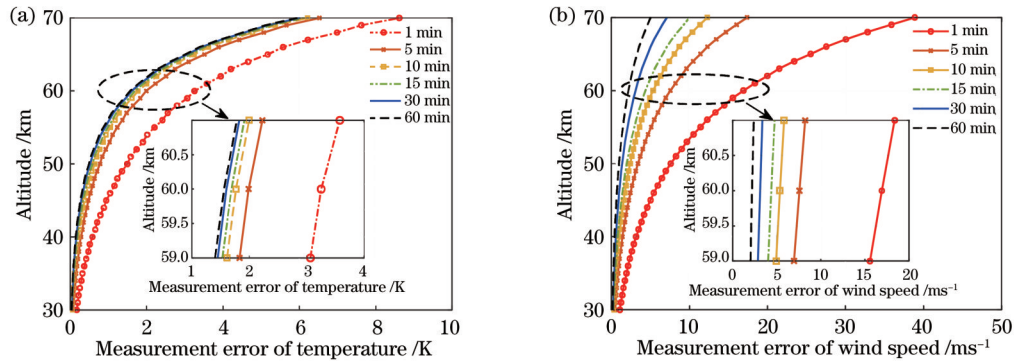


图 7 不同积分时间下的系统测量误差仿真。(a)大气温度;(b)经向和纬向水平风速

Fig. 7 Simulation of system measurement error under different integration times. (a) Atmospheric temperature; (b) horizontal wind speed in meridional and zonal directions

4 观测实验与对比分析

在 2022 年 10 月 15 日开展了第一次信号收发能力和温度风速测量功能的系统验证实验,实验中垂直通道的积分时间为 5 min,西向和北向通道的积分时间为 12.5 min,原始信号的距离分辨率为 150 m,在反演中信号距离分辨率将被累加至 1 km,观测实验一共持续 6 h,得到 12 组大气温度和经纬向水平风速同步测量结果,测量结果的时序变化如图 8 所示。

图 9 为其中一组采集于 00:07 的原始信号计数率和信噪比廓线,其中垂直、西向和北向收发通道在 60 km 高度处的实测单脉冲信噪比分别为 0.53、0.35 和 0.38,与模拟仿真结果相比分别偏小 0.22、0.19 和 0.16。图 8 右侧子图为全部实测大气温度和经纬向水平风速测量结果的平均误差廓线,其中 ΔT 为大气温度测量误差, ΔV 为视线方向水平风速测量误差。可以发现,60 km 高度处大气温度的平均测量误差为 2.359 K,纬向和经向水平风速的平均测量误差分别为 7.752 m/s 和 7.355 m/s。大气温度的实际测量误差与仿真误差相比偏大 0.42 K,纬向和经向水平风速的实际测量误差与仿真误差相比分别偏大 2.972 m/s 和 2.575 m/s。实验结果表明,系统实际信号收发能力和测量性能已经接近仿真理论预期。

需要注意的是,上述实测误差是基于信噪比误差分析理论的计算结果,为了进一步验证瑞利多普勒激光雷达测量结果的准确性,还需要与其他数据进行对比。对比数据源选取了欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 的大气模式产品和 TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) 卫星多通道红外辐射计温度测量产品^[31]。其中,ECMWF 大气模式产品时间分辨率为 1 h,选取 2022 年 10 月 15 日 20:00—16 日 01:00 的整点瞬时大气温度和经纬向风速廓线与实测结果进行对比,廓线坐标为 (119°E, 32°N),经纬度分辨率为 1°,对应水平距离分辨率约为 100 km,覆盖了激光雷达两个倾斜收发通道的水平延伸投影范围。TIMED 卫星温度廓线的测量时间为 2022 年 10 月 16 日 00:02,廓线坐标为 (118.627°E, 32.790°N),与激光雷达所处位置相距约 200 km。数据对比验证结果如图 10 所示。

由图 10(a)可见,实测大气温度和经纬向平均水平风速在 50 km 以下与大气模式结果一致性较好,呈现了与大气模式结果一致性较高的垂直波动结构。50 km 以上高度中瑞利多普勒激光雷达的实测结果开始与大气模式出现分歧,从 55 km 开始两者分歧逐渐变大,并且测量出了相比大气模式结果更加丰富的水平风速波动特征和更大的波动幅度。上述结果在

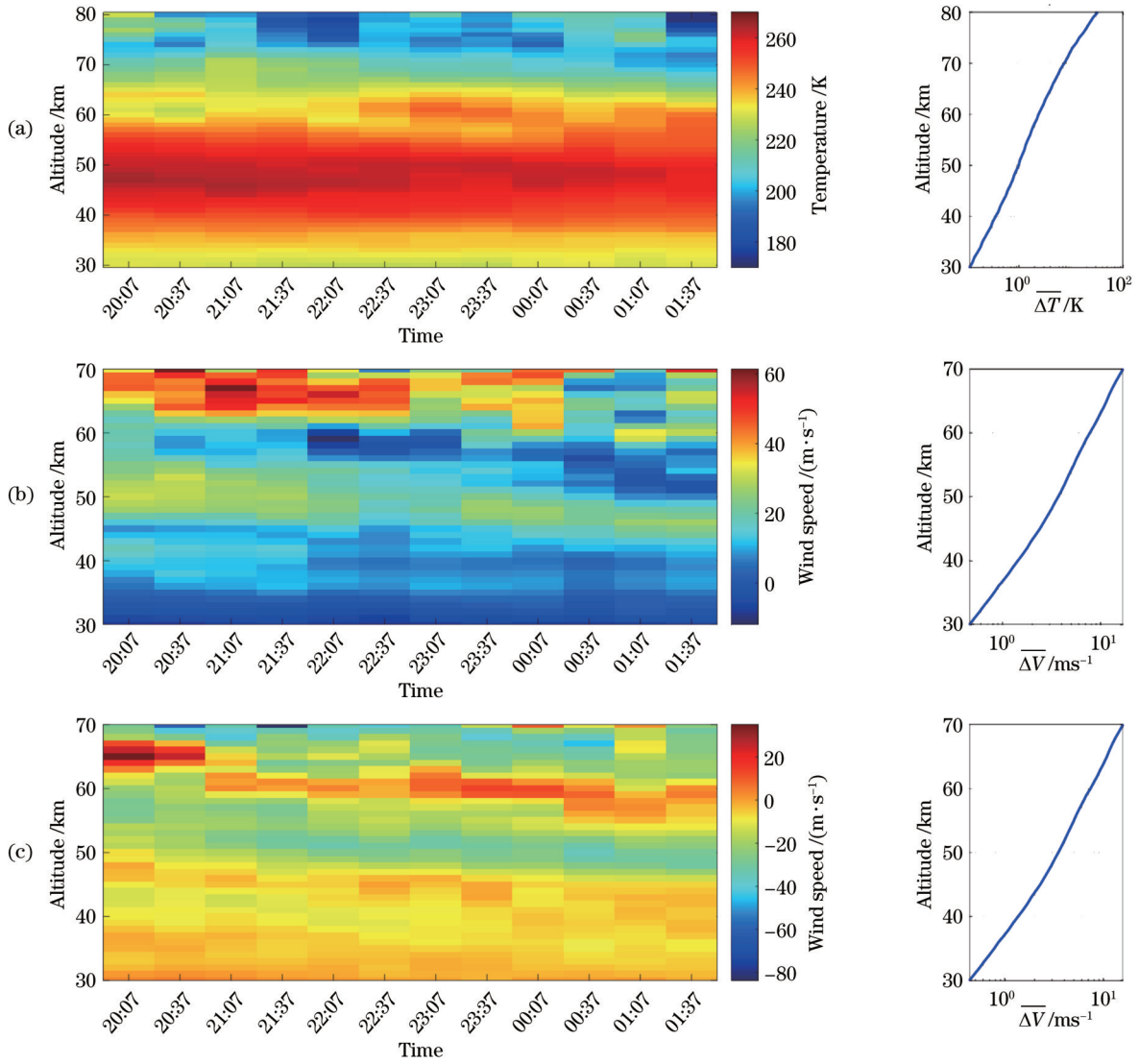


图 8 2022 年 10 月 15 日大气温度和经纬向水平风速测量时序结果和误差廓线。(a)大气温度;(b)纬向水平风;(c)经向水平风
Fig. 8 Measurement time series result of atmospheric temperature and meridional/zonal horizontal wind speed and measurement uncertainty profile on October 15, 2022. (a) Atmospheric temperature; (b) meridional horizontal wind; (c) zonal horizontal wind

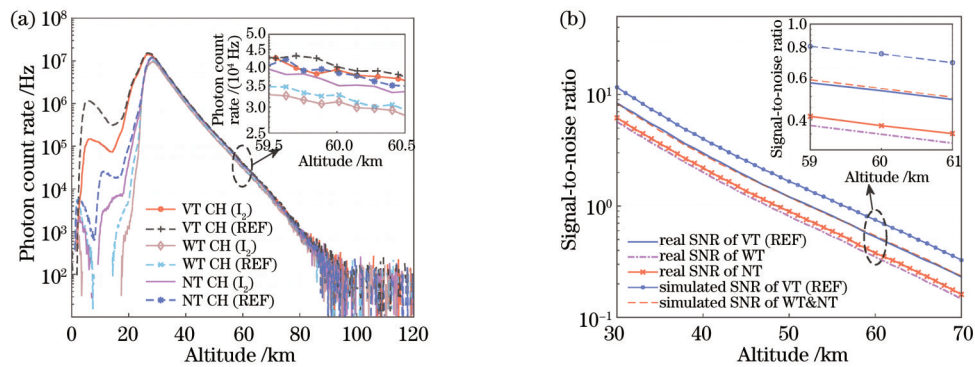


图 9 2022 年 10 月 16 日 00:07 测量的激光大气回波信号。(a)光子计数率;(b)信噪比
Fig. 9 Laser atmospheric echo measured at 00:07 on October 16, 2022. (a) Photon count rate; (b) signal-to-noise ratio

图 10(b)所示的对比偏差廓线中能够更加直观地看出:在 30~50 km 高度区间中,实测经纬向水平风速平均廓线与模式平均廓线的平均偏差分别为 -2.327 m/s 和

-3.946 m/s,实测大气温度平均廓线和模式平均廓线的平均偏差为 1.137 K;在 50~70 km 高度区间中,实测经纬向水平风速平均廓线与模式平均廓线的平均偏差

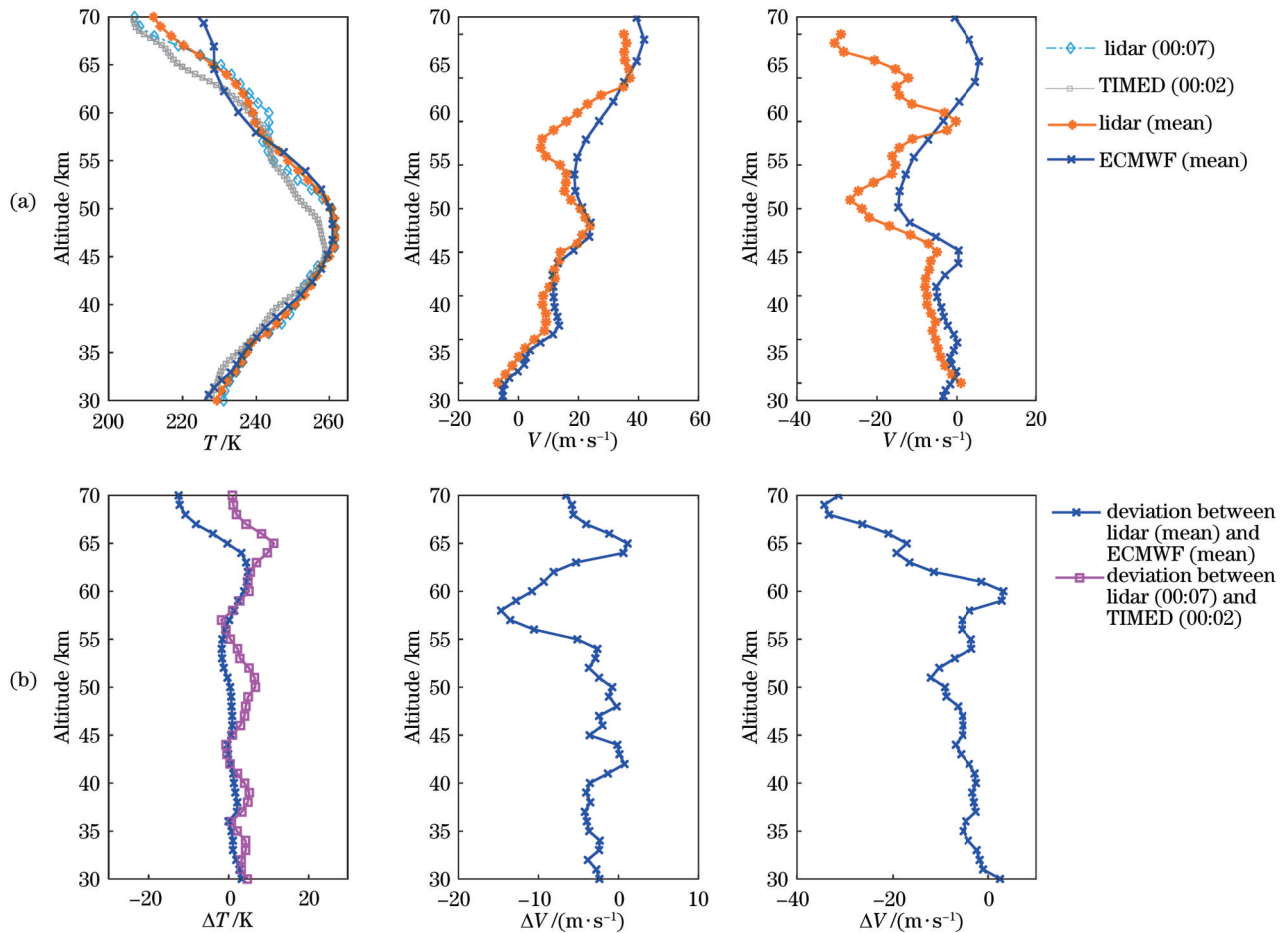


图 10 2022 年 10 月 15 日观测结果、大气模式和卫星产品的对比和偏差。(a)大气模式、卫星和观测结果廓线;(b)偏差分布廓线

Fig. 10 Comparison and deviation among observation results, atmospheric models and satellite products on October 15, 2022.

(a) Profiles of atmospheric model, satellite and observation; (b) deviation profile

分别增大至 -5.904 m/s 和 -12.703 m/s , 实测大气温度平均廓线和模式平均廓线的平均偏差为 1.447 K ; 在 TIMED 卫星测量结果与相同时刻测量的大气温度的对比中, $30\sim 50 \text{ km}$ 和 $50\sim 70 \text{ km}$ 两个高度区间的平均偏差分别为 2.889 K 和 4.038 K 。

相比于大气模式, 实测大气温度结果与 TIMED 卫星测量结果的对比偏差较大, 可能是卫星测量位置与激光雷达位置相隔距离较远导致的。实测结果与大气模式在 50 km 以上高度偏差增大的对比结果可能是大气模式缺乏平流层以上大气的直接观测同化资料和中高层高度中相对较粗的空间分辨率导致大气模式无法完全模拟出中间层的一些特殊天气过程引起的。在中国科学技术大学、挪威 ALOMAR 和法国 OHP 等多套瑞利测风激光雷达的观测数据对比中也曾报告过类似的现象^[7, 32-33]。

5 结 论

该系统是应用种子源多级串联光纤和固体放大再倍频激光器进行地基中层大气探测的瑞利多普勒激光雷达。该系统的激光器通过对种子源进行直接功率放

大, 能够避免传统种子注入激光器中输出激光的频率与注入种子激光频率不能严格保持一致的问题, 解决了多普勒风速测量中对激光频率基准稳定性要求较高的问题。多级光纤和固体功率放大提供了较高的激光重复频率和单脉冲能量, 解决了信号积分时间过长的问題, 同时使得激光雷达系统能够以时分复用的方式进行多通道的信号收发, 简化了系统结构。时分复用系统将激光依次向垂直、西向和北向发射进入大气, 从三个方向接收到的激光大气回波信号经过光纤合束后送入同一套碘池中进行多普勒鉴频, 避免了多路鉴频系统标定差异引入的风速测量误差。通过仿真和实验证明了该系统能够实现 $30\sim 70 \text{ km}$ 高度区间上距离分辨率为 1 km 、时间分辨率为 30 min 的大气温度和水平风速同步测量, 并且在 60 km 高度上实测的大气温度误差小于 3 K , 经纬向水平风速误差小于 8.5 m/s , 测量结果与大气模式产品和卫星测量结果对比一致性较好, 验证了该套瑞利测风激光雷达测量结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] 黄荣辉, 陈文, 魏科, 等. 平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究: 进展与问题[J]. 大气科学, 2018, 42(3):

- 463-487.
Huang R H, Chen W, Wei K, et al. Atmospheric dynamics in the stratosphere and its interaction with tropospheric processes: progress and problems[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(3): 463-487.
- [2] 吕达仁, 卞建春, 陈洪滨, 等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性[J]. 地球科学进展, 2009, 24(3): 221-228.
Lü D R, Bian J C, Chen H B, et al. Frontiers and significance of research on stratospheric processes[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(3): 221-228.
- [3] 闫召爱, 胡雄, 郭文杰, 等. 临近空间多普勒激光雷达技术及其应用(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 20210100.
Yan Z A, Hu X, Guo W J, et al. Near space Doppler lidar techniques and applications (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 20210100.
- [4] 张楠楠, 赵若灿, 孙东松, 等. 基于瑞利多普勒激光雷达的惯性重力波长期观测研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(S2): 20200351.
Zhang N N, Zhao R C, Sun D S, et al. Inertial gravity waves study with Rayleigh Doppler Lidar long-term observation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(S2): 20230351.
- [5] Baumgarten G. Doppler Rayleigh/Mie/Raman lidar for wind and temperature measurements in the middle atmosphere up to 80 km[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(6): 1509-1518.
- [6] Khaykin S M, Hauchecorne A, Wing R, et al. Doppler lidar at Observatoire de Haute-Provence for wind profiling up to 75 km altitude: performance evaluation and observations[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2020, 13(3): 1501-1516.
- [7] 卜令兵, 刘继桥, 陈卫标. 光谱稳定性对直接探测多普勒测风激光雷达的影响研究[J]. 光子学报, 2007, 36(2): 335-339.
Bu L B, Liu J Q, Chen W B. Effect of spectrum uncertainty for direct-detection Doppler wind lidar[J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(2): 335-339.
- [8] 潘艺升, 闫召爱, 郭文杰, 等. 脉冲激光器种子注入状态检测装置与实验研究[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 153-156.
Pan Y S, Yan Z A, Guo W J, et al. Pulse laser injection seeded state detector and experimental research[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 153-156.
- [9] 张飞飞, 王国成, 孙东松, 等. 基于法布里-珀罗干涉仪多普勒测风激光雷达径向风速漂移研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0814002.
Zhang F F, Wang G C, Sun D S, et al. Research on the radial velocity bias in Doppler wind lidar based on Fabry-Perot interferometer[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0814002.
- [10] Xia H Y, Dou X K, Shangguan M J, et al. Stratospheric temperature measurement with scanning Fabry-Perot interferometer for wind retrieval from mobile Rayleigh Doppler lidar[J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21775-21789.
- [11] 方志远, 赵明, 杨昊, 等. 直接测风激光雷达频率跟踪技术及对流层平流层大气风场观测[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(2): 20220412.
Fang Z Y, Zhao M, Yang H, et al. Frequency tracking technology of direct wind lidar and observation of atmospheric wind field in troposphere and stratosphere[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(2): 20220412.
- [12] Yan Z A, Hu X, Guo W J, et al. Development of a mobile Doppler lidar system for wind and temperature measurements at 30-70 km[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 188: 52-59.
- [13] 沈红超, 吴松华, 秦胜光, 等. 单频脉冲激光器的分子吸收光谱频率稳定技术研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0902010.
Shen H C, Wu S H, Qin S G, et al. Frequency stability based on molecular absorption spectrum of single-frequency pulse laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0902010.
- [14] Wang C S, Zhang Y S, Zheng J L, et al. Frequency-modulated continuous-wave dual-frequency LIDAR based on a monolithic integrated two-section DFB laser[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(11): 111402.
- [15] Zhuang W, Zhao Y, Wang S K, et al. Ultranarrow bandwidth Faraday atomic filter approaching natural linewidth based on cold atoms[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(3): 030201.
- [16] Wang J T, Zhou J, Zang H G, et al. Conductively cooled 250-Hz single frequency Nd: YAG laser[J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(7): 670-672.
- [17] Li S G, Ma X H, Li H H, et al. Laser-diode-pumped zigzag slab Nd: YAG master oscillator power amplifier[J]. Chinese Optics Letters, 2013, 11(7): 071402.
- [18] Gao F, Gao F J, Yang X, et al. Accurate measurement of aerosol optical properties using the multilongitudinal mode high-spectral-resolution lidar with self-tuning Mach-Zehnder interferometer[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(3): 030101.
- [19] 刘智深, 陈震, 于翠荣, 等. 多普勒测风激光雷达从车载到星载[J]. 大气与环境光学学报, 2015, 10(2): 126-138.
Liu Z S, Chen Z, Yu C R, et al. Doppler wind lidar: from vehicle-mounted to space-borne[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2015, 10(2): 126-138.
- [20] 赵明, 谢晨波, 钟志庆, 等. 高光谱分辨率激光雷达探测大气透过率[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): 130002.
Zhao M, Xie C B, Zhong Z Q, et al. High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(S1): 130002.
- [21] Gerstenkom S, Luc P. Description of the absorption spectrum of iodine recorded by means of Fourier Transform Spectroscopy: the (B-X) system[J]. Journal de Physique, 1985, 46(6): 867-881.
- [22] Witschas B, Vieitez M O, van Duijn E J, et al. Spontaneous Rayleigh-Brillouin scattering of ultraviolet light in nitrogen, dry air, and moist air[J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4217-4227.
- [23] Xu J Q, Witschas B, Kabelka P G, et al. High-spectral-resolution lidar for measuring tropospheric temperature profiles by means of Rayleigh-Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2021, 46(13): 3320-3323.
- [24] Korb C L, Gentry B M, Weng C Y. Edge technique: theory and application to the lidar measurement of atmospheric wind[J]. Applied Optics, 1992, 31(21): 4202-4213.
- [25] Hauchecorne A, Chanin M. Density and temperature profiles obtained by lidar between 35 and 70 km[J]. Geophysical Research Letters, 1980, 7(8): 565-568.
- [26] Che H, Xia X, Zhao H, et al. Spatial distribution of aerosol microphysical and optical properties and direct radiative effect from the China Aerosol Remote Sensing Network[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, 19(18): 11843-11864.
- [27] Tackett J L, Winker D M, Getzewich B J, et al. CALIPSO lidar level 3 aerosol profile product: version 3 algorithm design [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2018, 11(7): 4129-4152.
- [28] Kar J, Lee K P, Vaughan M A, et al. CALIPSO level 3 stratospheric aerosol profile product: version 1.00 algorithm description and initial assessment[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12(11): 6173-6191.
- [29] Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2002, 107(A12): SIA15-1.
- [30] Collis R T H, Russell P B. Lidar measurement of particles and gases by elastic backscattering and differential absorption[M]// Hinkley E D. Laser monitoring of the atmosphere. Heidelberg: Springer, 1976, 14: 71-151.
- [31] Xu J Y, She C Y, Yuan W, et al. Comparison between the temperature measurements by TIMED/SABER and lidar in the midlatitude[J]. Journal of Geophysical Research, 2006,

- 111(A10): A10S09.
- [32] Rüfenacht R, Baumgarten G, Hildebrand J, et al. Intercomparison of middle-atmospheric wind in observations and models[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(4): 1971-1987.
- [33] Dou X K, Han Y L, Sun D S, et al. Mobile Rayleigh Doppler lidar for wind and temperature measurements in the stratosphere and lower mesosphere[J]. *Optics Express*, 2014, 22(S5): A1203-A1221.

New Rayleigh Doppler Lidar Based on Iodine Molecular Absorption Cell

Tan Zhiqiang^{1,2}, Bu Lingbing^{1,2*}, Yang Bin^{1,2}

¹Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;

²Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China

Abstract

Objective The high spatial and temporal resolution observations of the middle and upper atmosphere can promote the study of atmospheric circulation coupling mechanisms and improve the accuracy of medium- and long-term weather forecasting. The Rayleigh Doppler lidar (RDLD) is able to detect atmospheric temperatures and wind speeds above 30 km altitude. However, the signal-to-noise ratio of the high-altitude Rayleigh backscatter signal received by RDLD is extremely low. To ensure measurement accuracy, it is normally required to increase the measurement spatial and temporal resolution, as well as to optimize the signal transceiver efficiency of the lidar system. Doppler shift wind speed measurement requires high frequency stability of the emitted laser, and the output frequency of the traditional seed injection laser cannot be kept strictly the same as the seed laser. In this paper, a new RDLD is designed using a new seeder multi-stage series direct amplification multiplier laser and a polarization-splitting-based time-division multiplexing transmitter system. The problems of long integration time and unstable laser frequency consistent with existing RDLD are solved. Higher spatial and temporal resolution atmospheric temperature and wind speed measurements are obtained.

Methods The system is equipped with a new laser system to output high repetition frequency and high energy pulsed laser. The laser is emitted into the atmosphere in vertical, westward, and northward directions in sequence by a polarization-splitting-based time-division multiplexing transmitter system. The atmospheric Rayleigh backscatter signal is coupled into a multimode fiber by the receiving telescope, combined into one way by a 3-in-1 optical fiber and sent into a iodine cell frequency discriminating receiver for atmospheric wind speed and temperature measurements. The simulation method is used to calculate the expected detection performance of the new RDLD design, and verify the feasibility of the new design. Finally, we built a set of RDLD according to the new design. The real atmospheric echo signal, atmospheric temperature and wind speed measurement results are obtained through the observation experiments. The real performance of the new RDLD system will be analyzed by comparing with the simulation results, and the accuracy of the measurement results will be confirmed by comparing with the atmospheric model and satellite measurement results.

Results and Discussions The simulation results of the new RDLD in Fig. 8 show that it can achieve simultaneous measurements of atmospheric temperature and zonal and meridional horizontal wind speed with a temporal resolution of 30 min and vertical distance resolution of 1 km. The detailed conditions of an integration time is 5 min for the vertical channel and 12.5 min for other two inclined channels. The theoretical measurement uncertainty of atmospheric temperature at 60 km altitude is 1.99 K, and the theoretical measurement uncertainty of zonal and meridional horizontal wind speed is 4.78 m/s. In the observation experiment (Fig. 9), the actual average measurement uncertainty of the atmospheric temperature of the new RDLD is 2.539 K, and the actual average measurement uncertainty of the zonal and meridional horizontal wind speed is 2.972 m/s and 2.575 m/s, respectively. The zonal and meridional horizontal wind speed average measurement result differs from the average model result by -2.327 m/s and -3.946 m/s in the altitude range from 30 km to 50 km, and the temperature average result differs from the average model result by 1.137 K (Fig. 10). In the altitude range from 50 km to 70 km, the zonal and meridional horizontal wind speed deviation increases to -5.904 m/s and -12.703 m/s, and the temperature deviation increases to 1.447 K. The difference between RDLD measurement and satellite measurement is 2.889 K and 4.038 K in the altitude ranges of 30-50 km and 50-70 km, respectively.

Conclusions The proposed Rayleigh Doppler lidar applies a seeder multi-stage series direct amplification multiplier laser system for ground-based mid-atmosphere detection. The laser system provides high-frequency stability, high laser repetition frequency and high single pulse energy laser output through direct power amplification of the seeder by a multi-stage fiber amplifier and solid-state amplifier. The laser atmospheric echo signals received in three directions are combined by a 3-in-1 optical fiber and sent to the same set of iodine cells for Doppler discriminations, the wind speed measurement uncertainties introduced by calibration differences of multiple channels can be avoided. The simulations and experiments have shown that it can solve the problem of too-long signal integration. The polarization-splitting-based time-division multiplexing transmitter reduces the overall system's complexity. Experimental results demonstrate that the actual signal transceiving capability and measurement performance of the system have been close to that expected in theoretical simulation. After that, simultaneous measurements of atmospheric temperature and horizontal wind speed at vertical distance resolution of 1 km and time resolution of 30 min are obtained. The accuracy of the new RDLD measurement results is validated by the good agreement with the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) atmospheric model and Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) satellite measurements.

Key words sensors; lidar; middle and upper atmosphere; Rayleigh scatter; iodine molecular absorption cell; doppler effect