

纯转动拉曼激光雷达探测北京地区近地面大气温度

尚震^{1,2}, 谢晨波¹, 王邦新^{1,2}, 谭敏^{1,2}, 钟志庆¹, 王珍珠¹, 刘东¹, 王英俭^{1,2}

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031; 2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

摘要: 对流层大气温度的垂直分布特征直接关联天气现象和大气污染物扩散, 一直是气象和环境部门的重点观测对象。当前激光雷达技术已经成为探测对流层大气温度垂直分布和时间演变的有效手段。然而由于对流层中含有大量的气溶胶粒子, 因此利用传统的振动拉曼和瑞利散射激光雷达技术测量大气温度具有一定的局限性, 尤其是边界层内存在高浓度的气溶胶粒子会严重降低大气温度测量精度。采用纯转动拉曼激光雷达技术可有效降低气溶胶粒子对测量温度精度的影响。纯转动拉曼测温激光雷达的核心是分光单元设计, 国内外研究普遍使用基于双光栅干涉仪的分光方法。文中将采用基于滤光片法的纯转动拉曼信号分光设计, 相比而言该方法具有更高的分光效率, 并且能够通过调节滤光片的角度改变激光雷达系统的灵敏度, 操作更为简单。在中国科学院“大气灰霾追因与控制”先导专项支持下, 该激光雷达与 2014 年 11 月安置在中国科学技术大学超级大气观测站。在亚太经济合作组织北京会议期间, 展开大气环境测量试验。激光紫外波段能量约为 200 mJ, 频率为 20 Hz, 激光脉冲数为 5000 发, 空间分辨率为 7.5 m。实验结果表明, 在晴朗无云气溶胶浓度较小的天气条件下温度测量统计误差小于 1.5 K, 测量高度可达 10 km, 在 7.5 km 以下统计误差小于 1 K; 在有薄云或者轻度雾霾天气条件下, 温度测量统计误差在 ± 3 K 左右, 测量有效高度通常在 6~8 km, 在 4.8 km 以下统计误差小于 1 K。

关键词: 激光雷达; 纯转动拉曼; 对流层温度; 干涉滤光片

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1030001

Pure rotational Raman lidar measurements of atmospheric temperature near ground in Beijing

Shang Zhen^{1,2}, Xie Chenbo¹, Wang Bangxin^{1,2}, Tan Min^{1,2}, Zhong Zhiqing¹, Wang Zhenzhu¹, Liu Dong¹, Wang Yingjian^{1,2}

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

Abstract: The vertical distribution of the atmospheric temperature in the troposphere is directly related to the meteorological phenomena and the diffusion of atmospheric pollutants. It has been the major parameters observed by the meteorological department and the environment sector. The lidar technology

收稿日期: 2017-02-05; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家 863 计划(2012AA120901); 国家自然科学基金(41405032); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G06-01-20); 安徽省自主创新专项(12Z0104074)

作者简介: 尚震(1988-), 男, 博士生, 主要从事探测对流层温度方面的研究。Email: shangzhengd@163.com

导师简介: 谢晨波(1976-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光大气探测和激光雷达技术方面的研究。Email: cbxie@aiofm.ac.cn

has become an effective method to detect the vertical distribution and time variation of the atmospheric temperature in the troposphere. Lower tropospheric temperature profile measured by lidar using the Rayleigh and vibrational Raman scattering can't be obtained accurately due to the abundant aerosols. Using N_2 and O_2 molecular pure rotational Raman scattering signal, the lower tropospheric temperature profile can be obtained without the influence of lower tropospheric aerosol theoretically. The main difficulty of the rotational Raman lidar is design and mechanics of the receiving spectroscopic system. In domestic research, most of the lidar systems use the spectroscopic technique based on double grating spectrometer. The technique based on the interference filters was introduced in this paper and used in our lidar system for observation of the tropospheric temperature. This technique had more efficiency and suppression in separation of the pure Raman signals from Mie signals. Furthermore, the system's sensitivity can be optimized by selecting the tilting angle of the filters. The experiment was based on the project of "Formation Mechanism and Control Strategies of Haze in China" carried out by the research groups of the Chinese Academy of Sciences. Our lidar system was moved to the super atmospheric observatory in University of Chinese Academy of Sciences on November 2014 and the experiment were taken during the APEC conference. The energy of laser in ultraviolet was about 200 mJ, the frequency was 20 Hz, the laser pulse number was 5 000, the spatial resolution was 7.5 m. The experimental result shows that the statistical error between lidar and radiosonde are less than 1.5 K with the range up to 10 km and the statistical error of less than 1 K is obtained up to 7.5 km height in the clean night. Larger differences of about 3 K at the region above the thin cloud may be caused by the strong elastic backscatter signal and the statistical error of less than 1 K is obtained up to 4.8 km height.

Key words: lidar; pure rotational Raman; tropospheric temperature; interference filters

0 引言

大气温度是常规观测的气象参数之一,主要用于表征大气的稳定性。对流层大气温度垂直廓线对大气物理、气象分析及预报天气具有重要的意义^[1]。目前探测大气温度的手段主要有无线电探空仪、微波辐射计和激光雷达等设备。无线电探空仪是利用搭载在探空气球上的测温敏感器件获取大气温度廓线信息,是当前全球气象部门测量大气温度廓线所采用的业务手段。由于该方法为直接探测,因此具有灵敏度和准确度高、感应快、体积小等优点。但是无线电探空仪时间分辨率低,在上升过程中容易受风速和风向影响,无法获得大气温度垂直廓线的连续变化信息。微波辐射计利用不同高度温度辐射的微波信号来判断大气温度,能够全天候连续观测,具有较高的探测速度和稳定性,但是垂直分辨率不高。激光雷达利用激光与大气分子的相互作用反演得到大气温度廓线。激光雷达具有激光束能量高、方

向性好、窄脉宽和高时间、空间分辨率等优点,能够长期连续测量大气温度垂直分布廓线。但其缺点是反演精度易受到系统标定和大气中气溶胶干扰因素影响。

激光雷达探测大气温度垂直廓线主要有瑞利散射探测技术、振动拉曼探测技术和纯转动拉曼探测技术。瑞利激光雷达技术可以探测 30 km 以上高空大气温度,在此高度之上大气气溶胶含量非常少,可以忽略不计^[2-3],大气激光散射回波信号被认为仅仅来自大气分子的瑞利散射,由瑞利散射回波信号可以获得不同高度处的大气分子密度,反演出大气温度垂直廓线。振动拉曼激光雷达利用 N_2 分子振动拉曼散射回波信号获得大气密度分布,并通过订正大气透过率项反演对流层中上部至平流层下部范围内气溶胶含量较少的大气温度廓线^[4-5]。 N_2 和 O_2 分子的纯转动拉曼后向散射强度与温度密切相关,纯转动拉曼激光雷达即是利用 N_2 和 O_2 分子的这种性质反演大气温度^[6-8]。该方法原理上选用 N_2 和 O_2 分子

两支较近的纯转动拉曼谱线,气溶胶和分子消光项除影响回波信号强弱外,对测量精度产生影响不大。

2000 年, Behrendt^[9] 等人设计了一台纯转动拉曼激光雷达系统,能够探测到 20 km 以下大气温度廓线。2005 年 Hua^[10] 等人将高精度多通道的 Fabry-Perot 标准具作为核心分光系统,实现了对流层大气温度的高精度探测。2012 年 Imaki^[11] 等人设计了一套结合光栅和滤光片的光学系统,实现了近地面的温度探测。2014 年, Wang^[12] 等人设计了一套多参数探测拉曼激光雷达系统,实现了大气温度、水汽和气溶胶的同时探测。2014 年, 武汉大学^[13] 设计的纯转动拉曼激光雷达系统基于双光栅分光的方法完成了对 5~30 km 大气温度的探测研究。2015 年, 李亚娟^[14] 等人设计了一套纯转动拉曼测温激光雷达系统,实现了在武汉市上空从 10~40 km 的中低空大气温度高精度探测。

文中介绍了一套测温纯转动拉曼激光雷达系统,分光系统由高性能的干涉滤光片(IF)组成,实现了包括 N₂ 和 O₂ 的高低阶转动拉曼信号和米-瑞利散射信号的三通道大气回波信号精细分光和高效率提取,从而完成近地面气溶胶富集区域内大气温度的高精度探测。

1 探测原理

纯转动拉曼散射谱线强度与转动量子数 J 和温度 T 的关系如图 1 所示。纯转动拉曼谱线强度 I 是随温度变化的,图中给出了三个不同温度条件下,转动拉曼谱线强度随温度的变化情况,尤其在实际上大气温度变化范围内,转动拉曼散射谱线强度随温度的变化较为灵敏。

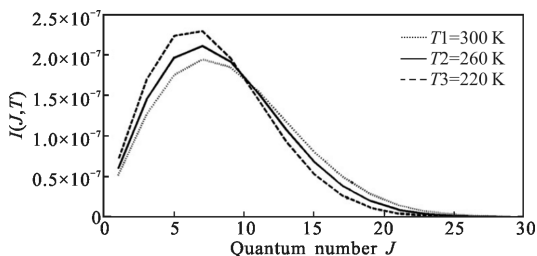


图 1 双原子分子纯转动拉曼散射谱线强度 $I(J,T)$ 与温度 T 的关系
Fig.1 Relationship between the intensity $I(J,T)$ and temperature T of the pure rotational Raman spectra of the diatomic molecule

大气中 N₂ 和 O₂ 分子的纯转动拉曼散射谱线强度分布与温度有关,在不同的大气温度下,谱线强度

对温度的敏感度不相同,高温时大多数谱线强度对温度敏感度较低,低温时大多数谱线强度对温度的敏感度较高,并且从图 1 中看出,低量子数拉曼谱线的强度随温度升高而降低,高量子数拉曼谱线的强度随温度升高而升高。由于 N₂ 和 O₂ 分子高低量子数的转动拉曼散射回波波长与发射激光的波长相近(间隔不超过 3 nm),所以近似认为大气对 N₂ 和 O₂ 分子高低阶转动拉曼谱线的消光作用是相同的。N₂ 和 O₂ 分子高低量子数的转动拉曼散射回波信号比值与温度呈指数关系,利用此关系可以反演出温度^[9]:

$$Q = \frac{P_L(z)}{P_H(z)} = \frac{I(J_L)\text{tr}(z, \lambda_L)\chi_L K_L \frac{s}{2z^2}}{I(J_H)\text{tr}(z, \lambda_H)\chi_H K_H \frac{s}{2z^2}} = \frac{I(J_L)\chi_L K_L}{I(J_H)\chi_H K_H} \quad (1)$$

$$Q = \exp[A^2/T(z) + B/T(z) + C] \quad (2)$$

$$T(z) = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC - 4A \ln Q}}{2(c + \ln Q)} \quad (3)$$

式中: Q 为低阶谱线强度与高阶谱线强度之比; $P_L(z)$ 和 $P_H(z)$ 分别代表被激光雷达系统接收大气中 N₂ 和 O₂ 分子低、高量子数的转动拉曼散射回波信号; $I(J_L)$ 和 $I(J_H)$ 分别是低、高量子数的转动拉曼散射强度; $\text{tr}(z, \lambda_L)$, $\text{tr}(z, \lambda_H)$ 分别是转动拉曼低、高量子数谱线大气消光系数; χ_L , χ_H 分别是光学系统接收转动拉曼低、高量子数回波信号的透过率; K_L , K_H 是探测器对低、高量子数转动拉曼散射回波信号的灵敏度; s 是接收望远镜的面积; A 、 B 、 C 是激光雷达测温的标定系数,由两个转动拉曼通道的信号强度比值和无线电探空仪测得的温度廓线进行二次拟合得到; $T(z)$ 为大气温度, z 是高度。

由于单谱线反演大气温度要求将 N₂ 转动谱线相互分离,且同时要求与 O₂ 的转动谱线分离,故要求激光雷达光源具有极窄的线宽,且要求分光系统具有极高的分辨率,这种纯转动拉曼激光雷达的研制费用非常高,所以一般采用多谱线反演大气温度,即同时接收多条 N₂ 和 O₂ 的高低阶谱线反演大气温度。

2 纯转动拉曼测温激光雷达系统结构

在国家 863 项目“多源光谱层析及三维数值大气关键技术”和 973 项目“云、气溶胶气候效应的观测与模拟研究”支持下,中国科学院安徽光学精密机

械研究所于 2014 年成功研制车载式大气温度、水汽和气溶胶测量激光雷达系统。文中主要介绍其纯转动拉曼激光雷达温度测量分系统。系统结构如图 2 所示。

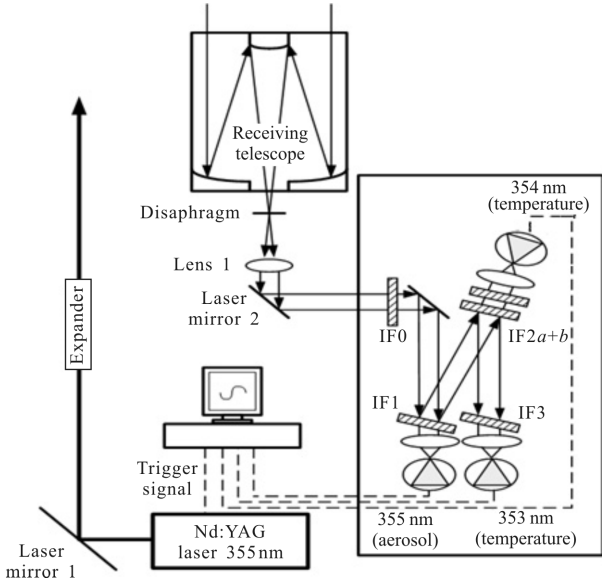


图 2 纯转动拉曼激光雷达温度测量分系统原理图

Fig.2 Schematic setup of the pure rotational Raman lidar temperature measurement sub-system

测温拉曼激光雷达采用的激光器为 Nd:YAG 激光器,经过三倍频后获得 354.7 nm 波长激光。相比于 532 nm 激光,在近地面高度紫外波段的拉曼后向散射截面更大,回波信号更强。发射光路中使用扩束镜可以减小出射激光的发散角,降低背景光干扰并且便于近距离探测。接收望远镜是卡塞格林型望远镜,直径为 450 mm。大气分子纯转动拉曼回波信号经过可调节光阑和准直透镜后,进入分光系统(图中黑框部分)。此分光模块是基于干涉滤光片的分光系统,干涉滤光片以一定的倾斜角度依次安装在光学平台上。首先回波信号透过中心波长为 353.7 nm、带宽为 8.5 nm 的干涉滤光片 IF0,IF0 作用是抑制背景光信号,对弹性散射信号和纯转动拉曼信号具有很高的透射率;透射信号经反射镜反射后入射到中心波长为 354.7 nm、带宽为 0.3 nm 的 IF1 上,通过 IF1 可以得到弹性散射信号,可用于分析大气气溶胶的光学特性;经 IF1 反射光入射到 IF2a 表面,IF2a 和 IF2b 以及 IF3 分别为两个独立的拉曼通道。为了提高对弹性散射信号的抑制能力,需串联使用 IF2a 和 IF2b 来提取中心波长为 354.05 nm 的低阶量子数转动拉

曼信号,IF3 提取中心波长为 353.05 nm 的高阶量子数转动拉曼信号。数据采集器采用瞬态记录仪,可以同时探测回波模拟信号和光子计数信号,将低空模拟信号与高空光子计数信号拼接,弥补了低空光子计数信号易饱和和高空模拟信号信噪比低的缺点,增大了测量的动态范围。

表 1 纯转动拉曼激光雷达系统主要参数

Tab.1 Technical parameters of the pure rotational Raman lidar system

Item	Parameter
Wavelength	354.7 nm
Pulse repetition rate	20 Hz
Pulse energy	200 mJ@355 nm
Beam divergence	<0.45 mrad
Beam expansion	3
Primary mirror diameter	450 mm
Telescope focal length	4 000 mm
Field of view	0.5–2 mrad
Interference filters	See table.2
Detectors	PMT Hamamatsu R7400
Data acquisition system	Analog mode 12 bit,20 MHz Photon-counting mode 250 MHz Range resolution 7.5 m

3 滤光片参数的选择

纯转动拉曼测温激光雷达的核心是分光系统,为了获得最佳的滤光片参数需要进行模拟计算和优化设计^[15]。图 3 为 N₂ 和 O₂ 分子分别在温度为 300 K 和 250 K 条件下的纯转动拉曼后向散射强度谱线以及窄带干涉滤光片的透过率函数曲线。

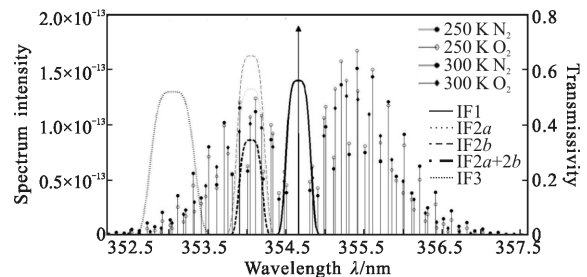


图 3 N₂ 分子和 O₂ 分子转动拉曼光谱与温度(T₁=300 K 和 T₂=250 K)的关系以及干涉滤光片的透过率曲线

Fig.3 Rotational Raman spectrum of N₂ and O₂ molecule for temperatures of T₁=300 K and T₂=250 K and transmission curves of the narrow-band interference filter

由公式(1)~(3)可知,只要测量出一对低阶和高阶量子数对应的拉曼散射激光雷达回波信号比就可反演出大气的温度廓线。由误差传递公式可知,温度的测量误差主要取决于低阶和高阶量子数对应的拉曼散射激光雷达回波信号比值的误差。由图 3 可知,同一量子数对应的拉曼散射信号强度在不同的温度下是不同的,因此需要计算不同大气温度环境下滤光片中心波长和带宽的选取对探测精度的影响。根据误差传递公式, ΔT 表达式如下^[16]:

$$\Delta T = \frac{\partial T}{\partial Q} \Delta Q \approx \frac{T(t+\Delta t) - Tt}{Q_T(t+\Delta t) - Q_T} Q_T \times \sqrt{\frac{P_{Jlow} + 2P_{Blow} + \frac{P_{Jhigh} + 2P_{Bhigh}}{P_{Jhigh}^2}}{P_{Jlow}^2} + \frac{P_{Jhigh} + 2P_{Bhigh}}{P_{Jhigh}^2}} \quad (4)$$

式中: Δt 为 5 K; $Q = P_{Jlow}/P_{Jhigh}$ 为高低阶转动拉曼通道的信号比值; P_{Jlow} 和 P_{Jhigh} 分别表示去除背景信号后的转动拉曼信号; P_{Blow} 和 P_{Bhigh} 分别表示两个转动拉曼探测通道的噪声信号^[14],

$$P_B = \frac{\eta \lambda}{hc} P_b \pi (\theta/2)^2 \lambda_{FWHM} A_r T_r \Delta t \quad (5)$$

式中: η 为光电探测器的量子效率; λ 为激发波长; h 为普朗克常数; c 为光速; P_b 为天空背景辐射亮度; λ_{FWHM} 为 λ 滤光片的带宽; A_r 为接收望远镜的接收面积; T_r 为接收光学单元的光学透过率; Δt 为激光雷达的时间分辨率。参考图 2 给出的谱线强度与温度的依赖关系,并且考虑到转动拉曼通道的滤光片在发射波长处还应具有较高的截止率(约为 10^{-7})^[15], 设

低阶量子数转动拉曼通道滤光片中心波长范围 353.6~354.6 nm, 步长为 0.01 nm; 高阶量子数转动拉曼通道滤光片中心波长范围为 352.6~353.6 nm, 步长 0.01 nm (为避免气溶胶荧光的影响,通常选用拉曼散射的反斯托克斯谱)。设两转动拉曼通道干涉滤光片带宽分别为 0.3 nm 和 0.5 nm。在模拟计算中需要利用高斯函数模拟滤光片透过率曲线随波长的分布变化,函数的定义为^[15]:

$$f(\lambda) = A \exp \left[- \left(\frac{2(\lambda - \lambda_{CWL})B}{\Delta \lambda_{FWHM}} \right)^4 \right] \quad (6)$$

式中: A 为峰值透过率; λ_{CWL} 为中心透过波长; $\Delta \lambda_{FWHM}$ 为滤光片的带宽; $B = \sqrt{\ln 2}$ 。最终得到滤光片参数如表 2 所示。图 4 为三组不同对温度 $(T_1, T_2) = (220 \text{ K},$

表 2 滤光片参数

Tab.2 Filter parameters

	IF0	IF1	IF2a	IF2b	IF3
AOL/(°)	0	5.7	6.5	6.7	6.2
CWL/nm	353.7	354.7	354.05	354.05	353.05
FWHM/nm	8.5	0.3	0.3	0.3	0.5
Peak transmission	0.55	0.61	0.54	0.64	0.51
Reflectivity at 354.66 nm			<0.1		
Transmission at 354.66 nm	0.55	0.61	<10 ⁻³	<10 ⁻³	<10 ⁻⁶

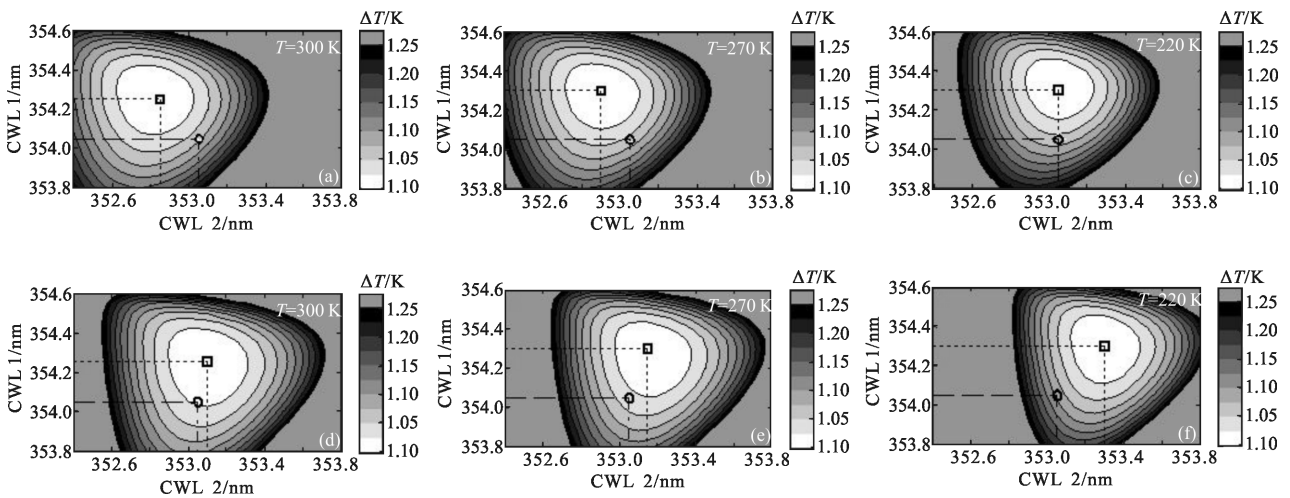


图 4 (a)~(c)表示无背景光在不同的温度条件下 ΔT 相对于滤光片中心透过波长 λ_{CWL1} 和 λ_{CWL2} 的变化; (d)~(f)表示添加背景光后信号的变化

Fig.4 (a)~(c) ΔT versus filter CWLs λ_{CWL1} and λ_{CWL2} under different temperature without background light; (d)~(f) ΔT versus filter CWLs λ_{CWL1} and λ_{CWL2} under different temperature with background light

225 K), (270 K, 275 K), (300 K, 305 K) 在没有背景光 (图(a)~(c))及有背景光图((d)~(f))的条件下, 两组滤光片中心透过波长与 T 的关系图, 中心白框点对应的坐标值即为两通道的滤光片中心波长最优值。图中(□)表示模拟计算两组滤光片参数的最优值,(O)表示设备仪器使用的滤光片参数值。 ΔT 如右侧灰度灰度值所示。从图(a)~(c)与图(d)~(f)可以看出, 当温度下降时, 可以明显地看出 λ_{CW2} (高阶)的最优值向波长增大的方向移动, 而 λ_{CW1} (低阶)的最优值只有很小的变化。对比图(a)~(d), (b)~(e), (c)~(f)可以发现, 当添加背景光后, λ_{CW2} 的最优值明显向波长增大的方向移动, λ_{CW1} 的最优值略微向波长减小的方向移动。这表明 λ_{CW2} 随温度和背景光变化的程度大, λ_{CW1} 随温度和背景光变化的程度小。因此, 安装调节时, 可以先将 λ_{CW1} 固定在一个位置, 根据不同的温度和背景光条件, 选择 λ_{CW2} 的入射角度, 提高系统的灵敏度。

4 测量结果与讨论

2014 年 11 月, 亚太经济合作组织(APEC)会议在北京召开, 中国科学院在实施“大气灰霾追因与控制”先导专项的基础上, 进一步组织实施了“京津冀区域灰霾综合外场实验”^[17], 以毗邻怀柔雁栖湖的国防科学技术大学超级大气观测站为核心实验区, 建立了大气污染综合观测网络。本所研制的纯转动拉曼激光雷达负责温度-水汽-气溶胶的观测实验, 并取得了较好的探测结果。纯转动拉曼激光雷达安置在北京怀柔区(N40°24', E116°40')进行观测。激光发射能量为 200mJ, 测量累计脉冲数均为 5000, 数据采集的空间分辨率为 7.5 m, 无线电探空仪数据来源是北京机场(N39°55', E116°17')的测量数据, 目的是用来标定纯转动拉曼激光雷达的系统常数, 即公式(3)A, B, C 三个未知量, 对于此系统 $A=1.35 \times 10^5$, $B=-4.7 \times 10^3$, $C=24.71$ 。测量结果如图 5~图 7 所示, 图 5 和图 6 分别表示在晴朗干净和有薄云的天气条件下测得的大气温度廓线个例结果, 其中图(a)表示气溶胶消光系数廓线, 通过 Fernald 方法计算得到, 而图(c)表示温度探测统计误差廓线, 由公式(4)计算得到。图 7 为连续观测反演的大气温度结果图以及同时刻的水汽和气溶胶信号结果图。

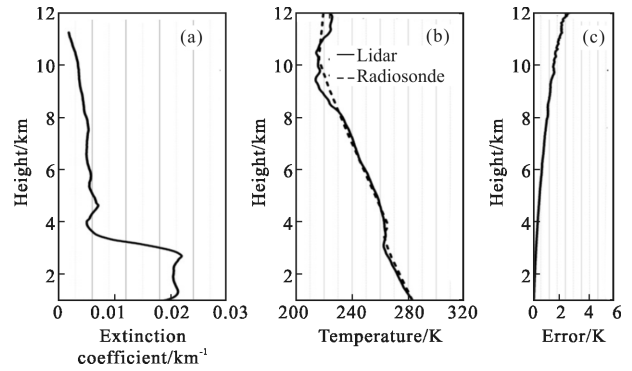


图 5 2014 年 11 月 5 日 20:30 纯转动拉曼激光雷达探测温度结果与无线电探空化的对比

Fig.5 Comparison of temperature observed by pure rotational Raman lidar and radiosonde data at 20:30 on November 5, 2014

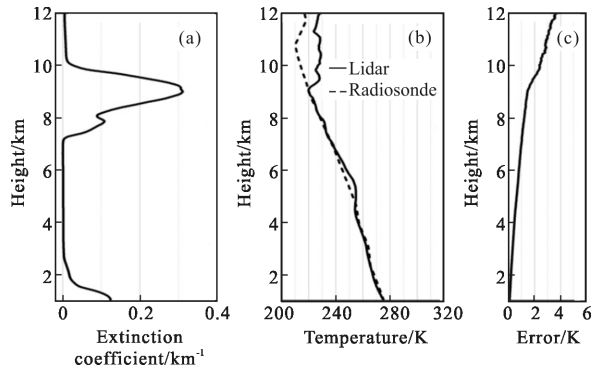


图 6 2014 年 11 月 4 日 20:30 纯转动拉曼激光雷达探测温度结果与无线电探空仪的对比

Fig.6 Comparison of the measurement of temperature of pure rotational Raman lidar with radiosonde data obtained at 20:30 on November 4, 2014

首先对转动拉曼激光雷达信号进行平滑处理, 3 km 以下平滑距离为 150 m, 3 km 以上平滑距离为 300 m, 然后通过公式(3)反演获得大气温度的空间分布变化曲线, 由图 5 看出, 11 月 5 日夜晚, 天气条件良好, 晴朗无云, 近地面的气溶胶消光系数仅为 0.025 km^{-1} , 纯转动拉曼雷达测量的温度廓线与无线电探空仪的结果表现了较好的一致性, 大气底层温度约为 17° , 随着高度增加, 温度变化呈现递减趋势, 变化梯度约为 6.5 K/km , 这与大气平均温度梯度变化基本一致。激光雷达可以测量到 12 km 左右的高度, 在 6 km 以下温度探测统计误差小于 1 K。在 8 km 之上, 探空数据与雷达数据总体趋势近乎一致, 但是有些许偏差, 主要是有三方面原因: 第一, 无线电探

空仪受风速和风向的影响发生明显的水平漂移,无法精确获得垂直高度上的大气参数信息;第二,激光雷达测量的是一段时间内温度的平均值,而无线电探空仪测量的是瞬时温度;第三,高空信号信噪比下降,影响反演结果。以上三个原因造成了两条温度廓线有所差异,但是二者的结果基本一致。

由图 6 看出,11 月 4 日,是有薄云天气,高空存在云层,近地面气溶胶消光系数为 0.15 km^{-1} ,在 8~10 km 处有一云层,最大消光系数为 0.38 km^{-1} ,云层光学厚度为 0.423,雷达测量的温度结果在 1~7 km 以及 7~8 km 进入云层的一段距离,与无线电探空仪测量结果吻合较好,9 km 处为云层厚度最大值,9 km 之后雷达测量的温度与探空仪对比,差异较大,原因可能是云层的米散射信号较强,超出了纯转动拉曼激光雷达对米散射信号的抑制能力,在拉曼通道中混入了部分米散射信号,引起了温度测量的误差。由温度统计误差图也可以发现,在 3 km 以下,统计误差小于 1 K,9 km 左右统计误差为 2.5 K,9~10 km 云层内测量统计误差迅速增大,说明此转动拉曼激光雷达在有云的天气条件下测量有一定的局限性,根据长期的实验观测统计,当气溶胶的消光系数在 0.25~0.3 以上,PM2.5 指数在 120~150 以上时,对此系统的温度探测准确度影响较大。如何更有效地去除或者减小米散射信号的影响是以后工作中需要重点研究和解决的问题。

图 7 表示 11 月 6 日 20:00 至 22:00 2 h 内连续

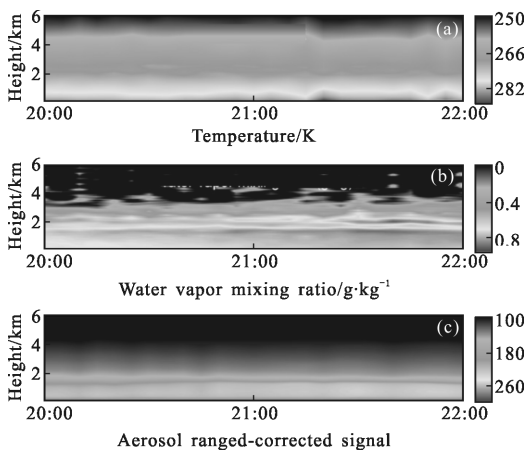


图 7 2014 年 11 月 6 日 20:00~22:00 连续探测大气温度,水汽,气溶胶结果图

Fig.7 Continuous detection of atmospheric temperature, water vapor and aerosol from 20:00~22:00 on 6 November 2014

探测大气温度-水汽-气溶胶的结果,在 APEC 会议期间北京采取了各种污染物减排措施,加上相对有利的气象条件,APEC 会议期间北京空气质量优良。从图中可以看出大气温度随着高度变化平缓,大气水汽混合比较低,近地面水汽混合比约为 1.2 g/kg 。由于北京冬季风速较大和天气干燥,不容易发生大气逆温层现象。但是从温度-水汽-气溶胶图中可以明显地看出,大气边界层在 1.5~1.8 km 附近变化,这反映了当晚大气状态相对稳定,也证明了该激光雷达系统的稳定性和可靠性。

5 结论

课题组已经研制成功了一套纯转动拉曼激光雷达系统,用于探测近地面至对流层的大气温度分布。该雷达分光系统是采用滤光片分光法,此方法在保证对弹性散射信号有足够抑制比的前提下,有较高的分光效率和抑制比,而且可以通过调节滤光片的角度,改变滤光片的中心透过波长,操作相对简单,灵敏度高。在天气状况良好的条件下,该系统可以测到 12 km 左右的高度,在 6 km 以下,统计误差在 1 K 以内。在有薄云或者轻度雾霾的天气条件下,测量高度只有 6~8 km,在 3 km 范围内,统计误差在 1 K 以内。文中验证了纯转动拉曼激光雷达技术测量对流层高度大气温度分布的可靠性。下一步工作需要纯转动拉曼激光雷达分光系统进行改进,减小有云情况下对测温的影响,并结合水汽和气溶胶做一些相关研究的分析。

参考文献:

- [1] Mi Jide, Cui Jiliang, Cao Hongxing. Temperature statistics of upper-air in Beijing[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, 57(2): 236-241. (in Chinese)
米季德,崔继良,曹鸿兴.北京高空温度的统计特征[J].气象学报,1999,57(2):236-241.
- [2] 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.
- [3] Fleming E L, Chandra S, Barnett J J, et al. Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as functions of latitude [J]. *Advances in Space Research*, 1990, 10(12): 11-59.

- [4] Evans K D, Melfi S H, Ferrare R A, et al. Upper tropospheric temperature measurements with the use of a Raman lidar[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(12): 2594–2602.
- [5] Keckhut P, Chanin M L, Hauchecorne A. Stratosphere temperature measurement using Raman lidar [J]. *Applied Optics*, 1990, 29(34): 5182–5186.
- [6] Ristori P, Froidevaux M, Dineev T, et al. Development of a temperature and water vapor Raman lidar for turbulent observations[C]//SPIE, 2005, 5984: 59840F–1–8.
- [7] Cooney J. Measurement of atmospheric temperature profiles by Raman backscatter [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1972, 11(1): 108–112.
- [8] Kobayashi T, Taira T, Yamamoto T, et al. Rotational Raman lidar for lower tropospheric temperature profiling [C]//Laser Radar Conference, 1992.
- [9] Reichardt A B J. Atmospheric temperature profiling in the presence of clouds with a pure rotational Raman lidar by use of an interference-filter-based polychromator [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(9): 1372–1378.
- [10] Hua D, Uchida M, Kobayashi T. Ultraviolet Rayleigh-Mie lidar with Mie-scattering correction by Fabry-Perot etalons for temperature profiling of the troposphere [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(7): 1305–1314.
- [11] Imaki M, Kawai H, Kato T, et al. Efficient ultraviolet rotational Raman lidar for temperature profiling of the planetary boundary layer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(5): 052401–1–5.
- [12] Wang Yufeng, Gao Fei, Zhu Chengxuan, et al. Raman lidar for atmospheric temperature, humidity and aerosols up to troposphere height[J]. *Acta Opt Sin*, 2015, 35(3): 0328004. (in Chinese)
- [13] Jia J Y, Yi F. Atmospheric temperature measurements at altitudes of 5–30 km with a double-grating-based pure rotational Raman lidar[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(24): 5330–5343.
- [14] Li Yajuan, Song Shalei, Li Faquan, et al. High-precision measurements of lower atmospheric temperature based on pure rotational Raman lidar [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(7): 2294–2305. (in Chinese)
李亚娟, 宋沙磊, 李发泉, 等. 基于纯转动拉曼激光雷达的中低空大气温度高精度探测 [J]. *地球物理学报*, 2015, 58(7): 2294–2305.
- [15] Weitkamp C. Lidar: Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [16] Macintyre R, Tan T, Heywood A, et al. Scanning rotational Raman lidar at 355 nm for the measurement of tropospheric temperature fields [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2007, 8(2): 7569–7602.
- [17] Chen Z, Zhang J, Zhang T, et al. Haze observations by simultaneous lidar and WPS in Beijing before and during APEC, 2014[J]. *Science China Chemistry*, 2015, 58(9): 1–8.