

对流层高度大气温度、湿度和气溶胶的 拉曼激光雷达系统

王玉峰 高飞 朱承炫 何廷尧 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 为了实现大气温度、水汽(相对湿度)和气溶胶的实时同步探测研究,成功研制了一台日常观测的多参数探测拉曼激光雷达,采用高性能二向色镜和窄带干涉滤光片组成高光谱分辨率高效率拉曼分光系统,实现独立5通道大气回波信号的高精细分光和高效率提取,并研发了多参数同步反演算法,获得了大气水汽密度、温度和气溶胶消光系数廓线,结合水汽密度和温度得到了同时刻大气相对湿度的垂直变化特性。利用该系统在晴天和有云条件下对西安局地进行初步实验观测,获得温湿度及气溶胶廓线以及云层内水汽与逆温层的高度关系。实验结果表明,在探测时间15 min和激光能量150 mJ的条件下,系统在晴天条件可实现高度16 km以下大气温度和湿度的同步探测,在有云条件下系统可实现大气底层和云层顶逆温层的精确探测,并可获得高层云层内和水汽层内大气水汽密度和相对湿度的同步增长趋势。实验数据与当地探空数据的多次随机比对在大气温度、湿度廓线上取得了较好的一致性,充分验证了该拉曼激光雷达实现对流层高度大气多参数同步探测的有效性和系统的可靠性。使用该系统可有效开展区域性大气的观测研究,为大气气候变化以及雾霾生消过程的研究提供可靠的实时探测数据。

关键词 遥感;大气温度;湿度;拉曼激光雷达;

中图分类号 P41

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0328004

Raman Lidar for Atmospheric Temperature, Humidity and Aerosols up to Troposphere Height

Wang Yufeng Gao Fei Zhu Chengxuan He Tingyao Hua Dengxin

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

Abstract In order to achieve measurement of atmospheric temperature, water vapor (relative humidity) and aerosol simultaneously, a Raman lidar system has been developed, and a high-performance spectroscopic box composed of dichroic mirrors and narrow-band interference filters is used to separate the different-wavelength lidar return signal and to extract the interested return signal with high efficiency. The method is proposed for profiling the atmospheric water vapor density, temperature and aerosol extinction coefficient, and thus the profile of relative humidity is obtained. Preliminary experiments are carried out for simultaneous atmospheric parameter detection in Xi'an under clear and cloudy conditions, the vertical profiles of water vapor density, temperature, relative humidity and aerosol extinction coefficient are analyzed, and the variation in water vapor in the clouds and the inversion layer is obtained. The observed results show that under the conditions of integration time of 15 min and laser energy of 150 mJ, the effective simultaneous detection range for temperature and relative humidity achieves up to 16 km under clear condition, the temperature inversion layer is obtained in the lower atmospheric layer and at the top of the cloud layer, and synchronization increasing trend is found between water vapor density

收稿日期: 2014-08-15; 收到修改稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(61275185, 61308105, 41027004)、西安理工大学优秀博士研究基金(080202)

作者简介: 王玉峰(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光雷达大气探测等方面的研究。

E-mail: wangyufeng@xaut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

and relative humidity within the high cloud layer and water vapor layer. The obtained results are better consistent with radiosonde data in terms of the water vapor density, temperature and relative humidity profiles, which verifies the reliability of the Raman lidar to achieve real-time multi-parameter measurement up to troposphere height, and long-term observation and studies can be conducted to provide reliable data for research of climate change and haze process.

Key words remote sensing; atmospheric temperature; humidity; Raman lidar

OCIS codes 280.3640; 280.6780; 290.5860; 280.1100

1 引 言

在气象学中,大气温度、水汽(相对湿度)及气溶胶是重要的大气气象及物理参数,也是精细结构大气观测的基本参数。这些物理参数之间相互依存,相互影响,对气象、气候以及大气辐射、热力学、动力学起着很重要的作用。开展大气水汽和气溶胶的探测研究,对于提高天气预报的准确性,研究云的形成、降水、大气污染物的扩散机理有着重要的科学研究意义。尤其是随着近几年雾霾现象的频发,对大气温度、湿度和气溶胶等参数的同步激光雷达探测研究,对于解明中国区域大气灰霾的形成机理以及雾霾的消过程等有很好的应用价值与前景^[1]。

随着激光技术和微弱信号检测技术的发展,拉曼激光雷达探测大气参数的能力不断提高,在探测高度、时空分辨率和测量精度上都取得了飞速发展,因此,拉曼激光雷达已成为大气水汽和气溶胶精细探测的主要方法之一^[2-5]。2002年, Behrendt等^[6]在日本空间大气无线电科学中心(RASC)搭建了一台振动-转动拉曼激光雷达系统,实现对11 km以下大气温度、水汽混合比和气溶胶光学参数的测量。2003年, Hua等^[7]成功研制了一台气象观测激光雷达系统,以特殊设计的高精度多通道Fabry-Perot(F-P)标准具作为核心分光系统,实现了全天时底层大气温度、湿度廓线的高精度探测。2004年, Balin等^[8]研发了多波长米-拉曼激光雷达系统,以双光栅多色仪为分光器件,实现对大气温度、湿度和气溶胶消光系数等参数的同步探测,其对大气水汽的探测高度可达10 km以上。2012年, Leblanc等^[9-10]提出了多望远镜扫描拉曼激光雷达系统,获得对流层以上到平流层底的大气水汽探测。国内众多科研机构也都开展了大量的研究工作,分别在大气气溶胶、温度和水汽探测方面取得了较好的研究成果,但是对大气气象多参数的同步探测研究工作相对较少^[11-16]。

为了实现大气温度、气溶胶和相对湿度的实时同步探测研究并提高系统的探测性能,本文设计了一套高效率的振动-转动拉曼激光雷达系统,以高性能二向色镜(DM)和窄带干涉滤光片(IF)构成高效率拉曼分光系统,实现独立5通道大气回波散射信号的高精细分光和高效率提取,包括氮气的高低量子数转动拉曼散射信号,氮气和水汽的振动拉曼散射信号以及米-瑞利散射回波信号。研发了多参数同步反演算法,反演获得了大气水汽、温度、相对湿度和气溶胶的廓线分布,通过不同天气条件的典型探测结果和探空气球数据的对比实验分析,验证了该拉曼激光雷达系统可实现近地面至对流层高度大气温度、湿度和气溶胶多参数的同步实时探测研究。

2 拉曼激光雷达探测原理

图1为中心波长为354.7 nm的激光脉冲发射到大气时的大气回波信号光谱分布,主要包括中心波长为354.7 nm的大气分子和气溶胶的米-瑞利散射光谱(MS),散射光谱强度依存温度变化的转动拉曼光谱(RRS)和氮气(N₂)、氧气(O₂)、水汽分子(H₂O)的振动拉曼散射光谱(VRS)。根据大气水汽和氮气的振动-转动拉曼散射光谱信号强度与其分子密度和温度之间的相互依存关系,采取相应的分光技术分离并提取有用的拉曼散射信号,可用来反演得到各种大气气象和环境相关参数的变化关系。

本文中利用氮气和水汽分子的拉曼散射信号反演获得大气水汽密度廓线,利用氮气分子高低量子数转动拉曼散射信号反演获得大气温度廓线,进而得到大气相对湿度的高度变化。利用氮气和水汽分子的拉曼散射回波信号强度 $P_N(z)$ 和 $P_H(z)$,反演获得大气水汽密度的垂直变化分布 $N_H(z)$,可表示为

$$N_H(z) = N_N(z) \cdot \frac{P_H(z)}{P_N(z)} \cdot \frac{k_N}{k_H} \cdot \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_H(\pi)} \cdot \exp\left\{\int_0^z [\alpha\lambda_n(z') - \alpha\lambda_n(z')] dz'\right\}, \quad (1)$$

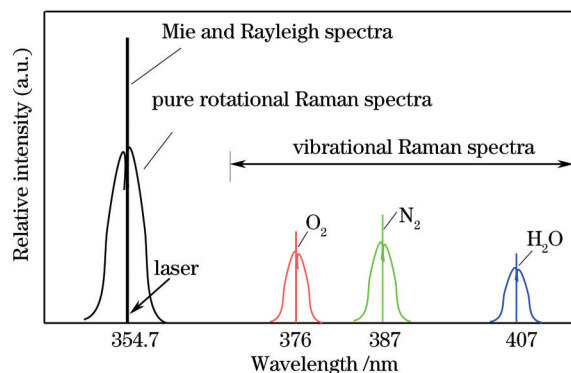


图1 激光波长 354.7 nm 激励的大气回波信号光谱分布

Fig.1 Spectrum distribution of return signal at laser excitation wavelength of 354.7 nm

式中下标 H 和 N 分别代表水汽分子和氮气分子, $N_N(z)$ 为随高度变化的氮气分子数密度, k 为各拉曼散射通道因子, $\sigma(\pi)$ 为分子拉曼后向散射截面, α 为大气消光系数, λ_H 和 λ_N 对应水汽和氮气分子的拉曼散射波长。

利用与温度相关的氮气分子高量子数和低量子数转动拉曼散射信号比值 $H(T, z)$, 可反演获得大气温度与高度的变化 $T(z)$, 分别表示为

$$H(T, z) = \frac{\sum_{J_{low}} P_1(J_{Low}, T, z)}{\sum_{J_{high}} P_2(J_{High}, T, z)} \approx \exp\left\{-\left[\frac{A}{T^2(z)} + \frac{B}{T(z)} + C\right]\right\}, \quad (2)$$

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

式中 A 、 B 和 C 为常数, 可通过探空气球的数据拟合获得。并得到该温度下的饱和水汽密度 $S_H(z)$, 它是温度的函数, 与大气温度 t (单位为 $^{\circ}\text{C}$) 之间的关系可表示为

$$S_H(t) = 2.17e(t)/(t + 273.15), \quad (4)$$

式中 $e(t)$ 为该温度下的水面饱和水汽压, 单位为 Pa。利用 Tetens 经验公式可以计算出

$$e(t) = 610.8 = \exp[17.27t/(t + 237.3)]. \quad (5)$$

因此, 根据相对湿度的定义, 即单位体积空气内实际所含的水汽密度和同温度下饱和水汽密度的百分比, 可得到相对湿度的高度分布, 表示为

$$H_R(z) = \frac{N_H(z)}{S_H(z)} \times 100\%. \quad (6)$$

同时, 根据氮气作为大气中的稳定气体且其后向散射系数是已知量, 单独利用氮气拉曼散射回波信号强度, 可精细反演获得在激光发射波长 λ_0 下的大气气溶胶消光系数 $\alpha_A(z, \lambda_0)$, 表示为

$$\alpha_A(z, \lambda_0) = \frac{\frac{d}{dz} \left[\ln \frac{Y(z) N_N(z)}{z^2 P_N(z)} \right] - \alpha_M(z, \lambda_0) - \alpha_M(z, \lambda_N)}{1 + \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_N} \right)^k}, \quad (7)$$

式中 α_M 为大气分子消光系数, 可通过标准大气模型给出。

3 多参数探测拉曼激光雷达系统

设计的振动-转动拉曼激光雷达系统构成如图 2 所示, 主要系统参数如表 1 所示。该系统采用 Nd:YAG 脉冲激光器的三倍频 (THG) 输出作为激励光源, 激光波长为 354.7 nm, 重复频率为 20 Hz, 激光能量为 150 mJ。脉冲激光经扩束准直后射向大气, 大气回波信号经直径为 600 mm 的望远镜接收, 并耦合进入多模光纤, 经透镜准直后进入由二向色镜和窄带干涉滤光片构成的高性能拉曼分光系统, 可实现 5 个独立光通道信号的精

细分光,其中通道1为米-瑞利散射通道,通道2为氮气拉曼散射通道,通道3为水汽拉曼散射通道,通道4和5则为两路转动拉曼散射信号通道。各回波信号经光电倍增管(PMT)光子计数探测,并经Licel数据采集记录仪最终送入计算机进行数据反演处理。通道1和2结合用于反演大气气溶胶光学参数廓线,通道2和3结合反演大气水汽密度廓线,通道4和5则用于反演大气温度廓线,并结合大气水汽密度和温度反演得到同时刻大气相对湿度的垂直变化特性。

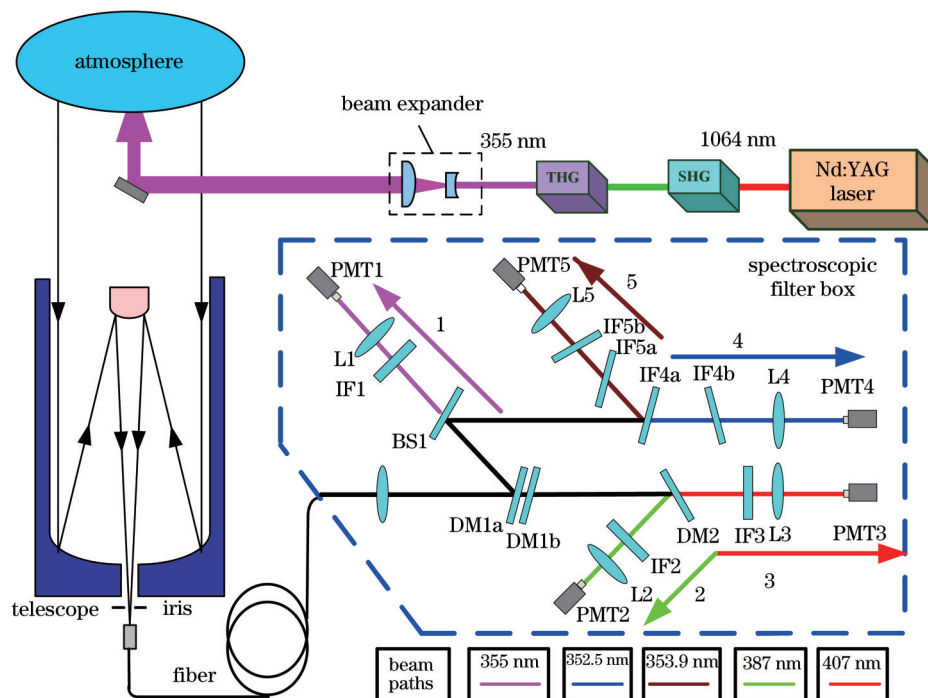


图2 大气多参数探测振动-转动拉曼激光雷达系统图

Fig.2 Configuration of the Raman lidar system for multi-parameter detection

表1 拉曼激光雷达系统参数表

Table 1 Parameters of the Raman lidar system

| Emitter and receiver system | Value |
|-----------------------------|--|
| Laser wavelength | 354.7 nm |
| Pulsed energy | 150 mJ |
| Repetition frequency | 20 Hz |
| Pulse width | 10 ns |
| Diameter of telescope | 600 mm |
| Spectroscopic system | |
| Beam splitter (BS1) | 7:3 for R:T |
| Dichroic mirrors (DMs) | Reflectance (R), transmittance (T) |
| DM1 | R>99% at 350~365 nm T>90% at 380~430 nm |
| DM2 | R>99% at 360~395 nm T>90% at 400~430 nm |
| Interference filters (IFs) | Central-wavelength, bandwidth, peak |
| IF1 | 354.7 nm, 1 nm, 70% |
| IF2 | 386.6 nm, 1 nm, 80% |
| IF3 | 407.6 nm, 1 nm, 65% |
| IF4a, IF4b (combined) | 353.9 nm, 0.6 nm, 25% |
| IF5a, IF5b (combined) | 352.5 nm, 1.1 nm, 25% |
| Detector | |
| PMTs | Hamamatsu R3896 |

在分光系统中,二向色镜 DM1 和 DM2 和各通道窄带干涉滤光片的透射特性如图 3 所示,DM1 和 DM2 具有高光谱分辨和高性能的特点,对某一波长范围内的光具有极高的反射率(大于 99%),而对其余光具有很高的透射率(大于 98%)。因此,大气回波信号先经 DM1 后,波长小于 370 nm 的光谱信号被高效率反射,其余光谱信号则被 DM1 高效率透射。利用 DM2 的高反射特性,结合中心波长为 386.6 nm、带宽为 1 nm 的窄带滤光片 IF2,在通道 2 中可获得氮气拉曼回波信号的高效率精细提取。在 DM2 的透射光通道中,利用带宽为 1 nm、中心波长为 407.6 nm 的 IF3,在通道 3 中可高效提取水汽分子的振动拉曼散射信号。

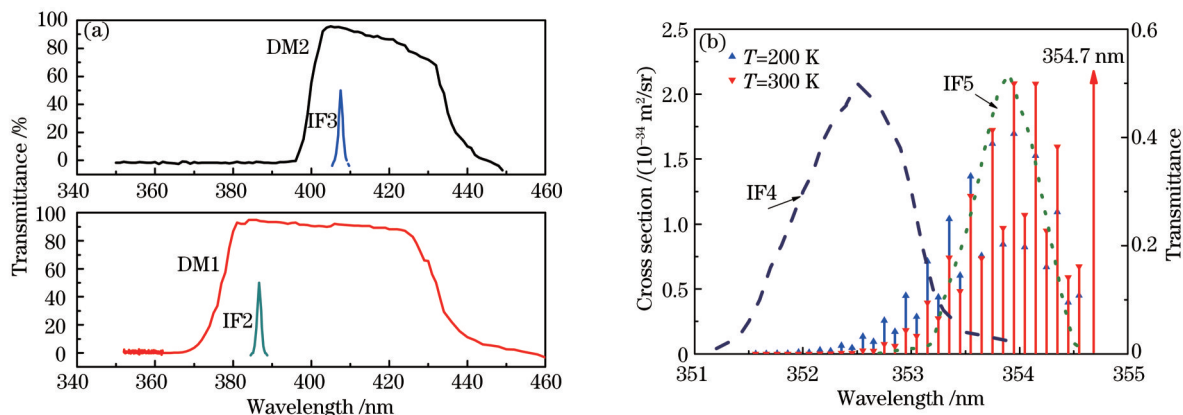


图 3 二向色镜和干涉滤光片的透射特性曲线。(a) DM1,DM2, IF2 和 IF3 的透射性能曲线;(b)氮气转动拉曼光谱与温度的依存关系以及 IF4 和 IF5 的透射特性

Fig.3 Transmittance curves of DMs and IFs. (a) Transmittance of DM1,DM2, IF2 and IF3; (b) dependence of N₂ rotational Raman signal on temperature and transmittance characteristics of IF4 and IF5

在经 DM1 反射的光通道中,设置一个分束镜 BS1 将波长小于 355 nm 的光分为独立的 3 个通道。考虑到大气米-瑞利散射信号最强,BS1 的反射与透射率比值设计为 7:3,其中透射信号经窄带滤光片 IF1 滤波后由光电倍增管(PMT1)接收,为米-瑞利散射通道 1;其余反射光入射到超窄带滤光片 IF4a 上,超窄带滤光片 IF4a 和 IF4b 以及 IF5a 和 IF5b 分别作为两个独立的光通道。由于氮气的高低量子数转动拉曼谱线强度与温度的相反变化关系,如图 3(b)所示,当温度从 200 K 上升至 300 K 时,低量子数转动拉曼谱线(靠近激光发射波长)强度随温度升高而减弱,而高量子数转动拉曼谱线(远离激光发射波长)强度随着温度升高而增强;因此,利用超窄带滤光片 IF4a 和 IF4b 的组合来提取中心波长为 353.9 nm 的低量子数转动拉曼散射信号,为低转动量子数通道 4;而超窄带滤光片 IF5(由 IF5a、IF5b 构成)则实现中心波长为 352.5 nm 的高量子数转动拉曼信号的提取,为高转动量子数通道 5。因此,利用二向色镜和窄带滤光片的级联组合,在各拉曼通道中既实现对所需波长回波信号的精细分光和高效率提取,又对米-瑞利散射信号具有高抑制性能。

4 典型探测结果与分析

4.1 有云条件下的测量与分析

搭建的系统位于西安理工大学激光雷达大气遥感中心,对西安局地大气进行初步实验观测,探测时间为 15 min,激光能量为 150 mJ。图 4 为 2013 年 10 月 22 日晚间 20:02 CST(中国标准时间)的探测实验结果,图 4(a)为 5 通道的距离校正平方信号,即米-瑞利散射信号,氮气振动拉曼散射信号(VRS_N₂)和水汽振动拉曼散射信号(VRS_H₂O),以及氮气分子低量子数转动拉曼散射信号(RRS1)和高量子数转动拉曼散射信号(RRS2)。从图中可以清晰地看到,米散射、氮气拉曼散射通道和低量子数转动拉曼散射通道的探测距离达到 20 km 以上,而且在高度 8~10 km 范围内米散射信号急剧增强,根据云层内气溶胶的变化情况以及所引起的大气透射率变化,可以判断出在高度 8~10 km 范围内存在云层。反演获得的该时刻大气气溶胶消光系数廓线如图 4 (b)所示,云层处气溶胶消光系数达到 0.3 km⁻¹,表明云层内含有大量气溶胶粒子。相对应地,受云层中强消光作用的影响,VRS_N₂通道,RRS1 通道和 RRS2 通道均呈现了衰减。因此,从获得的各回波信号波形形状看,分光系统中各拉曼散射通道已实现对米-瑞利散射信号的有效抑制。

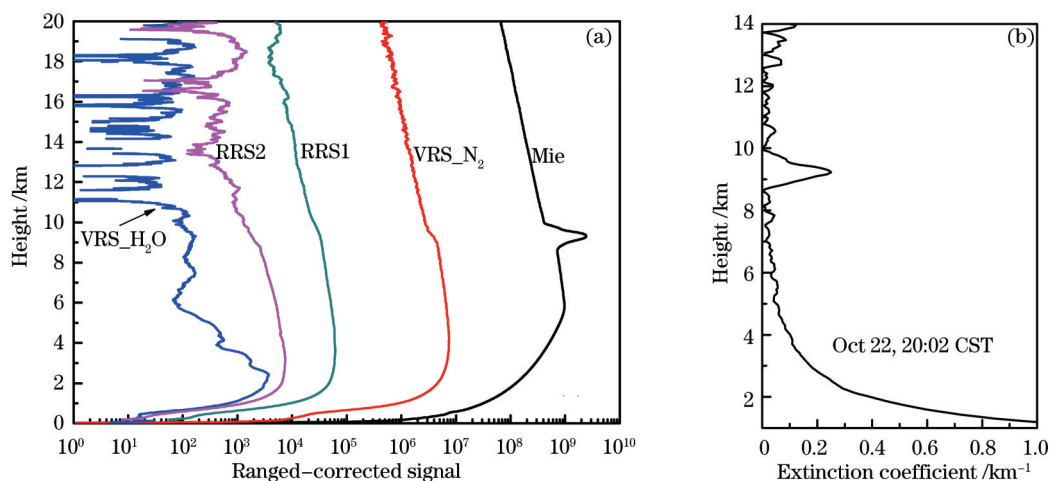


图4 2013年10月22日20:02 CST拉曼激光雷达探测结果。(a)各通道距离校正平方信号;(b)反演获得的气溶胶消光系数廓线
Fig.4 Raman laser lidar detection results obtained at 20:02 CST on October 22, 2013. (a) Ranged-corrected signals; (b) retrieved aerosol extinction coefficient profile

结合高低量子数转动拉曼散射信号强度,通过(2)式和(3)式反演获得大气温度的高度变化曲线,如图5(a)所示。当晚该系统对大气温度的有效探测距离可达14 km,大气底层温度为20℃左右,随着高度的升高温度线性递减,变化的梯度约为6 K/km,这与大气平均温度梯度基本一致。从图中还可以清晰地看到,在10~12 km高度范围内温度又逐渐升高,出现逆温现象,这是因为通常情况下夜间的云层上或顶部易出现强的逆温层。

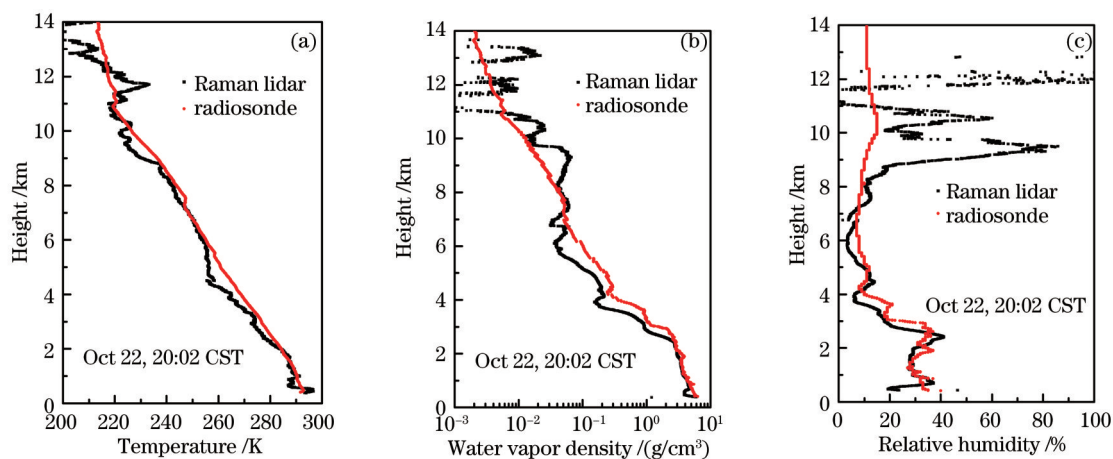


图5 2013年10月22日20:02 CST的同步反演结果以及与同步探空的比对。(a)大气温度廓线;(b)水汽密度廓线;(c)相对湿度廓线
Fig.5 Comparison of the retrieved profiles of Raman lidar with radiosonde data obtained at 20:02 CST on October 22, 2013.
(a) Atmospheric temperature; (b) water vapor density; (c) relative humidity

利用氮气和水汽拉曼散射信号反演获得的大气水汽密度廓线如图5(b)所示。大气中的水汽含量随着探测高度变化明显,呈现出水汽的高时空变化特性,在高度4 km和6 km处存在明显的水汽突变层,4 km高度处的水汽含量急剧减小为底层的1%(约0.2 g/cm³),在6 km处降低至0.02 g/cm³,表明该高度处大气中的水汽含量已非常低。在8 km高度以上,由于云层的作用水汽密度含量得到增强。根据相对湿度与大气温度和水汽密度的关系,利用图5(a)、(b)的结果,反演获得该时刻的大气相对湿度廓线,如图5(c)所示。可以看出,大气相对湿度随着高度变化明显,在4 km以下的高度范围内大气相对湿度值小于40%,在4 km以上湿度较低,平均值小于10%,即在高度4 km处大气相对湿度发生了较为明显的突变,该位置与西安地区的边界层顶位置一致。在高度8 km以上云层中大气相对湿度明显增强,达到80%左右,这是由于云层内温度的下降和水汽含量的急剧升高引起的。为了验证激光雷达数据的可靠性,与当地气象部门大气探测中心的同步探空气球数据进行比对,两站点的直线距离约为15 km,结果表明在高度8 km以下激光雷达探测获得的大气温度、

水汽密度和相对湿度的垂直变化分布与探空数据取得了很好的一致性,但是需要说明的是,在8~10 km的云层内,探空气球数据并未准确反映云层中大气水汽密度和相对湿度的变化趋势,主要原因在于高空风场会影响探空气球探测精度和准确度,受高空风场的作用,探空气球发生明显的水平漂移,所以无法精确获得垂直高度上的大气参数信息。

另一组有云天气条件下的典型测量结果为2013年11月15日晚间22:52 CST的测量,图6为各通道的距离校正平方信号和反演获得的大气气溶胶消光系数,可以看出在7 km附近也存在一个云层,但与图4所示的探测结果比较,该云层较薄,对应的气溶胶消光系数仅为 0.07 km^{-1} 。利用同样的反演方法,获得了大气温度、水汽密度和相对湿度廓线,结果如图7所示。大气温度以 6 K/km 的梯度线性递减,在过云后的8~9 km高度范围内(即云层上部)也出现一个小的逆温层,在云层对应的高度范围内水汽密度明显增强,相对湿度增大,达到80%左右。以上结果表明该拉曼激光雷达可实现高层云层内大气温度、水汽(相对湿度)和气溶胶的高精度探测。

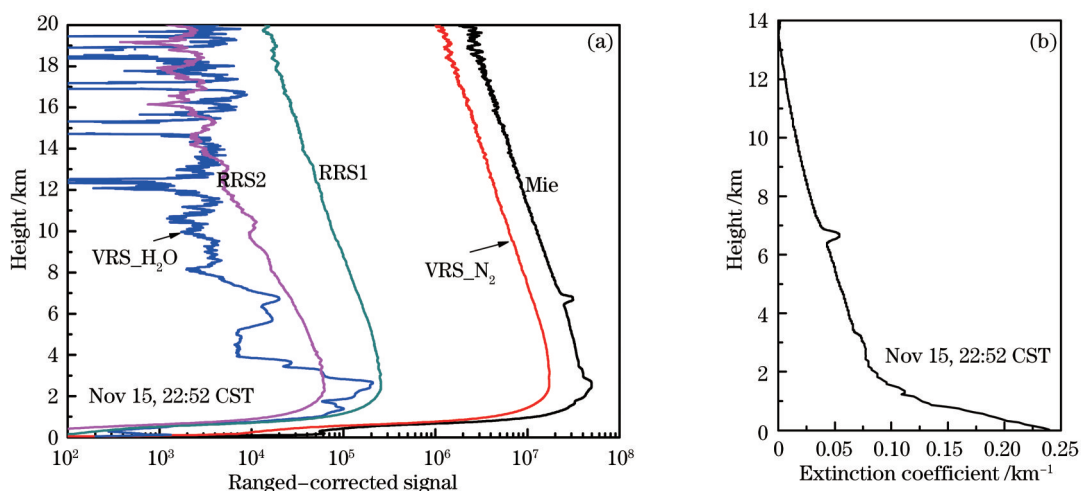


图6 2013年11月15日22:52 CST拉曼激光雷达探测结果。(a)各通道距离校正平方信号;(b)反演获得的气溶胶消光系数廓线

Fig.6 Raman laser lidar detection results obtained at 22.52 CST on November 15, 2013. (a) Ranged-corrected signals; (b) retrieved aerosol extinction coefficient profile

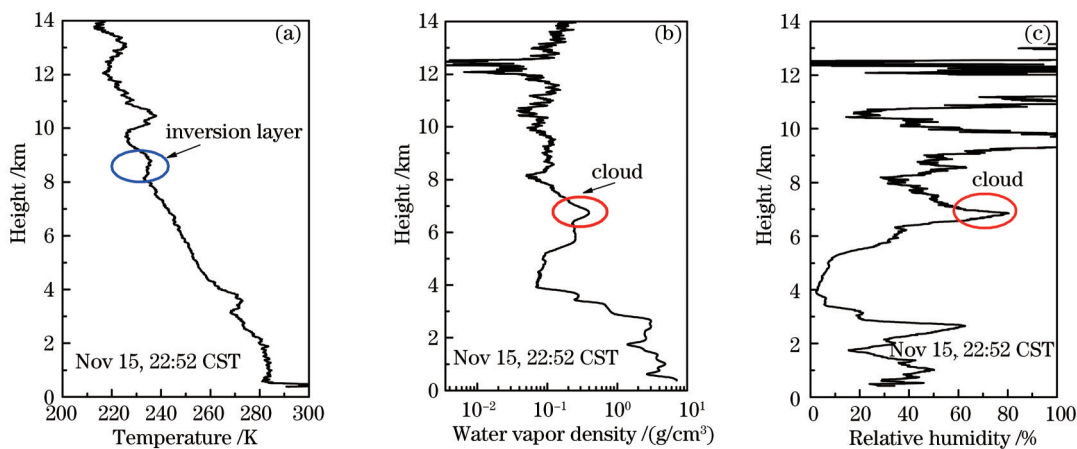


图7 2013年11月15日22:52 CST同步反演结果。(a)大气温度廓线;(b)水汽密度廓线;(c)相对湿度廓线

Fig.7 Retrieved profiles obtained at 22:52 CST on November 15, 2013. (a) Atmospheric temperature; (b) water vapor density; (c) relative humidity

4.2 天气晴朗条件下的测量与分析

为了验证系统的晴天探测能力,利用该激光雷达系统在晴朗天气条件下进行了初步实验。图8为2013年11月16日晚间20:00 CST的一组探测结果,当天晚间晴空无云,由图8(a)所示各通道距离校正平方信号

可见,除了水汽通道回波信号变化剧烈之外,其余各通道信号未出现明显的变化,反演获得的气溶胶消光系数廓线如图 8(b)所示,气溶胶消光系数均匀变化且随高度衰减。

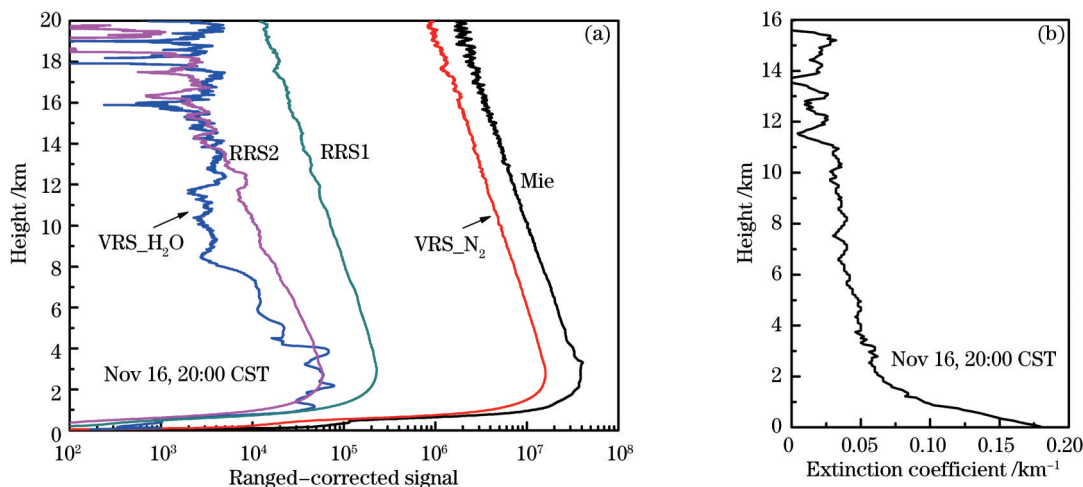


图 8 2013 年 11 月 16 日 20:00 CST 拉曼激光雷达探测结果。(a)各通道距离校正平方信号;(b)反演获得的气溶胶消光系数廓线

Fig.8 Raman laser lidar detection results obtained at 20:00 CST on November 16, 2013. (a) Ranged-corrected signals; (b) retrieved aerosol extinction coefficient profile

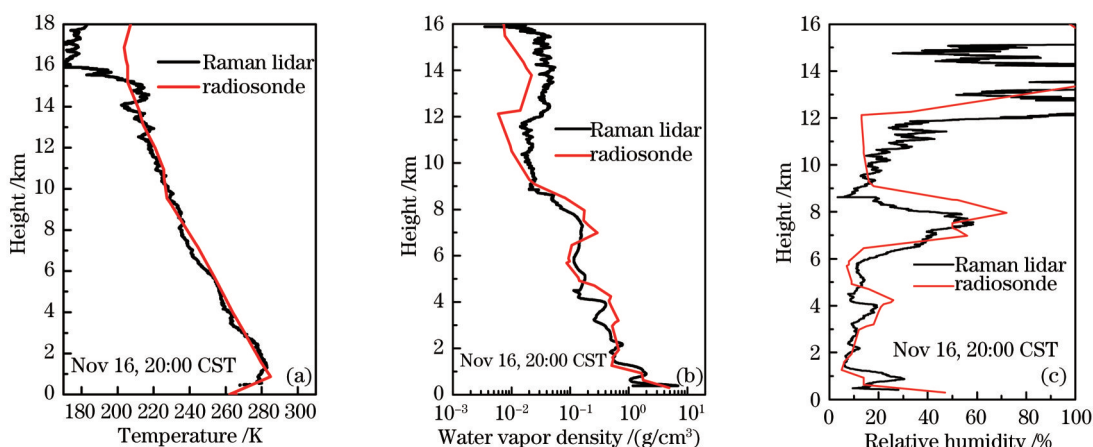


图 9 2013 年 11 月 16 日 20:00 CST 同步反演结果以及同步探空的对比。(a)大气温度廓线;(b)水汽密度廓线;(c)相对湿度廓线

Fig.9 Comparison of the retrieved profiles of Raman lidar with radiosonde data obtained at 20:00 CST on November 16, 2013.

(a) Atmospheric temperature; (b) water vapor density; (c) relative humidity

图 9(a)、(b)分别给出了反演获得的大气温度和水汽密度廓线,图中红线为同步的探空气球数据。图 9(a)清晰地反映了当晚对大气温度的有效探测距离可达 16 km,大气温度随着高度变化平缓,在高度 2 km 以下出现一个逆温层。这与当天天气情况有很大的关系,在晴朗无风或微风的夜晚由于地面辐射冷却易造成城市大气底层出现逆温层,就西安的冬天而言,大气状态相对稳定,大气逆温层的发生概率很高。图 9(b)为同步的大气水汽密度廓线,可以看出大气中的水汽随高度变化剧烈,随着探测高度的增加,大气中水汽含量越来越低,但是在高度范围 6~8 km 和 12~16 km 内水汽含量又明显增加,表明了该高度层内有水汽层的存在,水汽含量丰富。根据相对湿度与大气温度和水汽的关系,获得了 16 km 以下大气相对湿度的有效反演,计算结果如图 9(c)所示,在 6~8 km 的水汽层内,大气相对湿度增加到 60% 以上,在 12~16 km 范围内相对湿度明显增大(大于 100%)。与同步的探空气球数据对比表明,激光雷达数据与探空气球取得了很好的一致性,尤其是两者均清晰显示了大气底层逆温层以及水汽层内大气水汽密度和相对湿度的增大趋势。另外,图 10 给出了系统的探测误差与不确定度廓线分析,图 10(a)所示温度探测误差高度分布曲线可以反映出,当探测高度在 16 km 以下时系统探测的统计温度误差小于 4 K,尤其是在 10 km 以下的温度探测误差小于 1 K。图 10(b)给出了对应的

大气相对湿度测量不确定度廓线,可以看出,在 10 km 以下相对湿度不确定度小于 10%,而在高层水汽层内测量不确定度的增大主要与水汽探测通道信噪比下降有关。

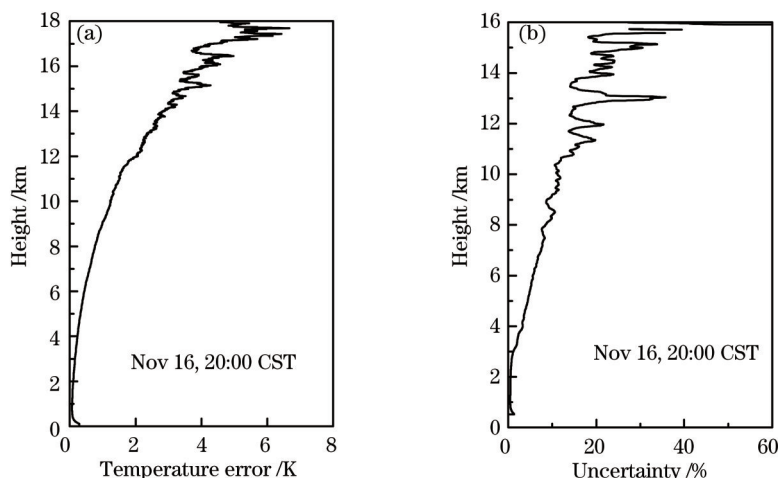


图 10 (a)温度探测统计误差廓线; (b)相对湿度的不确定误差廓线

Fig.10 Profiles of (a) statistical temperature error and (b) uncertainty of relative humidity

5 结 论

设计的拉曼激光雷达系统采用高性能的二向色镜和高效率的窄带干涉滤光片构成高效拉曼分光系统,实现独立 5 通道大气回波信号的精细分光和高效率提取,并研发了多参数同步反演算法,实现了大气温度、水汽(相对湿度)和气溶胶等多参数的同步实时探测研究。对西安局地大气进行初步实验,获得了同步的大气温湿度和气溶胶消光系数廓线。有云和晴天条件下的典型探测结果与分析表明,在晴天条件下系统获得了高度在 16 km 以下的温湿度同步探测;在有云条件下系统精确获得了大气底层和云层上的逆温层,以及高层云层内大气水汽密度和相对湿度的同步增强。实验数据与同步探空气球数据的随机比对,在大气水汽密度、温度和湿度廓线上均取得了很好的一致性,充分验证了该拉曼激光雷达系统用于对流层高度大气温度、相对湿度和气溶胶等多参数同步探测研究的高效性和可靠性。该系统可作为区域性大气和空间环境激光雷达监测基地继续开展长期观测实验研究,为大气气候变化以及雾霾生消过程的研究提供可靠的实时探测数据。

参 考 文 献

- 1 Han Yong, Wang Tijian, Rao Ruizhong, *et al.*. Progress in the study of physic-optics characteristics of atmospheric aerosols [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(11): 7396-7404.
韩 永, 王体健, 饶瑞中, 等. 大气气溶胶物理光学特性研究进展[J]. *物理学报*, 2008, 57(11): 7396-7404.
- 2 D N Whiteman. Examination of the traditional Raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(15): 2593-2608.
- 3 A Ansmann, M Riebesell, U Wandinger, *et al.*. Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio [J]. *Applied Physics B*, 1992, 55(1): 18-28.
- 4 Wang Hongwei, Hua Dengxin, Wang Yufeng, *et al.*. Design and analysis of new spectroscopic system of Raman lidar for detection of atmospheric water vapor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 120701.
王红伟, 华灯鑫, 王玉峰, 等. 水汽探测拉曼激光雷达的新型拉曼光谱分光系统设计与分析[J]. *物理学报*, 2013, 62(12): 120701.
- 5 G J Nott, T J Duck, J G Doyle, *et al.*. A remotely operated lidar for aerosol, temperature, and water vapor profiling in the high Arctic [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2012, 29(2): 221-234.
- 6 A Behrendt, T Nakamura, M Onishi, *et al.*. Combined Raman lidar for the measurement of atmospheric temperature, water vapor, particle extinction coefficient, and particle backscatter coefficient [J]. *Applied Optics*, 2002, 36(41): 7657-7666.

- 7 D Hua, T Kobayashi. UV Rayleigh–Mie Raman lidar for simultaneous measurement of atmospheric temperature and relative humidity profiles in the troposphere [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(3): 1287–1291.
- 8 I Balin, I Serikov, S Bobrovnikov, *et al.*. Simultaneous measurement of atmospheric temperature, humidity, and aerosol extinction and backscatter coefficients by a combined vibrational–pure–rotational Raman lidar [J]. Applied Physics B, 2004, 79(6): 775–782.
- 9 T Leblanc, I S McDermid, T D Walsh. Ground–based water vapor Raman lidar measurements up to the upper troposphere and lower stratosphere for long–term monitoring [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2012, 5(1): 17–36.
- 10 A Behrendt, V Wulfmeyer, A Riede, *et al.*. Three–dimensional observations of atmospheric humidity with a scanning differential absorption lidar [C]. SPIE, 2009, 7475: 74750L.
- 11 Zhang Wei, Wu Songhua, Song Xiaoquan, *et al.*. Atmospheric boundary layer detected by a Fraunhofer lidar over Qingdao suburb [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(6): 0628002.
张 薇, 吴松华, 宋小全, 等. 夫琅禾费暗线激光雷达探测青岛市郊大气边界层 [J]. 光学学报, 2013, 33(6): 0628002.
- 12 Xie Chenbo, Zhou Jun, Yue Guming, *et al.*. New mobile Raman lidar for measurement of tropospheric water vapor [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1281–1286.
谢晨波, 周 军, 岳古明, 等. 新型车载式拉曼激光雷达测量对流层水汽 [J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1281–1286.
- 13 Liu Dong, Tao Zongming, Wu Decheng, *et al.*. Development of three–wavelength–Raman–polarization lidar system and case study [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0228001.
刘 东, 陶宗明, 吴德成, 等. 三波长拉曼偏振激光雷达系统研制及探测个例 [J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0228001.
- 14 Z Tao, D Liu, Z Zhong, *et al.*. Measurements of cirrus clouds with a three–wavelength lidar [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(5): 050101.
- 15 Ma Xiaomin, Tao Zongming, Ma Mingjun, *et al.*. Retrieval method of slide–scatter lidar signals based on charge coupled device technique [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0201001.
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.
- 16 Wang Wei, Mao Feiyue, Gong Wei, *et al.*. Overlap factor calculation method based on laser intensity distribution and its sensitivity analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0228005.
王 威, 毛飞跃, 龚 威, 等. 基于激光强度分布的激光雷达重叠因子计算及其敏感性分析 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0228005.

栏目编辑: 吴秀娟