

# 水汽探测拉曼激光雷达的新型光谱 分光系统设计与分析\*

王红伟 华灯鑫<sup>†</sup> 王玉峰 高朋 赵虎

(西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 西安 710048)

(2013年1月27日收到; 2013年2月16日收到修改稿)

提出并设计了一套新型的大气水汽和气溶胶探测用紫外域拉曼激光雷达系统, 以二向色镜和超窄带滤光片构成高效率拉曼光谱分光系统, 实现激光雷达大气回波信号中米-瑞利散射信号、氮气和水汽的振动拉曼散射信号的精细分离和高效率提取. 利用美国标准大气的分子散射模型和实测的大气米散射信号模型, 对分光系统的米-瑞利散射信号的抑制率、大气水汽测量的信噪比和误差进行数值仿真设计. 搭建实验系统对西安地区夜间的大气水汽进行实验观测, 并利用有云天气下实测的激光雷达回波信号, 反演获得大气后向散射比和水汽混合比的相关特性, 验证了该拉曼光谱分光系统对米-瑞利信号的抑制率达到  $10^{-7}$  以上量级. 理论和实验结果表明, 设计的新型拉曼光谱分光系统可以在大气后向散射比为 17 时, 实现水汽探测误差小于 15%, 满足拉曼激光雷达系统对大气水汽的高效率探测.

**关键词:** 拉曼激光雷达, 水汽混合比, 大气后向散射比

**PACS:** 07.07.Df, 42.68.Wt, 92.60.Jq, 92.20.Bk

**DOI:** 10.7498/aps.62.120701

## 1 引言

水汽是大气中含量较少而又具有重要作用的气体. 它是生成云和降雨必不可少的因子, 具有三相变化, 是平衡地气系统辐射收支的一个重要因素, 对天气和气候的变化有着重要的影响<sup>[1,2]</sup>. 此外, 对激光在大气中的传输和大气动力学、气象学、全球水文循环和大气化学等有联系的一系列大气过程中, 水汽都扮演了很重要的角色<sup>[3]</sup>. 因此, 水汽含量的监测对大气环境和人类生产生活具有重要意义.

拉曼激光雷达是近年发展起来的一种新颖的探测大气气溶胶和水汽的激光雷达<sup>[4-10]</sup>. 利用激光与大气分子如氮气( $N_2$ )、水汽( $H_2O$ )、氧气( $O_2$ )等的拉曼散射效应, 根据特定散射光强度与大气分子密度之间的相互依存特性, 实现对大气特性的探测和研究. 国内外许多科研单位在水汽和气溶胶拉

曼激光雷达探测方面做了深入的研究工作, 取得了长足的发展. 目前拉曼激光雷达系统的拉曼光谱分光系统主要采用干涉滤光片<sup>[11-13]</sup>、高分辨率衍射光栅<sup>[14]</sup>、棱镜系统<sup>[15]</sup>、Fabry-Perot干涉仪<sup>[16-18]</sup>等作为分光器件提取和分离大气回波信号中的拉曼光谱信息, 并取得了较好的探测结果.

为了实现大气水汽的探测, 拉曼激光雷达系统要求对米-瑞利散射信号的抑制率高于  $10^{-7}$  量级<sup>[19]</sup>, 因此本文设计了一种由二向色镜和超窄带滤光片组成的拉曼激光雷达系统并进行系统仿真, 从理论上分析了该分光系统对米-瑞利散射信号的抑制率和水汽测量信噪比及测量误差. 利用初步的实验观测数据, 计算获得系统三个通道的信噪比曲线, 同时利用云的米散射信号, 对拉曼分光系统的米-瑞利信号的抑制率进行验证, 并反演获得大气水汽混合比高度分布廓线, 验证了所设计的拉曼激光雷达系统可高效率提取氮气和水汽振动拉曼散射回波信号, 实现了对大气水汽的高性能探测.

\* 国家自然科学基金(批准号: 41027004, 61275185)和陕西省教育厅科研基金(批准号: 2010JK759)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn

## 2 水汽探测拉曼激光雷达系统

图 1 所示为水汽探测拉曼激光雷达系统原理图. Nd:YAG 激光器三倍频输出波长为 354.7 nm 激光作为光源, 经 5 倍准直扩束后经反射镜发射到大气中, 大气回波信号由口径为 250 mm、组合焦距为 1 m 的卡塞格林式望远镜系统接收, 经口径为 0.8 mm 的光纤耦合到由二向色镜和超窄带滤光片组成的分光系统中. 散射信号经二向色镜

DM1 (dichroic mirrors) 反射, 再经过中心波长为 354.7 nm, 带宽为 1 nm 的窄带滤光片 IF1 (narrow-band interference filters), 作为米 - 瑞利探测通道 1; 由 DM1 透射的光被二向色镜 DM2 反射, 再经由中心波长为 386.7 nm, 带宽为 1 nm 的窄带宽滤光片 IF2, 作为氮气探测通道 2; 而由 DM2 透射的光经由中心波长为 407.8 nm, 带宽为 1 nm 的窄带宽滤光片 IF3, 作为水汽探测通道 3.

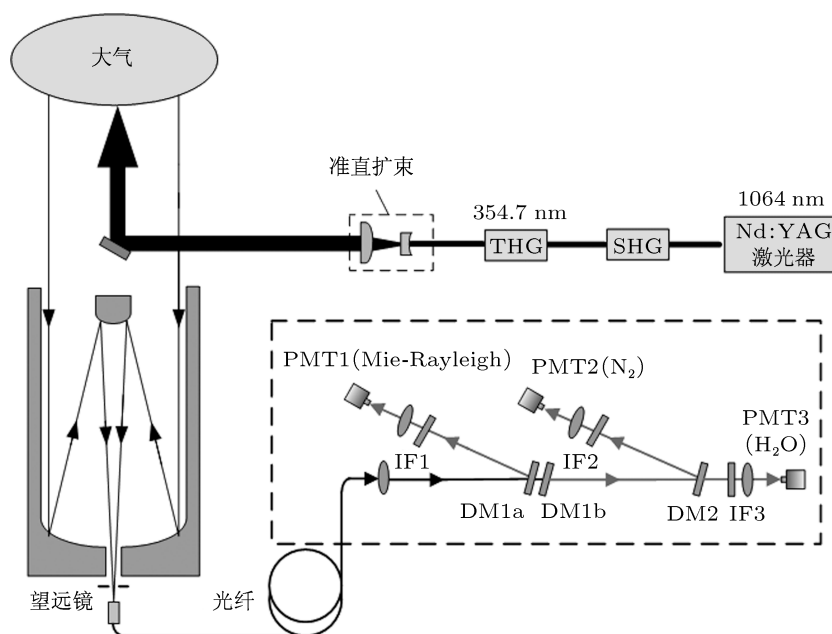


图 1 水汽探测拉曼激光雷达系统原理图

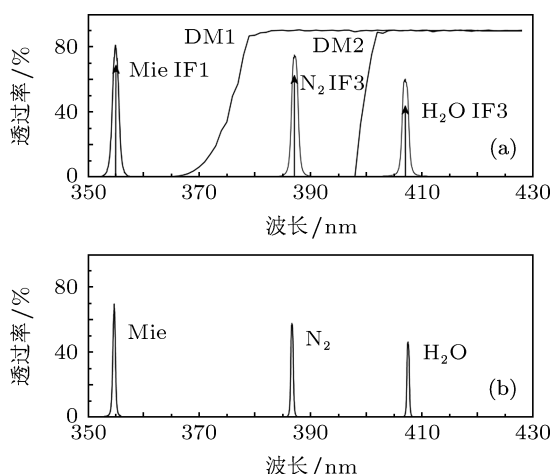


图 2 分光系统透射率曲线 (a) 二向色镜和窄带滤光片透射率曲线; (b) 分光后各通道光谱曲线

图 2 所示为拉曼光谱分光系统中二向色镜和超窄带滤光片的透射率曲线及经过分光后的各通道光谱曲线. 二向色镜 DM1 对波长小于 365 nm 的光具有极高的反射率 (> 99%), 而对波长大于

380 nm 的光具有很高的透射率 (> 90%), 窄带宽滤光片 IF1 的带外抑制率 OD (optical density) > 3, 峰值透过率为 70%, 因此, 在通道 1 可获得 355 nm 附近的米 - 瑞利散射信号, 并有效滤除太阳背景光和杂散光. 为减少米 - 瑞利散射信号和杂散光对通道 2 和通道 3 的干扰, 在二向色镜 DM1a 后又加入一个具有相同性能的 DM1b. 二向色镜 DM2 对波长小于 395 nm 的光具有极高的反射率 (> 99%), 对波长大于 400 nm 的光具有很好的透射率 (> 90%), 窄带宽滤光片 IF2 的带外抑制率 OD > 3, 峰值透过率为 80%. 因此, 在通道 2 可高效率精细提取氮气的振动拉曼散射信号, 并对米 - 瑞利散射信号的抑制率可达到 7 个数量级以上. 经二向色镜 DM2 透射的光再经过窄带宽滤光片 IF3, 其带外抑制率 OD > 3, 峰值透过率为 65%, 可高效率精细提取水汽振动拉曼散射信号, 对米 - 瑞利散射信号的抑制率可达到 9 个数量级以上. 系统参数如表 1 所示.

表 1 拉曼激光雷达系统参数表

| 发射和接收系统     |                 | 光谱分光系统    |                                                |
|-------------|-----------------|-----------|------------------------------------------------|
| Nd:YAG 激光器  |                 | 二向色镜 DMs  |                                                |
| 波长/nm       | 354.7           | DM1       | 透射率 $T$ , 反射率 $R$<br>$R > 99\%$ , (350—365) nm |
| 单脉冲能量/mJ    | 150             |           | $T > 90\%$ , (380—430) nm                      |
| 脉冲重复频率/Hz   | 20              | DM2       | $R > 99\%$ , (360—395) nm                      |
| 脉宽/ns       | 10              |           | $T > 90\%$ , (400—430) nm                      |
| 接收系统        |                 | 窄带滤光片 IFs |                                                |
| 望远镜直径/mm    | 250             | IF1       | 中心波长, 带宽, 峰值透射率<br>354.7 nm, 1 nm, 70%         |
| 望远镜视场角/mrad | 0.1             | IF2       | 386.7 nm, 1 nm, 80%                            |
| 光电倍增管 PMTs  | Hamamatsu R3896 | IF3       | 407.6 nm, 1 nm, 65%                            |

### 3 拉曼激光雷达数据反演及信噪比分析

根据水汽混合比的定义, 利用拉曼激光雷达接收到的水汽和氮气振动拉曼散射回波信号强度  $P_H$  和  $P_N$ , 可得到水汽混合比  $w(z)$  的表达式为 [7]

$$w(z) = 0.485 \cdot \frac{N_H(z)}{N_N(z)} = 0.485 \cdot \frac{P_H(z)}{P_N(z)} \cdot \frac{k_N}{k_H} \cdot \frac{\sigma_N(\pi)}{\sigma_H(\pi)} \cdot \frac{q(\lambda_N, z)}{q(\lambda_H, z)}, \quad (1)$$

其中,  $N_H$  和  $N_N$  是水汽和氮气的分子数密度,  $k_H$  和  $k_N$  为水汽和氮气通道的系统常数,  $\sigma_H(\pi)$  和  $\sigma_N(\pi)$  是水汽和氮气分子拉曼后向散射微分截面,  $q(\lambda_X, z)$  分别为波长  $\lambda_X$  在大气传输过程中的透过率, 与该波长下的气溶胶消光系数  $\alpha_{\lambda_X}^{aer}(z')$  和大气分子消光系数  $\alpha_{\lambda_X}^{mol}(z')$  有关, 表示为

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

同时, 可单独通过氮气振动拉曼散射回波信号强度, 精细反演获得气溶胶对激励波长  $\lambda_0$  的消光系数为 [20]

$$\alpha_{\lambda_0}^{aer}(z) = \frac{\frac{d}{dz} \left[ \ln \frac{N_N(z)}{z^2 P_N(z)} \right] - \alpha_{\lambda_0}^{mol}(z) - \alpha_{\lambda_N}^{mol}(z)}{1 + \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_N} \right)}. \quad (3)$$

根据光电探测器的特性, 系统的信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 可表示为

$$SNR = I_p^2 / (\langle i_{na}^2 \rangle + \langle i_{nT}^2 \rangle), \quad (4)$$

式中,  $I_p$  为光辐射作用引起的平均光电流,  $\langle i_{na}^2 \rangle$  为探测器所产生的散粒噪声均方光电流, 可表示为

$\langle i_{na}^2 \rangle = 2eG(I_p + I_b + I_d)\Delta f$ ,  $\langle i_{nT}^2 \rangle$  为探测器产生的热噪声均方光电流, 可表示为  $\langle i_{nT}^2 \rangle = 4kT\Delta f/R_L$ . 其中,  $e$  为电子电荷,  $G$  为光电倍增管增益系数,  $I_b$  为背景辐射引起的背景电流,  $I_d$  为热发射引起的暗电流,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为工作温度,  $\Delta f$  为带宽,  $R_L$  为负载电阻.

### 4 拉曼激光雷达系统仿真与分析

图 3 所示为利用美国标准大气模型中的大气分子散射模型及实测的气溶胶模型构成的大气后向散射比  $R_s$  (气溶胶散射系数与大气分子散射系数之比) 仿真模型廓线, 利用大气模型及拉曼激光雷达方程 [7] 对拉曼激光雷达系统进行仿真设计, 对系统探测误差和信噪比进行了分析, 以验证系统工作可行性和探测能力. 参照表 1 所给的参数, 考虑到分光系统对米-瑞利散射信号有 7 个数量级的抑制率, 采样间隔为 20 ns, 取测量时间为 10 min, 脉冲累计平均数为 12000, 计算得到各探测通道的散射信号强度随高度的分布情况, 如图 4 所示.

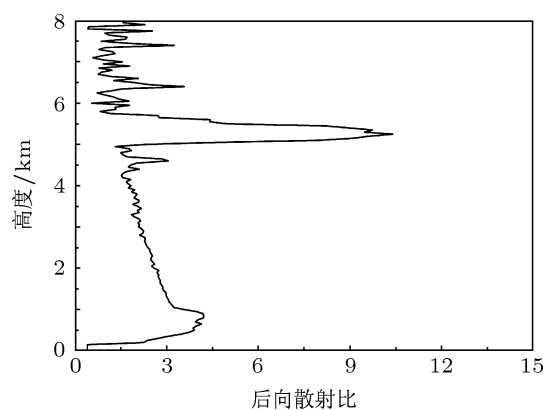


图 3 大气后向散射比  $R_s$  模型廓线

根据分光后提取出来的各回波信号强度,对大气水汽混合比测量进行系统仿真计算,得到水汽混合比如图 5 所示.从图 5 中可以看出,水汽混合比仿真曲线和大气水汽模型的变化趋势具有较好一致性,在 5 km 以下,大气后向散射比小于 5,此时水汽测量误差较小.而在 5—6 km 高度处,由于云的米散射信号较强,大气后向散射比较大,导致水汽回波信号信噪比下降,水汽测量值偏差较大.同时,根据氮气和水汽通道所接收的拉曼散射信号光子数和米-瑞利散射信号光子数,可得到水汽混合比信噪比和测量误差高度分布廓线,如图 6 所示.在 5.5 km 高度以上,由于云的米散射信号较强,对系统接收到的氮气和水汽分子振动拉曼散射信号干扰较大,云层后水汽信号信噪比急剧下降且水汽测量误差增大.当信噪比取 10 时,夜晚探测高度可以达到 5.5 km,而此处水汽探测误差在 10% 以内.由此可见,该大气水汽探测拉曼激光雷达系统能够较好地抑制米-瑞利散射信号,仿真证明本文设计的大气水汽探测拉曼激光雷达系统理论上可以实现中低层大气水汽的高精度探测.

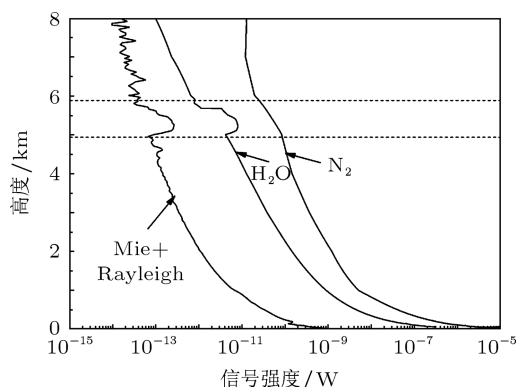


图 4 激光雷达大气回波信号强度高度分布廓线

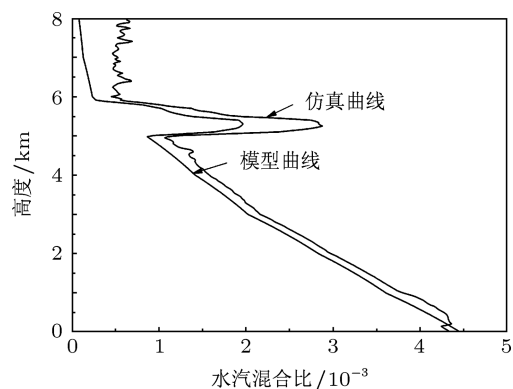


图 5 系统仿真的水汽混合比与大气水汽模型高度分布廓线

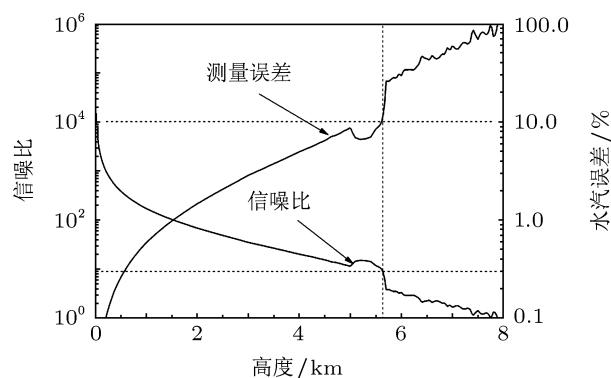


图 6 系统仿真信噪比和水汽测量误差高度分布廓线

### 5 拉曼激光雷达水汽及气溶胶探测结果与分析

搭建实验系统,对西安地区的大气水汽和气溶胶进行初步的实验观测,采样速率为 50 M/s,采样点数为 5000 点,空间分辨率为 3 m,采用 10000 次脉冲做平均,以消除随机噪声.图 7(a) 所示为一组有云天气下的测量示例,在 2012 年 10 月 23 日 21:00 测量的一组米-瑞利散射、氮气和水汽振动拉曼散射回波距离校正信号.在高度 2 km 处,米-瑞利散射信号有一个较强的气溶胶回波信号,根据当时的气象资料,该气溶胶回波信号是由云层产生,氮气信号出现明显衰减,符合有云层氮气信号分布结构特征.而水汽信号先小幅增大后再衰减,这是由于云层中水汽含量极大,但由于云层较厚,云的后向散射比较大,致使水汽回波信号衰减较大,导致云层后回波信号信噪比急剧下降,无法获得足够的探测信号.通过比较上述三组回波信号的波形轮廓,可以直观地看出水汽及氮气通道对云引起的强米散射信号已进行有效的抑制.

图 7(b) 和 (c) 所示为反演得到的大气后向散射比和水汽混合比高度分布廓线.从图中可以看出,在 2 km 以下,大气后向散射比小于 5,此时水汽混合比随距离呈现一定减小趋势,而在 2—2.5 km 高度,由于云层的存在,大气后向散射比较大 ( $R_s = 17$ ),水汽混合比急剧增大,表明该时刻云层较厚且水汽含量较大,过云后由于云层的影响,无法获得足够的水汽探测信号,探测误差急剧增大.

根据以上实测的大气回波信号及系统参数,可计算得到三个通道的信噪比及水汽混合比的测量误差曲线,如图 8(a) 与 (b) 所示.从图中可以看出在高度 2.3 km,大气后向散射比  $R_s$  为 17 时,水汽混合

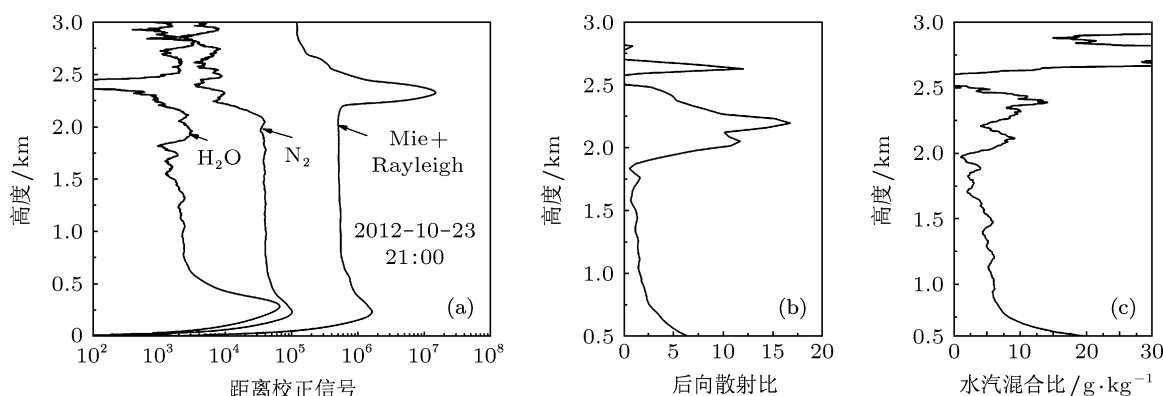


图7 2012年10月23日21:00大气回波信号的距离校正信号、大气后向散射比和水汽混合比高度分布轮廓线 (a) 大气回波信号距离校正高度分布轮廓线; (b) 大气后向散射比高度分布轮廓线; (c) 水汽混合比高度分布轮廓线

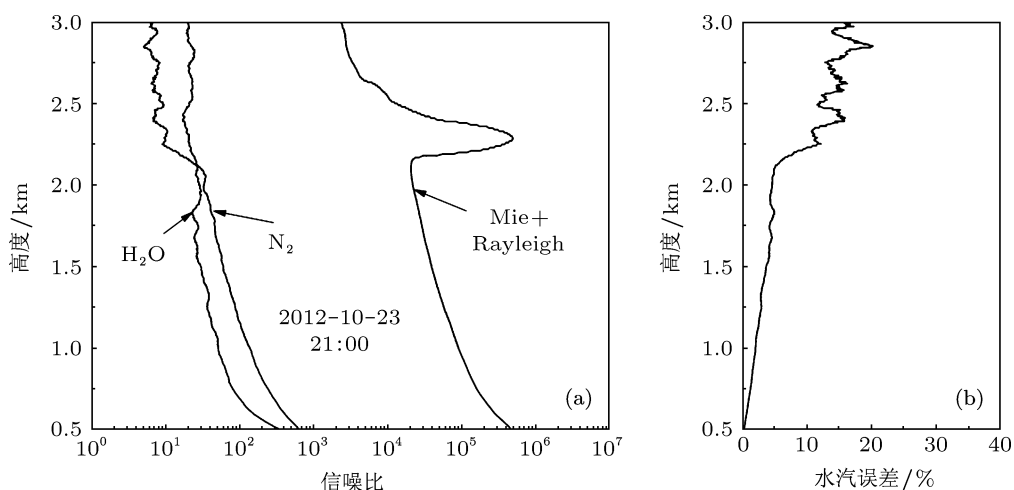


图8 系统各通道信噪比和水汽测量误差高度分布轮廓线 (a) 米通道、氮气和水汽通道信噪比; (b) 水汽混合比测量误差

比的测量误差为 15%. 通过对各回波信号强度进行分析可得, 在高度 2.3 km 处氮气和水汽拉曼通道对米-瑞利散射信号的抑制率均已达到  $10^{-7}$  以上.

## 6 结论

本文提出一种以二向色镜和超窄带滤光片作为分光器件的新型拉曼激光雷达系统, 能够实现对氮气和水汽振动拉曼散射信号及米-瑞利散射信号

的精细高效提取, 详细阐述了系统主要构成、工作原理和技术参数. 利用大气模型对系统水汽混合比探测误差和信噪比进行了仿真分析, 验证系统工作可行性. 利用实验观测, 对有云时的各回波信号进行分析, 获得了系统的信噪比. 理论分析与实验观测表明, 该分光系统氮气和水汽通道对米-瑞利散射信号的抑制率已达到  $10^{-7}$ , 并当大气后向散射比  $R_s$  小于 17 时, 所设计的拉曼激光雷达系统可以实现水汽混合比的测量误差小于 15%.

[1] Pruppacher H R, Klett J D 1997 *Microphysics of Clouds and Precipitation-Second Revised and Enlarged Edition with an Introduction to Cloud Chemistry and Cloud Electricity* (1st Ed.) (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers) p497  
 [2] Harries J E 1997 *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* **123** 2173  
 [3] Shine K P, Sinha A 1991 *Nature* **354** 382

[4] Ansmann A, Riebesell M, Weitkamp C 1990 *Opt. Lett.* **15** 746  
 [5] Kim D, Cha H 2005 *Opt. Lett.* **30** 1728  
 [6] Wu D C, Liu B, Qi F D, Fan A Y, Wang B X, Zhong Z Q, Bo G Y, Liu D, Zhou J, Wang Y J 2011 *J. Atmos. Environ. Opt.* **6** 18 (in Chinese) [吴德成, 刘博, 戚福弟, 范爱媛, 王邦新, 钟志庆, 伯广宇, 刘东, 周军, 王英俭 2011 大气与环境光学学报 **6** 18]

- [7] Whiteman D N, Melfi S H, Ferrare R A 1992 *Appl. Opt.* **31** 3068
- [8] Whiteman D N 2003 *Appl. Opt.* **42** 2571
- [9] Lazzarotto B, Frioud M, Gilles L Q, Mitev V, Quaglia P, Simeonov V, Thompson A, Bergh H V D, Calpini B 2001 *Appl. Opt.* **40** 2985
- [10] Mattis I, Ansmann A, Dietrich A, Jaenisch V, Wandinger U, Müller D, Arshinov Y F, Bobrovnikov S M, Serikov I B 2002 *Appl. Opt.* **41** 6451
- [11] Goldsmith J E M, Blair F H, Bisson S E, Turner D D 1998 *Appl. Opt.* **37** 4979
- [12] Hong G L, Zhang Y C, Zhao Y F, Shao S S, Tan K, Hu H L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 983 (in Chinese) [洪光烈, 张寅超, 赵曰峰, 邵石生, 谭锐, 胡欢陵 2006 物理学报 **55** 983]
- [13] Nott G J, Duck T J, Doyle J G, Coffin M E W, Perro C, Thackray C P, Drummond J R, Fogal P F, McCullough E, Sica R J 2012 *J. Atmos. Ocean Tech.* **29** 221
- [14] Wang Y F, Hua D X, Mao J D, Wang L, Xue Y K 2011 *J. Quant. Spectrosc. Radia. Trans.* **112** 214
- [15] Wang S L, Cao K F, Tao Z M, Hu S X, Wei H L, Hu H L, Wang Y J 2010 *J. Opt. Laser* **21** 1171 (in Chinese) [汪少林, 曹开法, 陶宗明, 胡顺星, 魏合理, 胡欢陵, 王英俭 2010 光电子·激光 **21** 1171]
- [16] Wang Y F, Hua D X, Wang H W, Di H G 2013 *Chin. J. Quantum Electron.* **30** 103 (in Chinese) [王玉峰, 华灯鑫, 王红伟, 狄慧鸽 2013 量子电子学报 **30** 103]
- [17] Wang S L, Su J, Zhao P T, Cao K F, Hu S X, Wei H L, Tan K, Hu H L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3941 (in Chinese) [汪少林, 苏嘉, 赵培涛, 曹开法, 胡顺星, 魏合理, 谭锐, 胡欢陵 2008 物理学报 **57** 3941]
- [18] Shen F H, Shu Z F, Sun D S, Wang Z C, Xue X H, Chen T D, Dou X K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 060704 (in Chinese) [沈法华, 舒志峰, 孙东松, 王忠纯, 薛向辉, 陈廷娣, 窦贤康 2011 物理学报 **60** 060704]
- [19] Hua D X, Uchida M, Kobayashi T 2005 *Appl. Opt.* **44** 1315
- [20] Russo F, Whiteman D N, Demoz B, Hoff R M 2006 *Appl. Opt.* **45** 7073

# Design and analysis of new spectroscopic system of Raman lidar for detection of atmospheric water vapor\*

Wang Hong-Wei Hua Deng-Xin<sup>†</sup> Wang Yu-Feng Gao Peng Zhao Hu

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 27 January 2013; revised manuscript received 16 February 2013)

## Abstract

A new ultraviolet Raman lidar system is proposed and developed for detecting atmospheric water vapor and aerosol study. The combination of dichroic mirrors and narrow-band interference filters is used as high-performance spectroscopic system to obtain the fine-separation and high-efficiency extraction of Mie-Rayleigh scattering signals, the vibrational Raman scattering signal of H<sub>2</sub>O and N<sub>2</sub>. By the American standard model and a set of atmospheric scattering signal model, the signal-to-noise ratio (SNR) and the water vapor measurement error are simulated and analyzed. The preliminary experiments are carried out at nighttime in Xi'an area for detecting the atmospheric water vapor and aerosols. Taking a set of the atmospheric returned signals measured under cloudy weather for example, the profiles of atmospheric backscatter ratio and water vapor mixing ratio are retrieved, and the SNR profiles of the three channels are discussed and verify that this configuration can achieve a high rejection rate ( $10^{-7}$ ) to Mie-Rayleigh scattering. The theoretical and experimental results show that water vapor detection error of less than 15% can be obtained under a backscatter ratio of 17, which demonstrates the feasibility of the system for the atmospheric aerosol and water vapor measurements.

**Keywords:** Raman lidar, water vapor mixing ratio, atmospheric backscatter ratio

**PACS:** 07.07.Df, 42.68.Wt, 92.60.Jq, 92.20.Bk

**DOI:** 10.7498/aps.62.120701

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41027004, 61275185) and the Scientific Research Foundation of the Education Department of Shaanxi Province, China (Grant No. 2010JK759).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: dengxinhua@xaut.edu.cn