

## 用于水汽混合比自标定的 532 nm/660 nm 双波长激光雷达

邓 迁<sup>1,2</sup>, 吴德成<sup>1</sup>, 况志强<sup>1,2</sup>, 刘 东<sup>1</sup>, 谢晨波<sup>1</sup>, 王英俭<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:** 水汽混合比的标定是水汽拉曼激光雷达的一个重要问题。利用两台输出激光波长分别为 532.1 nm 和 659.7 nm 的两台 YAG 激光器, 建立了一台能够实现水汽混合比自标定的双波长激光雷达, 并开展了双波长激光雷达的探测性能测试试验。通过分析测量数据表明该激光雷达的探测性能能够满足水汽混合比自标定的要求。根据实测的大气气溶胶垂直分布, 在气溶胶散射比大约为 1.01 的高度范围内, 得到了该双波长激光雷达测量氮气混合比的标定常数为  $0.545 \pm 0.031$ , 相对误差为 5.7%。这是实现水汽混合比自标定的关键一步, 为水汽混合比的自标定奠定了基础。

**关键词:** 激光雷达; 水汽混合比; 自标定

**中图分类号:** P412 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1230004

## 532 nm/660 nm dual wavelength lidar for self-calibration of water vapor mixing ratio

Deng Qian<sup>1,2</sup>, Wu Decheng<sup>1</sup>, Kuang Zhiqiang<sup>1,2</sup>, Liu Dong<sup>1</sup>, Xie Chenbo<sup>1</sup>, Wang Yingjian<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** The calibration of water vapor mixing ratio is an important issue for Raman lidar. A dual wavelength lidar was developed and tested for the self-calibration of water vapor mixing ratio based on the two YAG laser, which emitted laser pulses at the wavelengths of 532.1 nm and 659.7 nm. From the analysis of the lidar measurements, it indicates that the capability of lidar satisfies with the requirements of water vapor mixing ratio self-calibration completely. In the altitude range, in which the measured aerosol lidar scattering ratio was about 1.01, the calibration constant of nitrogen mixing ratio was determined to be  $0.545 \pm 0.031$  from the lidar measurements, and the relative uncertainty was about 5.7%. The determination of the nitrogen mixing ratio calibration constant was the key step in the water vapor mixing ratio self-calibration, which lays a foundation for the self-calibration could and the water vapor mixing ratio.

**Key words:** lidar; water vapor mixing ratio; self-calibration

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(41405032); 中国科学院 STS 区域重点项目(KFJ-STG-QYZD-022)

作者简介: 邓迁(1988-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达与大气环境监测方面的研究。Email: 838227958@qq.com

导师简介: 吴德成(1984-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事激光遥感探测方面的研究。Email: dchwu@aiofm.ac.cn

王英俭(1963-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光波和图像大气传输及自适应光学相位校正方面的研究。

Email: wyj@aiofm.ac.cn

## 0 引言

水汽是地球大气中重要的温室气体,并且对全球变暖有显著的正反馈作用<sup>[1]</sup>。大气中的水汽影响着全球气候变化、水循环、天气系统以及大气化学等重要过程<sup>[2-3]</sup>。水汽的时空分布对于研究云的形成、强对流天气系统的发展等具有重要意义<sup>[4-5]</sup>。水汽拉曼激光雷达由于其系统简单、可靠性高,能够实现自动化运行,已经成为当前长期测量对流层和平流层底部水汽垂直分布的重要手段之一<sup>[6-7]</sup>。

水汽拉曼激光雷达同时测量的水汽分子和氮气分子的拉曼散射回波信号,经过大气透过率等校正后,它们的比值与水汽混合比(水汽与干空气的质量比)成正比,比例常数称为水汽混合比标定常数,它与氮气拉曼通道和水汽拉曼通道的效率(包括光学效率、量子效率、电子学增益等)以及氮气分子和水汽分子的拉曼后向散射截面等有关<sup>[8]</sup>。水汽拉曼激光雷达经过标定,得到水汽混合比标定常数后,才能测量真实的水汽混合比。2013年,世界气象组织中的仪器和观测方法委员会(CIMO)在日内瓦召开的新技术和测试专家组第一次会议中,对水汽拉曼激光雷达技术进行了评估,着重指出水汽拉曼激光雷达的标定是目前限制该技术被广泛应用的关键<sup>[9]</sup>。

目前使用的水汽拉曼激光雷达的标定方法主要有以下两类:一是对比法。将水汽拉曼激光雷达测量的结果与其它设备测量的结果进行对比,得到水汽混合比标定常数,标定精度主要受到其它测量设备的绝对测量精度、激光雷达的随机测量误差、对比标定方法(用于对比的测量数据和高度范围等)等因素的影响。主要利用球载无线电探空仪测量的水汽混合比廓线对水汽拉曼激光雷达进行标定。球载无线电探空仪和激光雷达测量路径的不一致性,是该标定方法主要误差源之一。利用无线电探空数据得到的水汽混合比标定常数的统计误差约为 10%<sup>[10]</sup>。对于没有无线电探空数据的激光雷达站点,被动遥感设备(如微波辐射计、红外光谱仪、GPS 等)测量的水汽柱含量也可以用来标定水汽拉曼激光雷达。但是,由于受到几何因子的影响,激光雷达测量的水汽柱含量的误差往往比较大,从而导致水汽混合比标定常数的误差往往都超过 10%。第二类是标准灯法。标

准灯的辐射光谱曲线非常稳定并且是已知的,因此可以根据两个拉曼通道中测量的标准灯的信号强度得到这两个拉曼通道效率的比值<sup>[11-13]</sup>。与对比法相比,标准灯法不会受到其它水汽测量设备的测量精度、测量数据在时间和空间上的一致性、几何因子等因素的影响,可以获得高精度的水汽混合比标定常数,如“Lamp Mapping”方法得到的标定常数的误差约为 5%<sup>[13]</sup>。由于振动拉曼散射谱线的线宽非常窄,因此水汽拉曼激光雷达中都采用窄带干涉滤光片来提高信噪比。干涉滤光片的中心波长随入射角度的变化会发生漂移,这将导致滤光片对回波信号的透过率发生明显的变化;而标准灯的光谱曲线在滤光片中心波长的漂移范围内几乎不变,故滤光片对它的透过率几乎不随滤光片中心波长的漂移而变化。因此,利用标准灯法不能准确测量出由于滤光片入射角度变化引起的标定常数的变化,这是标准灯法最大的弊端<sup>[14]</sup>。

Wu 等提出了一种基于氮气混合比测量的水汽拉曼激光雷达自标定方法<sup>[15]</sup>。该方法在传统的水汽拉曼激光雷达中增加发射一束波长与水汽拉曼探测通道中心波长相近的激光,利用水汽拉曼通道接收其弹性散射回波信号,在气溶胶含量非常少的对流层中上部,该弹性散射回波信号可以近似为瑞利散射回波信号,然后联合氮气拉曼通道中测量的回波信号,可以得到氮气混合比的垂直分布,而氮气混合比是已知的,为 0.755<sup>[16]</sup>,因此就能得到氮气混合比的标定系数。进一步校正水汽拉曼通道中滤光片在水汽拉曼散射波长和新增加的激光波长上的透过率差异,就得到了水汽混合比的标定系数。与对比法和标准灯法相比,该方法能更真实、准确地对水汽拉曼激光雷达进行标定,理论标定误差小于 6%。在该方法中,最核心的问题是能够找到合适的出射激光波长与水汽拉曼探测通道中心波长相近的脉冲激光光源,因此,建立合适的双波长激光雷达系统是利用该方法实现水汽混合比自标定的关键<sup>[17-18]</sup>。

文中介绍了一台 532 nm/660 nm 的双波长激光雷达,用来实现对 532 nm 激光激发测量的水汽混合比进行自标定。文中首先对 532 nm/660 nm 双波长激光雷达进行介绍,然后对典型测量个例进行分析,结果表明该激光雷达的性能和测量结果满足自标定的要求,能够实现水汽混合比的自标定。

### 1 激光雷达系统

双波长激光雷达采用两台 Nd:YAG 激光器作为光源,其中一台激光器输出 532.1 nm 波长的激光脉冲,单脉冲激光能量为 54 mJ,另外一台输出 659.7 nm 波长的激光脉冲,单脉冲激光能量为 5 μJ。两台激光器分时交替向大气中发射激光脉冲。利用一台口径 400 mm 的卡塞格林望远镜分时接收 532.1 nm 波长的激光脉冲激发的大气弹性散射回波信号、氮气分子和水汽分子的拉曼散射回波信号,以及 659.7 nm 波长的激光脉冲激发的大气弹性散射回波信号。望远镜接收的回波信号经过准直后入射到后继光路中,在后继光路中,利用分色镜片将不同波长的回波信号分开,然后经过滤光片和会聚透镜后,被光电倍增管探测。数据采集器将探测器输出的电信号量化、采集,并传输给工控机存盘和显示。图 1 中给出了双波长激光雷达的结构示意图,表 1 中列出了双波长激光雷达主要技术参数。

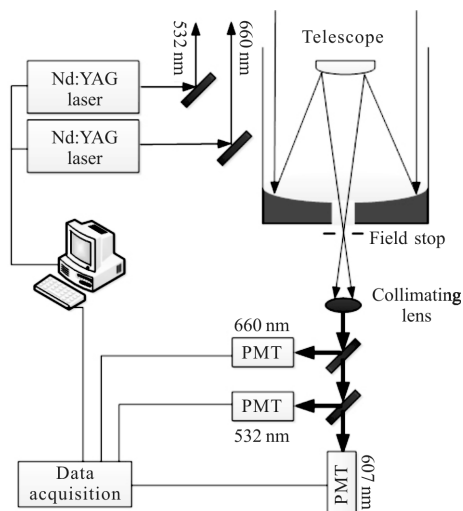


图 1 532 nm/660 nm 双波长激光雷达示意图

Fig.1 Schematic diagram of 532 nm/660 nm dual-wavelength lidar

水汽分子的振动拉曼散射频移为  $3\ 654\ \text{cm}^{-1}$ [19], 532.1 nm 波长的激光脉冲激发的水汽分子的拉曼散射回波信号的中心波长为 660.5 nm,与激光器发射的 659.7 nm 的激光波长相差 0.8 nm。在双波长激光雷达中,水汽拉曼探测通道中选用带宽为 10 nm 的宽带干涉滤光片,从而能够有效探测水汽分子的拉曼散射回波信号和 659.7 nm 激光脉冲的弹性散射回波信号。532 nm 和 607 nm 探测通道都采用了带宽为

0.3 nm 的窄带干涉滤光片。

表 1 532 nm/660 nm 双波长激光雷达主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of dual-wavelength lidar at 532 nm/660 nm

Unit name	Parameter		
Transmitter			
Laser type	Nd:YAG		
Wavelength/nm	532	660	
Pulse energy/mJ	54	0.005	
Pulse repetition rate/Hz	20	1 000	
Divergence/mrad	0.3	1.5	
Receiver			
Telescope	Cassegrain		
Diameter/mm	400		
FOV/mrad	2		
Filter	Interference filter		
Center wavelength /mm	532.1	607.4	660
FWHM/nm	0.3	0.3	10
Data acquisition			
Detectors	PMT		
Transient recorder	TR160-20		

### 2 探测结果及分析

双波长激光雷达在晴朗的夜晚进行了探测实验,图 1 中给出了双波长激光雷达在夜晚的一个探测个例。为了更清楚的看到大气的层结构,图 1 中给出了距离平方校正后的激光雷达回波信号,黑色实线、灰色点虚线和黑色短虚线分别是 50 000 发 532.1 nm 波长的激光脉冲累计平均的弹性散射回波信号、氮气分子和水汽分子的拉曼散射回波信号;品灰色长虚线是 2 000 000 发 659.7 nm 波长的激光脉冲累计平均的弹性散射回波信号;点线是模拟的 532 nm 波长的瑞利散射回波信号。532 nm 的弹性散射回波信号与模拟的瑞利散射回波信号在大约 6 km 以上有很好的的一致性,说明大气在 6 km 以上是非常清洁的。另外,两个波长上的弹性散射回波信号、氮气拉曼散射回波信号和模拟的瑞利散射回波信号在大约 6 km 以上的一致性,在一定程度上验证了该激光雷达测

量数据的可靠性。

图 2 中黑色实线、灰色点虚线和黑色短虚线分别是 532.1 nm 波长的激光脉冲激发的弹性散射回波信号、氮气分子和水汽分子的拉曼散射回波信号(50 000 发累计平均);品灰色长虚线是 659.7 nm 波长的激光脉冲激发的弹性散射回波信号(2 000 000 发累计平均);黑色点线是模拟的 532 nm 波长的瑞利散射回波信号。

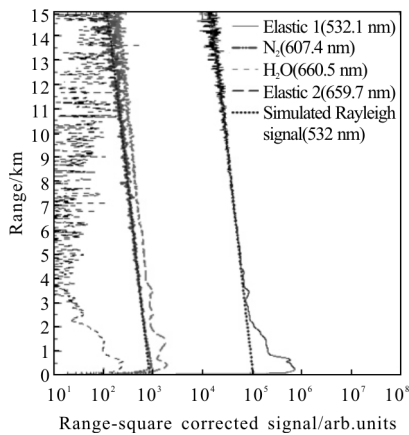


图 2 双波长激光雷达夜晚测量的距离平方校正的回波信号廓线  
Fig.2 Distance-squared echo signal profile at night measured by dual-wavelength lidar

根据图 2 中激光雷达测量的 532 nm 上的弹性散射回波信号和氮气分子的拉曼散射回波信号, 分别利用 Fernald 方法和 Raman-Mie 方法反演大气气溶胶的激光雷达散射比((Lidar Scattering Ratio, LSR)激光雷达测量的大气气溶胶后向散射系数/空气分子的后向散射系数+1), 结果如图 3 所示。图 3 中, 实线是采用 Fernald 方法反演的结果; 虚线是用 Raman-Mie 方法

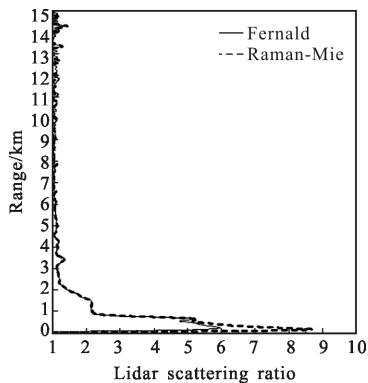


图 3 双波长激光雷达测量的大气气溶胶激光雷达散射比垂直分布  
Fig.3 Vertical distribution of atmospheric aerosol scattering ratio measured by dual-wavelength lidar

反演的结果。由此可以看出, 对流层中上部大气非常清洁, 7~10 km 高度范围内的大气气溶胶激光雷达散射比平均值为  $1.011 \pm 0.031$ , 可以将 660 nm 通道接收的弹性散射回波信号近似为瑞利散射回波信号, 由此产生的相对误差约为 1%。

图 4 中给出了双波长激光雷达测量不同通道中回波信号的比值。左图中是水汽分子和氮气分子拉曼通道回波信号的比值, 即未标定的水汽混合比; 右图中是 660 nm 弹性散射回波信号和氮气分子拉曼通道回波信号的比值, 在 7~10 km 高度范围内的比值就是未标定的氮气混合比。其中, 右图中大约 4 km 以下的波动主要是由于气溶胶层造成的, 另外, 在 2.5 km 以下的某些高度上, 回波信号的比值较 7~10 km 高度范围内的比值偏小, 这主要是由于 659.7 nm 波长的激光发散角较大, 导致其回波信号在这些高度上不完全接收造成。根据大气中已知的氮气混合比 0.755, 可以得到氮气混合比的标定常数为  $0.545 \pm 0.031$ 。氮气混合比标定常数的获得是标定水汽混合比关键性的一步, 验证了 532 nm/660 nm 双波长激光雷达系统具有实现水汽混合比自标定的能力。

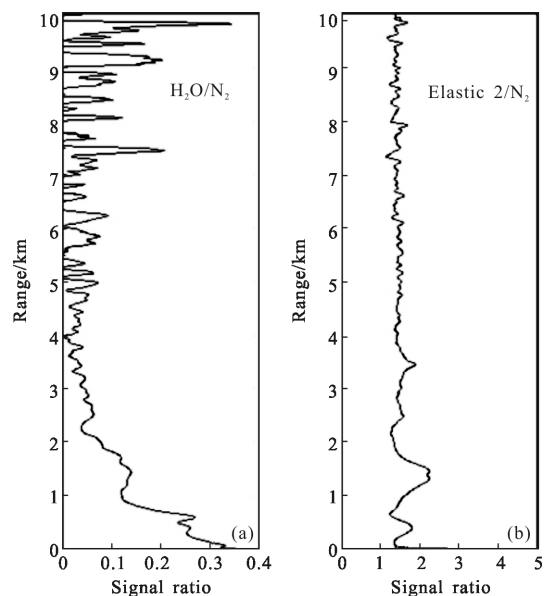


图 4 双波长激光雷达测量不同通道中回波信号的比值  
Fig.4 Ratio of echo signals in different channels measured by dual-wavelength lidar

### 3 结论

为了实现拉曼激光雷达测量水汽混合比的自标

定,建立一台 532 nm/660 nm 双波长激光雷达。文中对该双波长激光雷达进行了介绍,并且通过对其测量数据进行分析,表明该双波长激光雷达的测量数据是可靠的,并且双波长激光雷达的探测性能和测量数据质量能够满足水汽混合比自标定的要求。在双波长激光雷达一个测量个例中,很好地得到了氮气混合比的标定常数为  $0.545 \pm 0.031$ , 相对误差为 5.7%。氮气混合比标定常数的获得是标定水汽混合比关键性的一步,证明 532 nm/660 nm 双波长激光雷达系统具有实现水汽混合比自标定的能力。

### 参考文献:

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Lu Xianyang. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(7): 1697-1704. (in Chinese)
- [3] Kunz A, Müller R, Homonnai V, et al. Extending water vapor trend observations over Boulder into the tropopause region: Trend uncertainties and resulting radiative forcing [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2013, 118: 50831.
- [4] Wu Decheng, Liu Bo, Qi Fudi, et al. Tropospheric aerosols optical properties measured by a Raman-Mie lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2011, 6(1): 18-26.
- [5] Zhao Ming, Xie Chenbo, Zhong Zhiqing, et al. High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S): S130002. (in Chinese)
- [6] Tao Zongming, Liu Dong, Ma Xiaomin, 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. (in Chinese)
- [7] 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]. *Rev Geophys*, 2015, 53(3): 819-895.
- [8] Whiteman D N, Venable D D, Landulfo E. Comments on: Accuracy of Raman lidar water vapor calibration and its applicability to long-term measurements [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(15): 2170-2176.
- [9] Dr Isabelle Rüedi. Commission for instruments and methods of observation [D]. Geneva: WMO Observing and Information Systems Department, 2013: 4-7.
- [10] Davide Dionisi, Fernando Congeduti, Gian Luigi Liberti, et al. Calibration of a multichannel water vapor Raman lidar through noncollocated operational soundings: optimization and characterization of accuracy and variability [J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 2009, 27(1): 108-121.
- [11] Sherlock V, Hauchecorne A, Lenoble J. Methodology for the independent calibration of Raman backscatter water-vapor lidar systems [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(27): 5816-5837.
- [12] Leblanc T, McDermid I S. Accuracy of Raman lidar water vapor calibration and its applicability to long-term measurements [J]. *Appl Opt*, 2008, 47(30): 5592-5603.
- [13] Venable D D, Whiteman D N, Calhoun M N, et al. A lamp mapping technique for independent determination of the water vapor mixing ratio calibration factor for a Raman lidar system [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(23): 4622-4632.
- [14] Whiteman D N, Venable D D, Landulfo E. Comments on: Accuracy of Raman lidar water vapor calibration and its applicability to long-term measurements [J]. *Appl Opt*, 2011, 50(15): 2170-2176.
- [15] Wu D, Wang Z, Liu D, Xie C, et al. Independent calibration of water vapor Raman lidar by using additional elastic measurements at water vapor Raman wavelength [C]//EPJ Web of Conferences EDP Sciences, 2016, 119: 25007.
- [16] Brasseur G P, Orland J J, Tyndall G S. *Atmospheric Chemistry and Global Change* [M]. New York: Oxford University Press, 1999: 654.
- [17] Hu Xuan, Li Daojing, Tian He, et al. Impact and correction of phase error in lidar signal on synthetic aperture imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0306001. (in Chinese)
- [18] Liu Dong, Liu Qun, Bai Jian, et al. Data processing algorithms of the space-borne lidar CALIOP: a review [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1202001. (in Chinese)
- [19] Avila G, Fernández J M, Maté B, et al. Rotational-vibrational Raman cross sections of water vapor in the OH stretching region [J]. *J Mol Spectrosc*, 1999, 196: 77-92.