

高光谱分辨率激光雷达探测大气透过率

赵明^{1,2}, 谢晨波¹, 钟志庆¹, 王邦新¹, 王珍珠¹, 尚震^{1,3}, 谭敏^{1,3}, 刘东¹, 王英俭^{1,4}

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学辐射重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学技术大学 研究生院, 安徽 合肥 230026;
4. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 研制了一台基于种子注入激光器和碘分子吸收滤光器的高光谱分辨率激光雷达。介绍了该系统的基本原理、数据反演方法和系统结构。分别在有云天气和沙尘天气时进行了高光谱分辨率激光雷达探测大气透过率的实验, 并与用常规 Fernald 方法反演的结果进行对比。观测结果显示, 不同类型的气溶胶粒子以及云具有不同的物理和光学性质, Fernald 方法中假设的激光雷达比往往不符合实际情况, 因此会产生较大的测量误差。而高光谱分辨率激光雷达可以利用分子散射和气溶胶散射的谱宽不同, 将两种信号分离探测, 避免了假设激光雷达比, 从而实现大气透过率的高精度定量探测。

关键词: 高光谱分辨率激光雷达; 大气透过率; 碘分子吸收池

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.S130002

High spectral resolution lidar for measuring atmospheric transmission

Zhao Ming^{1,2}, Xie Chenbo¹, Zhong Zhiqing¹, Wang Bangxin¹, Wang Zhenzhu¹,
Shang Zhen^{1,3}, Tan Min^{1,3}, Liu Dong¹, Wang Yingjian^{1,4}

- (1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 4. School of Environmental Science and Photoelectric Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: A high spectral resolution lidar (HSRL) based on injection-seeded laser and iodine absorption filter has been developed. The basic principle, data processing method and configuration of HSRL were introduced. The HSRL measurement of atmospheric transmission in cloud and dust cases were presented, and compared with the results retrieved by the traditional Fernald method. Due to the nonidentity in physical and optical properties of different aerosols and cloud, the lidar ratio assumed in Fernald method cannot agree well with the real atmosphere and produces considerable error in atmospheric transmission. Utilizing different spectral width of molecular scattering and particle scattering, the HSRL could separate two kinds of signals with iodine filter. Therefore, HSRL can measure the atmospheric transmission quantitatively without the additional assumption of lidar ratio.

Key words: high spectral resolution lidar; atmospheric transmission; iodine absorption filter

收稿日期: 2016-02-05; 修订日期: 2016-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(41005014, 41405032); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-TZ-G06-01); 安徽省自主创新专项(12Z0104074)

作者简介: 赵明(1988-), 男, 博士生, 主要从事激光雷达遥感探测方面的研究。Email: mzhao@aiofm.ac.cn

导师简介: 谢晨波(1976-), 男, 研究员, 主要从事激光雷达大气遥感和环境监测方面的研究。Email: cbxie@aiofm.ac.cn

0 引言

由于大气中分子和气溶胶粒子的散射和吸收作用,激光在大气传输过程中会发生能量衰减,从而影响到传输的效果。大气透过率是表征大气对光辐射衰减效应的光学参数,在大气辐射、环境监测和激光传输校正等应用中具有重要的参考价值。

激光雷达作为一种主动光学遥感设备,因其具有良好的时空分辨率,以及昼夜连续观测能力,在大气透过率测量中发挥着重要作用^[1]。大气中与激光发生作用并造成消光的介质主要是大气分子和气溶胶。大气分子数密度随高度的分布情况比较稳定,且激光与大气分子仅发生瑞利散射,可以用模型很好地描述;气溶胶的时空分布则变化多样,而且具有不同理化性质的气溶胶对激光的散射和吸收特性各不相同。然而,对于普通的米散射激光雷达,在数据反演中需要引入的一条基本假设就是假定气溶胶的消光与后向散射系数之间满足某一确定的关系^[2-3]。这必然会引入一定的反演误差,对于消光系数,这一误差可达到 50%^[4]。

针对上述问题,使用拉曼激光雷达^[5]探测是一种有效解决办法。拉曼激光雷达中,氮气分子的振动拉曼散射信号只与氮气分子密度和气溶胶消光系数有关,从而排除了气溶胶散射的影响,实现了气溶胶消光系数的精确探测。但是因为分子拉曼散射截面比瑞利散射截面小 3 个数量级,拉曼信号在白天的信噪比很差,大多只能在夜间观测。文中介绍的高光谱分辨率激光雷达 (High Spectral Resolution Lidar, HSRL),则利用了大气分子散射谱与气溶胶散射谱宽度不同,通过使用窄线宽的激光器和具有高光谱分辨率的滤光器,分离了这两种散射信号,从而实现了大气光学参数的精确定量反演。相对于拉曼散射信号,HSRL 激光雷达具备更高的信噪比,因此适合白天测量。

中国科学院安徽光学精密机械研究所研制了一台基于碘分子滤光器的 HSRL 系统,并用于大气透过率的探测研究。文中将介绍 HSRL 的基本原理和反演方法、系统结构、探测大气透过率的结果实例、以及与米散射信号 Fernald 方法反演结果的比较和分析。

1 HSRL 的基本原理

高光谱分辨率激光雷达的概念最早是由 Fiocco 于 1968 年提出的^[6]。激光在大气介质中的散射光谱宽度,主要是由散射粒子的多普勒展宽引起的。大气分子的热运动速度高达每秒几百米,造成的瑞利散射光谱展宽达到 GHz 量级。相对于大气分子,气溶胶的质量要大得多,在分子撞击下的布朗运动速度要慢得多,产生的米散射光谱宽度可近似认为与发射激光谱宽相同。因此,如果使用窄线宽(约几十 MHz)的激光器作为发射光源,使瑞利散射和米散射的谱宽产生量级上的差别,再在接收部分安装具有高光谱分辨率的滤光器,将两种散射回波分离开,就可以分别得到气溶胶的散射和消光特性了。

目前可用于 HSRL 分光的高光谱分辨率器件主要有 F-P 干涉仪^[7-8]、原子/分子吸收池滤光器^[9]以及视场展宽迈克尔逊干涉仪^[10]等。由于碘分子在 532 nm 波长附近具有丰富的吸收谱线^[11],在几十摄氏度的温度下就能达到很高的米散射抑制比,并且其透射特性不依赖于机械准直或入射光的角分布,因此碘分子吸收池是目前应用最多的 HSRL 滤光器。

碘分子吸收池过滤回波信号的原理如图 1 所示。图中碘分子吸收谱用实线表示,选取碘分子的 1111 吸收线(18 788.451 0 cm⁻¹)用于滤波。散射回波光谱用点线表示。回波通过碘分子吸收池后,谱线中心的米散射谱尖峰被碘吸收,透过率小于 10⁻⁴,而瑞利散射谱具有 2 GHz 以上的谱宽,谱线两翼得以部分透过,如图中虚线所示。

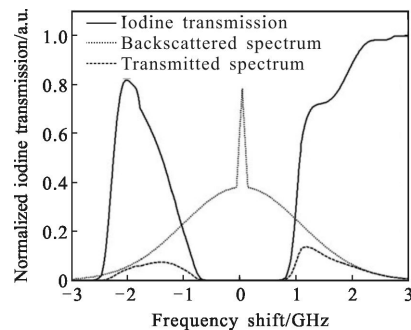


图 1 碘分子吸收池过滤回波信号原理图

Fig.1 Principle of the backscattered signal of iodine absorption filter

使用碘分子吸收池的接收光路如图 2 所示。望远镜接收到的后向散射信号被分成两束,一束光经

过碘分子吸收池,其中的米散射成分被吸收掉,瑞利散射成分部分透过并被 PMT 1 探测,作为分子通道;另一束光直接被 PMT 2 探测,作为综合通道。将分子通道和综合通道的信号分别记为 $s_{mol}(z)$ 和 $s_{com}(z)$:

$$s_{mol}(z) = \eta_{mol} \cdot [f_m(z) \cdot N_m(z) + f_a \cdot N_a(z)] \quad (1)$$

$$s_{com}(z) = \eta_{com} \cdot [N_m(z) + N_a(z)] \quad (2)$$

式中: z 为相对于激光雷达所在位置的高度; η_{mol} 和 η_{com} 分别为分子通道和综合通道的探测效率,包括除碘吸收池以外的所有光学和电子常量; $N_m(z)$ 和 $N_a(z)$ 分别为在高度 z 处散射,并被系统接收到的分子瑞利散射信号和气溶胶米散射信号; $f_m(z)$ 为高度 z 处的大气分子散射回波通过碘池的透过率,它是瑞利散射谱与碘分子吸收谱在频域的卷积; f_a 为气溶胶米散射回波通过碘池的透过率,近似等于碘吸收谱线中心的透过率,是一个与高度无关的小量。

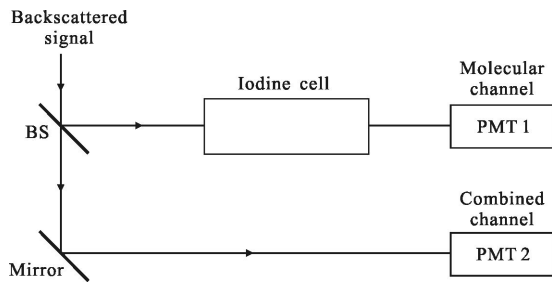


图 2 使用碘分子吸收池的接收光路结构图

Fig.2 Schematic diagram of the receiver light path with iodine cell

通过将激光引入接收系统进行频率扫描,再结合不同高度处的分子散射谱线,就可以计算出分子通道和综合通道的标定系数 $C_{mm}(z)$ 和 C_{am} :

$$C_{mm}(z) = f_m(z) \cdot \eta_{mol} / \eta_{com} \quad (3)$$

$$C_{am} = f_a \cdot \eta_{mol} / \eta_{com} \quad (4)$$

因此,能够从原始信号中提取出瑞利散射信号和米散射信号:

$$N_m(z) = \frac{s_{mol}(z) - C_{am} \cdot s_{com}(z)}{\eta_{com} [C_{mm}(z) - C_{am}]} \quad (5)$$

$$N_a(z) = \frac{s_{mol}(z) - C_{mm}(z) \cdot s_{com}(z)}{\eta_{com} [C_{am} - C_{mm}(z)]} \quad (6)$$

后向散射比可由总的散射信号与瑞利散射信号之比直接得到:

$$SR(z) = [N_m(z) + N_a(z)] / N_m(z) \quad (7)$$

结合根据大气模型计算的分子后向散射系数 $\beta_m(z)$,进而得到气溶胶后向散射系数:

$$\beta_a(z) = \beta_m(z) \cdot [SR(z) - 1] \quad (8)$$

气溶胶消光系数利用瑞利散射信号求得:

$$\alpha_a(z) = -\frac{1}{2\Delta z} \ln \left[\frac{X_m(z + \frac{\Delta z}{2}) / \beta_m(z + \frac{\Delta z}{2})}{X_m(z - \frac{\Delta z}{2}) / \beta_m(z - \frac{\Delta z}{2})} \right] - \alpha_m(z) \quad (9)$$

式中: $X_m = N_m \cdot z^2$ 为距离平方的瑞利散射信号; Δz 为一小段距离, $\alpha_m = 8\pi/3 \cdot \beta_m$ 为大气分子的消光系数。

由消光廓线,可得到大气在垂直方向的透过率:

$$T(z) = \exp[-\int_0^z \alpha_m(z') + \alpha_a(z') dz'] \quad (10)$$

而由气溶胶消光系数与后向散射系数则可得激光雷达比:

$$LR(z) = \alpha_a(z) / \beta_a(z) \quad (11)$$

2 HSRL 系统结构

HSRL 系统主要由激光发射部分、信号接收部分、数据采集部分及控制部分构成,系统结构如图 3 所示。系统以单模光纤激光器发射的窄线宽的 1 064 nm 连续光作为种子光,注入 Nd:YAG 激光器,经倍频

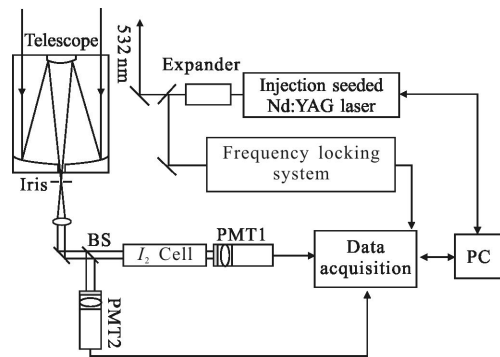


图 3 HSRL 系统结构图

Fig.3 Schematic diagram of the HSRL system

后,产生高功率、窄线宽的 532 nm 脉冲光,作为发射光源。种子注入技术将发射光的线宽从 30 GHz 压缩到小于 90 MHz,实现了从谱宽上将分子散射和气溶胶散射区分出来的目的。为了将激光频率稳定在吸收谱线中心,采用了基于声光调制器的频率锁定系统^[2],可以将发射光的频率稳定在 ± 80 MHz。接收部分主要由 200 mm 口径的 Cassegrain 望远镜、分光镜、20 cm 长的碘分子吸收池及其温控系统组成。在 HSRL 激光雷达探测中,选取碘分子的 1111 吸收线 ($18\ 788.451\text{ cm}^{-1}$)用于滤波,因为该吸收线靠近激光

器频率扫描范围的中心,并且具有较强的吸收。当碘池工作在 60 °C 时,可以对米散射信号达到 10⁴ 以上的抑制比。数据采集部分包括光电倍增管(PMT)及其高压模块,和采样速率为 20 MHz 的瞬态记录仪,对应的最小采样间隔为 7.5 m。计算机控制激光器的发射和稳频,以及数据的采集和传输。

HSRL 系统的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 HSRL 系统主要技术参数

Tab.1 Main parameters of HSRL system

Parameters	Values
Seed laser	
Average power	40 mW
Linewidth	5 kHz
Pulsed Nd:YAG laser	
Pulse energy	150 mJ/pulse
Linewidth	<90 MHz
Repetition rate	30 Hz
Receiver	
Telescope aperture	200 mm
Iodine cell	20 cm, 60 °C
Detector	PMT
Data Acquisition	12 bit, 20 MHz

3 实验结果

图 4 是 2015 年 3 月 31 日夜间 HSRL 系统的观测结果。图 4(a)是用不同方法反演的气溶胶消光系数廓线,其中的实线是由分子通道信号根据公式(9)反演的消光系数廓线;虚线是由综合通道信号用 Fernald 方法反演的消光系数廓线,反演中假设激光雷达比为 50 sr。两条消光系数廓线在 2.8 km 以下趋势一致,HSRL 法反演的数值略大,而在 2.8~3.2 km 的云层处,HSRL 法反演的消光系数则远小于使用 Fernald 法的数值,最大峰值分别为 1.3 km⁻¹ 和 6.1 km⁻¹。图 4(b)是相应的大气透过率廓线,图中实线表示 HSRL 方法反演的结果,虚线表示 Fernald 方法反演的结果。同样是在 2.8~3.2 km,两者的差异迅速扩大,3.5 km 以下的大气透过率分别为 0.244 和 0.1。图 4(c)是由

公式(11)得到的激光雷达比廓线。激光雷达比反映的是粒子的物理和光学性质,图 4(c)中 2.8 km 以下的激光雷达比变化不大,平均值约为 66 sr,根据经验,其成分有可能是城市污染气溶胶,而 2.8~3.2 km 的激光雷达比则急剧减小为 11~14 sr,印证了该处有云层存在。由此可见,对于 Fernald 方法,当有云层存在时,若使用固定的激光雷达比,会造成很大的反演误差,而 HSRL 方法可以避免这一问题。

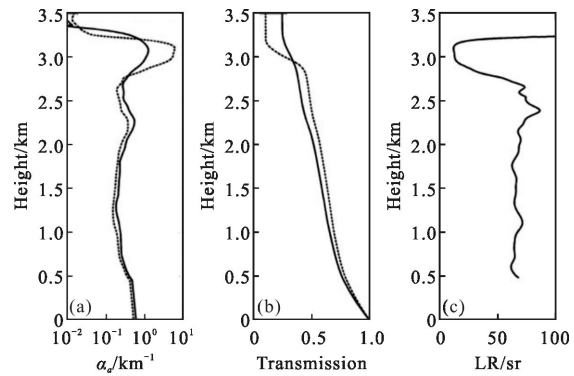


图 4 2015 年 3 月 31 日夜间 HSRL 激光雷达观测结果

Fig.4 Results measured by HSRL at night on March 31st, 2015

在 Fernald 法数据反演中,对于结构特征比较明显的云,可以对其假设较小的激光雷达比,一般取 10~20 sr,从而提高反演精度。但对于不同成分的气溶胶层,则很难通过廓线结构加以区分,更难以知道不同成分的激光雷达比分别是多少。一个典型的例子如图 5 所示,图中所示是 2015 年 4 月 2 日沙尘过境时观测到的结果。(a)~(c)各子图的参数与图 4 相同,依旧用实线表示 HSRL 方法反演的结果,用虚线表示 Fernald 方法反演的结果。从图 5(a)可以看到,以 0.8 km 为界,气溶胶分为两层。在 0.8 km 以下的部分,用 HSRL 法反演的气溶胶消光系数大于用 Fernald 法得到的结果,而在 0.8~2.5 km 的气溶胶层,前者却又小于后者。造成这一现象的原因是两层气溶胶的成分不同,近地层是对激光吸收较强的城市污染气溶胶,而上面一层主要是沙尘。这种不同很清楚地反映在激光雷达比上,如图 5(c)所示,下层气溶胶的激光雷达比大约为 64 sr,大于 Fernald 法反演中假定的 50 sr,而沙尘层的激光雷达比为 28~37 sr,又小于 50 sr。因此,由 HSRL 法和 Fernald 法反演的 3 km 以下大气透过率有所不同,分别为 0.26 和 0.20。

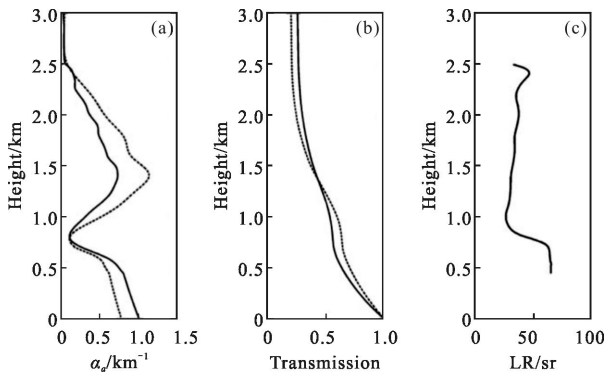


图 5 2015 年 4 月 2 日 HSRL 激光雷达观测结果

Fig.5 Results measured by HSRL on April 2nd, 2015

4 结论

研制了一台基于种子注入激光器和碘分子吸收滤光器的高光谱分辨率激光雷达。文中介绍了 HSRL 系统的基本原理、数据反演方法、系统结构,以及在大气透过率探测中的应用。观测结果显示,不同类型的气溶胶粒子以及云具有不同的物理和光学性质, Fernald 方法中假设的激光雷达比往往不符合实际情况,因此会产生较大的测量误差。高光谱分辨率激光雷达可以分别直接探测分子散射和气溶胶散射两种信号,避免了假设激光雷达比,从而实现大气光学参数的高精度定量探测。另外,反演得到的激光雷达比廓线可用于辅助分析大气中气溶胶粒子的成分和来源,为米散射激光雷达数据反演提供激光雷达比参考,有效降低大气透过率测量误差。

参考文献:

- [1] Shi Yuli, Yang Fengkai, Cao Nianwen. Study on inversion accuracy of aerosol optical depth with micropulse lidar in northern suburb of Nanjing [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(3): 372–376. (in Chinese)
- [2] Klett James D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. *Appl Opt*, 1981, 20(2): 211–220.
- [3] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 652–653.
- [4] Bösenberg Jens, Hoff Raymond. Plan for the implementation of the GAW aerosol Lidar Observation Network GALION [R]. GAW No. 178, 2007.
- [5] Wang Wei, Gong Wei, Mao Feiyue. et al. Long-term measurement for low-tropospheric water vapor and aerosol by Raman Lidar in Wuhan [J]. *Atmosphere*, 2015, 6: 521–533.
- [6] Fiocco G, DeWolf J B. Frequency spectrum of laser echoes from atmospheric constituents and determination of aerosol content of air[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1968, 25(3): 488–496.
- [7] Tang Lei, Wu Haibin, Sun Dongsong, et al. Design and calibration of the Fabry-Perot etalon in Rayleigh backscattering Doppler wind lidar [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(2): 283–288. (in Chinese)
- [8] Zheng Jun, Dong Jihui, Zhao Ming, et al. Design and optimization of Fabry-Perot etalon in 532 nm Doppler lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2014, 9(4): 316–322. (in Chinese)
- [9] Liu Zhishen, Chen Zhen, Yu Cuirong, et al. Doppler wind Lidar: from vehicle-mounted to space-borne [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2015, 10(2): 126–138. (in Chinese)
- [10] Huang Hanlu, Liu Dong, Yang Yongying, et al. Design of the high spectral resolution lidar filter based on a field-widened Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0913003. (in Chinese)
- [11] Gerstenkorn Sand Luc P. Atlas du spectre d'absorption de la molécule d'iode, 14 800–20 000 cm^{-1} [M]. Paris: National Centre of the Scientific Research, 1978.
- [12] Yokoyama Shuko, Yokoyama Toshiyuki, Araki Tsutomu, et al. A simple frequency lock of green YAG laser to Doppler-broadened spectrum of iodine molecules utilizing an acousto-optic frequency shifter [J]. *Meas Sci Technol*, 1998, 9(8): 1252–1258.