

新型车载式激光雷达探测对流层气溶胶

谢晨波, 毛敏娟, 岳古明, 戚福弟, 范爱媛, 周 军

中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031

摘 要 介绍了中国科学院安光所自行研制的新型车载式激光雷达的结构和主要技术参数, 给出了雷达数据的反演方法, 并利用它对合肥地区对流层的大气气溶胶进行了探测。测量结果表明, 该雷达具备昼夜连续观测对流层大气气溶胶的能力, 可以很好地反映气溶胶粒子的时间与空间分布特征。

主题词 激光雷达; 气溶胶; 消光系数; 对流层

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2006)11-1973-04

引 言

大气气溶胶是指悬浮在大气中直径为 $0.001 \sim 100 \mu\text{m}$ 的液体或固体微粒体系^[1]。虽然气溶胶在大气中的含量很低, 但它却扮演着十分重要的角色。一方面, 大气气溶胶可以通过吸收和散射太阳辐射直接扰动地-气系统的辐射平衡, 产生所谓的直接气候效应^[2]; 另一方面, 气溶胶粒子又可作为云的凝结核影响云的物理特性, 云量以及云的寿命, 产生所谓的间接效应^[3]。这两方面对于局地、区域乃至全球气候有着重要的影响^[4, 5]。此外, 大气气溶胶粒子对入射激光的散射作用使它成为激光大气传输的重要消光因子, 同时它对入射激光的吸收作用会加热大气从而导致热晕发生, 严重影响激光在大气中的传输, 因此气溶胶粒子也是激光大气传输研究中一个重要的大气光学参数。

发展光学探测手段是大气探测研究领域十分重要的工作^[6-8], 而激光雷达技术则是其中一项主要内容^[9-11]。激光雷达作为一种新型的大气气溶胶主动探测手段, 为我们提供了一种强有力的工具。激光雷达是通过分析激光的回波光信号从而得到大气气溶胶的物理特性。数十年来, 激光技术的不断发展为激光雷达大气气溶胶探测提供了所需要的光源, 另一方面, 信号探测和数据采集技术以及控制技术使得激光雷达在大气气溶胶的探测高度、空间分辨率、测量精度和时间上的连续观测等方面具有全面的优势, 是其他探测手段所不能比拟的。

本文首先叙述安徽光机所于2004年10月自行研制的车载式拉曼-米氏(Raman-Mie) 散射激光雷达(简称 RML 雷达)

的主要结构和技术参数, 然后给出 RML 激光雷达探测对流层大气气溶胶的数据处理方法, 最后对其测量结果进行分析 and 讨论。

1 RML 激光雷达结构和技术参数

激光雷达发射的激光在大气中传输时, 会与大气中的空气分子和气溶胶粒子产生散射和吸收作用, 通过接收和测量大气后向散射信号, 便可以提取出空气分子和气溶胶粒子光学参数的有关信息, 从而进一步获取气溶胶体后向散射系数或消光系数的垂直廓线。图1和表1分别给出了RML激光雷达的结构示意图和其技术参数。

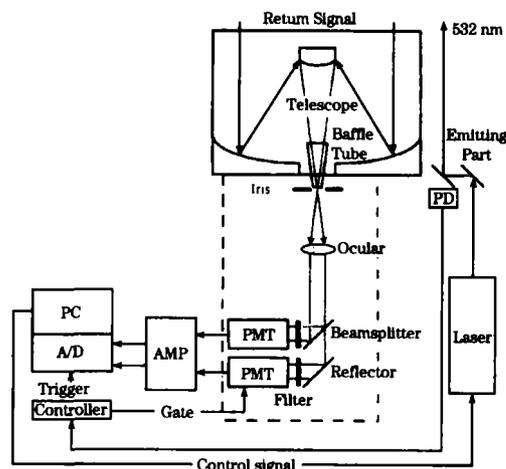


Fig 1 Schematic diagram of RML lidar

Table 1 Specifications of RML lidar system

Transmitter	Receiver and detector	Data acquisition and control
Laser: Nd:YAG type (CONTINUUM Powerlite8020)	Telescope: Cassegrain type (Meade 16" Lx200GPS)	Amplifier: PHILLIPS model777
Wavelength 532 nm	Clear perture 400 mm	Gain 50
Pulse energy 150 mJ	Field of view 0.3~3 mrad	Bandwidth 200 MHz
Pulse stability $\pm 3\%$	Filter: Barr Inc.	Noise 25 μ V
Repetition ratio 20 Hz	FWHM 0.3 nm	A/D Card: CompuScope1610
Divergence < 0.45 mrad	Detector: H7680/H7680-01	Sampling rate 10 MHz \cdot s ⁻¹
Pulse width 6~8 ns	Quantum efficiency 20%	Resolution 16 bit
		PC: WS-855

从图 1 中可以看出, RML 激光雷达主要有三部分组成: 激光发射单元、信号接收与探测单元以及数据采集与控制单元。

RML 激光雷达的激光发射单元主要包括激光器和发射组镜。在工控机运行控制程序的指令下, Nd:YAG 激光器以 20 Hz 的重复频率发射波长 532 nm 的激光, 经过发射组镜最终由望远镜转轴上的反射镜发射到大气中。

RML 激光雷达信号接收与探测单元的主要功能是接收大气回波光信号, 并将其导入相应的后继光学通道, 便于被光电倍增管探测。RML 激光雷达采用 ϕ 400 mm 口径卡塞格林型号望远镜接收 532 nm 大气后向散射光回波信号。该望远镜的主副镜均镀有超高反射率膜层 UHTC, 对 532 nm 波长的透过率达到 90% 以上。被望远镜接收的回波光信号首先经过遮光筒, 然后通过 0.3~3 mrad 可调视场光阑和目镜, 最后被分束镜分成 15% 和 85% 两束光, 前者反射至低层探测通道, 用于测量 4 km 以下的气溶胶; 后者则被全反镜反射入高层探测通道, 用于测量 2 km 以上的气溶胶。激光雷达后继光路中遮光筒和可调视场光阑的主要作用都是限制望远镜的接收视场, 以减少白天探测时进入激光雷达接收单元的背景杂散光, 提高雷达探测的信噪比。

进入高低层探测通道的光信号通过带宽为 0.3 nm 的滤光片后, 分别被常开型 (Normal on) 和常闭型 (Normal off) 的光电倍增管探测, 完成光信号到电信号的转变过程。常开型的光电倍增管是指通常状况下其始终处于倍增状况, 任何时间进入阴极面的光信号都将被放大转换为电信号; 而常闭型则恰恰相反, 通常处于关闭状况, 对接收的光信号没有响应。只有在输入门控脉冲时间内的光信号, 才能够被倍增转换为电信号^[12]。常闭型光电倍增管正是由于可以利用其门控功能来避免近距离强回波信号导致光电倍增管的“饱和现象”, 广泛应用于激光雷达的远距离测量。

RML 激光雷达数据采集与控制单元主要包括: 放大器, 采集卡以及主波门控控制器。其主要功能是对光电倍增管输

出的微弱电信号进行线性放大、模数转换采集和数据存储, 并控制整个激光雷达的工作流程。该激光雷达采用 50 倍的双通道线性放大器, 16 bit 双通道标准 PCI 插槽形式 AD 采集卡。主波门控控制器主要有主波控制电路、光电倍增管门控控制电路和主控工控机以及相应的操作程序软件组成, 确保 RML 激光雷达激光发射、回波信号接收、数据采集、传送和存储步调一致地工作。

2 RML 激光雷达数据处理方法

当激光雷达发射的激光在大气中传输时, 其接收单元探测高度 z 处的大气后向散射回波信号 (包括 Mie 氏散射和 Rayleigh 散射) 可由以下激光雷达方程表示^[13]

$$P(z) = Cz^{-2} [\beta_m(z) + \beta_p(z)] \cdot \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_m(z') + \alpha_p(z')] dz' \right\} \quad (1)$$

其中, $P(z)$ 为距离 z 处大气后向散射回波信号的功率 (W); C 为激光雷达仪器常数 ($W \cdot km^3 \cdot sr$), 它与激光的初始能量、系统光学效率、望远镜有效接收面积和探测器量子效率等有关; $\alpha(z)$ 和 $\beta(z)$ 分别为距离 z 处大气的消光系数 (km^{-1}) 和体后向散射系数 ($km^{-1} \cdot sr^{-1}$), 下标 m 和 p 分别代表空气分子和气溶胶粒子。

由于以上激光雷达方程中同时含有气溶胶消光系数 $\alpha(z)$ 和体后向散射系数 $\beta(z)$ 两个未知数, 同时由于激光雷达系统常数 C 不易直接准确测量, 故常通过对回波信号进行归一化或相对定标的办法求解方程。目前, 大多数激光雷达都采用比较成熟的 Fernald 方法来反演对流层气溶胶消光系数或体后向散射系数^[13]。

事先假设已知某高度 z_c 处大气气溶胶粒子和空气分子消光系数, 则 z_c 处以下各高度的气溶胶粒子消光系数 (后向积分) 为^[13]

$$\alpha_p(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp[2(S_1/S_2 - 1) \int_z^c \alpha_m(z') dz']}{\alpha_p(z_c) + (S_1/S_2) \alpha_m(z_c) + 2 \int_z^c X(z'') \exp[2(S_1/S_2 - 1) \int_z^c \alpha_m(z') dz'] dz''} \quad (2)$$

而 z_c 处以上各高度的气溶胶粒子消光系数 (前向积分) 为^[13]

$$\alpha_p(z) = -\frac{S_1}{S_2} \alpha_m(z) + \frac{X(z) \cdot \exp[-2(S_1/S_2 - 1) \int_z^c \alpha_m(z') dz']}{\alpha_p(z_c) + (S_1/S_2) \alpha_m(z_c)} - 2 \int_z^c X(z'') \exp[-2(S_1/S_2 - 1) \int_z^{z''} \alpha_m(z') dz'] dz'' \quad (3)$$

上式中, $X(z) = P(z)z^2$ 。 $S_1 = \alpha_p(z)/\beta_p(z)$ 是气溶胶消光后向散射比, 它依赖于气溶胶粒子的尺度谱分布和折射指数。对于背景期的平流层和对流层气溶胶, S_1 一般设为 50^{14} , 这意味着气溶胶粒子的尺度谱和化学组成不随高度变化, 气溶胶粒子散射特性的变化仅仅是由于其数密度随高度的改变。对应空气分子的消光后向散射比 $S_2 = \alpha_m(z)/\beta_m(z) = 8\pi/3$ 。空气分子的后向散射系数 $\beta_m(z)$ 使用美国标准大气模式获得空气分子密度的垂直分布廓线, 再由分子的 Rayleigh 散射理论得到。标定高度 z_c 是通过选取近乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在高度位置确定。在这个高度上 $X(z)/\beta_m(z)$ 的数值最小, 此高度一般在对流层顶附近。其边界值, 532 nm 波长的气溶胶体后向散射系数 $\beta_p(z_c)$ 则由气溶胶散射比 $R(z_c) = 1 + \beta_p(z_c)/\beta_m(z_c) = 1.01$ 来确定。

3 RML 激光雷达测量结果和讨论

RML 激光雷达探测对流层大气气溶胶一般在晴朗无低云的夜晚或白天进行。首先将 RML 激光雷达调整为垂直状态, 设置好适当的接收视场和门控时间以及光电倍增管的增益大小, 然后向大气发射 10 000 发激光脉冲并采集其回波光信号, 最终利用反演气溶胶软件得出其体后向散射系数或消光系数的垂直廓线。整个测量过程大约持续 10 min 左右。RML 激光雷达测量气溶胶垂直廓线的空间分辨率为 30 m。

3.1 RML 激光雷达对比测量结果

图 2 显示的为 2004 年 9 月 29 日夜晩, 在合肥地区 RML 激光雷达与本所另一台偏振-米氏散射激光雷达 (PML) 进行的对流层气溶胶对比测量结果。比较两垂直廓线不难看出, 整体上两者吻合得很好, 特别是对于不同高度上的一些气溶胶层结和高层卷云都表现得很一致。而 10 km 以上气溶胶小结构的不相吻合主要是由于两激光雷达在测量时间上的差别

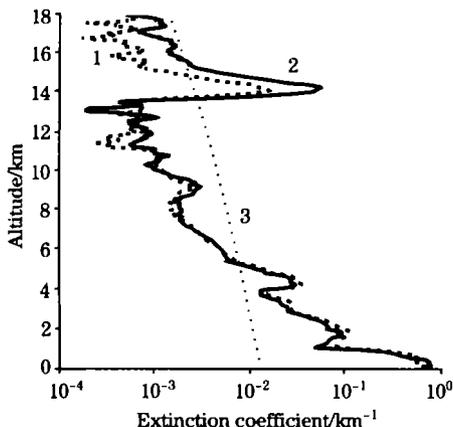


Fig 2 The aerosol extinction profiles measured by RML lidar (line) and PML lidar (dashed) 1: PML; 2: RML; 3: Molecule

以及反演气溶胶过程中干净点选取位置的不同引起。由于 PML 激光雷达曾与其它气溶胶观测手段进行对比试验并证明其测量结果正确可靠, 因此图 2 中的对比结果也反映了 RML 激光雷达测量对流层气溶胶数据的准确可靠。

图 3(a)~图 3(c) 分别给出了 2004 年 10 月 27 日 RML 激光雷达测量的 532 nm 波长对流层大气气溶胶的消光系数垂直廓线, 以及无线电气象探空仪测量的大气相对湿度和温度垂直廓线。作为比较, 图 3(a) 中还一并给出了 532 nm 波长空气分子 Rayleigh 消光系数垂直廓线(虚线)。

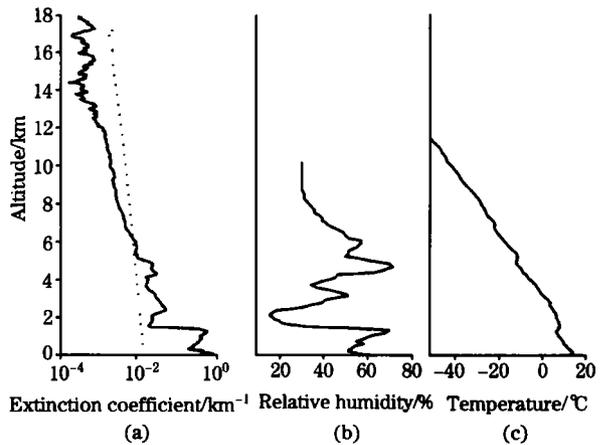


Fig 3 Profiles of tropospheric aerosol extinction (a), relative humidity(b) and temperature(c) on Oct. 27, 2004

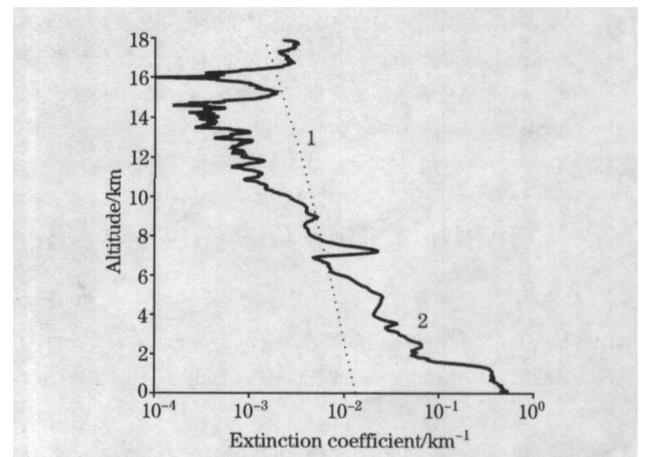


Fig 4 Profile of aerosol extinction by RML lidar in daytime 1: Molecule; 2: Aerosol

从图 3(c) 中的温度垂直廓线可以看出, 该天在接近 1.5 km 处有一明显的逆温层, 它为边界层与自由大气的界面。该逆温层存在高度的相对湿度和气溶胶消光都急剧减小至极小值。从边界层向上至 6 km 高度范围内的气溶胶消光系数峰值和相对湿度的峰值都一一对应, 甚至于一些精细结构两者都能够很好的吻合。这些结果表明, 对流层中的水汽和气

溶胶是密切相关的两个大气参数, 它们都被束缚在由逆温决定的大气边界层内。湿性气溶胶粒子较干性气溶胶粒子具有更大的消光特性, 气溶胶消光系数垂直廓线与相对湿度垂直廓线呈现正相关关系。图 3 中 RML 激光雷达测量数据与气象探空测量数据的较好吻合也从另一方面证明该激光雷达测量气溶胶数据的正确性和可靠性。

3.2 RML 激光雷达白天测量结果

除了夜晚, RML 激光雷达还可以对白天的大气气溶胶进行观测, 如图 4 所示。此次测量的时间为 2004 年 10 月 15 日 14:39 分。从测量结果可以看出, 该天气溶胶消光系数的

整体分布较为均匀, 在近地面 1.5~2 km 高度范围有一明显的边界层, 而 7~8 km 的消光系数峰值主要是由于少量卷云的影响。虽然在高度 11 km 以上由于白天天空辐射的影响, 激光雷达数据信噪比减小, 其消光系数出现一定程度的振荡。但还是可以从整体上反映出气溶胶消光系数的空间分布特征。

通过以上夜晚和白天的实际测量与对比试验结果不难看出, RML 激光雷达具备了通过对流层大气气溶胶进行昼夜连续观测的能力, 并且具有很好的测量精度。

参 考 文 献

- [1] ZHANG Cheng-chang, ZHOU Wen-xian(章澄昌, 周文贤编著). Introduction to Aerosol(大气气溶胶教程). Beijing: Meteorologic Press(北京: 气象出版社), 1995.
- [2] YIN Hong, HAN Zhi-gang(尹宏, 韩志刚). Acta Meteorologica Sinica(气象学报), 1989, 47(1): 118.
- [3] SHEN Shao-hua(申绍华). Chinese Journal of Atmospheric Sciences(大气科学), 1991, 15(6): 89.
- [4] LIU Yi, WANG Ming-xing, ZHANG Ren-jian(刘毅, 王明星, 张仁建). Climatic and Environmental Research(气候与环境研究), 1999, 4(4): 406.
- [5] LIU Qiang, WANG Ming-xing, LI Jing, et al(刘强, 王明星, 李晶, 等). China Power Science and Technology(中国粉体技术), 1999, 5(3): 17.
- [6] QIN Min, XIE Pin-hua, LIU Jian-guo, et al(秦敏, 谢品华, 刘建国, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(9): 1463.
- [7] HUANG Zhong-hua, WANG Jun-de(黄中华, 王俊德). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2002, 22(2): 235.
- [8] GAO Jian-bo, HU Xin-yao, HU Dong-cheng(高建波, 胡鑫尧, 胡东成). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2001, 21(5): 599.
- [9] HU Huan-ling, WU Yong-hua, XIE Chen-bo(胡欢陵, 吴永华, 谢晨波). Research of Environmental Sciences(环境科学研究), 2004, 17(1): 59.
- [10] XIE Chen-bo, HAN Yong, LI Chao, et al(谢晨波, 韩永, 李超, 等). High Power Laser and Particle Beams(强激光与粒子束), 2005, 17(7): 971.
- [11] ZHANG Yi-chao, HU Huan-ling, TAN Kun, et al(张寅超, 胡欢陵, 谭锟, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2004, 24(8): 1025.
- [12] Kume Hidehiro, Kazuyoshi, Sakai Shiro, et al(久米英浩, 冈静和芳, 酒井四郎, 等). The Basic Theory and Application of Photonmultiplier(光电倍增管基础及应用). Hamamatsu Photonics K. K. Press(日本静冈县: 滨松光子学株式会社出版印刷研究所), 1995.
- [13] Frederrick G F. Appl. Opt., 1984, 23: 652.
- [14] Yasuhiro Sasano. Appl. Opt., 1996, 35: 4941

New Mobile Lidar for the Measurement of Tropospheric Aerosol

XIE Chen-bo, MAO Min-juan, YUE Gu-ming, QI Fu-di, FAN Ai-yuan, ZHOU Jun

Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract A new mobile lidar system has been developed for measuring tropospheric aerosol. Its main structure and specification as well as lidar data processing method are described. The results of measurement over Hefei city show that this lidar has ability to gain profiles of tropospheric aerosol day and night, and to manifest aerosol temporal and spatial distributions with high precision.

Keywords Lidar; Aerosol; Extinction; Troposphere

(Received Aug. 28, 2005; accepted Dec. 8, 2005)