

激光雷达探测的大气气溶胶空间二维分布

陈 敏¹, 孙东松², 顾 江³, 沈法华¹, 夏海云¹

(1. 苏州大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215006;

2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031;

3. 常熟理工学院 物理与电子科学系, 安徽 常熟 215500)

摘 要: 提出了通过改变激光束仰角的斜程探测得到气溶胶空间二维分布的方案。利用自行研制的 Mie 散射激光雷达系统对合肥西郊上空的大气气溶胶进行了连续的斜程探测, 并通过相应的数据处理方法, 得到气溶胶消光系数二维分布图及其随时间的演变图。给出了 2005 年 12 月 2 日的典型探测结果, 这些结果不仅全面直观地反映了大气空间某一纵向剖面的气溶胶消光系数分布情况, 而且清楚地显示了这一分布随时间的整体变化趋势, 这对于实时的大气环境监测具有重要意义。

关键词: 激光雷达; 消光系数; 斜程

中图分类号: TN958.98 文献标识码: A 文章编号: 1007-2276(2007)03-0369-04

Two-dimensional distribution of aerosol measured by lidar

CHEN Min¹, SUN Dong-song², GU Jiang³, SHEN Fa-hua¹, XIA Hai-yun¹

(1. The School of Physical Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215006, China;

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

3. Department of Physics and Electronics Science, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract: A scheme of two-dimensional space distribution of aerosol is put forward, which obtained from slant-range-detection by changing the laser's elevation angle. Atmospheric aerosol extinction coefficient at west suburb of Hefei was continuously measured with a Mie scattering lidar system developed by ourselves. Some two-dimensional distributions of aerosol extinction coefficient and their evolving figures were obtained by corresponding data processing means. The classical measurement results of Dec 2, 2005 are given. The results not only roundly reflect the distribution of aerosol extinction coefficient of some longitudinal cross section in atmosphere space, but also obviously display the integral changing tendency of this distribution. And it will be significant for real-time monitoring of atmospheric environment in future.

Key words: Lidar; Extinction coefficient; Slant range

0 引 言

大气气溶胶是指悬浮在大气中直径为 0.001~100 μm 的液体或固体微粒体系。其自然源为火山、沙尘暴、森林和草原等。人类的活动, 诸如工业、交通建

筑、农业等也会产生气溶胶粒子。这些粒子通过吸收和散射太阳辐射以及地球的长波辐射而影响地球-大气系统的辐射收支, 同时它作为凝结核参与云、雨的形成。因此, 精确测量与研究大气气溶胶的含量、散射和吸收特性及其时空分布已成为气候、环境等研究领域十分关注的问题^[1]。

收稿日期: 2006-10-20; 修订日期: 2006-12-10

作者简介: 陈敏(1980-), 女, 江苏张家港人, 硕士生, 主要从事激光雷达大气遥感方面的研究。Email: xiaominu2@tom.com

导师简介: 孙东松(1962-), 男, 江苏江阴人, 研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事多普勒测风激光雷达的研究。Email: dssun@ai ofm.ac.cn

通过遥感手段来获取气溶胶的时空分布具有很好的应用前景。而激光雷达在大气气溶胶的探测高度、空间分辨率、空间分布的实时监测和测量精度等方面均具有优势,为气溶胶和云的探测提供了一种有效、可靠的手段。通过改变激光束仰角的斜程探测,可以得到气溶胶的二维空间分布及其随时间的演变图。

文中介绍了自行研制的 Mie 散射激光雷达系统的结构和主要技术参数,以及气溶胶二维分布探测的数据处理方法,并给出了合肥地区对流层气溶胶测量的若干典型结果。

1 Mie 散射激光雷达系统

1 064 nm Mie 散射激光雷达系统从整体上可分为激光发射单元、二维扫描单元、回波信号接收单元、信号探测和数据采集单元及控制单元五部分。图 1 是该激光雷达系统的原理框图,主要的技术参数见表 1。

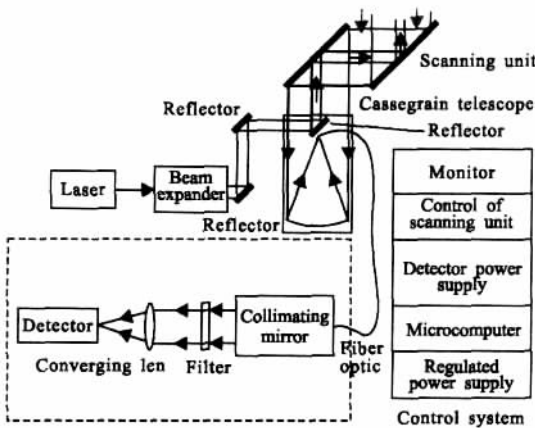


图 1 1 064 nm Mie 散射激光雷达结构示意图
Fig.1 Diagram of the Mie lidar system

该系统采用的 Nd:YAG 激光器的中心波长是 1 064 nm,工作在此波长,激光输出功率较大。单脉冲输出能量为 170 mJ,脉冲重复频率为 50 Hz,可以节省探测时间,有利于捕捉气溶胶或云层的变化。激光发散角为 0.5 mrad,光束经 8 倍扩束镜扩束准直后,再由反射镜调节激光发射方向使其进入大气。

二维扫描系统是由两个镀有 1 064 nm 波长全反的介质膜平面反射镜、水平旋转机构和垂直旋转机构组成的大口径光学潜望式结构。通过软件控制可以实现全方位自动扫描,水平扫描角度:0°~360°,垂直扫描角度:0°~180°,角速度大于 5 %/s。利用它可以连续进行不同角度的斜程探测,从而得到气溶胶的二维空间分布及其随时间的演变图。

表 1 Mie 激光雷达系统参数
Tab.1 Parameters of the Mie lidar

	Item	Parameter
Transmitter	Laser wavelength/nm	1 064(Nd:YAG)
	Pulse energy/mJ	170
	Pulse repetition rate/Hz	50
Scanner	Azimuth	0°~360°
	Elevation	0°~180°
Receiver	FOV/mrad	150
	Telescope diameter/mm	300
	Interference filter bandwidth/nm	0.55
	Detector	Quantum efficiency

接收望远镜采用有效通光口径为 300 mm 的抛物面镜,该主镜镀有 1 064 nm 波长全反的介质膜,反射率高达 99%。被望远镜接收的大气后向散射回波信号耦合至光纤,再由光纤导入至准直镜后成为平行光,经过窄带滤光片压制背景光后由光子计数探测器接收。光子计数探测器将光信号转换为电信号后,输入光子记数卡内,最后由工控机中的主程序对采集的数据进行储存和处理。

2 激光雷达方程及其反演

在一次散射的前提下,Mie 散射型激光雷达方程表示为:

$$P(z)=P_0 C_z^{-2} [\beta_m(z)+\beta_a(z)] \exp\left\{-\int_0^z 2[\sigma_m(z)+\sigma_a(z)] dz\right\} \quad (1)$$

式中: P(z)为高度 z 处大气的后向散射回波信号; P₀(z)为激光发射能量; C 为激光雷达系统常数; β_m(z)和 β_a(z)分别为高度 z 处分子和气溶胶粒子的后向散射系数; σ_m(z)和 σ_a(z)分别为高度 z 处分子和气溶胶粒子的消光系数。

对此激光雷达方程,反演方法主要有 Klett^[2-3]和 Fernald^[4]两种。文中采用 Fernald 方法反演测量数据。其后向积分和前向积分分别为:

$$\sigma_a(z)=-\frac{S_a}{S_m} \cdot \sigma_m(z)+\frac{X(z) \cdot \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right) \int_z^z \sigma_m(z) dz\right]}{\sigma_a(z_c)+\frac{S_a}{S_m} \sigma_m(z_c)}+2 \int_z^z X(z) \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right) \int_z^z \sigma_m(z) dz\right] dz \quad (2)$$

$$\sigma_a(z) = \frac{S_a}{S_m} \cdot \sigma_m(z) + X(z) \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \sigma_m(z) dz \right] / \left(\frac{X(z)}{\sigma_a(z_c) + \frac{S_a}{S_m} \sigma_m(z_c)} - 2 \int_z^{z_c} X(z) \times \exp \left[-2 \left(\frac{S_a}{S_m} - 1 \right) \int_z^{z_c} \sigma_m(z) dz \right] dz \right) \quad (3)$$

式中: $X(z) = P(z)z^2$; $S_a = \frac{\sigma_a(z)}{\beta_a(z)}$ 是气溶胶消光后向散射比, 其值与气溶胶粒子的化学成分和尺度谱分布等参数有关。文中取 $S_a = 50^{[9]}$, 表示气溶胶的化学组成和尺度谱不随高度改变。与之对应的空气分子的消光后向散射比为 $S_m = \frac{\sigma_m(z)}{\beta_m(z)} = \frac{8\pi}{3}$ 。空气分子的消光系数 $\sigma_m(z)$ 可使用美国标准大气模式获得; z_c 为标定高度, 通过选取几乎不含气溶胶粒子的清洁大气层所在的高度来确定, 在这个高度上 $\frac{X(z)}{\beta_m(z)}$ 的值应该最小。1 064 nm 波长的气溶胶后向散射系数 $\beta_a(z_c)$ 由设定的气溶胶散射比 $R(z_c) = 1 + \frac{\beta_a(z_c)}{\beta_m(z_c)} = 1.08^{[6]}$ 来确定。

对于标定高度 z_c 处以下各高度上的气溶胶粒子消光系数的求解采用 Fernald 后向积分, z_c 处以上各高度上的气溶胶粒子采用 Fernald 前向积分。

3 斜程测量和数据处理方法

由于该系统装有带宽为 0.55 nm 的滤光片, 能有效地抑制白天辐射背景的干扰, 提高激光雷达接收回波信号的信噪比, 因此测量在晴朗、能见度高的白天和夜晚均能进行。激光雷达从仰角 34° 开始探测, 仰角的增加幅度为每次 2°, 到 90° 为一个周期。一个周期结束后, 二维扫描系统自动复位, 继续从 34° 开始进行下一个周期的探测, 一个周期持续时间为 30 min。在每次测量过程中 Nd:YAG 激光器发射约 3 000 个激光脉冲, 设定的最大探测距离为 15 km, 通过分析这些激光的回波信号, 从而得到大气气溶胶的物理特性。

激光雷达实际测得的回波信号中除了大气后向散射信号, 还包含有太阳、天空的光辐射以及光电探测系统中的暗电流噪声和热噪声等, 因此, 在处理这些原始数据时必须先进行背景信号的去除。根据探测的数据, 将 13~15 km 的回波信号的平均值作为背景信号, 从原始信号中予以去除。其次, 该激光雷达虽然

是共轴系统, 理论上只要接收视场角大于激光束发散角, 即可获得重叠因子为 1, 但接收望远镜中存在反射镜(如图 1 所示), 使得近距离处望远镜不能全部接收激光大气回波信号, 故对这部分区域要进行归一化的几何重叠因子修正^[7-8]。最后利用五点三次平滑公式对等距离上的观测数据进行平滑处理, 以降低大气起伏引起回波光子数的起伏。

原始回波信号在经过以上三步处理后, 可沿斜程方向^[9]使用 Fernald 方法进行反演, 计算出不同仰角方向上气溶胶消光系数的廓线图。消光系数对应着探测高度的气溶胶浓度, 消光系数越大, 在该高度上的气溶胶浓度就越大。

4 测量结果与分析

实验地点位于合肥市西郊的董铺岛上, 观测时间从 2005 年 11 月 23 日到 2005 年 12 月 3 日。利用 Mie 散射激光雷达对该观测站的大气气溶胶光学特性进行了连续的斜程探测, 用 Fernald 方法处理了测量数据。文中选择了一天的观测数据进行分析。

图 2 是 2005 年 12 月 2 日上午, 激光束从仰角 34°~90° 斜程扫描得到的气溶胶消光系数分布图。

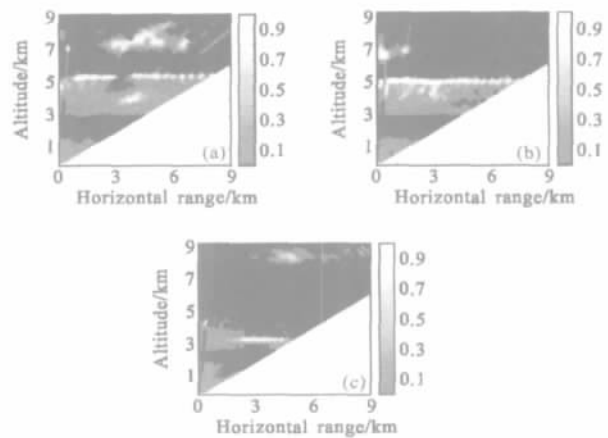


图 2 气溶胶二维空间分布图

Fig.2 Two-dimensional distribution of aerosol extinction coefficients

图 2(a)是上午 6:30~7:00 的测量结果。可以看到, 从地面到 1.7 km 高度范围内存在一气溶胶层, 其消光系数的最大值在 0.1 km^{-1} 左右。在 3~5.3 km 范围内明显存在一较厚的气溶胶层, 富含大量的气溶胶粒子, 其浓度相对于地表那层气溶胶要大得多, 并在 5.3 km 位置处消光系数达到峰值, 其值为 1 km^{-1} 。图中明显的特点是即使在对流层的下部 2~3 km 高度区域也往往会出现一洁净层, 其消光系数明显减小, 说明此高度范围内几乎

不存在气溶胶粒子。这些都反映了气溶胶浓度垂直分布结构的复杂性。而在同一高度上,气溶胶消光系数大致相同,这表明水平方向上气溶胶分布比较均匀。

图 2(b)是 7:10~7:40 的测量结果,3~5 km 处的气溶胶层变化不大,只是消光系数的峰值由原来的 5.3 km 降至 5 km,说明短时间内气溶胶变化不很明显。

图 2(c)是上午 11:10~11:40 的测量结果。垂直高度 3~4 km 内仍存在一气溶胶层,但相对于 4 个小时前,这层气溶胶的浓度和厚度都有所减小,其消光系数的峰值位置也下降至 3.5 km 高度附近。8 km 处的云层厚度也降低至 600 m 左右。这是由于白天太阳辐射、空气垂直对流等影响,对流层中下部气溶胶随时间演变程度较大。

5 结 论

通过介绍 Mie 散射激光雷达测量大气气溶胶的方法和比较分析测量结果,可以得出,连续进行不同仰角的斜程探测,能够得到气溶胶二维分布图。该图更全面地反映了大气空间某一纵向剖面的气溶胶消光系数分布情况,非常直观。如果将连续几个周期测量到的二维分布图制作成动态画面,能清楚地展示气溶胶及云的空间分布随时间的变化情况,使观测者能掌握整体的变化趋势,这对于实时大范围的环境监测具有重要意义。

参考文献:

[1] LIU Yi, WANG Ming-xing, ZHANG Ren-jian. The present

(上接第 368 页)

程), 2006, 35(6): 687- 690.

- [7] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23(5): 652- 653.
- [8] KUNZ G J, LEEUW de G. Inversion of lidar signals with the slope method[J]. Appl Opt, 1993, 32(18): 3249- 3256.
- [9] XIE Chen-bo, HAN Yong, LI Chao, et al. Mobile lidar for visibility measurement[J]. High Power Laser And Particle Beams(谢晨波, 韩永, 李超, 等. 车载式激光雷达测量大气水平能见度. 强激光与粒子束), 2005, 17(7): 971- 975.

status of aerosol research in China [J]. Climatic and Environmental Research(刘毅, 王明星, 张仁健. 中国气溶胶研究进展. 气候与环境研究), 1999, 4(4): 406- 414.

- [2] KLETT J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Appl Opt, 1981, 20(2): 211- 220.
- [3] YANG Zhao, SUN Dong-song, LI Qiang. Retrieval of atmosphere extinction coefficient for imaging laser radar[J]. Infrared and Laser Engineering(杨昭, 孙东松, 李强. 成像激光雷达大气消光系数的反演方法. 红外与激光工程), 2004, 33(3): 239- 242.
- [4] FERNALD F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments[J]. Appl Opt, 1984, 23 (5): 652- 653.
- [5] TAKAMURA T, SASANO Y. Ratio of aerosol backscatter to extinction coefficients as determined from angular scattering measurements for use in atmospheric lidar applications[J]. Optical and Quantum Electronics, 1987, 19: 293- 302.
- [6] LEFRERE J. Lidar survey of the post Mt. St. Helens stratospheric aerosol at Haute Province Observatory [J]. Appl Opt, 1981, 20 (7): 1116- 1117.
- [7] TOMINE K, HIRAYAMA C, MICHIMOTO K, et al. Experimental determination of the crossover function in the laser radar equation for days with a light mist[J]. Appl Opt, 1989, 28(12): 2194- 2195.
- [8] DHO S W, PARK Y J, KONG H J. Experimental determination of ageometric form factor in the lidar equation for an inhomogeneous atmosphere[J]. Appl Opt, 1997, 36(24): 6009- 6010.
- [9] YANG Yang, ZHAO Yuan, QIAO Li-jie, et al. Atmosphere transmission property of 1.06 μm laser[J]. Infrared and Laser Engineering(杨洋, 赵远, 乔立杰, 等. 1.06 μm 激光的大气传输特性. 红外与激光工程), 1999, 28(1): 15- 19.

- [10] WHITEMAN D N, MELFI S H, FERRARE R A. Raman lidar system for the measurement of water vapor and aerosols in the Earth's atmosphere[J]. Appl Opt, 1992, 31(16): 3068- 3082.
- [11] HAN Yong, XIE Chen-bo, RAO Rui-zhong, et al. Comparison and analysis of two visibility detecting methods based on optical scatter technology[J]. Infrared and Laser Engineering(韩永, 谢晨波, 饶瑞中, 等. 基于光散射技术的两种能见度探测方法的比较分析. 红外与激光工程), 2006, 35(2): 173- 176.