

文章编号: 0253-2239(2004)08-1015-5

车载测污激光雷达对大气边界层气溶胶的斜程探测*

张改霞 张寅超 胡顺星 刘小勤 杨陆军 陶宗明 吕勇辉 曹开法
谭 赜 邵石生 胡欢陵

(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, 合肥 230031)

摘要: 利用自行研制的车载测污激光雷达系统(AML-1)对大气边界层气溶胶进行了斜程探测,并给出了与之相应的数据处理方法。将该雷达相近时间内斜程测量与垂直测量的数据进行对比,结果表明此斜程探测及数据处理方法是合理可行的。文中列举了某斜程方向(20°天顶角)气溶胶随时间的演化图,以及某垂直剖面内气溶胶消光系数二维扫描图,这些典型结果很直观的反映了气溶胶时、空分布情况,对实现连续、实时、大范围污染监测有重要意义。

关键词: 大气光学; 激光雷达; 气溶胶; 斜程探测; 大气边界层

中图分类号: P401 文献标识码: A

Slant Measurements of Atmospheric Boundary Layer Aerosol with Mobile Lidar

Zhang Gaixia Zhang Yinchao Hu Shunxing Liu Xiaoqin Yang Lujun Tao Zongming
Lü Yonghui Cao Kaifa Tan Kun Shao Shisheng Hu Huanling

(Atmospheric Optics Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

(Received 2 June 2003; revised 28 September 2003)

Abstract: Aerosol measurements in slant range in atmospheric boundary layer are performed by using a mobile pollution detecting lidar system (AML-1). The corresponding data processing method is introduced. By comparing the adjacent measurements performed by this mobile lidar in slant range and vertical range, the results show great feasibility of the slant-range measurement and data processing method. Two typical examples, aerosol extinction coefficients changing with height and time in 20° zenith angle and one two-dimensional scanning, are presented. These graphs show apparent space-time distribution of aerosol extinction coefficients, which is important to realize continual, simultaneous, large-ranged atmospheric pollution detection.

Key words: atmospheric optics; lidar; aerosol; slant-range measurements; atmospheric boundary layer

1 引 言

大气气溶胶是指悬浮在大气中的直径在 0.001~100 μm 的液体或固体微粒体系,是大气环境中组成复杂、危害较大的污染物之一。由于气溶胶在强迫辐射、云物理和气溶胶表面的非均相化学过程中的

重要作用^[1,2],使得气溶胶研究一直是气候、环境和大气科学等研究领域十分关心的问题,为各国所重视。尤其是大气边界层气溶胶,具有浓度大、粒子尺度谱范围宽、时空分布不确定性和粒子多变性^[3]等特点,而且它还对人体和其它生物的生理健康有着重要的影响。

激光雷达为环境监测提供了有力的探测工具。然而简单的垂直探测和固定地点探测已不能满足人们对气溶胶的认识需求,对气溶胶进行斜程探测,不

* 国家 863 计划信息获取与处理技术主题资助课题。

E-mail: gxzhang@aiofm.ac.cn

收稿日期:2003-06-02;收到修改稿日期:2003-09-28

仅可得到该方向上的气溶胶分布,而且通过不同仰角和方位角的测量,可得到气溶胶的二维分布或三维立体分布。本文介绍了自行研制的车载测污激光雷达系统以及斜程探测的数据处理方法,并给出了典型结果。

2 车载测污激光雷达系统

根据环保领域的要求,安徽光学精密机械研究所大气光学实验室于2000年建成我国第一台车载激光雷达系统(AML-1),主要用于对流层下部尤其是大气边界层污染物(SO_2 、 NO_2 、 O_3 和漂尘)的探测。该系统安装在改装过的小型客车上,便于野外测量并具有高灵敏度、高时空分辨能力、以及连续、实时、大跨度探测等优点,而且测量数据可靠、整体结构稳定性好。其主要由发射系统、方位和俯仰扫描装置、接收系统、数据采集及控制系统四大部分组成。图1是车载测污激光雷达系统的原理框图。

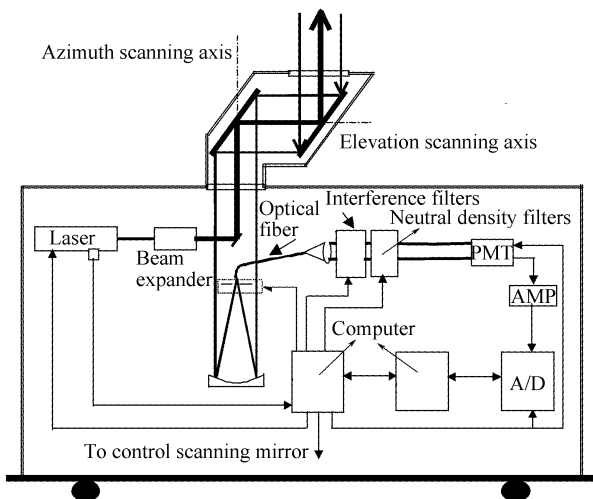


Fig. 1 Schematic diagram of mobile Lidar system

激光发射系统由激光光源、扩束镜和导光镜组成。测量气溶胶时,该系统采用Nd:YAG固体激光器的倍频光波长(532 nm)作为探测光,脉冲能量不低于80 mJ,重复频率10 Hz,光束发散角约为1 mrad。激光光束经12倍扩束镜扩束准直后,由导光镜导向大气。

接收系统主要由接收望远镜、小孔光阑、光纤、输出光准直器、滤光片和光电倍增管等组成。大气回波信号由大口径(直径300 mm)近牛顿式接收望远镜接收,在其焦平面上,放置不同直径大小的小孔光阑(视场角为0.2~1.7 mrad),起限制视场角的作用。光纤将信号导向准直器,变成平行光束,再经过超窄带、高光谱透过率滤光片滤波(抑制天空背景

噪声)后,由低噪声的光电倍增管将光信号转换成电信号输出。

从光电倍增管出来的弱信号,经前置放大器放大后送到Jv52014、12 bit数据采集卡和计算机,对信号进行采集和处理。

车载测污激光雷达系统最大的特点是采用了大口径、高精度三维空间扫描装置,潜望式设计,结构合理,大大减小了扫描系统的体积、重量和研制成本,并具有更好的稳定性和可靠性,而且能进行俯仰和方位转动。水平扫描角度: $-180^\circ \sim +180^\circ$,垂直扫描角: $-10^\circ \sim +100^\circ$,角速度大于 $5^\circ/\text{s}$ 。因此我们可利用它进行不同角度的斜程探测和扫描,进而可得到气溶胶的二维和三维空间分布。

3 斜程探测及数据处理方法

为了提高信噪比,我们不仅在系统设计中采用了12倍扩束镜(限制激光束的发散角)、小孔光阑(很大程度上限制了天空背景噪声)和高透射窄带滤光片(抑制工作波长以外的光谱干扰),还在每组测量过程中接收5000~10000个脉冲信号,利用信号良好的时间相关性和噪声的时间不相关性,把深埋于噪声中的信号提取出来^[4,5]。斜程测量的数据处理方法分为四步:

1) 从各阶段测量的原始数据中分别扣除天空背景、接收电子仪器的暗电流噪声和热噪声等产生的背景信号,从而得到实际的大气后向散射回波信号。我们一般采取13~15 km的回波信号的平均值作为背景信号。

2) 虽然该系统属于共轴系统,但由于接收系统中有导光镜的存在,因而在近地面1 km左右存在过渡区,即只有部分回波信号的光进入接收望远镜的视场内,因而需对该区域进行几何重叠因子订正^[6]。

3) 对回波信号进行分区域、三角滤波平滑处理,以降低大气自身起伏带来的随机噪声。

4) 沿斜程方向,采用Fernald^[7]方法计算不同高度气溶胶的体后向散射系数和消光系数。Fernald方法是现阶段处理非均匀分布气溶胶的常用方法,即将大气分子和气溶胶的消光和后向散射分别考虑,将分子的消光后向散射比取为 $8\pi/3$,假设在某一标定高度上气溶胶消光后向散射比已知的情况下,可求解气溶胶消光系数和后向散射系数随高度的分布廓线。由于该激光雷达关心的是对流层中

下部,尤其是大气边界层污染物的分布情况,所以测量气溶胶时,考虑到 Fernald 方法的后向积分比较稳定^[8~10],我们一般将标定高度选在 3~5 km 左右,采用后向积分保证大气边界层数据结果的可靠性。

4 测量结果与讨论

4.1 垂直方向上与其它激光雷达测量结果对比

L300 激光雷达是安徽光机所大气光学实验室研制的双波长米氏散射激光雷达^[11],用于探测 532 nm 和 1064 nm 两个波长对流层气溶胶消光系数的垂直廓线。自 1995 年建成后,L300 进行了大量气溶胶的常规探测,积累了丰富的资料,并取得了高水平的研究成果。图 2(a)是 2000 年 6 月 6 日晚,车载测污激光雷达与 L300 在合肥(31.31° N, 117.17° E)、沿垂直方向测量得到的气溶胶消光系数分布图,实线是 AML-1 激光雷达 21:30 测量的结果,虚线是 L300 在 20:42 测量的结果。由于两雷达光学系统的差异和当天实验条件限制,几何重叠因子的订正(0~1 km 左右)不再进行比较。从图中可以看出,二者的测量结果表现出较好的一致性。气溶胶消光系数总的变化趋势是:从地面到 10 km 左右,明显有两个 4 km 左右厚度的气溶胶层。二者的差异主要是由于气溶胶时空分布不确定性和相差近一个小时的测量间隔引起的。

图 2(b)是 2003 年 4 月 15 日晚,AML-1 车载测污激光雷达与 Portable lidar 在合肥西郊董铺岛垂直方向测量得到的气溶胶消光系数分布图,图中带点线是 AML-1 在晚上 8 点测量的结果,实线是 Portable lidar 在晚上 7 点半左右测量的结果,二者呈现出很好的一致性。当天夜晚天空晴朗无云,风力 3 级,气溶胶水平分布比较均匀,因而两雷达都做了几何重叠因子的订正。二者在同一地点探测气溶胶,虽然时间上相差半个小时左右,但由于当晚天气

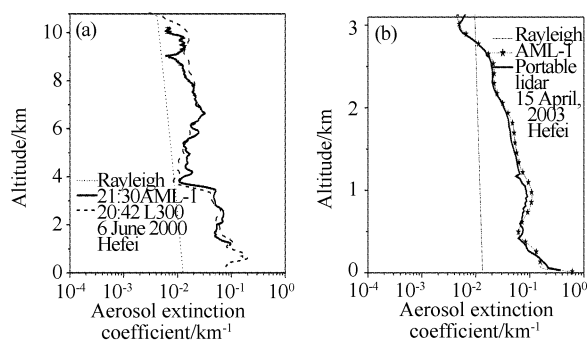


Fig. 2 Profiles of aerosol coefficients by (a) AML-1 and L300 (b) AML-1 and Portable lidar

状况良好,使得夜间大气边界层比较稳定,因而测量结果不会存在较大差异。这也从侧面反映了两台激光雷达的稳定性和可靠性。

4.2 垂直测量与斜程测量结果对比

图 3(a)是 2003 年 4 月 15 日晚在合肥,选择时间上相近的垂直测量与斜程测量结果进行对比,虚线是 21:51、天顶角为 30°的斜程探测的实验数据结果,实线是 21:22 垂直测量数据结果;图 3(b)是二者之间的误差,吻合得较好,总体误差小于 10%,是由于气溶胶时空分布不确定性和粒子物理、化学特性的多变性引起的。在 1 km 以下误差较大,除上述原因外,还因为几何重叠因子的订正差异造成的;从理论上讲,在气溶胶水平分布比较均匀的天气,由于角度的倾斜,几何重叠因子对斜程测量在垂直方向上的影响要小于其对垂直测量的影响,因而可以说,在近地面该段高度上斜程测量结果要比垂直测量结果更接近于真实值。

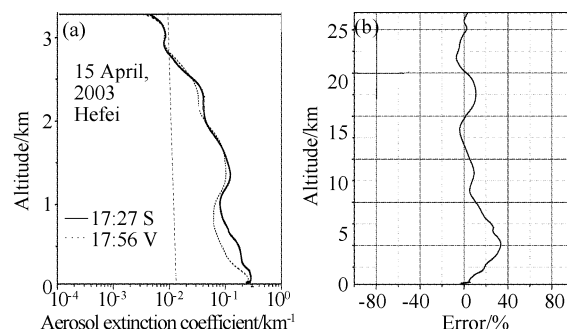


Fig. 3 (a) slant and vertical profiles of aerosol extinction coefficients (b) error distribution, at night on 15 April 2003

图 4(a)是 2003 年 4 月 30 日晚在合肥,斜程测量结果(17:27 天顶角 35°测量)和垂直测量结果(17:56)对比图,整体上讲,二者吻合得较好;图 4(b)表明了二者之间的误差是随高度呈振荡式分布。与

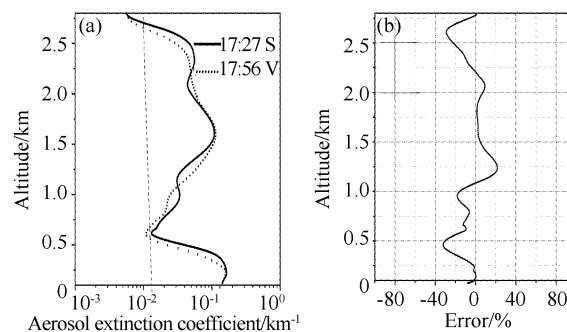


Fig. 4 (a) Slant and vertical profiles of aerosol extinction coefficients (b) error distribution, at night on 30 April 2003

图 3 相比,同样相差半个小时,斜程与垂直的测量结果差异较大。原因是白天由于太阳辐射,地表温度高于气温,热量向上传递,近地面大气层结构不稳定^[12],气溶胶消光系数随时间分布变化较大。夜间则是因地面长波辐射,热通量是向下的,整个大气边界层内空气处于稳定层结构状态。图 4 当时正值下午五点多钟,再加上人类活动比较频繁,因而同图 3 夜间九点多相比,气溶胶随时间演变程度较大,所以斜程测量与垂直测量结果之间差异也较大。

4.3 斜程测量气溶胶随时间的演化图

图 5 是 2003 年 5 月 8 日晚,以天顶角为 20° 的仰角测量气溶胶消光系数随高度-时间的演化图。纵向看,随着高度的增加,整体上看气溶胶消光系数逐渐减小,但在 1 km 以下和 2 km 高度,明显有两个近 1 km 厚的气溶胶层,富含大量的气溶胶粒子,这是典型的气溶胶多层结构分布。沿时间轴看,由于深夜的来临,气溶胶的消光系数逐渐减小,并趋于稳定。

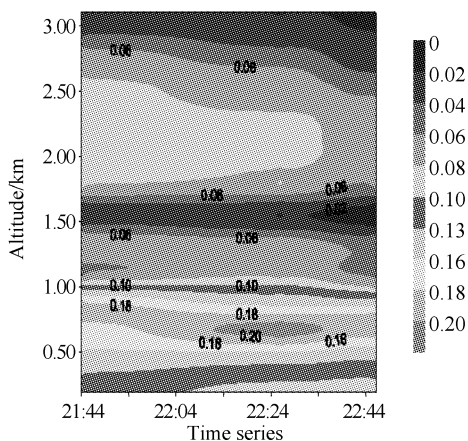


Fig. 5 Distribution of aerosol extinction coefficients in slant range (zenith angle 20°) with height and time by Mobile lidar

4.4 气溶胶二维扫描分布图

图 6 是 2003 年 6 月 14 日上午在合肥,沿某一方位,从天顶角 $0^\circ \sim 40^\circ$ 对气溶胶进行扫描的消光系数分布图。图中横坐标表示水平距离,纵坐标表示垂直高度。其反映了大气空间某一纵向剖面的气溶胶消光系数分布状况,非常直观。同一地点,随高度的增加,气溶胶消光系数逐渐减小,只是在大约 1.9~2.6 km 的高度上有一气溶胶层;同一高度上,气溶胶消光系数大致相同,表明水平方向上气溶胶分布比较均匀,其微小差别表征了大气分布的细微结构。

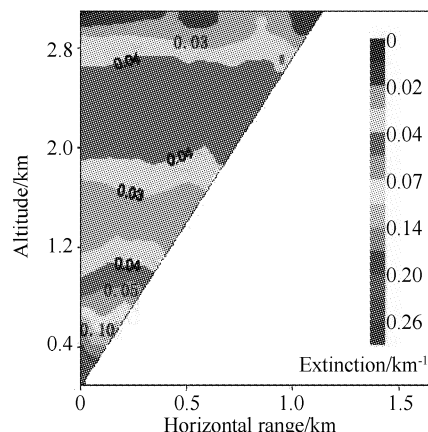


Fig. 6 Two-dimensional scanning result of aerosol extinction coefficients

结论 本文介绍了 AML-1 车载测污激光雷达系统和斜程探测气溶胶的数据处理方法。通过对比分析垂直与斜程的测量结果,可以得出以下结论:

1) 由于角度的倾斜,几何重叠因子对斜程测量在垂直方向上的影响要小于其对垂直测量的影响。

2) 通过选择时间相近的垂直与斜程的测量结果进行比较,从侧面反应了车载测污激光雷达系统的稳定性、可靠性。

3) 通过对同一角度不同时间的测量,可获取在该方向上气溶胶消光系数随时间的演化情况;通过对某一方位不同仰角上气溶胶进行测量,可以得到该方位上的气溶胶二维分布;如果对不同方位、不同仰角的气溶胶测量,还可得到气溶胶的三维立体分布,这将对实现连续、实时、大范围监测气溶胶有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Liu Yi, Wang Mingxing, Zhang Renjian. The present status of aerosol research in China. *Climatic and Environmental Research* (气候与环境研究), 1999, **4**(4): 406~414 (in Chinese)
- 2 Liu Qiang, Wang Mingxing, Li Jing *et al.*. Present research on atmospheric aerosol and its trends. *China Powder Science and Technology* (中国粉体技术), 1999, **5**(3):17~23 (in Chinese)
- 3 Liu Zhishen, Wu Dong, Song Xiaoquan *et al.*. Development of lidar and experimental research for measuring atmospheric aerosol. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6):724~728 (in Chinese)
- 4 Zhang Zhengyu, Sui Xiaolin. Faint signal digital correlation detection of laser ranging: study and simulation. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **29**(7): 661~665 (in Chinese)

- 5 Wu Yonghua, Hu Huanling, Zhou Jun *et al.*. Measurements of stratosphere aerosol with L625 lidar. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(8): 1012~1015 (in Chinese)
- 6 Sasano Y, Shimizu H, Takeuchi N *et al.*. Geometrical form factor in the laser radar equation: an experimental determination. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(23): 3908~3910
- 7 Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 625~653
- 8 Bissonnette L R. Sensitivity analysis of lidar inversion algorithms. *Appl. Opt.*, 1985, **25**: 2122~2124
- 9 Klett J D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction ratios. *Appl. Opt.*, 1985, **24**: 1638~1643
- 10 Spinhirne J D, Reagan J A, Herman B M. Vertical distribution of aerosol extinction cross section and inference of aerosol imaginary index in troposphere by lidar technique. *J. Appl. Meteor.*, 1980, **19**: 426~438
- 11 Zhou Jun, Yue Guming, Jin Chuanjia *et al.*. Two-wavelength Mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 1412~1417 (in Chinese)
- 12 Wu Xiaoqing, Wang Yingjian, Rao Ruizhong *et al.*. Numerical model of atmospheric optical refractive index structure parameter. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 2003, **15**(2): 819~822 (in Chinese)

《光学学报》关键词规范

本刊所刊登学术论文必须在摘要后列出不少于四个关键词。第一个关键词列出该文章主要工作所属学科名称。第二个关键词列出该文研究得到的成果名称。第三个关键词列出该文在得到上述成果或结论时采用的科学研究方法的具体名称。第四个关键词列出前三个关键词没有出现的,但是被该文作为主要研究对象的事或物质的名称。如有需要,第五、第六个关键词等列出作者认为有利于检索和文献利用的其他关键词。

为了使作者在撰写论文时更准确地选择第一关键词,本刊特推荐以下学科名称(34个),请作者从中选用。

大气与海洋光学	Atmospheric and ocean optics
原子与分子物理	Atomic and molecular physics
相干与统计光学	Coherence and statistical optics
探测器	Detectors
衍射与光栅	Diffraction and gratings
光纤光学与光通信	Fiber optics and optical communications
傅里叶光学与光信号处理	Fourier optics and optical signal processing
几何光学	Geometrical optics
全息	Holography
图像处理	Image processing
成像系统	Imaging systems
仪器,测量与计量	Instrumentation, measurement and metrology
集成光学	Integrated optics
激光器与激光光学	Lasers and laser optics
机器视觉	Machine vision
材料	Materials
医用光学与生物技术	Medical optics and biotechnology
显微	Microscopy
非线性光学	Nonlinear optics
光计算	Optical computing
光数据存储	Optical data storage
光学设计与制造	Optical design and fabrication
光学器件	Optical devices
表面光学	Optics at surfaces
光电子学	Optoelectronics
物理光学	Physical optics
量子光学	Quantum optics
遥感	Remote sensing
散射	Scattering
光谱学	Spectroscopy
薄膜	Thin films
超快光学	Ultrafast optics
视觉与色彩	Vision and color
X射线光学	X-ray optics