

文章编号 :1001-4322(2004)03-0286-05

AML - 1 车载测污激光雷达探测大气边界层气溶胶*

张改霞, 张寅超, 胡顺星, 刘小勤, 邵石生, 谭 锐, 周 军, 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,安徽 合肥 230031)

摘 要: 介绍了自行研制用于环境监测的车载式激光雷达(AML - 1)系统及典型特点,其在测量气溶胶时不但可以全天候探测,还可以从不同仰角进行测量,对实现连续、实时、大范围监测大气污染有着重要的意义。结合该激光雷达的特点,从垂直、斜程、二维扫描等方面分别给出了该系统探测气溶胶时的典型结果和时空分布图,总结了 AML - 1 车载测污激光雷达系统在测量气溶胶时的优越性和意义。

关键词: 车载测污激光雷达; 大气边界层; 气溶胶; 消光系数; 扫描

中图分类号: TN249

文献标识码: A

大气边界层是指直接受地面影响的那部分对流层,它响应地面作用的时间尺度为 1h 或更短。人类和地球上的生物都生活在大气边界层内,需要适应不同地区边界层的不同气候。火山、沙尘暴、工业、农业、交通、建筑等直接向大气层排放了大量污染物。大气边界层顶就如同一个反射面,把这些污染物抑制在边界层里,使该层大气污染更加严重,直接影响到经济发展和人类生存环境,因而,为保护生态环境,开展大气边界层的污染研究是大气科学最活跃、最重要的分支之一^[1]。

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。它在诸多大气过程中起到重要的作用^[2,3],从而使得气溶胶探测成为当今大气科学和环境科学等领域的重要研究内容。激光雷达为环境监测提供了有力的工具^[4],其具有高时空分辨能力,以及连续、实时、大范围监测等特点,从而广泛应用于大气监测等领域;环境激光雷达也将在人类生存环境的改善中发挥越来越重要的作用。本文介绍了我们自行研制的车载测污激光雷达系统及其典型特点,并从垂直、斜程、以及二维扫描等方面,给出了测量气溶胶的一些典型结果。

1 车载测污激光雷达系统

我们研制的车载式激光雷达系统(AML - 1),主要用于综合探测近地面层大气污染物(SO_2 , NO_2 , O_3 和气溶胶)。该系统是在多年研究激光雷达大气探测的基础上,通过光电优化设计,在保证其稳定性和可靠性的基础上,尽可能减轻各部件质量,最后将其安装在一改装过的小型客车上,移动灵活方便并具有高精度、实时快速、距离分辨率高、监测范围大等特点。该系统主要由发射系统、方位和俯仰扫描、回波信号接收、数据采集和数据存储及系统控制 5 个单元组成。图 1 为车载测污激光雷达系统的原理框图,表 1 列出了其主要技术参数。

车载测污雷达系统采用 Nd:YAG 固体激光器的二倍频 532nm 作为探测波长,单脉冲激光能量约为 80mJ,重复频率是 10Hz,光束发散角约为 1mrad。激光光束经 12 倍扩束镜后,由导光镜导向大气。扩束镜由一个凹透镜和两个凹面镜组成,设计合理,比起一般的光束准直器,它不但起到了扩束、准直的作用,使光束发散角小于 0.1mrad,还减少了光学元件对光束的吸收。

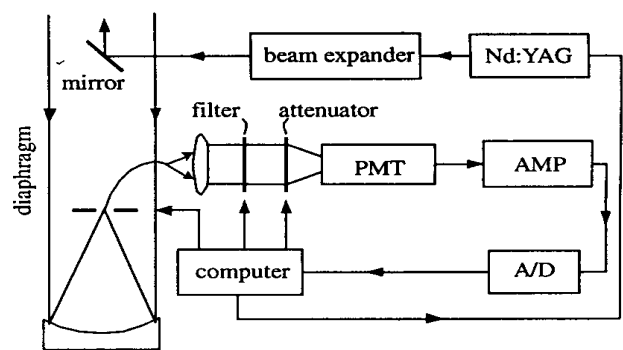


Fig. 1 Schematic diagram of mobile lidar system

图 1 车载测污激光雷达系统原理图

* 收稿日期:2003-09-22; 修订日期:2003-12-05

基金项目:国家 863 计划信息获取与处理技术资助课题

作者简介:张改霞(1976—),女,硕士研究生,主要从事激光雷达大气探测研究;合肥 1125 信箱;E-mail:gxzhang@aiofm.ac.cn.

表1 AML-1 车载测污雷达系统主要技术参数

Table 1 Specification of the mobile lidar AML-1

laser	Nd: YAG
wavelength/ nm	532
output energy per pulse/ mJ	80
repetition rate/ Hz	10
beam divergence/ mrad	1
pulse duration/ ns	10
scanner	elevation $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$, azimuth $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$
receiving optics	
type	$\phi 300\text{mm}$ Newton telescope
field of view/ mrad	$0.2 \sim 1.7$
filter	
central wavelength/ nm	532
bandwidth/ nm	0.5
transmittance/ %	60 % minimum at 532nm
PMT	9214QB UV detector
amplifier	LeCory100A ,gain :10 ,bandwidth :100MHz
data acquisition	JV52014 type , 12bit
data processing	IPC - 610

接收望远镜采用直径为 300mm 的近牛顿型望远镜,在其焦平面上设置一个小孔光阑,起到限制光束孔径和视场角的作用。AML-1 车载测污激光雷达系统在 $0.2 \sim 1.7\text{mrad}$ 范围内分别设有 5 小孔光阑,因而在保证接收视场角大于激光发散角的前提下,可选取小孔径的光阑,限制较强的背景光,这样便可以在白天对气溶胶进行测量,这是该激光雷达不同于一般激光雷达的典型特点。

由接收望远镜会聚的光,经光纤到凸透镜,准直后再通过高精度窄带滤光片、衰减片到达光电倍增管、前置放大器,最后由 A/D 转换器和计算机进行采样,累加平均和存储。滤光片透射带宽只有 0.5nm,透过率高达 65%,带外抑制是 10^{-5} ,可有效的通过工作波长 532nm,同时抑制其它波长的背景光或杂散光。滤光片和衰减片采用复合转盘式设计,其转动由计算机控制。光电倍增管配有制冷装置,以减少阴极热发射产生的暗电流噪声和阳极电阻产生的热噪声。为了进一步减少电子学系统引入的噪声,应尽量使前置放大器靠近光电倍增管,缩短连接的电缆。

该系统中另一大特点是采用了大口径高精度三维空间扫描系统,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,并且各元件抗震性好、使用寿命长,因此其具有良好的稳定性和可靠性。该装置还采用封闭结构,防止镜面污染,只有测量时才将扫描平镜的镜头盖打开。扫描平镜通过自动控制指令能进行俯仰和方位转动,以实现三维立体扫描。水平扫描角度: $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$;垂直扫描角: $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$,角速度大于 $5^{\circ}/\text{s}$ 。因此我们可利用它进行垂直、不同角度的斜程探测和扫描。

对测量数据,该系统采用现阶段处理非均匀分布气溶胶的常用方法——Fernald^[5]方法,计算各个高度上气溶胶的消光系数和体后向散射系数。

2 测量结果与讨论

AML-1 车载测污激光雷达自 2000 年研制成功后,分别在合肥、北京等地对大气中的气溶胶(Mie 散射原理)和污染物(SO_2 , NO_2 , O_3 , 差分吸收原理)进行了大量的观测,积累了丰富的经验,并多次与国内多台激光雷达和传统方法进行对比,结果吻合得较好,证明了该激光雷达的可靠性。以下结合该激光雷达的特点,给出了探测气溶胶的一些典型结果。

2.1 AML-1 与其它雷达结果对比

图 2(a) 是 2001 年 12 月 29 日上午,AML-1 车载测污激光雷达在北京与 MPL 激光雷达垂直测量气溶胶的数据结果比较图,虚线代表大气分子 Rayleigh 散射消光系数廓线,带星线是 AML-1 探测得到的气溶胶廓线,实线是 MPL 激光雷达探测结果,二者吻合得较好。不同之处主要是由于当时实验条件的限制,二者的测量时间

有一定的间隔,再加上白天气溶胶分布不确定性较大,使得测量结果之间存在一定的差异,但该图从侧面反映了历经千里行程后,AML-1激光雷达即使在白天测量气溶胶仍是比较稳定、可靠的。

为了进一步检测该雷达探测气溶胶的可靠性,2003年4月15日晚在合肥,AML-1激光雷达(带星线)与Portable Lidar(实线),对大气气溶胶垂直探测进行了对比测量,如图2(b)所示。二者表现出很好的一致性,即使是在同一高度区域上的细微结构也是大致相同的。Portable Lidar曾与多台激光雷达进行气溶胶垂直测量的对比实验,证实了其测量结果是较为可靠的^[6]。因而通过图2(b)的对比实验,反映了AML-1车载测污激光雷达探测大气气溶胶的稳定性和可靠性。

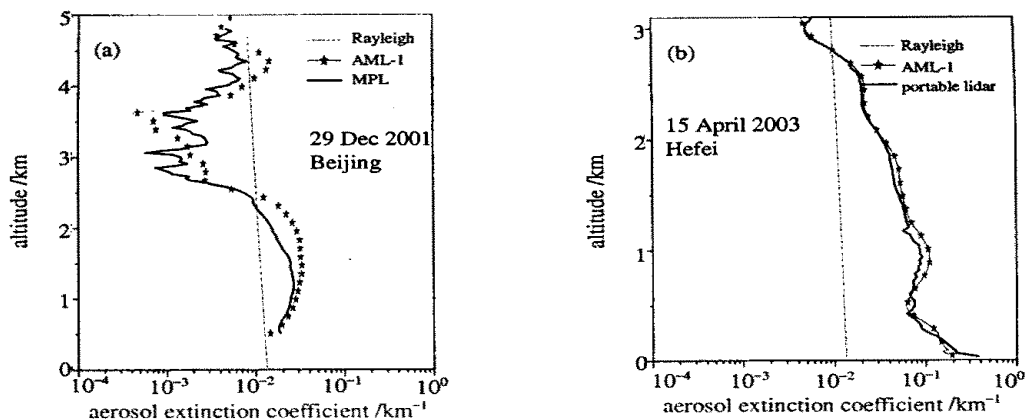


Fig. 2 Profiles of aerosol coefficients by (a) AML-1 and MPL, (b) AML-1 and portable lidar

图2 AML-1与MPL(a)及Portable Lidar(b)探测到的气溶胶消光系数廓线

2.2 垂直测量

大气边界层的一个重要特征就是由于热作用导致边界层结构强烈的日变化。白天由于太阳辐射,地表温度高于气温,热量向上传递,近地面大气层结不稳定,湍流充分发展^[7,8],湍流很强,中午达到最大值,因而气溶胶消光系数分布变化较大。图3是AML-1车载测污激光雷达2002年1月24日上午在北京测量的气溶胶消光系数分布图,该天天气晴朗,阳光较强烈,因而采用了0.3mrad的小孔光阑限制强烈的背景光。从探测结果知,该天近地面层气溶胶含量较大,但随高度的增加逐渐减少;时间上,两廓线在2.5km以下有较大差别,表明临近中午大气边界层气溶胶含量明显增多。

夜晚则不同,气溶胶分布比较缓和。图4(a)是2003年4月15日晚,在合肥测得的气溶胶消光系数分布廓线。整体上看,与图3相比,时间间隔同样不到一小时,气溶胶消光系数随时间变化不大,只是近地面层(0~1km左右)气溶胶含量随时间有较明显的减小趋势。图4(b)是气溶胶消光系数时空分布图,很直观的显示了典型的气溶胶消光系数夜间分布特征。夜间稳定层逐渐形成,并渐趋变厚;白天大气边界层内的混合层变成了残留层。原因是因地面长波辐射,热通量是向下的,因而整个大气边界层内空气处于稳定层结状态。

2.3 斜程测量

图5(a)是2003年4月15日晚在合肥,AML-1激光雷达选择时间上相近的垂直与斜程测量结果对比图,实线是30°天顶角斜程(21:51 S)探测数据结果,虚线是垂直(21:22 V)测量数据结果,两廓线分布呈较好的一致性。斜程探测的处理方法是沿斜程方向,应用Fernald方法进行处理,再投影到垂直方向上与垂直测量得到的结果相比较。图5(b)是二者之间的误差。在处理数据过程中,虽然两组数据均采用同一个几何重叠因子分布曲线,但由于测量方向的不同,使得激光雷达几何重叠因子订正^[9~11]在垂直高度上对垂直测量与斜程测量的影响有所不同。该雷达系统的几何重叠因子的修正范围在0~1km,这正与图5中两廓线在0~1km范围内误差较大相吻合;其余测量误差都小于10%,主要是因为气溶胶时空分布不确定性和粒子物理、化学特性的多变性,这种差异是在所难免的。因而通过垂直测量结果与斜程测量结果一致性的比较,反映了斜程测量气溶胶消

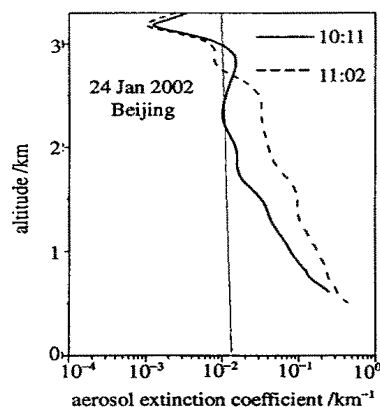


Fig. 3 Profiles of aerosol coefficients by AML-1 lidar in Beijing on 24 Jan 2002

图3 2002年1月24日在北京,AML-1探测到的气溶胶消光系数分布图

光系数的可靠性。

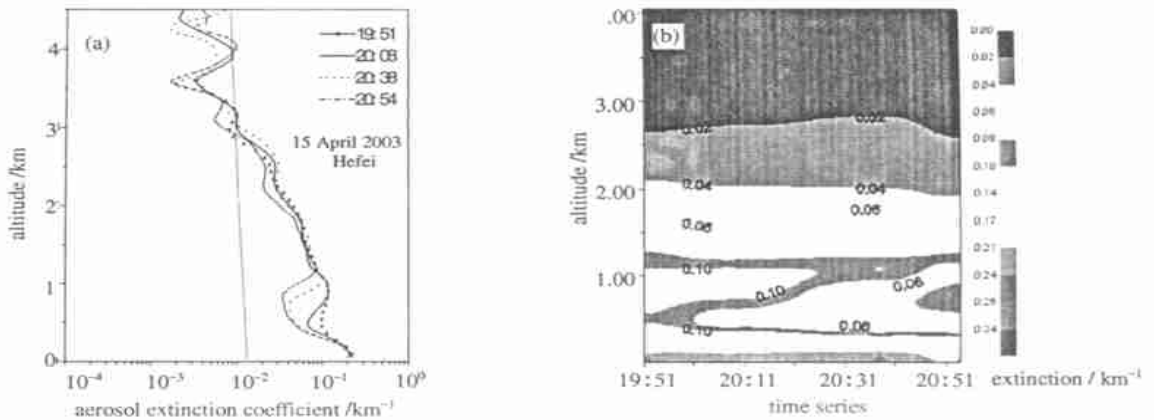


Fig. 4 Aerosol extinction coefficients (a) profiles and (b) distribution with height and time by AML - 1 lidar
图 4 2003 年 4 月 15 日晚 ,AML - 1 在合肥探测的气溶胶消光系数垂直廓线(a)及时空分布图(b)

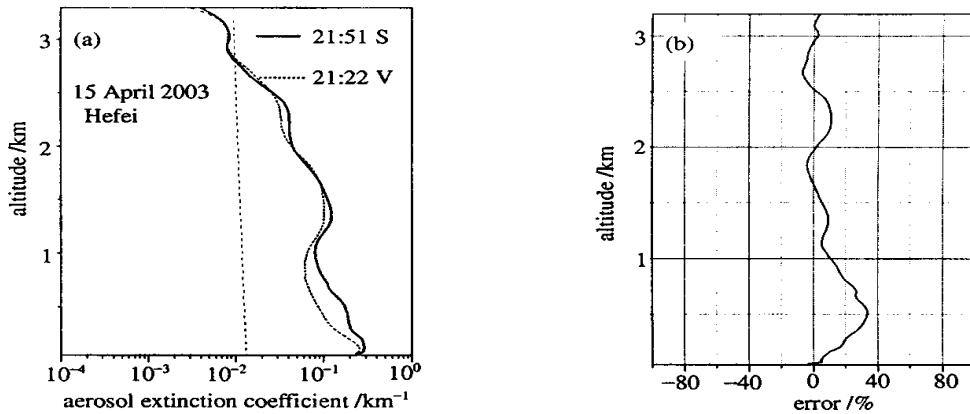


Fig. 5 (a) Measurements of aerosol extinction in slant range and vertical range ,and (b) error distribution
图 5 2003 年 4 月 15 日晚 ,斜程探测与垂直探测气溶胶消光系数廓线(a)及误差分布(b)

2.4 二维扫描图

AML - 1 雷达的另一典型特点之一是可以对大气污染物进行扫描式测量。例如图 6 即是激光雷达扫描头沿某一方位,从天顶角 $0 \sim 50^\circ$ 对气溶胶进行二维扫描的消光系数分布图。横坐标表示水平距离,纵坐标表示垂直高度,颜色表征消光系数大小。其反映了在该段测量时间内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。在 2.6km 以下,气溶胶消光系数不低于 0.08km^{-1} ;沿纵坐标看,在同一地点,随高度的增加,气溶胶消光系数逐渐减小;沿横坐标看,同一高度上,气溶胶消光系数大致相同,微小的差别表征了大气气溶胶分布的细微结构。

如果在不同方位角内对气溶胶消光系数进行扫描,则可以得到气溶胶的三维分布,从而实现对气溶胶的更大范围的监测。

3 结 论

本文介绍了 AML - 1 车载测污激光雷达系统的典型特点,并给出了测量气溶胶的几例典型结果。AML - 1 激光雷达采用车载式,突破了固定地基激光雷达测量空间范围有限的局限性^[4],可长距离行驶测量,到污染区进行监测,从而实现了大范围快速、连续、实时监测等特点,而且性能稳定、可靠。由于该系统采用了 12 倍扩束

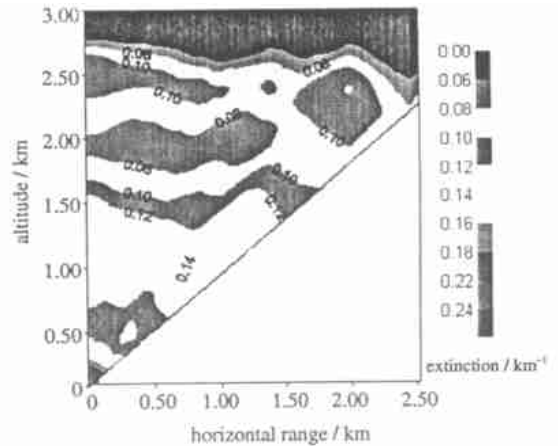


Fig. 6 2-D scanning results of aerosol extinction coefficients
图 6 气溶胶消光系数二维扫描分布图

镜、小孔径光阑和高精度窄带滤光片等光学元件,在很大程度上限制了背景光,因而可在白天对气溶胶进行准确测量。不论共轴还是非共轴激光雷达系统,往往要进行几何重叠因子的订正。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。因而在水平比较均匀的天气,可利用斜程测量,减小几何重叠因子在高度上产生的误差。通过对某一方位、不同仰角的气溶胶测量,可以得到该方位上气溶胶的二维分布;对不同方位、不同仰角气溶胶进行测量,则可得到气溶胶消光系数的三维立体分布。这将对实现连续、实时、大范围监测大气污染有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 胡非,洪钟祥,雷孝恩. 大气边界层和大气环境研究进展[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 712—728. (Hu F, Hong Z X, Lei X. Recent progress of atmospheric boundary layer physics and atmospheric environment research in IAP. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(4): 712—728)
- [2] 刘毅,王明星,张仁健. 中国气溶胶研究进展[J]. 气候与环境研究, 1999, 4(4): 406—414. (Liu Y, Wang M X, Zhang R J. The Present Status of aerosol research in China. *Climatic and Environmental Research*, 1999, 4(4): 406—414)
- [3] 刘强,王明星,李晶,等. 大气气溶胶研究现状和发展趋势[J]. 中国粉体技术, 1999, 5(3): 17—23. (Liu Q, Wang M X, Li J, et al. Present research on atmospheric aerosol and its trends. *China Powder Science and Technology*, 1999, 5(3): 17—23)
- [4] Edner H, Fredriksson K, Sunesson A, et al. Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring[J]. *Appl Opt*, 1987, 26(19): 4330—4338.
- [5] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observation: some comments [J]. *Appl Opt*, 1984, 23(5): 625—653.
- [6] 钟志庆,戚福弟,范爱媛,等. 便携式米散射激光雷达[J]. 安徽气象, 2003, 203—205. (Zhong Z Q, Qi F D, Fan A Y, et al. Portable Lidar of Mie scatterance. *Anhui Qixiang*, 2003, 203—205)
- [7] 吴晓庆,王英俭,饶瑞中,等. 一维大气边界层光学折射率结构常数数值模式的实验检验[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(2): 819—822. (Wu X Q, Wang Y J, Rao R Z, et al. Numerical model of atmospheric optical refractive index structure parameter. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(2): 819—822)
- [8] 瓮宁泉,曾宗泳,肖黎明,等. 大气折射率结构常数垂直分布特征[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(6): 673—676. (Weng N Q, Zeng Z Y, Xiao L M, et al. Profile and characteristic of refractive index structure constant. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(6): 673—676)
- [9] Sassen K, Dodd G C. Lidar crossover function and misalignment effects[J]. *Appl Opt*, 1982, 21(17): 3162—3165.
- [10] 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.
- [11] Dho S W, Park Y J, Kong H J. Experimental determination of a geometric form factor in a lidar equation for an inhomogeneous atmosphere[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(24): 6009—6010.

Measurements of planetary boundary layer aerosols with mobile lidar AML - 1

ZHANG Gai-xia, ZHANG Yin-chao, HU Shun-xing, LIU Xiao-qin, SHAO Shi-sheng,
TAN Kun, ZHOU Jun, HU Huan-ling

(Atmospheric Optics Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1125, Hefei 230031, China)

Abstract: This paper introduces the typical characteristics of AML - 1 mobile lidar, which is the first mobile lidar of China. This lidar can be used to measure aerosols at daytime when receiver angle matches transmitter angle well and high transmission interference filter is used. It also can be used to measure aerosols at different zenith angle because it has 3D scanning device. All these may have great significance for realizing continual, simultaneous, large-ranged atmospheric pollution detecting. The results show great stability and reliability of AML - 1 mobile lidar comparing with other lidars. Typical aerosol profiles and space-time distributing diagrams are shown and discussed at vertical, slant and 2D scanning aspects.

Key words: Mobile pollution detecting lidar; Planetary boundary layer; Aerosol; extinction coefficient; Scanning