

激光雷达白天探测大气边界层气溶胶^{*}

张改霞^{1,2)} 赵日峰^{1,2)} 张寅超³⁾ 赵培涛²⁾

1) 山东大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2) 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)

3) 北京理工大学信息科学技术学院, 北京 100081)

(2007 年 7 月 26 日收到, 2008 年 4 月 30 日收到修改稿)

介绍了自行研制可用于白天探测大气气溶胶的 AML-1 激光雷达系统, 分析了白天工作条件下激光雷达的各种噪声干扰, 并给出了抑制噪声干扰的有效措施. 其中, 天空背景辐射噪声是激光雷达白天工作的主要干扰, 通过接收视场角与激光束发散角的严格匹配以及采用高光谱透过率超窄带滤光片可大大抑制天空背景光的干扰. 最后, 给出了 AML-1 激光雷达白天测量大气边界层气溶胶的典型结果.

关键词: 大气光学, 激光雷达, 气溶胶, 边界层

PACC: 9265, 4260K, 9265V

1. 引言

激光雷达的迅猛发展为环境监测提供了强有力的手段^[1,2], 但由于激光雷达集激光技术、信号探测与采集技术、自动化技术、计算机技术、精密机械和光学加工等技术于一体, 容易受天气条件的影响, 使其应用受到一定的限制, 例如许多激光雷达常常选择在夜间进行工作^[3-6], 以避免白天强烈的天空背景光. 而大气边界层的主要特征是由于热力作用而导致强烈的日变化, 并具有浓度大、粒子尺度谱范围宽、时空分布不确定性和粒子多变性等特点. 因此仅仅通过晚间探测, 积累大气边界层气溶胶的有关资料往往是不够的. 基于此, 提高激光雷达技术, 抑制白天强烈的天空背景噪声干扰, 对大气边界层气溶胶进行快速、实时、高精度监测是环保领域的迫切需求, 也是发展的必然趋势.

本文介绍了自行研制的 AML-1 激光雷达系统, 分析了其白天工作条件下的各种噪声, 并给出了抑制噪声的相应措施. 最后, 给出了 AML-1 激光雷达白天测量大气边界层气溶胶的一些典型结果.

2. AML-1 激光雷达系统

图 1 是我们课题组用于探测大气边界层污染物的 AML-1 激光雷达系统原理框图, 它整体上分为激光发射系统、扫描系统、接收系统、和控制系统四大部分. 表 1 是该激光雷达系统的主要技术参数.

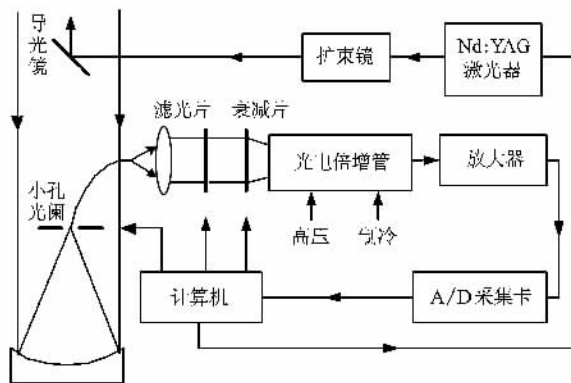


图 1 车载测污激光雷达系统原理图

激光发射系统由激光光源、扩束镜和导光镜组成. 测量大气气溶胶时, 该系统采用 Nd:YAG 固体激光器的倍频光 532 nm 作为探测波长, 脉冲能量 80 mJ, 重复频率 10 Hz, 光束发散角约为 1 mrad. 激光光

^{*} 国家高技术研究发展计划(863)项目(批准号 2002AA135030)资助的课题.

[†] E-mail: zgx_one@hotmail.com

束经 12 倍扩束镜扩束准直后 ,由导光镜导向大气 .

表 1 AML-1 车载测污雷达系统主要技术参数

发射系统	
激光器	Nd :YAG
波长/nm	532
脉冲能量/mJ	80
脉冲工作率/Hz	10
光束发散角/mrad	1
脉冲宽度/ns	10
扩束镜(光学镜组)	12 倍扩束
机械扫描系统	
仰角(°)	- 5—100
方位(°)	0—360
接收系统	
接收望远镜	Ø300 mm 近牛顿型望远镜
接收视场/mrad	0.2—1.7
滤光片	
CWL/nm	532
FWHM/nm	0.5
T/%	65
光电倍增管(EMI)	9214QB 紫外探测器
放大器	LeCroy100A ;增益 10 ;带宽 100 MHz
数据采集系统	JV52014 型 ,12bit 最大采样速率 40 M/s
数据存储和系统运行控制	研华 IPC-610 工控机 ,主频 500 MHz

扫描系统是 AML-1 激光雷达系统的一大特点 .该系统可进行俯仰和方位扫描 ,因而可对大气气溶胶进行剖面测量 .方位扫描角度为 0°—360° ,俯仰扫描角为 - 5°—100° ,角速度 > 5°/s .

接收系统主要由接收单元和信号探测与采集单元组成 .接收单元包括接收望远镜、小孔光阑、光纤 (中心直径 = 1.2 mm ,数值孔径 N. A. = 0.37) 输出光准直器、滤光片等 .接收望远镜是口径为 300 mm 的近牛顿式接收望远镜 ,在其焦平面上 ,设置有不同直径大小的小孔光阑 ,起限制视场角的作用 .光纤将接收望远镜收集的大气对激光的后向散射光和天空背景光导向准直器 ,变其成平行光束 ,再由超窄带、高光谱透过率滤光片滤波 .信号探测与采集单元由光电倍增管、前置放大器、数据采集卡组成 .光电倍增管将光信号转变成电信号 ,经前置放大器将信号放大 ,再由 A/D 模数转换进行采集 .

控制系统主要由主控计算机和主波控制器组成 ,其作用是保证发射系统、扫描系统和接收系统协调一致的工作 .

3. 噪声分析和抑制噪声的相应措施

激光雷达的噪声通常包括信号噪声、背景辐射噪声、探测器的暗电流噪声和电阻热噪声 .

3.1. 信号噪声

激光雷达探测信号的信噪比可以表示为^[7]

$$SNR(\lambda, z) = \frac{N_s(\lambda, z)}{\sqrt{N_s(\lambda, z) + 2 N_b(\lambda) + N_d(\lambda)}} \times \sqrt{n} , \quad (1)$$

式中 , $N_s(\lambda, z)$ 是高度 z 处的大气对激光的后向散射的光电子数 , $N_b(\lambda)$ 是天空背景辐射的光电子数 , $N_d(\lambda)$ 为光电倍增管的暗计数 , n 为累积的激光脉冲数 .因此 ,可以利用信号 $N_s(\lambda, z)$ 良好的时间相关性和噪声 $N_b(\lambda)$ 及 $N_d(\lambda)$ 的时间不相关性 ,通过多次测量 (例如 $n = 5000—10000$ 个激光脉冲) 累加平均 ,把深埋于噪声中的信号提取出来^[8,9] ,提高探测信号的信噪比 .还可通过权重法、移动平均法等平滑方法对回波信号进行平滑 ,以减少因大气起伏带来的误差 .

3.2. 白天背景噪声

由于激光雷达系统在测量时有意避开了太阳直接辐射 ,因而白天背景噪声主要来自天空背景辐射噪声 ,可表示为^[10,11]

$$N_b(\lambda) = \frac{\eta \lambda}{hc} P_b(\lambda) \pi (\theta/2)^2 d_w(\lambda) A_r T_r \Delta t , \quad (2)$$

式中 , $P_b(\lambda)$ 是波长为 λ 的天空背景辐射亮度 ($W m^{-2} sr^{-1} nm^{-1}$) , θ 是接收视场角 (mrad) , $d_w(\lambda)$ 是干涉滤光片带宽 (nm) , A_r 为接收望远镜的接收面积 (m^2) , T_r 是接收光学单元的光学效率 , Δt 是时间分辨率 (s) .

从 (2) 式可以看出 ,大口径的接收望远镜和高光学效率的接收光学单元显然不利于对天空背景光 $N_b(\lambda)$ 的抑制 ,但对于大气后向散射光 $N_s(\lambda, z)$ 的接收又是非常有利的 .因此必须根据激光雷达探测性能的需求 ,设计合适的接收望远镜口径和接收光学单元的光学效率 .这样 ,对于白天探测的激光雷达 ,抑制天空背景光 $N_b(\lambda)$,提高信噪比的关键技术是减小激光雷达的接收视场角 θ 和采用窄光谱带宽 $d_w(\lambda)$.为此 ,AML-1 激光雷达在系统设计中采用了 12 倍扩束镜、直径很小的小孔光阑以及高光谱

透过率窄带滤光片,有效地降低了天空背景噪声.

Nd:YAG 激光器输出的激光发散角为 1 mrad,经 12 倍扩束镜后,光束发散角为 0.08 mrad.通常情况下,激光雷达的接收视场角应为激光束发散角的 2—3 倍,这样既保证激光雷达对发射到大气中的激光光束的全接收,又尽可能地减少天空背景光进入接收视场角造成的干扰^[12]. AML-1 激光雷达在接收望远镜的焦平面上设置了不同孔径的光阑,可调节接收视场角 θ 在 0.2~1.7 mrad,根据白天天空背景光的强度大小,可选择适当孔径的小孔光阑,使得接收视场角 θ 为 0.3 mrad 或 0.7 mrad.

AML-1 激光雷达系统使用的是高光谱透过率窄带滤光片,其透射带宽 $d_{\lambda}(\lambda)$ 为 0.5 nm 532 nm 波长的透过率高达 65%,带外抑制比是 10^{-5} . 使用该滤光片可将天空背景噪声抑制在测量范围的 0.015% 之内.图 2 是 2003 年 6 月 9 日下午,AML-1 激光雷达使用该滤光片测得的天空背景噪声.该激光雷达采用 16 位 A/D 转换器,设有 32768 个量化级,图 2 中的天空背景噪声不到 4 个量化级,因而天空背景干扰只占满量程的 0.01% 左右.如果量程采用 1 V,则背景噪声不到 0.1 mV.

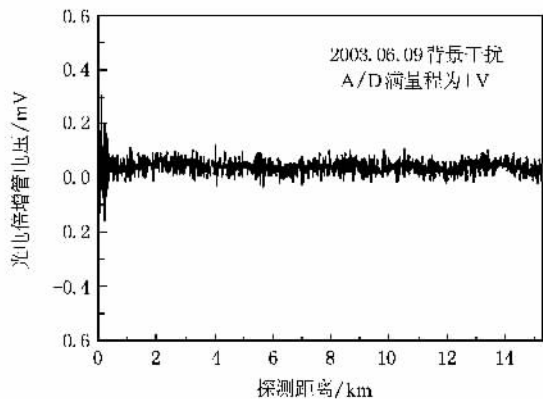


图 2 2003 年 6 月 9 日下午 AML-1 测量的天空背景信号

中国海洋大学海洋遥感研究所已通过实验证实,使用带宽为 0.15 nm 的窄带滤光片抑制天空背景干扰的效果是带宽为 2.6 nm 滤光片的 20 倍^[13].当然需要指出的是,由于窄带滤光片的制作技术要求很高,往往是带宽愈窄,峰值透过率愈低,因而使用窄带滤光片在有效抑制天空背景干扰的同时,也在一定程度上降低了大气后向散射信号的接收.

3.3. 暗电流噪声与电阻热噪声

大气探测激光雷达一般选择具有灵敏度高、噪

声低、增益倍数大的光电倍增管作为信号探测器.光电倍增管的噪声主要有暗电流噪声、阳极电阻产生的热噪声等.暗电流噪声是指光电倍增管在加上高压后,在无光照情况下输出的电流,可表示为^[10,11]

$$N_d(\lambda) = \text{CPS}(\lambda) \Delta t, \quad (3)$$

式中 $\text{CPS}(\lambda)$ 是光电倍增管的暗计数(暗电流) (s^{-1}) Δt 是时间分辨率(s);其主要是光电阴极和打拿极的热电子发射产生的,因此降低光电倍增管的工作温度可以减少热电子发射,从而降低暗电流. AML-1 激光雷达的 9214QB 型光电倍增管配有制冷装置,使其工作温度低于 -15°C ,从而有效地减小了暗电流噪声.

电阻热噪声是由电荷无规则运动引起的.由热力学原理,通过推导热平衡辐射公式,可得到热噪声公式^[14]

$$i_n^2 = \frac{4\pi k T \Delta f}{R}, \quad (4)$$

式中 k 是 Boltzmann 常数, T 是工作温度, Δf 是系统带宽, R 是电阻.因此降低工作温度和缩小系统带宽可以有效地减小电阻热噪声.

为防止工作空间的杂散光进入光电倍增管造成干扰,将它置于一个严格密封的暗盒内.另外由于光电倍增管检测的是弱信号,因此应尽可能缩短它与前置放大器相连接的电缆,以减少额外噪声的引入.当然,在电子学系统的系统设计和安置中,还要合理使用地线,以及采用金属板机柜屏蔽电子学系统,从而尽可能少引入噪声干扰.

4. 数据处理方法

AML-1 激光雷达的数据处理方法分为三步:

1) 从各阶段测量的原始数据中分别扣除背景信号,从而得到实际的大气后向散射回波信号.一般采用 13—15 km 的回波信号的平均值作为背景信号.

2) 对大气后向散射回波信号进行分区域、三角滤波平滑处理(数据平滑点数范围为 5—20,依据噪声的大小适当选取),以降低大气自身起伏带来的随机噪声.

3) 利用 Fernald 方法^[15]后向积分^[16—18]计算各个高度气溶胶的体后向散射系数.在计算中,空气分子消光系数垂直分布数据通过标准大气模式和瑞利散射理论计算给出;其消光后向散射比为 $8\pi/3 \text{ sr}^{-1}$ ^[11];对于 532 nm 波长,大气气溶胶消光后向散射比取为 50 sr^{-1} ^[19],标定高度通常选在 3—5 km,例如 3.8 km,

标定值取为 1.2.

5. 测量结果与讨论

AML-1 激光雷达通过三年多对大气气溶胶进行白天、夜间的综合观测,积累了较丰富的经验,并在技术和实验数据处理方法上有了较大的提高.该激光雷达通过多次与其他探测仪器结果对比,证实了该系统探测气溶胶的可靠性.以下给出了 AML-1 激光雷达白天测量气溶胶的典型结果.

5.1. AML-1 激光雷达白天探测气溶胶可靠性的验证

图 3 是 2001 年 12 月 29 日中午在北京,AML-1 激光雷达与另一台微脉冲激光雷达 (MPL) 同时探测的大气气溶胶后向散射系数垂直廓线的对比图.由于正值中午,天空背景光较强,AML-1 激光雷达的接收视场角设置为 0.3 mrad.图中的实线是 AML-1 探测的大气气溶胶后向散射系数垂直廓线,它与微脉冲激光雷达的探测结果(虚线)符合得较好,二者具有相同的变化趋势.它们在 1 至 3 km 高度区域有一定的差别,这估计是因为白天太阳辐射,地表温度高于气温,热量向上传递,近地面大气层结不稳定,湍流充分发展并在中午达到最大值^[20],而两台激光雷达获取大气气溶胶后向散射系数垂直廓线的时间不尽完全相同,它反映了大气气溶胶后向散射系数垂直分布随时间的变化比较大.另外,两台激光雷达的配置及其技术参数也不相同,也会导致测量结果的差别.

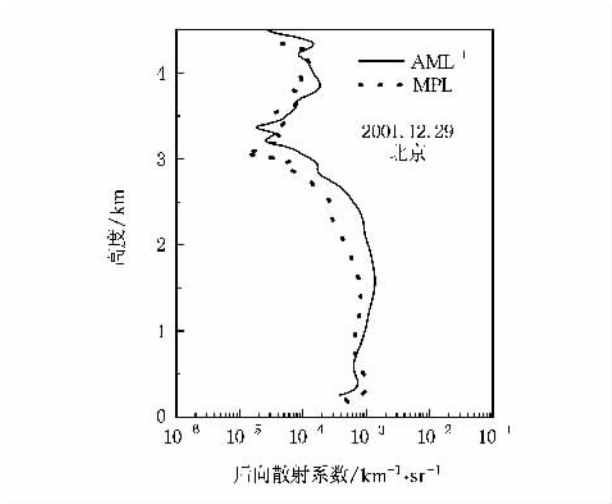


图 3 AML-1 雷达与 PML 雷达白天测量结果对比

图 4 是 2003 年 6 月 14 日上午在合肥西郊董铺岛,AML-1 激光雷达于 10:37 的垂直测量(实线)和 10:52 的斜程测量(虚线,天顶角为 30°)结果对比图(纵坐标已归一到同一垂直高度),二者呈现出较好的一致性.细微差别主要是由于白天气溶胶随时间的分布不确定性和空间分布差异造成的.与图 3 相比,二者之间的差别较小,原因估计是由于大气气溶胶的来源不同,因而不同地区、不同的大气环境和不同的气象条件,大气气溶胶的化学成分、质量浓度、粒度分布以及随时间变化也不同.北京受工业、交通、建筑、居民生活等污染源的影响,再加上地处我国北方,冬春两季气候较为干燥,有时还要受中国西北部沙尘暴的侵袭,因而大气气溶胶后向散射系数时空变化较快.而合肥西郊董铺岛远离市区,空气污染小且三面环水,因而大气气溶胶的分布随时空变化较慢.

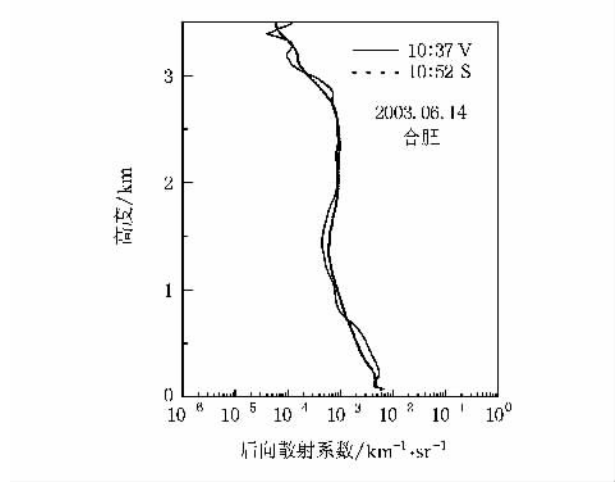


图 4 AML-1 雷达在白天,垂直与斜程测量结果对比(纵坐标已归一到同一垂直高度)

5.2. 白天大气气溶胶后向散射系数分布特征

图 5(a)是 2003 年 4 月 16 日上午,AML-1 激光雷达采用 0.7 mrad 的接收视场角,在合肥测得的三个时刻大气气溶胶后向散射系数垂直廓线,图 5(b)是大气气溶胶后向散射系数高度-时间分布图.从图 5(b)中可以看出,早晨 8:21 测得的气溶胶后向散射系数垂直廓线,还未退去夜间的分布特征,从地面到 1 km 左右的夜间稳定层清晰可见.随着时间的推移,夜间稳定层被破坏,大气边界层内气溶胶的含量逐渐增加,并且时空分布变化较快.

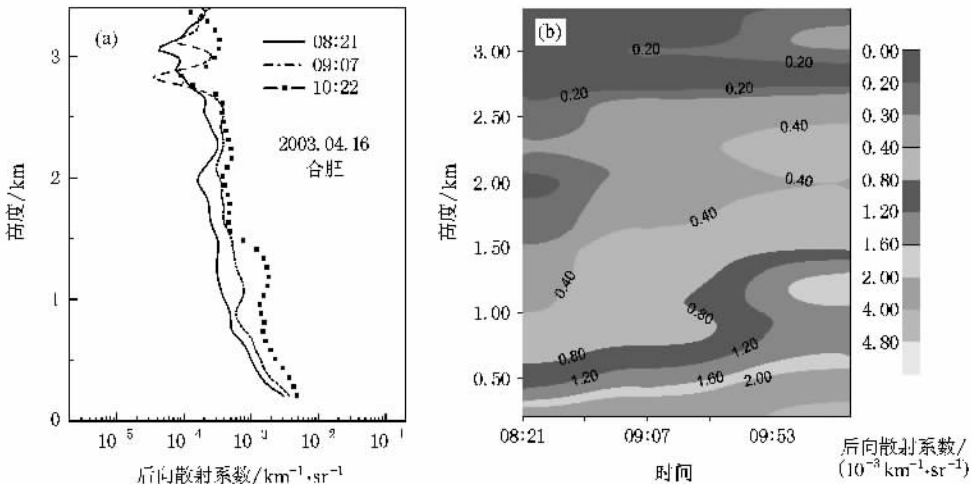


图 5 2003 年 4 月 16 日上午 AML⁻¹在合肥探测的气溶胶后向散射系数 (a)垂直廓线 (b)时空分布

6. 结 论

大气探测激光雷达的噪声包括信号噪声(主要是回波信号的统计起伏噪声和信号在光电倍增管阳极产生的散粒噪声)、天空背景辐射噪声、探测器的暗电流噪声和电阻热噪声,其中天空背景辐射噪声

是激光雷达白天工作的主要干扰.理论分析和实验测量表明,通过严格设计激光雷达的技术参数,重点是增加每次测量累计的激光脉冲数、窄的接收视场、窄的滤光片半宽度和低的信号探测器的暗计数等,可以使激光雷达在白天接收到具有较高信噪比的信号廓线,从而能比较清晰地反映出大气边界层气溶胶光学性质的垂直分布和时间变化特征.

[1] Blair T. N. Evans 1988 *Appl. Opt.* **27** 3299

[2] Zhao P T, Zhang Y C, Wang L, Hu S X, Su J, Cao K F, Zhao Y F, Hu H L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 0335

[3] Hong G L, Zhang Y C, Zhao Y F, Shao S S, Tan K, Hu H L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 983 (in Chinese) [洪光烈、张寅超、赵曰峰、邵石生、谭 锐、胡欢陵 2006 物理学报 **55** 983]

[4] Tao Z M, Zhang Y C, Liu X Q, Tan K, Shao S S, Hu H L, Zhang G X, Lü Y H 2004 *Chin. Phys.* **13** 409

[5] Si F Q, Liu J G, Xie P H, Zhang Y J, Liu W Q, Kuze H, Liu C, Lagrosas N, Takeuchi N 2005 *Chin Phys.* **14** 2360

[6] Mao J P, Randolph K S 2004 *Appl. Opt.* **43** 914

[7] Sun J Q 1986 *Laser monitoring the atmosphere* (Beijing : Science Press) 78—81 (in Chinese) [孙景群编著 1986 激光大气探测 (科学出版社) 第 78—81 页]

[8] Russell P C, Karoline R M 2000 *Proceedings of SPIE* **4035** 22

[9] Lu D Q, Qian L J, Li Y Z, Fan D Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 0088

[10] Spinhirne J D 1993 *Micro pulse lidar*, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing* **31** 48

[11] Smith E V P, Gottlieb D M 1974 *Space Science Reviews* **16** 771

[12] Harms J, Lahmann W, Weitkamp C 1978 *Appl. Opt.* **17** 1131

[13] Song X Q, Liu Z S, He Y, Liu J T 2001 *Journal of Ocean University of Qingdao* **31** 593 (in Chinese) [宋小全、刘智深、贺岩、刘金涛 2001 青岛海洋大学学报 **31** 593]

[14] Yan J X, Gong S S, Liu Z S 2001 *Environmental monitoring lidar* (Beijing : Science Press) 50—57, 214—216 (in Chinese) [阎吉祥、龚顺生、刘智深 2001 环境监测激光雷达 (北京 : 科学出版社) 第 50—57, 214—216 页]

[15] Fernald F G 1984 *Appl. Opt.* **23** 625

[16] Bissonnette L R 1985 *Appl. Opt.* **25** 2122

[17] Klett J D 1985 *Appl. Opt.* **24** 1638

[18] Spinhirne J D, Reagan J A, Herman B M J 1980 *Appl. Meteor.* **19** 426

[19] Sasano Y 1989 *Appl. Opt.* **28** 1670

[20] Wu X Q, Wang Y J, Rao R Z, Zeng Z Y, Gong Z B 2003 *High Power Laser and Particl Beams* **15** 819 (in Chinese) [吴晓庆、王英俭、饶瑞中、曾宗泳、龚知本 2003 强激光与粒子束 **15** 819]

A lidar system for monitoring planetary boundary layer aerosol in daytime^{*}

Zhang Gai-Xia^{1 2†} Zhao Yue-Feng^{1 2)} Zhang Yin-Chao³⁾ Zhao Pei-Tao²⁾

¹ *College of Physics and Electronics Shandong Normal University, Jinan 250014, China*

² *Atmospheric Optics Lab, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

³ *College of Information Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*

(Received 26 July 2007 ; revised manuscript received 30 April 2008)

Abstract

Lidar is a powerful tool for atmospheric monitoring. However, most lidars operate only in nighttime due to the interference of strong background skylight in daytime. We have developed the AML-1 lidar system, which can measure aerosol profiles in daytime also. In this paper, the structure and specifications of the lidar system are described. Various noise sources of the lidar and methods for rejecting these noises are discussed. It has been found that among these noises the sky radiation is the main background noise for daytime working lidars. This noise can be effectively eliminated by incorporating small divergence-angle of emitting laser beam, narrow-field-of-view receiver, and narrow-band filter with high transmittance. Some daytime boundary layer aerosol profiles measured by the AML-1 are presented.

Keywords : atmospheric optics, lidar, aerosol, planetary boundary layer

PACC : 9265, 4260K, 9265V

^{*} Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2002AA135030).

[†] E-mail: zgx_one@hotmail.com