

侧向散射激光雷达探测白天近地面气溶胶探测技术

麻晓敏^{1,2,3}, 陶宗明^{1,3*}, 张璐璐⁴, 单会会³, 张辉³, 马明俊⁵, 王申浩³, 王英俭^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

³陆军炮兵防空兵学院基础部, 安徽 合肥 230031;

⁴安徽粮食工程职业学院信息技术系, 安徽 合肥 230011;

⁵中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 基于 CCD 的侧向散射激光雷达不受几何因子的影响, 是探测近地面气溶胶的有力工具。夜晚的探测技术已成熟, 由于背景光中夜晚的月光和星光远弱于白天的太阳光, 故利用夜晚探测技术得到的白天气溶胶信噪比很低。实验中选用窄带滤光片和小张角镜头, 通过校正窄带滤光片透射率、缩短单次曝光时间、多次曝光平均等技术可有效提高白天探测气溶胶的信噪比。白天个例表明, 侧向散射激光雷达与后向散射激光雷达反演的气溶胶后向散射系数廓线在 0.75~1.50 km 范围内的变化趋势一致, 并对 0.75 km 以下侧向散射激光雷达探测的正确性进行了验证。对合肥地区近地面气溶胶后向散射系数进行了 37 h 的连续昼夜探测, 并与同一地点的温度、PM2.5 质量浓度联合进行分析。研究表明, 改进后的白天侧向散射激光雷达技术是正确、可行的。

关键词 大气光学; 后向散射系数; 侧向散射激光雷达; 气溶胶; 窄带滤光片

中图分类号 TN958.2; P407.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0401005

Ground Layer Aerosol Detection Technology During Daytime Based on Side-Scattering Lidar

Ma Xiaomin^{1,2,3}, Tao Zongming^{1,3}, Zhang Lulu⁴, Shan Huihui³, Zhang Hui³,
Ma Mingjun⁵, Wang Shenhao³, Wang Yingjian^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³Department of Basic Sciences, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China;

⁴Department of Information Technology, Anhui Vocational College of Grain Engineering,
Hefei, Anhui 230011, China;

⁵Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract Side-scattering lidar based on CCD, which is not affected by geometrical factors, is a powerful tool for ground layer aerosol detection. The detection technology at night is mature. Since moonlight and starlight in the background light are much weaker than the sunlight, the signal-to-noise ratio is very low when we detect ground layer aerosol during daytime using the detection technology used at night. In experiments, lens with a small field of view and a narrowband filter is selected. Meanwhile, correcting narrowband filter transmittance, reducing single exposure time, and multi-average-exposure are applied to improve signal-to-noise ratio effectively. The daytime case

收稿日期: 2017-09-22; 收到修改稿日期: 2017-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(41475025)

作者简介: 麻晓敏(1980—), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光雷达技术、激光大气探测方面的研究。

E-mail: maxiaomin308515@163.com

导师简介: 王英俭(1963—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光大气传输湍流效应及自适应光学相位校正方面的研究。E-mail: wyj@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zmtao@aiofm.ac.cn

shows that the aerosol backscattering coefficient profile from side-scattering lidar is consistent with that from backscattering lidar in the range from 0.75 km to 1.5 km. The correctness of side-scattering lidar detection under 0.75 km is also verified. Continuous 37 h profiles of aerosol backscattering coefficient of Hefei near ground region are calculated, and the analysis combined with temperature and PM_{2.5} mass concentration is conduct. The results indicate that the improved side-scattering lidar detection technology is correct and feasible.

Key words atmospheric optics; backscattering coefficient; side-scattering lidar; aerosol; narrowband filter

OCIS codes 010.1310; 290.5825; 040.1520

1 引 言

气体介质中加入固态或液态粒子而形成的分散体系称为气溶胶,其粒径介于 0.001~100 μm 之间,大约 80% 的气溶胶分布在对流层大气最低几千米以下^[1]。大气气溶胶不但通过吸收和散射太阳辐射来影响地球-大气系统的辐射收支平衡,同时它还是水蒸气的凝结核,参与云的形成^[2]。目前人们对于气溶胶气候效应的科学认知程度仍比较低,其重要原因是缺乏大气气溶胶的物理、化学与光学特性观测的基础数据,特别是近地面气溶胶的垂直分布信息很难获得。

激光自 20 世纪 60 年代被发明以来,便很快应用到大气探测中,普通的后向散射激光雷达存在一个探测过渡区和盲区,常用几何因子来描述其接收后向散射光的完整程度^[3],激光雷达的几何因子是系统装置的位置和角度的函数,很多研究人员用不同的方法对其进行了估算^[3-5],也有大量的研究人员采用不同的方法对几何因子进行修订^[6-7]。但探测的误差仍然较大,受几何因子影响的范围一般从地面至 200~300 m,甚至更远,而这一范围正是气溶胶的富集区,也是环境部门所重点关注的区域,这限制了后向散射激光雷达在近地面段的应用。

近年来,国内外有不少团队都在研制基于 CCD 的侧向散射激光雷达系统,并将其用于大气探测^[8-12],该系统将发射装置(激光器)与接收装置(CCD 相机)分两处放置,它没有过渡区和盲区,在近地面段的测量精度和空间分辨率都很高,它的不足之处是远距离段空间分辨率不高、信噪比较低。此外,由于采用 CCD 作为接收器,白天太阳背景光很强,信噪比很低。所以,侧向散射激光雷达非常适合用于探测夜晚近地面层的大气气溶胶分布^[13-14]。白天是人类生产生活主要参与的时间段,故白天的近地面气溶胶探测是急需解决的一大难题。本文选用窄带滤光片和小张角镜头,通过优化镜头的张角、滤光片的带宽等参数,有效抑制太阳背景光,使基于 CCD 的侧向散射激光雷达系统在白天的大气探测

中获得较高的信噪比,并将侧向散射激光雷达的探测结果与后向散射激光雷达的探测结果在一定的高度范围内进行了对比,对探测结果的正确性进行了验证,还对近地面气溶胶进行了 37 h 的昼夜连续探测和对比分析。

2 装 置

研制的夜晚侧向散射激光雷达系统装置如图 1 所示,采用横向和纵向视场角分别为 105° 和 80° 的大张角 CCD 相机作为接收器^[15],联合后向散射激光雷达系统对垂直射入大气中的激光束进行探测,其工作原理为:发射至大气中的激光束与大气相互作用,其散射光中包含了大气气溶胶的散射信息,侧向散射激光雷达中的 CCD 相机各像元接收光束上各处的侧向散射光信号。同时,后向散射激光雷达中的望远镜和光电倍增管(PMT)接收激光束上不同高度的后向散射光信号,联合后向散射激光雷达方程和侧向散射激光雷达方程,可以获得从地面开始的气溶胶后向散射系数廓线。但是,白天太阳背景光太强,利用上述装置探测得到的白天的侧向散射光信噪比太低。太阳光的能量是连续光谱的能量之和,分布在单一波长上的能量要小得多,利用窄带滤光片可以阻止太阳光中的绝大部分能量。在滤光片的带宽大于激光线宽范围的前提下,滤光片对气溶胶散射形成的光束不存在衰减,滤光片带宽越窄,

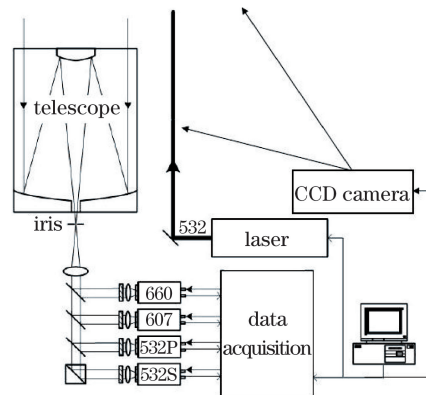


图 1 激光雷达系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of lidar system

阻止背景光的效果就越好,同时 CCD 张角不能太大,要与窄带滤光片相适用,否则大张角处 CCD 像元透射率太小,进行修正时误差太大,以致无法修正。此外,需从后向散射激光雷达信号中获取侧向散射激光雷达的参考点信息,还要保证侧向散射激光雷达与后向散射激光雷达有一定的探测重叠范围。

为此,对已有的侧向散射激光雷达系统进行了

以下改进:1) 将横向和纵向视场角分别为 105° 和 80° 的大张角镜头更换为横向和纵向视场角分别为 12.1° 和 9.2° 的小张角镜头;2) 在镜头上加装了 1 nm 带宽的窄带滤光片;3) 缩短单次曝光时间,采用多次曝光平均,以减少太阳背景光的影响,并提高信噪比;4) 缩短 CCD 相机到激光束的垂直距离,以增强激光散射回波信号。系统参数如表 1 所示。

表 1 激光雷达系统的主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of lidar system

Laser: Nd:YAG (continuum surlite)		Backward receiver: telescope (Cassegrain)		Sideward receiver: CCD (ST-8300M, SBIG, America)	
Wavelength λ /nm	532	Diameter /mm	300	Pixel array	3352×2532
Pulse energy N_0 /mJ	250	Iris /mrad	0.5-3.0	Pixel size / $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	5.4×5.4
Repetition rate /Hz	20	Detector (PMT)	R7400-U02	Lens focal length /mm	85
Divergence /mrad	0.5	A/D converter /bit	16	Filter bandwidth $\Delta\lambda$ /nm	1

3 原理与技术

3.1 探测原理

后向散射激光雷达系统已非常成熟,利用 Fernald 提出的递推法即可反演出气溶胶的后向散射系数^[16]。方程中的大气分子消光系数和后向散射系数由瑞利散射理论模型获得。根据本系统中 607 nm 氮气拉曼散射通道的回波信号及氮气拉曼散射激光雷达方程,无需假设条件即可直接反演出气溶胶的激光雷达比,进而从后向散射激光雷达方程中反演出几何因子以上的气溶胶后向散射系数廓线。

由侧向散射激光雷达系统的发射和接收光路可知,侧向散射激光雷达方程为^[17]

$$N(z, \theta) = \frac{N_0 K A}{D} [\beta_a(z, \theta) + \beta_m(z, \theta)] \times \exp - \left\{ \int_0^z [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz' + \int_0^{z/\cos(\pi-\theta)} [\alpha_a(z') + \alpha_m(z')] dz' \right\} \Delta\theta, \quad (1)$$

式中 $N(z, \theta)$ 为 CCD 相机单个像元接收到的距离 z 处、散射角为 θ 、角宽度为 $\Delta\theta$ 的大气侧向散射回波信号, N_0 为激光器单脉冲能量, K 为系统常数, A 为有效光学接收面积, D 为 CCD 到光束的垂直距离, $\alpha_a(z)$ 、 $\alpha_m(z)$ 分别为距离 z 处的气溶胶、大气分子的消光系数, $\beta_a(z, \theta)$ 、 $\beta_m(z, \theta)$ 分别为距离 z 处气溶胶、大气分子在散射角 θ 方向上的侧向散射系数。

从侧向散射激光雷达方程中反演气溶胶后向散射系数廓线的方法采用的是本课题组提出的方法^[17-18],其正确性已被验证。

3.2 滤光片带宽与入射角的关系

在白天的大气探测中,为了阻止太阳光中绝大部分能量,在 CCD 镜头前加装了 1 nm 的窄带滤光片。当光垂直入射到滤光片上时,在滤光片的上下表面发生反射和折射,波长变化使得透射光强度下降为入射光强度的一半时,滤光片的带宽 $\Delta\lambda$ 为波长增量的 2 倍,由法布里-珀罗原理可知^[19]

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{\pi k} \frac{1-R}{\sqrt{R}}, \quad (2)$$

式中 λ 为入射光波长, k 为干涉级数, R 为光强透射率。

当光斜入射到滤光片时,与垂直入射相比,透射光的透射率会下降,当透射率下降到最大值的一半时,入射角为该滤光片的半角宽度 i ,对应的折射角为 γ ,经推导可得

$$\frac{1-R}{\sqrt{R}} = \pi k \left(\frac{1}{\cos \gamma} - 1 \right). \quad (3)$$

由(2)、(3)式可得

$$\Delta\lambda = \lambda \left(\frac{1}{\cos \gamma} - 1 \right), \quad (4)$$

即带宽 $\Delta\lambda$ 越窄,折射角 γ 越小,结合折射定律 $n_0 \sin i = n \sin \gamma$,当两种介质的折射率 n_0 和 n 一定时,滤光片的半角宽度 i 也越小。

在本实验中,激光的中心波长为 532 nm, $\Delta\lambda = 1$ nm,若 $R=0.95$,由(2)式可得 $k \approx 9$,代入(3)式可得 $\gamma=3.45^\circ$ 。设空气的折射率为 1,滤光片的折射率为 1.5,则 $i=5.18^\circ$,所以 CCD 相机的张角大于 $2i$ 的像元对应的透射率很小,修正时引起的误差很大,故需改用小张角的 CCD 相机镜头,本实验中所用的

CCD 镜头沿光束方向的张角为 9.2° ，理论上可满足要求。

3.3 滤光片透射率测试

滤光片的透射率与光线的入射角 α 有关,如图 2 所示,入射角越大,则透射率越小,故加滤光片后需对成像信号进行修正。为此,在同一地点放两个 CCD 相机对同一束激光同时进行成像,一个 CCD 镜头前加了带宽为 1 nm 的窄带滤光片,另一个 CCD 镜头前未加滤光片。将两个 CCD 成像的信号进行比对,若将 $\alpha=0^\circ$ 时的透射率设为 1,则可获得实验中使用的窄带滤光片的相对透射率随入射角的变化曲线,如图 3 所示。由图 3 可知,实测的实验中滤光片的半角宽度约为 3° ,远小于理论值 5.18° ,这与滤光片实际的光强透射率 R 、 (1 ± 0.2) nm 的滤光片带宽、滤光片的实际折射率等有关。由于入射角在 $-3^\circ\sim 3^\circ$ 之外的像元成像信号利用图 3 曲线进行修正时误差太大,故将该部分像元信号舍弃,入射角介于 $-3^\circ\sim 3^\circ$ 之间的信号经图 3 曲线进行修正后大大减小了窄带滤光片透射率对成像的影响。

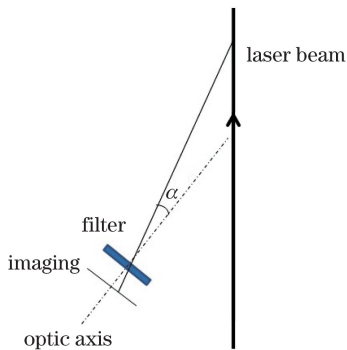


图 2 滤光片与入射光束示意图

Fig. 2 Diagram of filter and incident beam

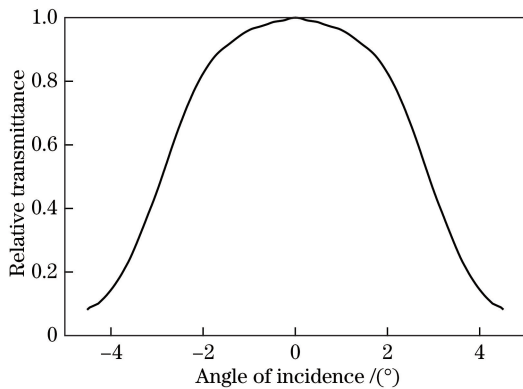


图 3 滤光片的相对透射率曲线

Fig. 3 Relative transmittance curve of filter

3.4 模拟计算

由探测原理可知,联合侧向散射激光雷达和后

向散射激光雷达可获得从地面开始的气溶胶后向散射系数廓线。侧向散射激光雷达系统中的接收器(CCD 相机)在曝光时间内一直处于工作状态,白天背景光中的太阳光与夜晚的月光、星光相比强很多,尽管激光脉冲的强度比背景光强很多,但是在大部分曝光时间内激光器不发光,而太阳光一直存在。由天空背景光辐射公式和 CCD 成像理论可估算出利用 CCD 对白天的侧向散射激光成像时,太阳背景光与激光散射光的信号强弱对比关系。

天空背景辐射信号 N_b 可表示为^[20]

$$N_b = \frac{\eta\lambda}{hc} P_b \pi \left(\frac{\Delta\theta}{2} \right)^2 A T_r \Delta t \Delta\lambda, \quad (5)$$

式中 η 为光电探测器的量子效率; T_r 为接收光学单元的透射率; P_b 为天空背景辐射亮度,对于 532 nm 波长, $P_b=0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}\cdot\text{nm}^{-1}$; 对于接收器 CCD, 单个像元的张角 $\Delta\theta=6.34\times 10^{-5} \text{ rad}$; $A=2.8\times 10^{-3} \text{ m}^2$; 当接收 3 km 处的回波信号时激光雷达的时间分辨率 $\Delta t=2\times 10^{-5} \text{ s}$; 干涉滤光片带宽 $\Delta\lambda=1 \text{ nm}$ 。由(5)式可得,接收一个激光脉冲期间 CCD 单个像元接收的太阳背景光子数约为 $90\eta T_r$,若曝光时间为 0.5 s, 单个像元接收的太阳背景光子数约为 $2.25\times 10^6 \eta T_r$ 。

单次激光脉冲期间 CCD 单个像元接收到的激光光子数为

$$N_s = \frac{\eta N_0 \lambda}{hc} \frac{1}{D\omega} A \beta T_r T_i \Delta\theta, \quad (6)$$

式中 $N_0=250 \text{ mJ}$; 气溶胶的后向散射系数 $\beta\approx 5\times 10^{-3} \text{ km}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$; T_r 、 T_i 分别为激光雷达发射和接收光学单元的透射率; D 为 CCD 到激光束的垂直距离, $D=4.5 \text{ m}$; ω 为激光束成像时宽度方向所占的像元个数,在白天曝光 0.5 s 后, $\omega=10$ 。代入以上参数可得, $N_s\approx 1.3\times 10^7 \eta T_r T_i$, 本系统中激光器重复频率为 20 Hz, 曝光 0.5 s 后 $N_s\approx 1.3\times 10^8 \eta T_r T_i$ 。

可见,当选用 1 nm 的窄带滤光片时,在不考虑背景光中的暗电流和热噪声等情况下,若将 T_r 设为 1, 单次激光脉冲期间接收到的激光光子数远大于背景光光子数。当曝光时间为 0.5 s 时,激光光子数约为背景光光子数的 57 倍,且曝光时间越长时,背景光占的优势越明显,若要 CCD 在白天能有效抑制太阳背景光,侧向散射激光雷达必须采取两项措施:1) 采用窄带滤光片,以阻止太阳光中绝大部分能量;2) 缩短单次曝光时间,以减小太阳

光的影响。

3.5 短曝光时间与多次平均

白天 CCD 成像的信号中包含了激光散射光、太阳背景光、暗电流和热噪声等,为说明暗电流和热噪声与曝光时间的关系,利用加 1 nm 窄带滤光片的 CCD 相机在晚上对实验室中的日光灯进行不同曝光时间的 7 次成像,分析 7 次成像中日光灯与背景光中相同的两个像元的光子数,结果如表 2 所示。

表 2 曝光时间与光子数的关系表

Table 2 Relationship between exposure time and photon counts

Exposure time /s	Lamp photon counts	Background light photon counts	Net photon counts	Ratio
5.0	26209	1163	25046	49.7
4.0	21510	1126	20384	40.4
3.0	16304	1132	15172	30.1
2.0	10855	1039	9816	19.5
1.0	5848	1060	4888	9.7
0.5	3410	1047	2363	4.7
0.1	1510	1006	504	1.0

由上述分析可知,在白天的大气探测中,一方面,缩短曝光时间会减小太阳背景光的影响;另一方面,激光回波信号变小而暗电流、热噪声不变,使得信噪比下降。此外,白天太阳背景光太强,曝光时间达到某一值后,回波信号超过 2^{16} (系统中 CCD 相机的 A/D 转换器为 16 位),达到饱和值,为解决这一矛盾,根据误差理论^[21]

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{\sqrt{M}}, \quad (7)$$

式中 σ 为标准误差, M 为测量次数, $\bar{\sigma}$ 为 M 次测量平均值的标准误差。根据(7)式,多次测量可减小随机误差,故实验中采用多次曝光求平均的方法提高信噪比。图 4 为单次曝光、连续 10 次曝光平均的光子数随像素的变化,每次曝光时间都为 0.5 s。从图 4 中曲线的波动可以看出 10 次曝光平均后信噪比大幅提高了。

由以上分析可知,选用窄带滤光片和小张角相机,通过校正窄带滤光片透射率、缩短单次曝光时间、多次曝光平均等技术,可降低太阳背景光的影响,也可有效提高信噪比。

4 结果与分析

利用上述改进的实验系统在 2016 年 12 月 6 日 8:00 至 2016 年 12 月 7 日 21:00 进行了连续两个白昼的大气探测,在对探测数据进行分析时,由于滤光片相对透射率小于 0.5 的像元信号修正误差太

由于实验在晚上进行,所以背景光主要是暗电流和热噪声,由表 2 可知背景光光子数随曝光时间的变化很小,日光灯光子数减去背景光光子数为净光子数,不同曝光时间的净光子数与曝光时间为 0.1 s 的净光子数的比值基本与曝光时间的比值成正比。由此推知,在大气探测实验中激光散射光和太阳背景光随曝光时间的增加而增强,但暗电流和热噪声与曝光时间长短无关。

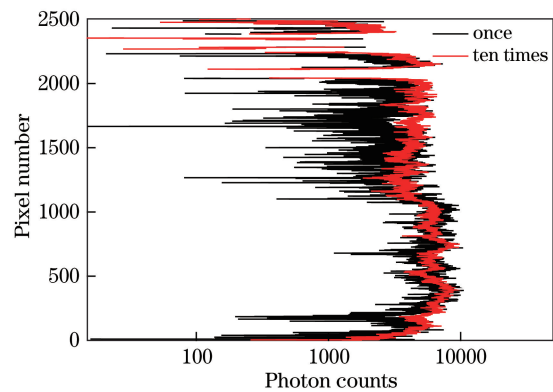


图 4 不同曝光次数的信号曲线

Fig. 4 Signal curves with different exposure times

大,故将其舍弃,下面对探测结果进行分析。

4.1 探测结果比对

为了验证白天侧向散射激光雷达探测技术的正确性,选择个例进行了分析。图 5 是 2016 年 12 月 7 日 16:00 近地面气溶胶后向散射系数随高度的变化廓线。在本次实验中,CCD 与激光束之间的垂直距离为 4.5 m, CCD 相机的焦距为 85 mm,从图中可以看出,在 0.75~1.50 km 之间,侧向散射激光雷达与后向散射激光雷达反演的结果吻合得很好,由于几何因子的存在,0.75 km 以下后向散射激光雷达的探测误差很大,而侧向散射激光雷达没有这一缺陷,能够对近地面的气溶胶进行高分辨率探测。将侧向散射激光雷达的探测结果与同一地点水平发射的激光雷达的探测结果进行了比对(图 5 中五角星

所示),发现两者吻合得很好,说明 0.75 km 以下,侧向散射激光雷达探测的结果是可信的。1.5 km 以上侧向散射激光雷达与后向散射激光雷达反演的结果偏差较大,说明在本次实验中 1.5 km 以上侧向散射激光雷达的空间分辨率较低,信噪比较低,其主要有两方面的原因:1) 当距离 D 一定时,探测高度越高,空间分辨率越低;2) 激光经 CCD 成像为有一定宽度的直线^[22],当距离 D 一定时,曝光时间越长,激光束成像的宽度越宽。本实验中同一高度处激光成像占 10 个像元宽度,即某一高度的信号强度由 10 个像元的强度之和决定,同理,沿光束方向某一高度处的光强受前后共 10 个像元的信号影响,探测高度越高则空间分辨距离越大,相应的信号被平滑得越严重。故在本次实验中,1.5 km 以上侧向散射激光雷达反演的结果误差很大,这也说明侧向散射激光雷达不适用于远距离的大气探测,其优势是近地面段的大气探测。

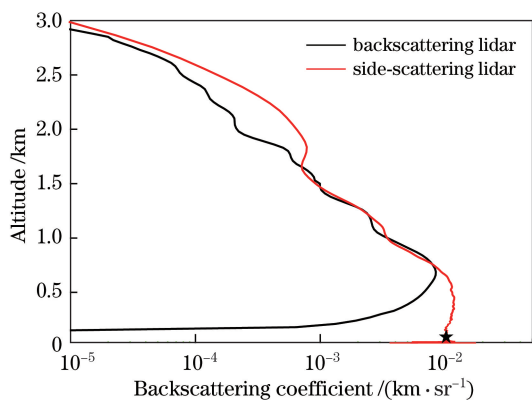


图 5 2016 年 12 月 7 日 16:00 近地面气溶胶后向散射系数廓线

Fig. 5 Ground layer profile of aerosol backscattering coefficient at 16:00 on 2016-12-07

4.2 个例分析

图 6 为 2016 年 12 月 6 日 8:00 至 2016 年 12 月 7 日 21:00 共 37 h 连续探测的气溶胶后向散射系数时间演化图,利用侧向散射激光雷达和后向散射激光雷达各自的优势,近地面探测取侧向散射激光雷达的反演结果,远距离探测取后向散射激光雷达的反演结果,为了更详尽地了解近地面段气溶胶的变化情况,只显示 1.5 km 以下的细节。

图 7 为探测时间段内同一地点的温度随时间的变化曲线。从高度上来看,随着高度的增加,气溶胶后向散射系数总体呈减小趋势;从边界层来看,2016 年 12 月 7 日白天大气边界层高度在 1 km 左右,2016 年 12 月 6 日白天大气边界层高度基本低

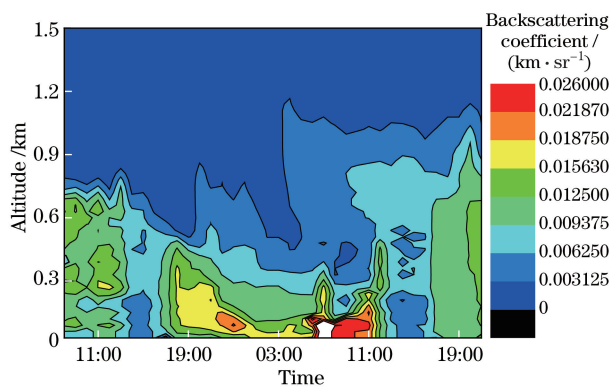


图 6 气溶胶后向散射系数廓线随时间的变化

Fig. 6 Variation in profile of aerosol backscattering coefficient with time

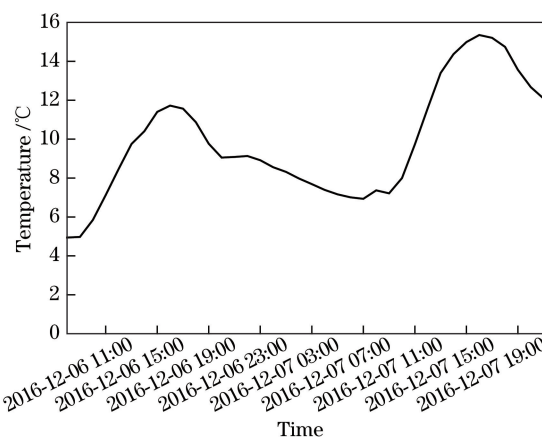


图 7 温度变化曲线

Fig. 7 Temperature curve

于 0.8 km,这与图 7 中 2016 年 12 月 7 日的平均温度比 2016 年 12 月 6 日高是正相关的;在细节上,2016 年 12 月 6 日 8:00—16:00 地面温度逐渐升高,但大气边界层高度基本保持在 0.8 km 左右,2016 年 12 月 6 日 16:00—20:00 温度逐渐降低,边界层高度由 0.70 km 降至 0.55 km,2016 年 12 月 6 日 20:00—24:00 边界层高度出现介于 0.70~0.85 km 的小高峰,夜晚长时间无光照,温度逐渐降低,2016 年 12 月 7 日 05:00—06:00 温度达到最低,边界层高度也降至最低,日出后随着温度的升高,边界层迅速抬高,2016 年 12 月 7 日 06:00—21:00 边界层高度基本保持在 1 km 左右;从近地层来看,2016 年 12 月 7 日 01:00—12:00 近地面气溶胶后向散射系数较大,大于 $0.01563 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$,2016 年 12 月 6 日 15:00—17:00 和 2016 年 12 月 7 日 14:00—16:00 气溶胶后向散射系数最小,介于 $0.003125 \sim 0.00625 \text{ km}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 之间。图 8 为在探测时间段内同一地点地面直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物 (PM_{2.5}) 质量浓度变化曲线,从图 8 可以看出,2016 年 12 月

7日01:00—12:00 近地面大气污染比较严重, PM_{2.5}质量浓度基本在 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上, 2016年12月6日16:00和2016年12月7日14:00—17:00之间 PM_{2.5} 质量浓度最小, 介于 $45\sim 55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 这与图6中近地面探测结果是相符的。

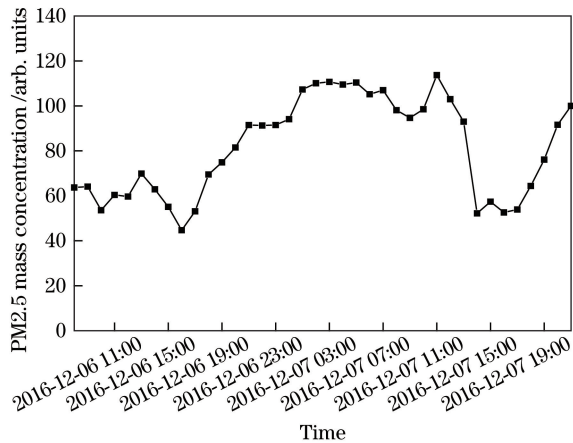


图8 PM_{2.5} 质量浓度曲线

Fig. 8 PM_{2.5} mass concentration curve

5 结 论

选用窄带滤光片和小张角镜头, 通过校正窄带滤光片透射率、缩短单次曝光时间以及多次曝光平均等技术, 对已有的侧向散射激光雷达系统进行改进, 使其适用于白天的大气探测。首先对测得的数据进行透射率校正, 以消除入射角对滤光片透射率的影响; 再利用项目组提出的反演气溶胶后向散射系数方法对校正后的数据进行反演, 并将反演结果与后向散射激光雷达探测的结果进行垂直方向和水平方向上的比对; 最后进行 37 h 的昼夜连续探测, 并与同一地点的温度、PM_{2.5} 质量浓度联合进行分析。对比分析表明, 经改造后白天的侧向散射激光雷达系统的探测结果是有效、可靠的, 这为白天近地面气溶胶探测提供了一种新的手段, 从而实现了利用侧向散射激光雷达系统对近地面气溶胶的昼夜连续探测。

参 考 文 献

- [1] Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 826-840.
石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 826-840.
- [2] Zhang R J, Ho K F, Shen Z X. The role of aerosol in climate change, the environment, and human health[J].

Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2012, 5(2): 156-161.

- [3] Hu S X, Wang X B, Wu Y H, *et al.* Geometrical form factor determination with Raman backscattering signals[J]. Optics Letters, 2005, 30(14): 1879-1881.
- [4] Su J, McCormick M P, Liu Z Y, *et al.* Obtaining a ground-based lidar geometric form factor using coincident spaceborne lidar measurements[J]. Applied Optics, 2010, 49(1): 108-113.
- [5] Mao F Y, Gong W, Li J. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(4): 907-912.
- [6] Chen R Q, Jiang Y S, Wang H Y. Calculation method of the overlap factor and its enhancement for airborne lidar[J]. Optics Communications, 2014, 331: 181-188.
- [7] Wang H X, Liu J G, Zhang T S. Calculation method of geometrical form factor and its enhancement for off-axis lidar system[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(6): 0601001.
王欢雪, 刘建国, 张天舒. 基于 Monte Carlo 积分法的离轴激光雷达几何因子的计算及系统优化[J]. 光子学报, 2015, 44(6): 0601001.
- [8] Tao Z M, Liu D, Ma X M, *et al.* Development and case study of side-scatter lidar system based on charge-coupled device[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3282-3286.
陶宗明, 刘东, 麻晓敏, 等. 基于 CCD 的侧向激光雷达系统研制及探测个例[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3282-3286.
- [9] Meki K, Yamaguchi K, Li X, *et al.* Range-resolved bistatic imaging lidar for the measurement of the lower atmosphere[J]. Optics Letters, 1996, 21(17): 1318-1320.
- [10] Bernes J E, Parikh Sharma N C, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system[J]. Applied Optics, 2007, 46(15): 2922-2929.
- [11] Bernes J E, Bronner S, Beck R, *et al.* Boundary layer scattering measurements with a charge-coupled device camera lidar[J]. Applied Optics, 2003, 42(15): 2647-2652.
- [12] Mei L, Brydegaard M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system[J]. Optics Express, 2015, 23(24): 1613-1628.
- [13] Ma X M, Zhang H, Shan H H, *et al.* Statistical distribution of aerosol backscattering coefficient profiles in near-ground at west suburb of Hefei in 2014[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0705001.
麻晓敏, 张辉, 单会会, 等. 合肥西郊 2014 年近地面气溶胶后向散射系数廓线统计分布[J]. 中国激光,

- 2016, 43(7): 0705001.
- [14] Shi B, Tao Z M, Ma X M, *et al.* Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501006.
史博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0501006.
- [15] Ma X M, Shi B, Shan H H, *et al.* Geometric calibration method of side-scatter lidar based on charge-coupled device[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(2): 0201002.
麻晓敏, 史博, 单会会, 等. 基于 CCD 成像的侧向散射激光雷达几何标定方法研究[J]. *光子学报*, 2015, 44(2): 0201002.
- [16] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: Some comments[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(5): 652-653.
- [17] Tao Z M, Liu D, Wang Z Z, *et al.* Measurements of aerosol phase function and vertical backscattering coefficient using a charge-coupled device side-scatter lidar[J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 1127-1134.
- [18] Tao Z M, Liu Dong, Xie C B, *et al.* A numerical inversion method for CCD side-scatter lidar[C]. *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 2013: 350-352.
- [19] Zhao K H, Zhong X H. *Optics (Vol.1)* [M]. Beijing: Peking University Press, 2016: 335-340.
赵凯华, 钟锡华. *光学(上册)* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2016: 335-340.
- [20] Xie C B. Development of the mobile Raman-Mie scattering lidar[D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 39-40.
谢晨波. 车载式 Raman-Mie 散射激光雷达的研制[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005: 39-40.
- [21] Tao Z M, Zhang Q Z, Fang X, *et al.* Estimation of random errors for backscatter lidar observations[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3279-3282.
陶宗明, 张清泽, 方欣, 等. 激光雷达信号随机误差的估算[J]. *光子学报*, 2009, 38(12): 3279-3282.
- [22] Ma X M, Tao Z M, Ma M J, *et al.* Retrieval method of side-scatter lidar signal based on charge coupled device technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0201001.
麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0201001.