

夫琅禾费暗线激光雷达探测青岛市郊大气边界层

张 薇 吴松华 宋小全 靳 磊

(中国海洋大学海洋遥感研究所, 山东 青岛 266100)

摘要 激光雷达通过接收微弱的回波信号进行大气探测, 具有高时空分辨率等优点, 但由于受到强烈太阳背景光的影响, 激光雷达白天探测的信噪比提高受到限制, 难以对大气物理参数及大气边界层进行全天时同等性能观测。针对此问题, 研制了一种新波长、工作在夫琅禾费暗线下的光子计数激光雷达, 进而利用夫琅禾费光子计数激光雷达对青岛市郊的大气边界层进行观测实验。发射激光选取太阳暗线波长, 激光雷达白天探测的信噪比提高了2~3倍, 昼夜探测性能相当。由探测数据反演得到的消光系数显示了2011年夏季青岛郊区大气边界层气溶胶的垂直分布结构特征。

关键词 遥感; 激光雷达; 夫琅禾费暗线; 消光系数; Fernald方法

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0628002

Atmospheric Boundary Layer Detected by a Fraunhofer Lidar over Qingdao Suburb

Zhang Wei Wu Songhua Song Xiaoquan Jin Lei

(Ocean Remote Sensing Institute, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China)

Abstract Lidar with high spatial and temporal resolution detects atmospheric parameters by receiving the echo signal signal. Because of the disturbance of strong solar background light, the signal-to-noise ratio (SNR) of lidar in the daytime is greatly restricted so that the atmospheric parameters and characteristics of the atmospheric boundary layer are hardly observed with consistent quality through day and night. The photon counting lidar prototype in Fraunhofer dark lines is devised to solve this problem. The atmospheric boundary layer of Qingdao suburb is observed using the lidar. The SNR is improved 2~3 times by operating the lidar at the wavelength of solar dark lines. The extinction coefficient obtained by inversion of the detected data illustrates the vertical structures of aerosol in the atmospheric boundary over Qingdao suburb during summer 2011.

Key words remote sensing; lidar; Fraunhofer dark lines; extinction coefficient; Fernald method

OCIS codes 120.0280; 070.4790; 290.1090

1 引 言

大气边界层是对流层最靠近地面的气层, 受到湍流交换、太阳辐射和地表等影响, 气候日变化明显^[1]。大气边界层的气溶胶粒子包含各种固态、液态和固液混合态的微粒, 既有由海洋溅沫、土壤和矿物质、生物圈活动自然形成的, 也有由石化燃料和生物质燃烧、工农业生产活动等人类活动产生的^[2]。大气边界层内的气溶胶日变化显著, 探测气溶胶光学参数的时空分布对气候变化研究以及人类生活具

有重要意义^[1,3]。

激光雷达作为探测大气气溶胶的有效工具, 具有时空分辨率高、可探测垂直剖面信息等优点, 主要包括米氏散射激光雷达、拉曼激光雷达^[4~6]、高光谱分辨率激光雷达^[7]和偏振激光雷达^[8~10]。通常情况下, 激光雷达后向散射信号非常微弱, 白天探测容易受到强烈太阳背景光的影响。

为了减小白天探测太阳背景光的影响, 通常采用文献^[11]中的方法提高白天探测的信噪比(SNR,

收稿日期: 2013-01-02; **收到修改稿日期**: 2013-01-30

基金项目: 国家 863 计划(2008AA12Z101)资助课题。

作者简介: 张 薇(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事大气激光探测方面的研究。E-mail: zhangwei_ouc@163.com

导师简介: 吴松华(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事高光谱分辨率激光雷达、多普勒激光雷达等方面的研究。

E-mail: wush@ouc.edu.cn(通信联系人)

R_{SN}),包括提高激光发射功率、使用窄带宽高透射率的干涉滤光片和压缩激光发散角、使接收视场角与发散角相匹配等。窄带干涉滤光片带宽越窄,透射率越低,复杂度和造价也大幅度提高。目前较好的干涉滤光片带宽为 0.1 nm,用于滤波的法布里-珀罗标准具带宽达到 0.04 nm,但仍远远大于单模脉冲激光器的线宽。即使采用带宽最窄的滤光片,仍有与发射激光波长一致的太阳背景光进入接收系统,激光雷达昼夜探测能力差距仍然较大。

针对上述问题,本文利用一种工作波长在夫琅禾费暗线上的光子计数激光雷达^[12]。波长确定在太阳光谱中镁原子的主要夫琅禾费暗线上,即518.36 nm,

用来进一步减少白天太阳背景光对回波信号的影响,大幅度提高激光雷达白天探测能力。

通过分析夫琅禾费全天气子计数激光雷达的探测数据,分析其太阳背景光、白天和夜间探测信噪比;利用 Fernald 方法反演了青岛郊区夏季大气边界层气溶胶消光系数垂直分布的时间变化特征,并对结果进行了分析讨论。

2 系统原理

大气探测激光雷达通常分为 3 个部分:发射系统,接收系统和信号接收、采集、运行控制系统。系统原理图如图 1 所示,其主要性能指标如表 1 所示。

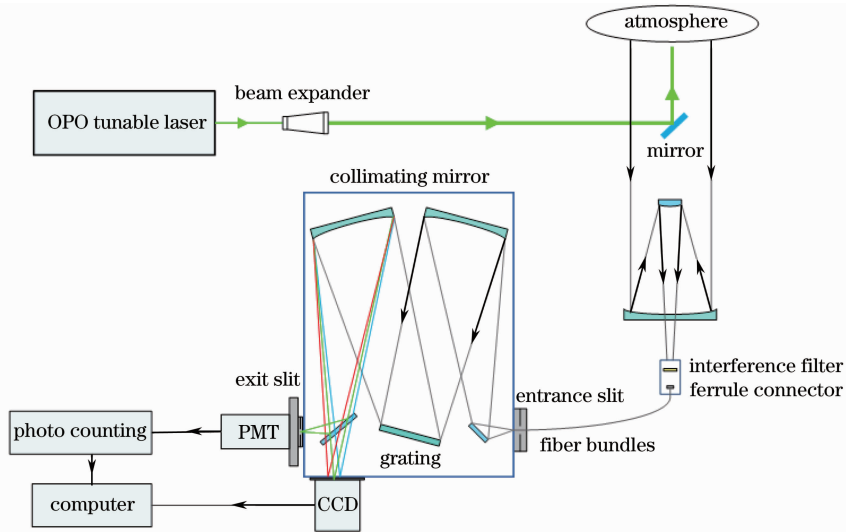


图 1 夫琅禾费激光雷达系统原理图

Fig. 1 System diagram of Fraunhofer lidar

表 1 系统参数

Table 1 System parameters

Transmitter	Laser		
	OPO pumped by 355 nm Nd:YAG laser		
	Repetition rate /Hz		10
	Pulse width /ns		5
	Wavelength range /nm		420~2400
	OPO pulse energy /mJ		28
Receiver	Telescope	Schmidt-Cassegrain,	aperture 200 mm
	Interference filter	Bandwidth 10 nm,	central wavelength 520 nm
	Fiber	Core diameter 200 μm,	multi-core
	Spectrometer	Linear dispersion 1.52 nm/mm,	focal ratio 6.5/f, 1200 line/nm
	PMT Quantum efficiency	>15%, transit time 5.4 ns, rise time 0.78 ns	
Data acquisition	Photon counting	Maximum counting rate 200 MHz	
	AD acquisition	Sampling frequency 20 MHz (modulated), resolution 14 bit	

选取镁原子夫琅禾费暗线^[12]作为激光雷达弹性散射测量通道发射波长,其中心波长为 518.36 nm,故可调谐激光光源是激光雷达发射系统的关键。激光发射系统采用 355 nm 的 Nd:YAG 三倍频抽运光

学参量振荡器(OPO),输出 518.36 nm 的激光波长。大气波信号通过口径为 200 mm 的施密特-卡塞格林望远镜与多芯光纤束系统耦合,输入光栅分光系统使用电荷耦合器件(CCD)确认激光发射波长及光

栅中心观测波长,回波信号由光电倍增管(PMT)转化为电信号,进入模数(AD)采集和光子计数器进行数字化采集,采集系统的距离分辨率为7.5 m。

3 太阳背景光探测分析

夫琅禾费暗线主要是由于太阳光谱受到太阳外层大气中原子的吸收而形成的,较强烈的吸收可使太阳背景光强度下降60%~90%。由于发射波长所在的天空背景光被强烈吸收,故激光雷达可获得较好的全天气子计数能力。在大气观测实验前,系统进行了太阳背景光谱的探测分析。太阳背景光谱探测实验选取天气晴朗无云、无明显天气过程的2011年5月4日进行。实验采用激光雷达的光学接收系统CCD通道探测太阳光谱。图2为2011年5月4日当地时间14:00夫琅禾费激光雷达光谱通道观测到的510~530 nm的太阳光谱。作为对照,图3选取了Kurucz^[13]2004年的516~519 nm的太阳光谱数据。

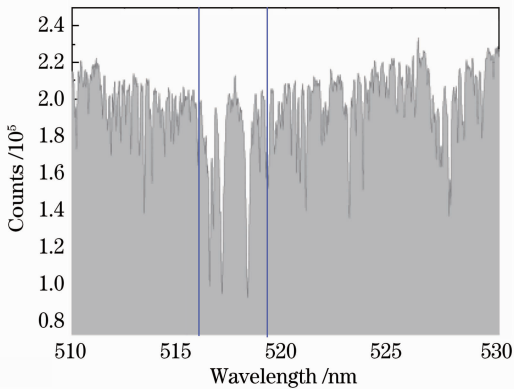


图2 夫琅禾费激光雷达光谱通道观测到的太阳光谱
Fig. 2 Solar spectrum observed by the spectral channel of Fraunhofer lidar

从太阳光谱实际观测结果可见,太阳光谱并不是连续的,有明显的暗线存在。系统测量的结果(516~519 nm波段图中蓝线框出)与Kurucz 2004年所提供的太阳光谱结果基本一致。3条比较明显的暗线分别为516、517、518 nm附近镁原子夫琅禾费暗线。

为进一步分析夫琅禾费暗线对激光雷达探测信噪比的影响,实验观测了所选的暗线内外(on-line、off-line见图3)的太阳背景信号。实验选择晴朗无云且没有明显天气过程的2011年5月6日进行。将OPO的输出激光波长分别调至518.36 nm(on-line)和518.65 nm(off-line),接收系统仍然利用高光

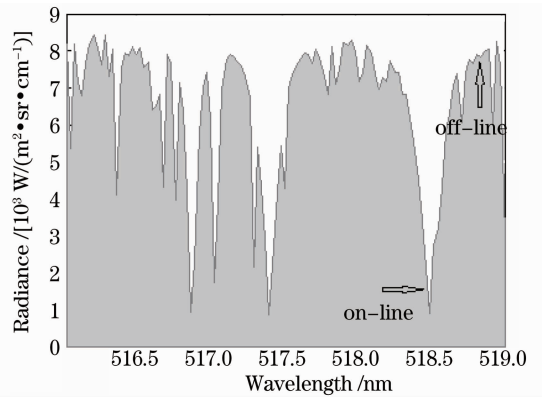


图3 Kurucz 2004年数据库提供的太阳光谱
Fig. 3 Solar spectrum supplied by Kurucz in 2004

谱分辨率光学接收通道,观测到的结果如图4所示。

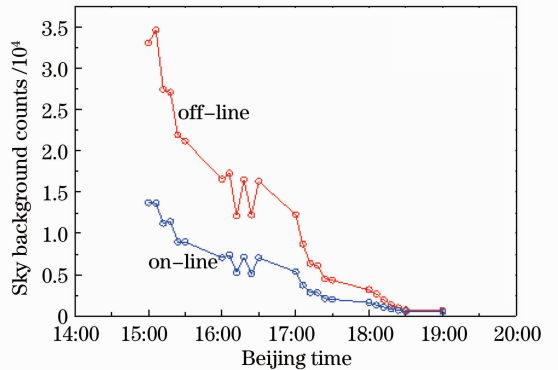


图4 夫琅禾费暗线中心与非暗线处背景光变化
Fig. 4 Tendency of solar background comparison between on-line and off-line measurements

从图4可以看出,下午15:00非暗线处太阳背景光强随着时间的推移变化显著,暗线中心处太阳背景光强为非暗线处的30%。太阳背景光受到较大程度地抑制。与天文数据库的太阳光谱对比可知,系统测得的暗线所体现的镁原子对太阳光的吸收程度略小于Kurucz 2004暗线,而且3条主暗线周围的吸收较弱的精细结构没有完全体现。在激光雷达观测实验中,太阳光谱中存在暗线,且暗线处的背景光强远小于非暗线处的太阳背景光强,但是实验观测数据也未达到理论上夫琅禾费暗线的最小背景光强,即最大光强的10%左右。经分析这主要是由于激光雷达光谱分光系统的分辨率不够,难以分辨上述精细结构。在波长435.8 nm处系统光谱分辨率为0.02 nm,分辨率不够高导致了部分信息丢失。

4 信噪比分析

将夫琅禾费激光雷达的工作波长分别调至镁原

子吸收暗线的 on-line 和 off-line 处,分析激光雷达回波信号的探测信噪比。图 5、6 分别显示了 2011 年 6 月 3 日下午暗线与非暗线处回波的信噪比以及二者的信噪比差 Δ , 每组数据分别是 4 组回波信号的累积平均。暗线处回波信号的信噪比明显大于非暗线处回波的信噪比($\Delta > 0$), 回波信号的信噪比提高了 2 倍以上。

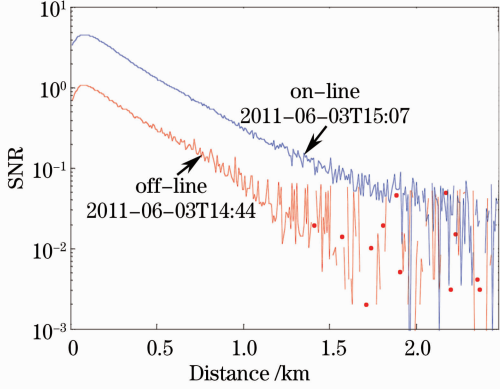


图 5 白天夫琅禾费暗线中心(518.36 nm)与非暗线处信噪比曲线

Fig. 5 SNR of on-line and off-line measurements for Fraunhofer line in daytime

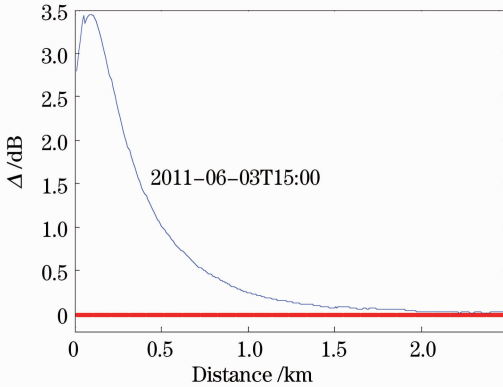


图 6 白天夫琅禾费暗线中心(518.36 nm)与非暗线处信噪比差

Fig. 6 SNR difference between on-line and off-line measurements for Fraunhofer line in daytime

作为对照,图 7、8 显示了 2011 年 6 月 3 日夜间暗线处与非暗线回波的信噪比以及二者的信噪比差,每组数据分别是 4 组回波信号的累积平均。暗线处回波信号的信噪比与非暗线处回波的信噪比基本一致。

5 大气气溶胶探测实验

5.1 气溶胶消光系数反演方法

夫琅禾费暗线激光雷达原理样机包括一个弹性

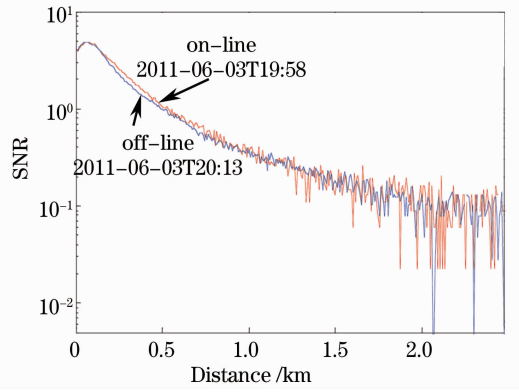


图 7 夜间夫琅禾费暗线中心(518.36 nm)与非暗线处信噪比曲线

Fig. 7 SNR of on-line and off-line measurements for Fraunhofer line in nighttime

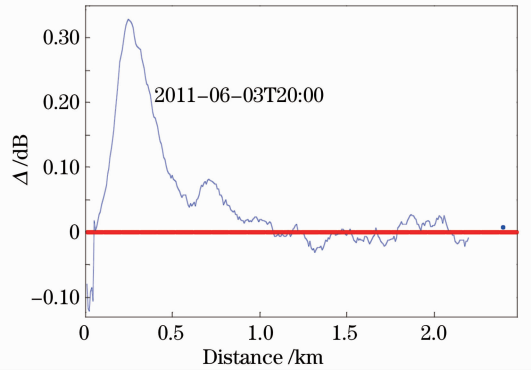


图 8 夜间夫琅禾费暗线中心(518.36 nm)与非暗线处信噪比差

Fig. 8 SNR difference between on-line and off-line measurements for Fraunhofer line in nighttime

散射探测通道,采用 Fernald 方法^[14]对该通道探测到的后向散射信号进行了气溶胶消光系数反演。激光雷达方程如下:

$$P(R) = \frac{CP_0}{R^2} [\beta_a(R) + \beta_m(R)] \times \exp\left\{-2 \int_0^R [\sigma_a(r) + \sigma_m(r)] dr\right\}, \quad (1)$$

式中 R 为探测距离, $P(R)$ 为后向散射信号回波功率, C 为系统常数, P_0 为激光雷达发射功率, β_a 和 β_m 为气溶胶和分子的后向散射系数, σ_a 和 σ_m 为气溶胶和分子的消光系数。

利用 Fernald 方法来反演气溶胶消光系数,首先选取参考高度 R_t , 参考高度以下各个高度上的气溶胶消光系数为

$$\sigma_a(R) = -\frac{S_a}{S_m}\sigma_m(R) + \frac{X(R)\exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_R^{R_f}\sigma_m(r)dr\right]}{\frac{X(R_f)}{\sigma_a(R_f) + \frac{S_a}{S_m}\sigma_m(R_f)} + 2\int_R^{R_f}X(r)\exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_R^{R_f}\sigma_m(r')dr'\right]dr}, \quad (2)$$

参考高度 R_f 以上各个高度的气溶胶消光系数为

$$\sigma_a(R) = -\frac{S_a}{S_m}\sigma_m(R) + \frac{X(R)\exp\left[-2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_{R_f}^R\sigma_m(r)dr\right]}{\frac{X(R_f)}{\sigma_a(R_f) + \frac{S_a}{S_m}\sigma_m(R_f)} - 2\int_{R_f}^RX(r)\exp\left[-2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_{R_f}^R\sigma_m(r')dr'\right]dr}, \quad (3)$$

式中 $X(R) = P(R)R^2$, $S_a = \alpha_a/\beta_a$ 为激光雷达比, $S_m = \sigma_m/\beta_m$ 。

由于该原理样机的有效测量高度为 2~3 km, 故参考高度会根据回波信号的信噪比设定, 通常取 2~3 km。参考高度处的气溶胶消光系数可以根据过境时的激光雷达和红外线路者卫星检测 (CALIPSO) 的消光系数来确定, 约为 0.13 km^{-1} 。

5.2 S_a 的确定及结果分析

5.2.1 激光雷达比 S_a 的确定

气溶胶激光雷达比 S_a 与气溶胶的大小、形状和化学成分以及大气环境 (如湿度) 有关, 并且随着高度的变化而变化。实验进行时间为夏季, 青岛在这一季节以海陆风为主, 实验进行时段从正午至夜间, 海风盛行, 气溶胶类型为海洋型气溶胶。Franke 等^[15]通过拉曼激光雷达在 2001 年测得海洋型气溶胶的 S_a 在 20~35 sr 之间^[15]。

图 9 为同组数据激光雷达比分别为 20、30、35 时的气溶胶消光系数。3 条曲线趋势一致, 在 1 km 以上基本重合, 1 km 以下有微小差异, 最大值约为 0.15 km^{-1} 。图 9 给出了不同激光雷达比下气溶胶消光系数的动态范围。本实验的 S_a 取值为 30 sr。

5.2.2 气溶胶垂直探测分析

实验选取无明显天气过程的时间进行, 以便在大气日变化均匀的条件下进行白天和夜间探测性能的比较。地点为山东省青岛市中国海洋大学崂山校区, 其经纬度为 (36.16°N , 120.49°E)。从 2011 年 5 月至 8 月选取每个月晴朗的时间进行实验, 实验每天时间段主要是 10:00~20:00。

图 10 为 2011 年 6 月 3 日夫琅禾费激光雷达在不同时刻观测到的气溶胶垂直消光系数随着时间的变化曲线, 可以看出从上午 10:30 至下午 16:31 时 1.5 km 以下的气溶胶缓慢增加, 16:31 至 17:58 气溶胶呈递减趋

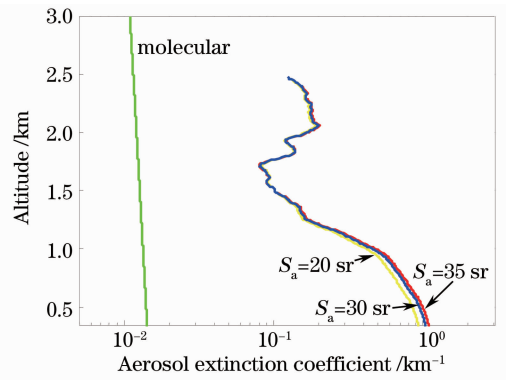


图 9 选取不同激光雷达比时的气溶胶消光系数
Fig. 9 Aerosol extinction coefficients for different lidar ratios

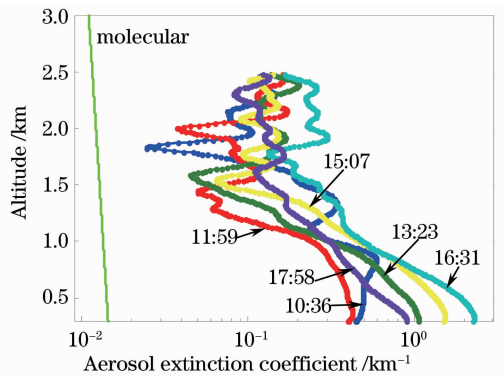


图 10 青岛 2011 年 6 月 3 日气溶胶剖面图
Fig. 10 Aerosol profile on 3rd, June, 2011, in Qingdao
势, 而 1.5 km 以上的气溶胶无明显变化。

图 11 为 2011 年 8 月 24 日夫琅禾费激光雷达在不同时刻观测到的气溶胶垂直消光系数随着时间的变化曲线, 可以看出 1.5 km 以下的气溶胶变化缓慢, 而 1.5 km 以上的气溶胶变化比较明显, 11:16 时天空出现低层云, 这使得气溶胶变化相差近一个数量级。

为了更加直观地反映大气中气溶胶的逐时变化

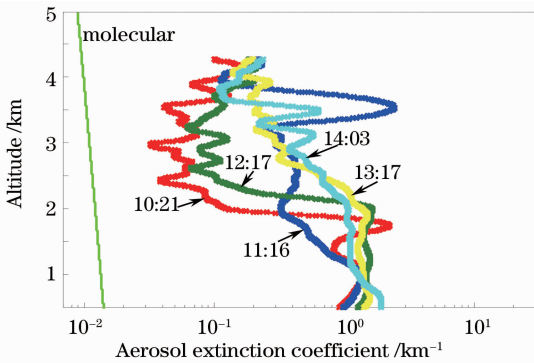


图 11 青岛 2011 年 8 月 24 日气溶胶剖面图
Fig. 11 Aerosol profile on 24th, August, 2011, in Qingdao

趋势,实验利用激光雷达对大气进行长时间连续垂直观测,获得气溶胶随时间高度(THI)分布的变化规律。图 12 和图 13 分别为 2011 年 6 月 3 日的距离平方校正光子计数回波信号的 THI 图和气溶胶消光系数的 THI 图。探测高度为 7.5 km,根据回波信号信噪比,选取 2.475 km 以下的数据显示,气溶胶消光系数 THI 图显示在 1 km 以下出现气溶胶层。

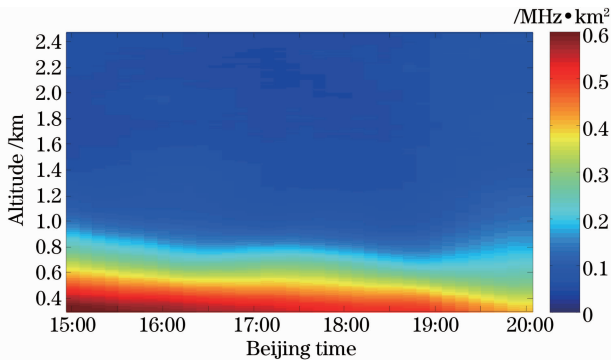


图 12 青岛 2011 年 6 月 3 日距离平方校正光子计数回波信号的 THI 图

Fig. 12 THI drawing for distance square correction photon counting echo signal on 3rd, June, 2011, in Qingdao

夫琅禾费暗线激光雷达在观测期间稳定性良好,从 THI 图中可以看出,当日下午至傍晚气溶胶变化趋势缓慢。实验地点位于青岛市郊,大气中的气溶胶变化受人类活动影响较小,主要受大气湍流的影响。

近日落时,地面接受的太阳辐射逐渐减少,湍流活动逐渐减弱。根据气象资料,青岛地区 6 月 3 日 15:00 和 4 日 03:00 的相对湿度分别为 96% 和 93%。夏季青岛地区的相对湿度较大,由于气溶胶吸湿作用的影响,消光系数较大。由于相对湿度的变化范围较小,故其对气溶胶消光系数的影响很小。

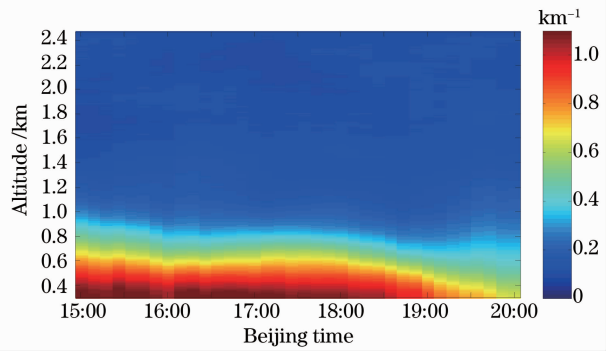


图 13 青岛 2011 年 6 月 3 日气溶胶消光系数 THI 图
Fig. 13 THI drawing for aerosol extinction coefficient on 3rd, June, 2011, in Qingdao

根据激光雷达观测资料显示,18:30~20:00 气溶胶消光系数下降,分析可能主要是由大气湍流活动减弱引起的气溶胶沉降造成的。

5.3 探测结果与美国 CALIPSO 卫星对比

激光雷达所在位置经纬度为(36.16°N,120.49°E),激光雷达进行大气边界层探测期间,美国 CALIPSO 卫星的气溶胶和云探测激光雷达于 2011 年 6 月 3 日 12:53:04~13:45:34 经过青岛,CALIPSO 卫星每个探测剖面的空间点间距为 59.4 km,选取了该卫星最近过境测量数据(36.14°N,119.68°E)进行印证分析,二者相距离约 46 km。图 14 为 11:00~20:00 这一段时间内的激光雷达信号,每隔 30 min 取样一次反演消光系数,最后与 CALIPSO level-2 数据消光系数进行对比。考虑到 CALIPSO 过境时段大气中风速的变化、CALIPSO 空间范围的变化等因素,CALIPSO level-2 数据消光系数在激光雷达消光系数的动态带状范围内,可以对激光雷达反演结果进行印证。

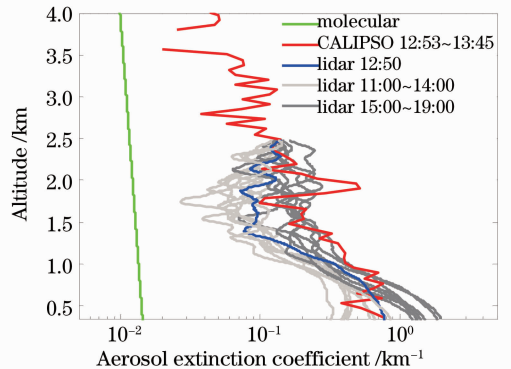


图 14 青岛地区 2011 年 6 月 3 日 CALIPSO level-2 消光系数与激光雷达回波信号消光系数对比
Fig. 14 Comparison between the extinction coefficients of lidar echo signal and CALIPSO level-2 data on 3rd, June, 2011, in Qingdao

6 结 论

利用夫琅禾费暗线激光雷达原理样机,进行了大气边界层气溶胶特征探测。分析表明,将激光波长调至太阳夫琅禾费暗线处,白天与夜间回波信号探测信噪比差小于 $\pm 1\text{dB}$,在太阳背景光较强的绿光波段,能够达到全天时背景相当的探测能力。实现了镁原子夫琅禾费暗线波长的激光雷达,目前处于原理样机研究阶段。受技术条件所限,目前采用的 OPO 激光频率稳定和带宽压缩技术仍需进一步改进,以减小测量过程中的频率漂移,与接收带宽精确匹配,以最高效率利用夫琅禾费暗线的背景光抑制特性。大气边界层消光系数剖面和时间序列观测实验,以及与 CALIPSO 卫星探测数据对比分析,显示了该原理样机有较好的稳定性。后续研究将重点解决发射激光器的单频线宽压缩技术,探索以夫琅禾费暗线为原理的高光谱分辨率激光雷达技术。

参 考 文 献

- 1 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo *et al.*. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Beijing University Press, 2006. 239~240
盛裴轩,毛节泰,李建国. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006. 239~240
- 2 K. B. Strawbridge, B. J. Snyder. Daytime and nighttime aircraft lidar measurements showing evidence of particulate matter transport into the northeastern valleys of the Lower Fraser Valley, BC [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(34): 5873~5886
- 3 Mao Jietai, Zhang Junhua, Wang Meihua. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(5): 625~634
毛节泰,张军华,王美华. 中国大气气溶胶研究综述[J]. 气象学报, 2002, **60**(5): 625~634
- 4 Dinoev Todor. Automated Raman Lidar for Day and Night Operational Observation of Tropospheric Water Vapor for Meteorological Applications [D]. Suisse: MeteoSwiss, 2009.

- 1~139
- 5 Yu Haili, Hu Shunxing, Wu Xiaoping. Measurement of CO₂ concentration profile of lower-troposphere with Raman lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(8): 0801003
于海利,胡顺星,吴晓庆. 拉曼激光雷达探测低对流层大气二氧化碳分布[J]. 光学学报, 2012, **32**(8): 0801003
- 6 Kong Weiguo, Chen Siying, Zhang Yinchao *et al.*. Threshold amendment and time-delay compensation of rotational Raman lidar for atmospheric measurement [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 022801
孔卫国,陈思颖,张寅超等. 基于转动拉曼测温激光雷达数据采集系统的阈值校正和延时补偿技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 022801
- 7 Edwin E. Eloranta. High spectral resolution lidar [J]. *Springer Series in Optical Sciences*, 2005, **102**: 143~167
- 8 R. M. Schotland, K. Sassen, R. Stone. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors [J]. *J. Appl. Meteorol.*, 1971, **10**(5): 1011~1017
- 9 Bo Guangyu, Liu Dong, Wang Bangxin *et al.*. Two-wavelength polarization airborne lidar for observation of aerosol and cloud[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(10): 1014002
伯广宇,刘东,王邦新等. 探测云和气溶胶的机载双波长偏振激光雷达[J]. 中国激光, 2012, **39**(10): 1014002
- 10 Wu Lianghai, Gao Jun, Fan Zhiguo *et al.*. Scattering of particles in the atmosphere and their influence on celestial polarization patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0701005
吴良海,高隽,范之国等. 大气粒子散射特性及其对空间偏振分布的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0701005
- 11 Liu Bingyi. Performance Optimization and Wind Field Retrieval for Mobile Wind Lidar [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. 20~29
刘秉义. 车载测风激光雷达性能优化和风场反演[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. 20~29
- 12 Songhua Wu. Daytime photon counting lidar prototype in the Fraunhofer lines [C]. *SPIE*, 2011, **8192**: 819207
- 13 R. L. Kurucz. Solar Source Function [EB/OL]. [2004-05-01]. http://rtweb.aer.com/solar_frame.html
- 14 F. G. Femald. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(5): 652~653
- 15 K. Franke, A. Ansmann, D. Muller *et al.*. One-year observations of particle lidar ratio over the tropical Indian Ocean with Raman lidar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(24): 4559~4562

栏目编辑: 王晓琪