

扫描式气溶胶激光雷达研制与观测研究

陈超^{1,2,3}, 王章军^{1,2,3}, 宋小全^{4,5}, 张涛^{1,2,3}, 杜立彬^{1,2,3}, 孟祥谦^{1,2,3}, 刘兴涛^{1,2,3}, 李先欣^{1,2,3},
李辉^{1,2,3}, 庄全凤^{1,2,3}, 王秀芬^{1,2,3}

- (1. 齐鲁工业大学(山东省科学院) 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266100;
2. 山东省海洋监测仪器装备技术重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 山东 青岛 266100;
4. 中国海洋大学 信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100;
5. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 气溶胶在大气光学、大气辐射、大气化学、大气污染和云物理学等领域具有重要研究意义, 是大气监测的重要要素。为了更好地研究大气气溶胶光学特性及其时空变化特征, 山东省科学院海洋仪器仪表研究所研制了基于 532 nm 波长、单脉冲能量 60 μJ 、可进行三维扫描测量的气溶胶激光雷达。主要介绍了激光雷达的结构设计、技术指标、探测原理、探测模式、观测实验与数据分析。通过激光雷达在青岛小麦岛海洋环境监测站的观测实验数据, 分析了不同天气条件下的大气水平能见度, 验证了时间-高度显示、距离-高度显示与平面-位置显示测量模式的有效性。通过多种观测模式的数据, 利用 Fernald 方法反演了不同时刻的气溶胶消光系数, 并分析了气溶胶与云光学特性的时空变化特征。探测结果表明: 扫描式气溶胶激光雷达可以有效测量大气水平能见度, 通过扫描系统可以获取不同方向的气溶胶性质分布特征从而扩展了其探测范围。多种探测模式相结合可以获取云、气溶胶和边界层时空变化特征。

关键词: 激光雷达; 扫描式; 气溶胶; 能见度; 边界层

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1230009

Development and observational studies of scanning aerosol lidar

Chen Chao^{1,2,3}, Wang Zhangjun^{1,2,3}, Song Xiaoquan^{4,5}, Zhang Tao^{1,2,3}, Du Libin^{1,2,3}, Meng Xiangqian^{1,2,3},
Liu Xingtiao^{1,2,3}, Li Xianxin^{1,2,3}, Li Hui^{1,2,3}, Zhuang Quanfeng^{1,2,3}, Wang Xiufen^{1,2,3}

- (1. Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology, Shandong Academy of Sciences, Qingdao 266100, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Monitoring Instrument Equipment Technology, Qingdao 266100, China;
3. National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment, Qingdao 266100, China;
4. College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
5. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: Aerosol plays an important role in atmospheric optics, atmospheric radiation, atmospheric chemistry, atmospheric pollution and cloud microphysics, which has been an important factor of

收稿日期: 2018-07-05; 修订日期: 2018-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(41405023); 国家重点研发计划(2016YFC1400300); 海洋公益性行业科研专项(201505031);

山东省自主创新及成果转化专项(2014ZZCX06103); 山东省自然科学基金(ZR2017QD009, ZR2015PD002, ZR2015PD007)

作者简介: 陈超(1982-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事大气激光雷达设计与应用方面的研究。Email: lidarcc@126.com

atmospheric monitoring. To better study temporal and spatial variation of optical characteristics of atmospheric aerosol, a scanning aerosol lidar employing a pulsed laser with single laser energy of $60 \mu\text{J}$ at 532 nm was developed by Institute of Oceanographic Instrumentation, Qilu University of Technology, Shandong Academy of Sciences. The structure, technical parameters, detection principle and modes were introduced; some experiments were performed and analyzed. Through the measurements in Wheat Island marine environment monitoring station, the horizontal visibility under different weather conditions was analyzed. It was proved that the developed lidar can provide detection modes of time height indication (THI), range height indication (RHI) and plane position indication (PPI). The temporal and spatial variation of aerosol and cloud properties were analyzed through the data of different detection modes and extinction coefficient of aerosol in different moments retrieved by the Fernald method. The observational results show that the lidar can effectively acquire horizontal visibility, the distribution of aerosol in different directions, the temporal and spatial variation of aerosol, cloud and the structure of boundary layer.

Key words: lidar; scanning; aerosol; visibility; boundary layer

0 引言

大气气溶胶主要分布于大气对流层,对太阳辐射、气候变化和空气污染等有重要影响,还在云的形成过程中扮演凝结核的角色,是气象预报、气候研究、环境监测等领域的重要气象参数之一^[1-3]。随着城市化、工业化的飞速发展,大气污染程度日趋严重,边界层中气溶胶,尤其是可吸入颗粒物浓度明显增加,极大的影响了空气质量,从而危害着人类健康^[4-5]。

大气激光雷达具有高时空分辨率的探测优势,现在已经成为实时连续监测大气物理参数、云和气溶胶等特性以及其时空分布的有力工具^[6-7]。很多科研部门也已经利用激光雷达数据反演颗粒物粒径谱分布与质量浓度,与现有的颗粒物单点监测设备进行功能互补^[8-9]。近年来,小型激光雷达如微脉冲激光雷达在大气气溶胶、云和边界层高度的实时、连续探测上得到了广泛应用。像美国 Sigma Space 公司的微脉冲激光雷达,法国 CIMEL ELECTRONIQUE 公司的激光雷达 CE370,芬兰 Vaisala 激光云高仪等,都已经成为可靠的气溶胶常规观测产品在全世界范围内进行应用^[10-11]。目前国内气象部门应用的大气激光雷达基本还是依赖于进口。因此研发能服务于气象、环境的气溶胶观测激光雷达产品,具有重要的研究意义和社会效益。

从激光雷达的小型化、工程化和产品化等方面

出发,自主研发的扫描式气溶胶激光雷达,具有体积小、结构简单、控制精度和自动化程度高的特点,扩展了小型激光雷达的探测模式、探测范围和自动探测的能力,可进行长期的业务化观测。

文中重点阐述了扫描式气溶胶激光雷达的系统结构与性能参数,通过 2015 年 5 月至 9 月,在青岛小麦岛海洋环境监测站(36.05°N , 120.43°E , 海拔高度 13 m)的观测实验研究,验证了其探测能力和工作可靠性,通过数据分析与对比,论证了其可以观测的参数及数据准确性。

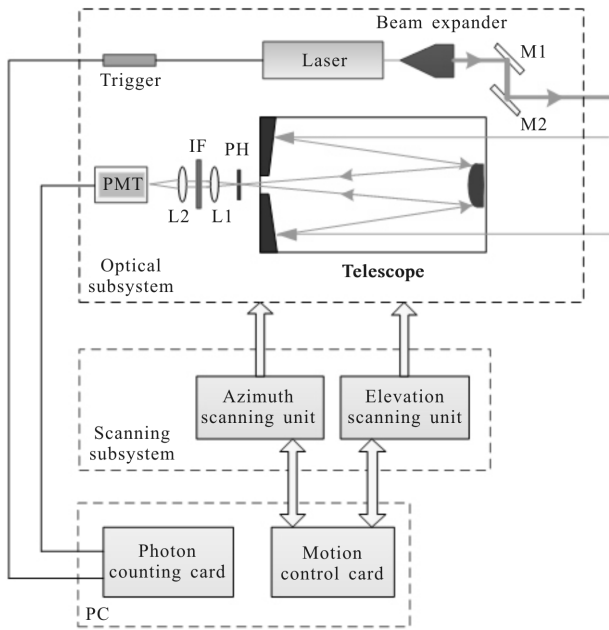
1 系统设计

图 1 为扫描式气溶胶激光雷达的外观设计图与结构示意图。



(a) 外观图

(a) Appearance



(b) 结构图

(b) Structure

图 1 扫描式气溶胶激光雷达

Fig.1 Scanning aerosol lidar

扫描式气溶胶激光雷达具有三维立体扫描观测的功能,主要由光学子系统和扫描子系统组成。光学子系统中激光器发射 532 nm 波长脉冲激光作为探测光源,经过 10 X 扩束镜准直后,通过反射镜 M1 与 M2 发射至大气中。大气回波信号由口径 200 mm 的施密特-卡塞格林望远镜接收,经过小孔光阑 (PH)、准直透镜(L1)、干涉滤波片(IF)与会聚透镜(L2)后,由光电倍增管(PMT)将光信号接收并转换为电信号,最终数据由光子计数卡采集后在工控机上存储、显示。

扫描子系统主要用于控制激光光束的出射方向,由俯仰扫描单元、水平扫描单元和运动控制单元组成。俯仰扫描与水平扫描都采用电机驱动,从机械结构设计上考虑,为了使整个系统结构紧凑,俯仰扫描单元采用同步带传动结构,水平扫描单元采用齿轮传动结构。为了提高输出扭矩,降低负载惯量,俯仰扫描单元和水平扫描单元都采用 1:10 减速机传动,同时减小了后续传动结构(如同步带轮和齿轮)的体积,有利于系统小型化的结构设计。运动控制单元主要通过工控机上的运动控制卡发出对电机的控制指令(包括起停、转速和转向)来实现对激光雷达

水平与俯仰扫描的控制。

扫描式气溶胶激光雷达采用产品化设计理念,扫描子系统与光学子系统采用一体化设计,以使激光雷达具有体积小(长、宽、高为 650 mm×510 mm×1 100 mm)、质量轻(80 kg)、操作简单和稳定性好等特点。主要技术指标如表 1 所示。

表 1 扫描式气溶胶激光雷达技术指标

Tab.1 Parameters of scanning aerosol lidar

Parameters	Specification
Transmitter	
Type	LD-pumped Nd:YAG
Laser wavelength/nm	532
Pulse energy/ μ J	60
Pulse duration/ns	10
Pulse repetition frequency/kHz	7
Beam divergence/ μ rad	200
Receiver	
Type	Schmidt-Cassegrain
Diameter/mm	200
Field of view/ μ rad	500
Filter bandwidth/nm	0.5
Detector type	PMT
Detection mode	Photon counting
Range resolution/m	37.5
Detection range/km	0.1-15
Scanning subsystem	
Azimuth angle/($^{\circ}$)	0-355
Elevation angle/($^{\circ}$)	0-180

为了便于用户在扫描式气溶胶激光雷达业务运行时使用和观察数据,文中基于 C# 语言设计开发了数据采集与控制软件,可控制激光发射的方向、设置采集参数、切换探测模式(如时间-高度显示(Time Height Indication, THI)测量模式、平面-位置显示(Plane Position Indication, PPI)测量模式和距离-高度显示(Range Height Indication, RHI)测量模式等);可以进行数据的实时采集及读取历史数据。如图 2 所示,THI 测量模式软件界面,可以实时观察探测方向上的大气状态,也可通过 THI 图观察一段时间内气溶胶的时空分布特征。界面设计具有较强的可视性和操作性。

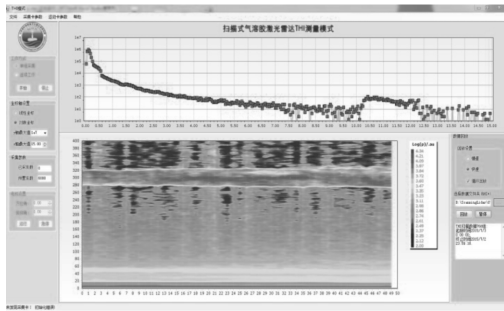


图 2 扫描式气溶胶激光雷达数据采集与控制软件 THI 测量模式界面

Fig.2 THI mode interface of scanning aerosol lidar's data acquisition and control software

2 探测原理与模式

扫描式气溶胶激光雷达主要利用激光束与大气粒子散射与分子散射(米散射与瑞利散射)的回波信号来进行大气参数的测量。回波信号与许多因素有关,其接收到的距离 r 处大气后向散射信号功率 $P(r)$ 可以由激光雷达方程确定^[12]:

$$P(r) = \frac{C P_0 A_r \beta(r) T^2(r)}{r^2} \quad (1)$$

式中: P_0 为发射激光脉冲的功率; A_r 为接收望远镜的有效接收面积; C 为激光雷达校正常数,与系统的几何重叠因子、系统的总透过率和信号的距离分辨率有关; $T(r)$ 为大气透过率,可表示为:

$$T(r) = \exp\left\{-\int_0^r \alpha(r') dr'\right\} \quad (2)$$

式中: $\alpha(r)$ 与 $\beta(r)$ 分别表示包含大气分子和气溶胶的消光系数与后向散射系数。其反映了大气的光学特性,可以利用接收的信号,通过激光雷达方程来求解这两个变量,文中采用 Fernald 方法^[13]。

扫描式气溶胶激光雷达除了常规的垂直方向观测大气气溶胶廓线或 THI 测量模式外,还可以通过三维扫描装置按照 RHI 和 PPI 模式,对大气气溶胶进行三维立体扫描观测,便于对大气气溶胶、云、边界层等的时空分布特性有更直观的认识。同时还可以进行水平方向观测,反演大气水平能见度信息。

在假设水平消光均匀的情况下,水平能见度 V_h 可由下列公式给出^[14]。

$$V_h = \frac{3.912}{\alpha_w} = \frac{3.912}{\alpha_\lambda} \left(\frac{0.55}{\lambda}\right)^m \quad (3)$$

式中: α_λ 为探测波长 λ 的大气水平消光系数,对应距

离平方校正信号(Range Corrected Signal, RCS)取自然对数后与距离(R)拟合直线的斜率一半。 m 的取值可由下式确定:

$$m = \begin{cases} 0.585V_h^{\frac{1}{3}} & V_h < 6 \text{ km} \\ 1.3 & 6 \text{ km} \leq V_h < 50 \text{ km} \\ 1.6 & V_h \geq 50 \text{ km} \end{cases} \quad (4)$$

3 实验研究与数据分析

扫描式气溶胶激光雷达研制完成后,为了检验其可靠性和稳定性,在青岛小麦岛海洋环境监测站进行了多次观测实验见图 3。小麦岛海洋环境监测站位于青岛市崂山区,四面环海,观测地点距离海洋不到 20m,观测数据可以用于分析近海与海洋气溶胶特性。

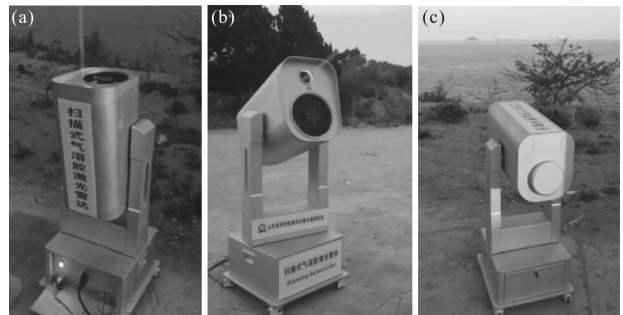


图 3 扫描式气溶胶激光雷达在小麦岛海洋环境监测站进行观测

Fig.3 Aerosol observations by scanning aerosol lidar at Wheat Island marine environment monitoring station

为了发挥扫描式气溶胶激光雷达探测灵活性和多模式观测的特点,获取尽可能多的数据产品,在实验过程中,分别进行了水平能见度观测,垂直方向观测,以及 THI、RHI 与 PPI 模式观测,通过数据反演获得了水平能见度信息、气溶胶消光系数、气溶胶、云与边界层的时空分布特征。为了满足业务化观测的需要,实验中可通过无线网络进行远程控制,也可通过软件设置测量模式实现无人值守观测。

3.1 水平能见度观测

能见度的大小直接影响人们的工作、生活以及交通活动的正常进行,能见度是决定机场开放还是关闭,航运是否正常进行的最关键因素。气溶胶是影响大气能见度的最主要因素^[15]。通过扫描式气溶胶激光雷达沿着海面进行了水平观测,获得了在不同的能见度条件下的观测数据。图 4(a)为 2015 年 5 月 17 日 19:30 累积 10 min 的观测数据,当天天气晴,能

能见度高,通过公式(3)计算的能见度约为 41.7 km。图 4(b)为 2015 年 5 月 18 日 19:30 累积 10 min 的观测数据,当天海上雾气很大,能见度很低,通过公式(3)计算的能见度约为 2.2 km。

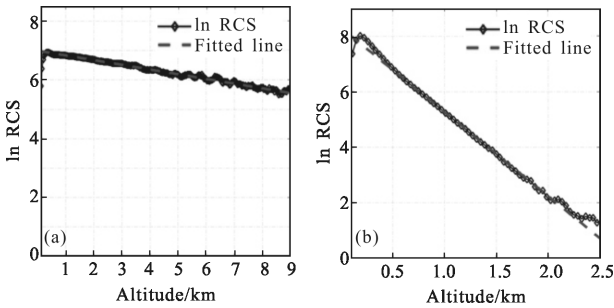


图 4 不同能见度的水平观测数据

Fig.4 Horizontal observation data of different visibility

由“WEATHER UNDERGROUND”(https://www.wunderground.com/)提供的青岛流亭国际机场(36.27°N, 120.38°E)气象观测数据可以看到,5月17日20:00能见度为29 km,相对湿度为26%,风速7 m/s,天气状态为晴;5月18日20:00能见度为3.6 km,相对湿度为64%,风速3 m/s,天气状态为汽雾。虽然与扫描式气溶胶激光雷达观测地点有差异,但反映当天的天气状态和能见度变化趋势基本一致。而造成两地观测点能见度有差别的主要原因是由于在湿度较小风速较大的情况下,海上的能见度一般大于城市里,所以5月17日小麦岛实验站的能见度大于青岛流亭国际机场的能见度;而在湿度较大风速较小的情况下,海上更容易形成海雾,从而影响能见度,所以5月18日小麦岛实验站的能见度更低。

3.2 气溶胶与云的观测

通过扫描式气溶胶激光雷达观测可以获得高时空分辨率的气溶胶和云性质的时空分布特征。当激光从大气进入云时,在云的边界处将会产生很强的后向散射信号,这样通过分析激光回波的变化,可以判别云底的高度^[16]。通过THI模式垂直观测,可以获得激光雷达上空云与气溶胶的时空分布特征。

如图5(a)所示,2015年5月16日20时至5月17日4时的距离平方校正信号THI图,可以明显地观察到到低空3 km以下气溶胶和云的时空变化特征,也可以清楚地看到高空卷云在激光雷达上空的变化,最终稳定在大约7~10 km高度的过程。图5(b)为青岛国家基本气象站(36.07°N, 120.33°E)5月17日19:15探空数据获得的相对湿度廓线。相对湿度的垂直分布与空中是否有云密切相关,一般晴空时,若大气没有明显的上升运动,空气中的相对湿度随高度上升是递减的。在有云的情况下,云中的相对湿度会明显增大。通过图5可以看到激光雷达观测有云的高度相对湿度明显变大。

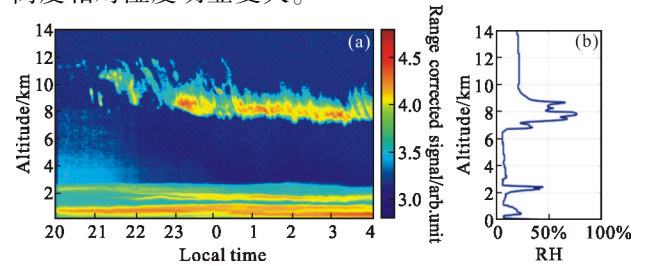


图 5 (a) 距离平方校正信号 THI 图, (b) 相对湿度

Fig.5 (a) THI figure of RCS, (b) relative humidity

图 6 为通过 Fernald 方法反演的图 5(a)中 5 个整

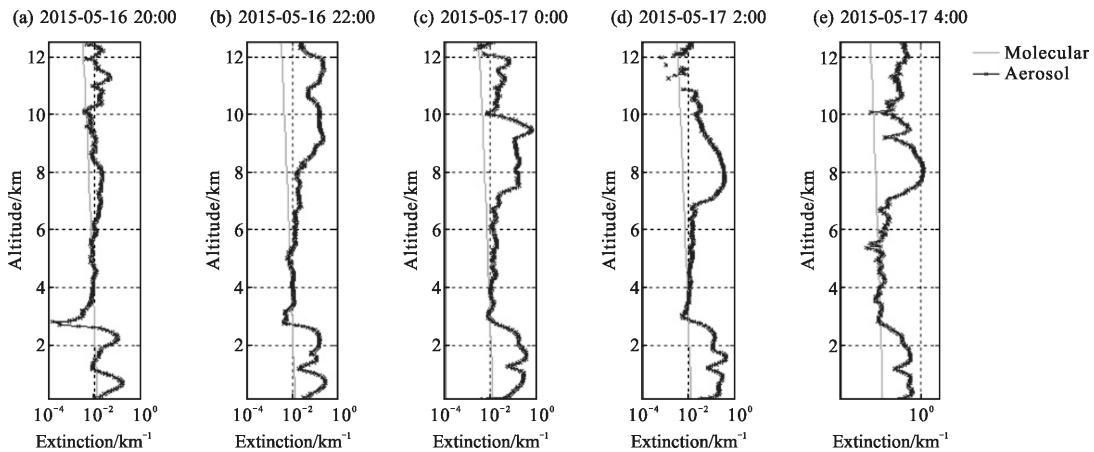


图 6 不同时刻的气溶胶消光系数廓线

Fig.6 Aerosol extinction coefficients profile at different time

点时刻的大气消光系数。因为观测场地位于岸边,气溶胶具有海洋性气溶胶的特征,在反演时,气溶胶消光后向散射比 Sa 取为 25^[17]。通过图 6 可以清楚的看到大气气溶胶消光系数随高度和时间的变化特征。

扫描式气溶胶激光雷达除了利用 THI 模式观测,获得探测方向的大气气溶胶时空分布特征,还可以通过 RHI 模式与 PPI 模式来获取大范围的气溶胶分布信息。

如图 7 所示,2015 年 8 月 31 日 20:10~20:30,扫描式气溶胶激光雷达俯仰角从 0°~120°进行的 RHI 扫描测量距离平方校正信号图,角度分辨率为 2°。通过图 7 可以看出在这段时间探测角度范围内气溶胶与云的空间分布特征,气溶胶主要分布在 2 km 以下,在激光雷达上空 4 km 左右有云,且有多层云的存在。

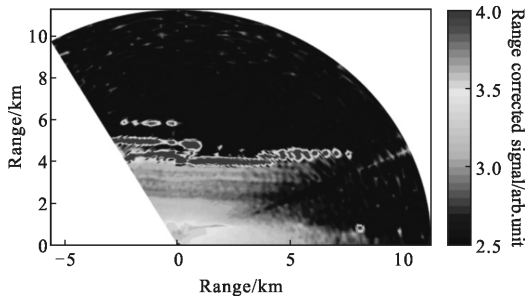


图 7 2015 年 8 月 31 日 20:10~20:30, RHI 测量距离平方校正信号图,俯仰角 0°~120°

Fig.7 RHI of RCS from elevation 0° to 120° at 20:10-20:30, on August 31, 2015

如图 8 所示,2015 年 9 月 7 日 19:55~20:50,扫

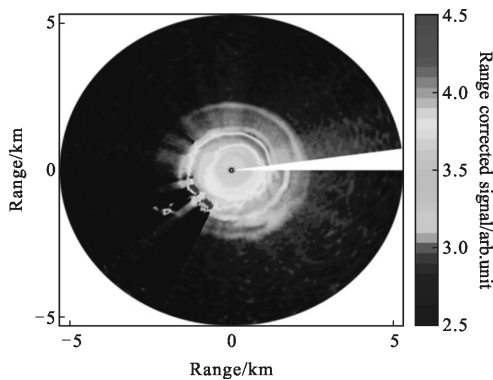


图 8 2015 年 9 月 7 日 19:55~20:50, PPI 测量距离平方校正信号图,俯仰角 45°,方位角 0°~355°

Fig.8 PPI of RCS from azimuth 0° to 355° with elevation 45° at 19:55-20:35, on September 7, 2015

描式气溶胶激光雷达以俯仰角 45°,方位角从 0°~355°进行的 PPI 扫描测量距离平方校正信号图,角度分辨率为 2°。可以清楚的观察到这段时间内,以扫描式气溶胶激光雷达为中心,气溶胶与云在测量方向上的水平平面投影的分布特征,即观测位置上平面天空气溶胶与云的空间分布特征。

3.3 边界层观测

大气边界层与人类活动的关系最密切、最直接,大气污染问题也主要发生在这一层,是大气科学的重要研究内容。激光雷达为大气边界层的研究提供了新的技术方法,大气边界层以内的气溶胶分布浓度明显高于边界层之上的自由大气部分的气溶胶浓度。

利用大气激光雷达数据反演边界层高度主要有梯度法、对数梯度法和归一化梯度法等^[18-19],文中主要采用归一化梯度法来反演大气边界层高度。归一化梯度定义为:

$$D(z) = \frac{\Delta P(z)}{\Delta z \times P(z)} \quad (5)$$

式中: $\Delta P(z)$ 为相邻两个高度的信号差值; Δz 为距离分辨率。该方法可通过大气气溶胶随高度的相对变化来获取边界层高度,归一化梯度最小值所在的高度对应大气边界层高度。

如图 9 所示,2015 年 5 月 14 日 20:30 至 5 月 15 日 4:30 的观测数据的距离平方校正信号 THI 图,用黑色虚线代表反演的边界层高度。通过图 9 能明显看到气溶胶和云随时间与空间的变化特征以及边界层高度随时间的变化趋势。可以看到低空 2 km 附近有云存在,云与边界层之间有一个过渡区,随着时间推移低空云信号逐渐变强。通过该算法反演边界层高度很好的避免了低空云对边界层高度反演的影响。反演得到的这段时间边界层平均高度约为 0.85 km。

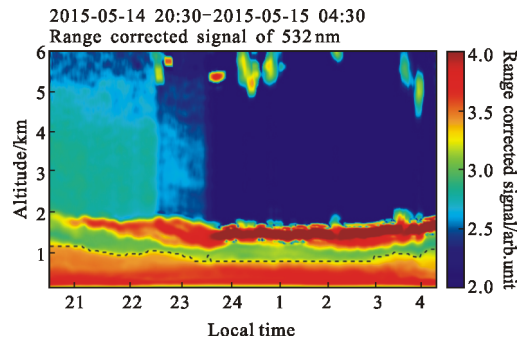


图 9 边界层高度时空变化图

Fig.9 Temporal and spatial variation of boundary layer height

4 结 论

文中主要介绍了根据大气激光雷达产品化要求和大气气溶胶业务化监测需要,研制的结构一体化、控制自动化的小型扫描式气溶胶激光雷达,并开发了配套的数据采集与控制软件,可以实现对大气气溶胶定点大范围观测。通过在青岛小麦岛海洋环境监测站的观测应用,验证了其多种测量模式(多方向观测、THI 测量、RHI 测量和 PPI 测量)的探测能力,并可应用于大气能见度、云和气溶胶性质时空分布特征以及大气边界层高度等的研究上。通过扫描式气溶胶激光雷达观测数据与其他观测数据的对比,进一步验证了其探测可靠性。

该研究成果为大气对流层气溶胶研究提供了可靠的业务化设备和方案,对大气激光雷达在大气环境监测、气象监测领域服务与业务化应用具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Liu Bingyi, Zhuang Quanfeng, Qin Hengguang, et al. Aerosol classification method based on high spectral resolution lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0411001. (in Chinese)
- [2] Yan Qing, Hua Dengxin, Li Shichun, et al. Observations and productization of the micro-pulsed Mie scattering lidar system [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 123-128. (in Chinese)
- [3] Xu Mengchun, Xu Qingshan. Effect of aerosol particle characteristic and vertical distribution on radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0211002. (in Chinese)
- [4] Huang Xiaohu, Han Xiuxiu, Li Shuidong, et al. Spatial and temporal variations and relationships of major air pollutants in Chinese cities [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(7): 1001-1011. (in Chinese)
- [5] Zhang Junqiang, Xue Chuang, Gao Zhiliang, et al. Optical remote sensor for cloud and aerosol from space: past, present and future[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 679-698. (in Chinese)
- [6] Liu B Y, Esselborn M, Wirth M, et al. Influence of molecular scattering models on aerosol optical properties measured by high spectral resolution lidar[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(27): 5143-5154.
- [7] Chen Chao, Song Xiaoquan, Yan Baodong, et al. Case study of tropopause cirrus observed with lidar during 2011 spring in Beijing [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2012, 23(11): 2142-2148. (in Chinese)
- [8] Di H G, Hua H B, Cui Y, et al. Vertical distribution of optical and microphysical properties of smog aerosols measured by multi-wavelength polarization lidar in Xi'an, China [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2016(5): 027.
- [9] He Tao, Hou Lujian, Lv Bo, et al. Study of accuracy of lidar inversion PM2.5 concentration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 206-211. (in Chinese)
- [10] Liu Q, He Q, Fang S, et al. Vertical distribution of ambient aerosol extinctive properties during haze and haze-free periods based on the Micro-pulse lidar observation in Shanghai [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 574(8): 1502-1511.
- [11] Zhang Wanchun, Zhang Ying, Lv Yang, et al. Observation of atmospheric boundary layer height by ground-based lidar during haze days [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, 17(4): 981-992. (in Chinese)
- [12] Lv W Y, Yuan K E, Wei X, et al. A mobile lidar system for aerosol and water vapor detection in troposphere with mobile lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(4): 0433001.
- [13] Bao Qing, He Junliang, Cha Yong, et al. Retrieval of aerosol extinction coefficient and optical thickness using varied lidar ratio [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0301002. (in Chinese)
- [14] Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. An algorithm for horizontal visibility based on lidar[J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(12): 1250-1252. (in Chinese)
- [15] Lv Lihui, Liu Wenqing, Lu Yihuai, et al. A new micro-pulse lidar for atmospheric horizontal visibility measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0908005. (in Chinese)
- [16] Wang Xiaopeng, Song Xiaoquan, Chen Yubao, et al. Observation and validation of cloud layer structures from the mobile Doppler lidar and radiosonde during spring in Beijing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(S): S201001. (in Chinese)
- [17] Dawson K W, Meskhidze N, Josset D, et al. Spaceborne observations of the lidar ratio of marine aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2015, 15(6): 3241-3255.
- [18] Wang Dongxiang, Song Xiaoquan, Feng Changzhong, et al. Coherent Doppler lidar observations of marine atmospheric boundary layer height in the bohai and yellow sea [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(S): S101001. (in Chinese)
- [19] Yang T, Wang Z, Zhang W, et al. Boundary layer height determination from lidar for improving air pollution episode modeling: Development of new algorithm and evaluation[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2017, 17(1): 6215-6225.