

doi:10.3788/gzxb20174609.0901002

# 双扫描激光雷达精细探测低层大气气溶胶方法

高飞,李婉婉,南恒帅,雷宁,袁方苗,石冬晨,汪丽,华灯鑫

(西安理工大学 机械与精密仪器工程学院,西安 710048)

**摘 要:**为实现水平非均匀分布的低层大气气溶胶光学特性的遥感探测,提出一种基于双扫描激光雷达的气溶胶精细探测方法.该方法以扫描激光雷达为遥感探测工具,通过双激光雷达相向交叉扫描工作模式,实现对同一空域近地表气溶胶全视野剖面的交叉探测,从而提供双激光雷达方程组以精确求解气溶胶消光和后向散射系数.在数据反演过程中,通过对交叉扫描区域进行坐标化和网格化处理、网格像素单元的初值预设,以及双扫描激光雷达方程组的数值逼近反演得到气溶胶消光.利用长距离扫描激光雷达的数据对该方法进行验证,结果表明,该方法与多角度方法反演所得到的结果随高度变化的趋势具有高度的一致性;同时双扫描激光雷达可提供交叉扫描区域剖面的气溶胶浓度分布,相比于单条廓线具有较大的优势.

**关键词:**双扫描激光雷达;气溶胶;精细探测;水平非均匀;多角度方法

中图分类号:TH741

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)09-0901002-8

## Fine Detection of Aerosol in the Lower Troposphere using Twin Scanning Lidars

GAO Fei, LI Wan-wan, NAN Heng-shuai, LEI Ning, YUAN Fang-miao,  
SHI Dong-chen, WANG Li, HUA Deng-xin

(School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,  
Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to remote sense the aerosol optical properties in the horizontal inhomogeneous atmosphere, a method based on twin scanning lidars was proposed for fine detection of aerosols. The scanning lidar was utilized to be the remote sensing tool to overcome the effect of overlap function of lidar system. The twin scanning lidars were performed for the cross scanning from the ground to the height of concern, which made the exact solutions of the two unknown parameters (extinction and backscatter coefficients) in the lidar equation retrievable. In the procedures of data retrieval, the coordinate and gridding were performed in the cross region, and the initial values of the pixel data were set. Numerical approximations of aerosol extinction and backscatter coefficients were got finally by minimizing the estimation of lidar function and the real one. The verification of retrieval method was performed using the scanning data from the long-range scanning lidar. The result shows that the retrieved result has the same tendency of height compared with the result from the multi-angle method, and twin scanning lidars can provide the aerosol distribution in cross scanning region profile which has advantage compared to the single profile.

**Key words:** Twin scanning lidars; Aerosol; Fine detection; Horizontal inhomogeneous atmosphere; Multi-angle method

**OCIS Codes:** 010.3640; 280.3640; 010.0280; 230.0250; 040.5250

**基金项目:**国家自然科学基金(Nos.41627807,41305023,41775035)、中国博士后基金(No.2014M560799)和陕西省自然科学基金(Nos.2014JQ5174,2014KJXX-64)资助

**第一作者:**高飞(1981—),男,副教授,博士,主要研究方向为激光雷达大气遥感探测等.Email:gaofei@xaut.edu.cn

**通讯作者:**华灯鑫(1964—),男,教授,博士,主要研究方向为激光雷达大气遥感探测等.Email:dengxinhua@xaut.edu.cn

**收稿日期:**2017-03-22; **录用日期:**2017-05-28

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

大气气溶胶主要存在于近地表的对流层大气内,随气流漂浮或沉降,在大气辐射的吸收和散射、云雾降水的形成、大气污染以及大气光电现象的产生过程中都扮演着非常重要的角色<sup>[1-2]</sup>.同时,由于气溶胶直接受到地表作用力的影响,在短时间内随地表作用力发生变化,且短时间内的大气湍流主导着区域内的气流运动,水平或者垂直地交换和传输热量,气体和气溶胶颗粒从地表通过大气边界层进入到大气层内,引起边界层内各种物理量的非均匀分布和时空变化<sup>[3]</sup>.

气溶胶的观测技术和研究方法有很多,而激光雷达已经被证明是大气特性探测中最有发展前景的测量仪器<sup>[4]</sup>.激光雷达通过探测大气分子、少量悬浮微粒物质以及气溶胶颗粒等对激光脉冲的散射光谱信号,来获得气溶胶消光、后向散射系数和激光雷达比等气溶胶光学参量廓线.目前气溶胶激光雷达主要有米-瑞利弹性散射激光雷达、高光谱分辨率激光雷达和振动拉曼散射激光雷达三种形式.米-瑞利弹性散射激光雷达是最简单的气溶胶探测激光雷达形式,主要通过探测大气分子瑞利散射和气溶胶米散射的混合光谱信号来遥感探测气溶胶时空变化<sup>[5]</sup>.然而在数据的反演过程中,大气消光和后向散射系数关系的假设却限制了气溶胶光学参量的反演精度<sup>[6-7]</sup>.高光谱分辨率激光雷达利用超窄带 Fabry-Perot 标准具或者原子/分子吸收滤波器分离气溶胶米散射和大气分子瑞利散射信号,从而高精度探测气溶胶光学特性的时空变化<sup>[8-10]</sup>.拉曼散射激光雷达则利用大气中高度分布稳定的氮气分子振动拉曼散射信号只受气溶胶消光影响的特点,在无需额外假设条件下实现对气溶胶光学特性的精细探测<sup>[11-12]</sup>.同时高光谱分辨率激光雷达和拉曼散射激光雷达开展大气气溶胶垂直分布特性探测时,激光雷达系统几何重叠因子的存在却给低层大气气溶胶的光学探测造成了一定的困难<sup>[13-14]</sup>.CCD 侧向散射技术和纯转动拉曼激光雷达方法可对激光雷达系统几何重叠因子和探测盲区进行修正,并取得了一定的成果<sup>[15-16]</sup>.扫描激光雷达是弹性散射激光雷达的一种特殊工作形式,可实现低层大气气溶胶的水平或者垂直扫描,克服系统几何重叠因子给大气探测带来的困难.然而在数据的反演过程中,利用 Klett 法或者 Fernald 法进行数据反演时受参考点距离处大气状态假设的影响较大,给数据的反演结果带来了较大的不确定度<sup>[6-7]</sup>.同时扫描激光雷达应用多角度的数据反演方法受到水平均匀大气假设的限制<sup>[17-18]</sup>.

低层水平非均匀大气气溶胶的探测对于激光雷达来说具有较大的困难,主要是由于激光雷达垂直探测中几何重叠因子的存在会造成探测盲区,同时单扫描激光雷达应用多角度方法需要进行水平均匀大气的假设.然而实际大气中受地表多污染源的影响,多为水平非均匀大气状态.发展低层水平非均匀大气气溶胶的激光雷达探测技术具有重要的现实意义.为了实现低层大气气溶胶光学参量的遥感测量,尤其是近地表多污染源水平非均匀大气气溶胶分布特性的精细探测,本文利用扫描激光雷达的独特优势,提出一种基于双扫描激光雷达的新型气溶胶遥感探测方法.该方法采用扫描激光雷达为遥感探测工具,结合双激光雷达相向交叉扫描探测工作模式,实现对同一空域内的近地表气溶胶全视野剖面的交叉探测.

## 1 双扫描激光雷达气溶胶探测方法模型

弹性扫描激光雷达是弹性激光雷达的一种特殊工作模式,其激光雷达方程可表示为距离  $r$  和扫描俯仰角  $\theta$  的函数,即

$$P(r, \theta) = CP_0 r^{-2} \beta(r, \theta) \exp \left[ -2 \int_0^r \alpha(r', \theta) dr' \right] + P_{bg} \quad (1)$$

式中,  $P(r)$  为激光雷达瞬时接收功率,  $C$  为激光雷达系统常数,  $P_0$  为激光发射功率,  $\alpha$  和  $\beta$  分别表示与大气状态相关的消光和后向散射系数,  $P_{bg}$  为激光雷达信号的背景噪音成分.背景噪音可通过激光雷达回波廓线的末端数据估算得到<sup>[19]</sup>.滤除噪音后,弹性扫描激光雷达方程的  $S$ -函数就可表示为

$$S(r, \theta) = \ln \{ r^2 [P(r, \theta) - P_{bg}] \} = c + \ln \beta(r, \theta) - 2 \int_0^r \alpha(r', \theta) dr' \quad (2)$$

式中,  $c = \ln(CP_0)$ , 为激光雷达系统常数.实践证明,在大气水平均匀的假设条件下,扫描激光雷达在不受系统几何重叠因子的影响下,可实现从地表到数千米高度的气溶胶消光系数的光学探测,其反演结果可认为是给定高度上扫描区域内气溶胶光学特性的平均值<sup>[20-21]</sup>.为实现在水平非均匀大气气溶胶的探测,多位科学家

对多角度算法进行了卓有成效的改进<sup>[22-23]</sup>,然而多数只是停留在理论方法的探讨,尚未能真正应用到实验结果的观测应用研究中.基于此,在利用扫描激光雷达克服几何重叠因子的优势基础上,提出基于双扫描激光雷达的气溶胶遥感探测方法,以期实现近地表水平非均匀气溶胶的精细探测.

双扫描激光雷达气溶胶探测方法模型如图 1.两台探测性能一样的扫描激光雷达系统 Lidar-1 和 Lidar-2 分别放置在探测区域(距离为  $d$ )的两端,并进行相应的扫描参数设置.从某一时刻开始,两台激光雷达同时对探测区域施行从地表到探测高度  $h$  的相向交叉扫描探测,则此时的双激光雷达方程的  $S$ -函数可分别表示为

$$\begin{cases} S_1(r_1, \theta_1) = c_1 + \ln\beta(r_1, \theta_1) - 2 \int_0^{r_1} \alpha(r'_1, \theta_1) dr_1 \\ S_2(r_2, \theta_2) = c_2 + \ln\beta(r_2, \theta_2) - 2 \int_0^{r_2} \alpha(r'_2, \theta_2) dr_2 \end{cases} \quad (3)$$

假设整个扫描时间在大气湍流的时间尺度以内,则交叉扫描区域内任意探测点的大气状态都可用两个激光雷达方程进行表示,因此从数学角度来说双未知数双方程组可解.

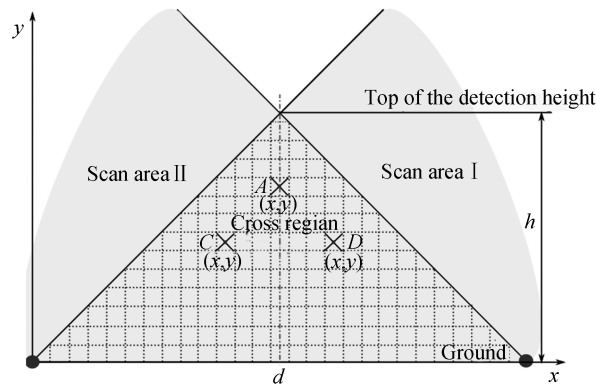


图 1 基于双扫描激光雷达的气溶胶探测方法模型

Fig.1 Schematic diagram of the aerosol remote sensing using twin scanning lidars

在交叉扫描区域,激光雷达需要获得足够信噪比的回波信号,因此两台激光雷达的水平距离  $d$  应设置在达到反演所需信噪比时(光子计数模式探测时,信噪比大于 1 即可)的探测距离.由于该探测距离受大气状态信息影响很大,应在每次测量时根据具体情况进行设置.探测高度  $h$  的设置取决于扫描区域的探测目标,当选择大气边界层高度或者低层大气时,通常以 3 km 左右为宜<sup>[24]</sup>.双扫描激光雷达的气溶胶探测方法可实现对交叉扫描剖面的全视野探测,在探测前需要利用全球定位系统(Global Position System, GPS)对两台激光雷达的地理坐标及光柱方向进行测量和设置,以保证两台激光雷达对同一剖面进行交叉扫描探测. GPS 定位器本身的定位精度会给剖面的确定带来一定的误差,然而考虑到激光高斯的发散性及望远镜接收系统的视场角等,交叉扫描剖面允许在一定的误差范围内.同时,扫描激光雷达应进行合理的参数配置,以实现大气湍流时间尺度内的交叉剖面探测.扫描参数需要综合考虑以下几方面因素:1)两台激光雷达的距离  $d$  和探测高度  $h$ ,此决定激光雷达的最大扫描俯仰角;2)扫描步进角,此决定交叉扫描平面内激光雷达原始数据的分辨率,包括垂直分辨率和水平分辨率;3)大气湍流的时间尺度,此决定整个激光雷达的扫描工作时间.以长距离扫描激光雷达为例<sup>[20-21]</sup>,其水平探测距离可达到 15~25 km,当研究对象为大气边界层时,俯仰角设置为  $0^\circ \sim 20^\circ$ ,在步进角设置为  $0.5^\circ$  的情况下,整个扫描过程可在 6.5 min 内完成,基本在大气湍流的时间尺度 7 min 以内<sup>[25]</sup>.

## 2 双扫描激光雷达气溶胶数据反演

在双扫描激光雷达构成的激光雷达方程组式(3)中,气溶胶光学参量(消光系数  $\alpha$  和后向散射系数  $\beta$ )具有对数和积分的形式,很难使用迭代的方法进行反演,因此提出一种双扫描激光雷达进行气溶胶光学参量反演的方法,即首先对交叉扫描区域进行坐标化和网格化处理,之后对网格像素单元进行初值预设,最后对双扫描激光雷达方程组进行数值逼近从而反演得到气溶胶光学参量.选用长距离扫描激光雷达的扫描数据<sup>[20]</sup>对该数据反演方法进行验证.

## 2.1 交叉扫描区域的坐标化、网格化和初值预设

双扫描激光雷达相向交叉扫描,可实现扫描区域气溶胶空间分布的遥感探测,探测数据选择用笛卡尔二维距离高度指示器(Range-Height Indicator, RHI)图进行表达(图 1).首先对二维 RHI 图进行网格化,从而以像素点的形式表达气溶胶光学参量信息,以解决双激光雷达探测数据的交叉重合问题.每一像素点的中心都对应二维 RHI 图的唯一坐标,有利于激光雷达空间扫描数据利用重心法进行数据重构<sup>[21, 26]</sup>,以清晰使用 S-函数进行交叉扫描区域像素单元气溶胶光学信息的表达.原则上来说,二维 RHI 图的横纵坐标的分辨率越小越好,然而由于激光雷达发射光束口径、距离分辨率以及扫描步进角的影响,二维 RHI 图像素单元在远端会更多地重复利用相同的激光回波廓线数据进行数据重构,造成虚假信息较多,因此需要合理地选择二维 RHI 图的横纵坐标.例如长距离扫描激光雷达进行大气参量扫描测量时<sup>[20-21]</sup>,在激光雷达距离分辨率为 3.75 m,扫描步进角为 0.5°的条件下,二维 RHI 图的横纵坐标分辨率设置为 50 m.

二维 RHI 图像素单元的初值从原则上讲可预设为任意正值,然而,为了提高运算效率,可将其预设为该高度上单扫描激光雷达应用多角度方法所反演得到的消光系数,并在误差范围内进行波动<sup>[20-21]</sup>,因为多角度方法反演得到的结果可认为是高度上光学参量的平均结果.而后向散射系数的初值可通过消光系数的反演结果和激光雷达比假设值进行估算得到<sup>[27]</sup>.

## 2.2 扫描激光雷达系统常数的确定

采用数值逼近的方法反演激光雷达方程组式(3)中的大气消光  $\alpha$  和后向散射系数  $\beta$ ,需要首先确定激光雷达相对系统常数  $c_1$  和  $c_2$ ,其标定可以采用拉曼法<sup>[28]</sup>、太阳光度计标定法<sup>[29]</sup>等多种方法.而在应用扫描激光雷达进行气溶胶探测时,多角度的气溶胶反演方法表明大气光学厚度为此高度上二维 RHI 图水平像素点集数据(S-函数)构成的线性函数的斜率,而激光雷达相对系统常数 $[c + \ln\beta(r, \theta)]$ 为此高度上水平像素点集(S-函数)构成线性函数的截距<sup>[17, 20]</sup>,因此激光雷达常数 C 的获取需要在激光雷达相对系统常数 $[c + \ln\beta(r, \theta)]$ 中剔除大气后向散射的贡献(式(2)).由于系统的常数对于固定的激光雷达系统来说是确定的,因此选择晴朗无污染的天气条件,利用标准大气模型估算得到大气后向散射系数<sup>[30]</sup>,进而得到激光雷达常数,为双扫描激光雷达 S-函数的计算提供有效的计算参数.为克服由于结构稳定和仪器环境参数变化对系统常数估算所带来的影响,应选择多日扫描数据的反演结果进行统计分析,提高系统常数的估算精度.图 2 为利用扫描激光雷达的扫描数据<sup>[20]</sup>(23:45 CET)所估算得到的相对系统常数.从图中可以看出,系统常数的估算结果随着高度的增加而略微发生变化,这主要是由于激光脉冲的抖动、光脉冲的多重散射以及大气湍流综合作用的结果.然而从总体上看,系统常数的估算结果在忽略这些因素的影响下,可认为是保持不变的,并可采用均方根误差估算的方法确定为  $30.22 \pm 0.13$ .

## 2.3 网格单元光学厚度的计算

由于采用对交叉扫描区域进行坐标化、网格化的处理方式,因此扫描激光雷达方程 S 函数中大气单程透过率( $\int \alpha dr$ )的计算需要改写成离散数据和的形式,即  $\sum (\alpha_{i,j} \times \Delta r_{i,j})$ ,其中  $(i, j)$  表示扫描廓线所经过的网格像素单元的坐标,  $\Delta r$  为扫描廓线所经过的网格路径大小.网格路径大小需要首先确定路径与网格的交点坐标,之后通过两点距离公式进行计算.图 3 为扫描激光雷达扫描区域网格模型( $300 \times 60$ ),网格分辨率为 50 m(对应垂直探测高度 3 km 和水平探测距离 15 km),网格像素单位分别为(90, 71)和(226, 75)的光学路径  $\Delta r$  计算结果.在网格像素长度和宽度认为单位 1 的条件下,网格像素的光学路径  $\Delta r$  的最大结果为  $\sqrt{2}$ (1.414),这可从网格坐标单元(226, 75)中更清晰地看出来,因为右侧激光雷达扫描光束路径的横纵坐标完全相等.

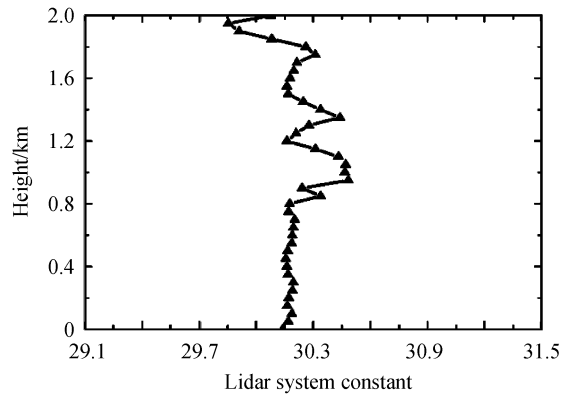


图 2 扫描激光雷达相对系统常数的估算结果  
Fig.2 Estimation of the relative system constant of the scanning lidar



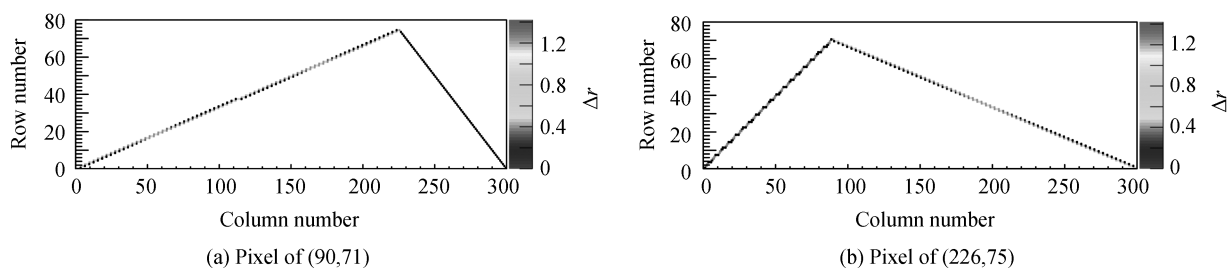


图3 双扫描激光雷达的网格光学路径计算结果

 Fig.3 Calculation results of  $\Delta r$  in the pixel of 2D RHI diagram for the twin scanning lidars

## 2.4 网格单元 $S$ -函数值的数值逼近

在由网格像素组成的二维 RHI 扫描图中,任意网格像素都具有唯一确定的消光散射系数  $\alpha$  和后向散射系数  $\beta$ .若将消光、后向散射系数以及确定的激光雷达系统常数带入激光雷达方程的  $S$ -函数,可正向构建扫描区域网格像素单元的  $S'$ -函数为

$$S'(i, j) = c + \ln \beta(i, j) - 2 \sum \alpha_{i, j} \cdot \Delta r_{i, j} \quad (4)$$

为反演得到真实的气溶胶消光和后向散射系数,采用数值逼近的数据反演方法,即用随机假设的消光和后向散射系数构建的  $S'$ -函数与真实测量得到的激光雷达回波  $S$ -函数进行比较,并取整个交叉扫描剖面内二者具有最小差异累加和时的气溶胶消光和后向散射结果为最终反演所得到的像素单元气溶胶光学参量信息,即

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [S(i, j) - S'(i, j)]^2 \quad (5)$$

在以网格模型为  $300 \times 60$ 、网格分辨率为 50 m 为例 ( $M=300, N=60$ ) 的交叉扫描区域中,将利用多角度方法所反演得到的气溶胶消光和后向散射系数及其误差,根据概率分布抽样在误差范围内建立估计量,分别计算扫描剖面 18 000 个像素点的构建  $S'$ -函数和观测值  $S$ -函数的差值,并对差值进行累加运算.从这个过程来说,整个剖面气溶胶消光和后向散射随机的次数对反演结果会有较大的影响.因为随机次数越多,消光和后向散射所随机的次数也越多,从而可使得  $\chi^2$  选取更佳逼近的结果.

## 3 实验观测数据的方法验证

为了初步验证双扫激光雷达精细探测大气气溶胶方法的可行性,选用长距离扫描激光雷达在 2009 年 7 月 1 日 21:09 的扫描数据<sup>[20]</sup>.该扫描数据被认为是两台同样配置的激光雷达在相距 15 km 处进行相向交叉扫描的大气环境探测结果,且由于仿真数据的构建,激光雷达扫描剖面内大气参量呈对称性分布,反演结果能够更好地与多角度方法的反演结果进行比对.图 4 为利用双扫描激光雷达气溶胶数据反演方法对该组数据进行反演所得到的气溶胶消光系数结果,循环次数分别为 500 次和 2 000 次.该扫描区域气溶胶含量较少,且受到海洋气流和陆路气流的交叉影响,在对流层中形成气溶胶层,并随着时间发生变化,影响当地的环境<sup>[21]</sup>.两幅反演结果都显示该地区气溶胶浓度呈层状分布,即 0~1.0 km 气溶胶浓度较大,因此 1.0 km 可定义为边界层高度.而在边界层高度之上的 1.6 km 和 2.3 km 高度分别有气溶胶层的存在,并且在 2.3 km 处气溶胶消光达到了  $0.25 \text{ km}^{-1}$  以上,说明从其它区域的气流所携带的气溶胶对当地的环境影响较大.

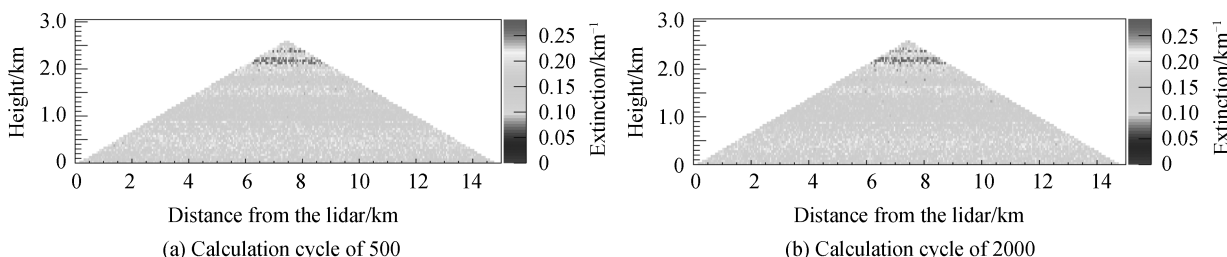


图4 基于双扫描激光雷达方法的气溶胶消光反演结果

Fig.4 Retrieval result of the aerosol extinction using the technique of twin scanning lidar

图5为双扫描激光雷达的气溶胶反演结果与多角度方法的探测结果的比较,可更清晰地辨别该气溶胶探测方法的优势.从图中可以看出,双扫描激光雷达的气溶胶探测结果相比于多角度方法的气溶胶廓线分布具有更大的波动性,这主要是由于在双扫描激光雷达数据反演过程中的随机取样所造成的.然而,边界层结构( $<1.0$  km)和气溶胶层(1.6 km 和 2.3 km)都可以在双扫描激光雷达的气溶胶探测结果上看出来,并且随着循环次数的增加,气溶胶分层变化的趋势与多角度方法更加吻合,从而说明循环次数对反演结果具有较大的影响,增大随机次数可以有效提高数据反演精度.然而受限于当前计算机计算能力的限制,目前并无更多循环次数的反演结果.今后会在提高计算能力的基础上,增大随机的次数,提高反演的精度.

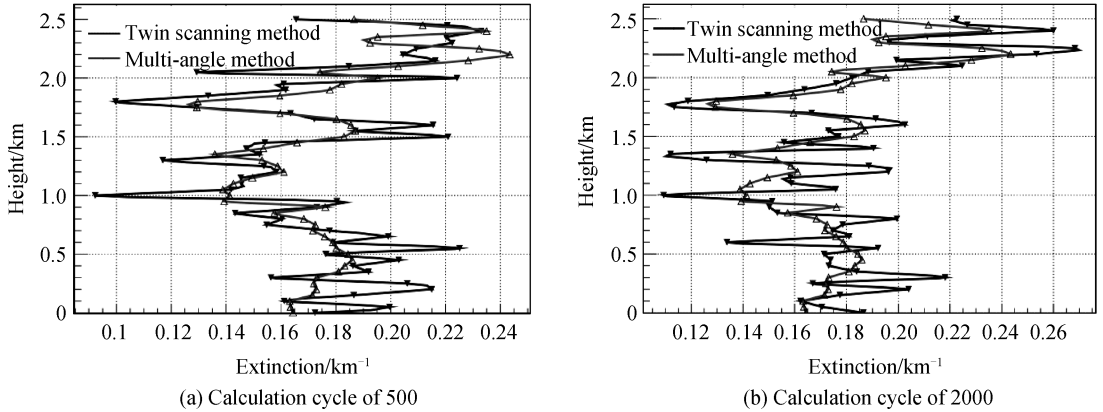


图5 双扫描激光雷达气溶胶反演结果与多角度方法的比较

Fig.5 Comparison between the aerosol extinctions retrieved by the twin scanning lidars and multiangle method

选长距离扫描激光雷达的数据进行验证,其有效探测距离可达到 15 km,因此两台激光雷达的距离  $d$  设置为 15 km.双扫描激光雷达的气溶胶探测应用的条件是能够实现交叉扫描剖面的全视野扫描,诚然城市化的发展所带来的高楼大厦,给扫描激光雷达的探测应用带来了一定的局限性,但是其可在某些条件成熟的地方进行应用,如空旷地带或者平坦的郊区环境中.

## 4 结论

本文提出一种基于双扫描激光雷达的气溶胶精细探测方法.该方法以双扫描激光雷达为探测工具,利用双激光雷达相向交叉扫描探测工作模式,以实现同一空域内的近地表气溶胶全视野剖面的交叉探测.为验证双扫描激光雷达探测气溶胶方法的可行性,在数据反演过程中采用长距离扫描激光雷达的扫描数据进行计算.通过将该扫描数据相向配置,可实现双扫描激光雷达进行气溶胶交叉探测的效果.交叉扫描区域使用纵横坐标分辨率分别为 50m 的二维 RHI 图进行表示,并进行坐标化和网格化处理.利用多角度方法计算得到扫描激光雷达系统的相对系统常数为  $30.22 \pm 0.13$ .在光学厚度的计算方面建立了光学路径  $\Delta r$  的计算数据库,最后通过比较构建的  $S$ -函数与测量的  $S$ -函数以数值逼近的方法确定大气光学参量—消光和后向散射系数.结果表明,双扫描激光雷达的反演结果可以得到扫描剖面的气溶胶浓度分布,相比于单条廓线具有较大的优势.同时,在气溶胶层的探测结果上,与多角度方法所反演得到的结果具有高度的一致性.然而,目前受限于电脑计算能力的限制,随机次数仅进行了 2 000 次以内的随机运算,因此结果差别不是很大.今后将提升计算能力,从而得到更加优化的计算结果.

## 参考文献

- [1] MAO Jie-tai, ZHANG Jun-hua, WANG Hua-mei. Summary comment on research of atmospheric aerosol in China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, **60**(5): 625-634.  
毛节泰,张军华,王华美. 中国大气气溶胶研究综述[J]. *气象学报*, 2002, **60**(5):625-634.
- [2] YU H B, LIU S C, DICKINSON R E. Radiation effects of aerosols on the evolution of the atmospheric boundary layer [J]. *Journal of Geophysics Research*, 2002, **107**(D12): 41-42.
- [3] ROLAND B S. An introduction to boundary layer meteorology[M]. Dordrecht (Netherlands): Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [4] YAN Ji-xiang, GONG Shun-sheng, LIU Zhi-shen. Laser radar for environment monitoring[M]. Beijing (China): China Science Publishing & Media Ltd., 2001.

- 阎吉祥,龚顺生,刘智深. 环境监测激光雷达[M].北京(中国):科学出版社,2001.
- [5] ZHOU Jun, YUE Gu-ming, JIN Chuan-jia, *et al.* Two-wavelength mie lidar for monitoring of tropospheric aerosol[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1412-1417.  
周军,岳古明,金传佳,等. 探测对流层气溶胶的双波长米氏散射激光雷达[J]. 光学学报,2000,**20**(10): 1412-1417.
- [6] JAMES D K. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns [J]. *Applied Optics*, 1981, **20**: 211-220.
- [7] FREDERICK G F. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**: 652-653.
- [8] SHE C Y, ALVAREZ II R J, CALDWELL L M, *et al.* High spectral resolution Rayleigh-Mie lidar measurements of aerosol and atmospheric profiles [J]. *Optics Letters*, 1992, **17**(7): 541-543.
- [9] MASAHARU I, TAKAO K. Ultraviolet high-spectral-resolution Doppler lidar for measuring wind field and aerosol optical properties [J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(28): 6023-6030.
- [10] SONG Xiao-quan, GUO Jin-jia, YAN Zhao-ai, *et al.* Research on the high spectral resolution lidar for atmospheric aerosol properties [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, **18**(9): 1009-1015.  
宋小全,郭金家,闫召爱,等. 大气气溶胶光学参数的高光谱分辨率激光雷达探测研究 [J]. 自然科学进展,2008,**18**(9): 1009-1015.
- [11] ALBERT A, MAREN R, CLAUS W. Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar [J]. *Optics Letters*, 1990, **15**(13): 746-748.
- [12] DAVID N W. Examination of the traditional raman lidar technique. II. Evaluating the ratios for water vapor and aerosols [J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2593-2608.
- [13] MAO Fei-yue, GONG Wei, LI Jun. Geometrical form factor calculation using Monte Carlo integration for lidar [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, **44**(4): 907-912.
- [14] GAO Fei, HUA Deng-xin, WU Min, *et al.* Effect of M2 factor of laser beam for a non-coaxial lidar system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1649-1654.  
高飞,华灯鑫,吴敏,等. 光束品质因子 M2 对非同轴激光雷达探测性能的影响 [J]. 光学学报,2008,**28**(9): 1649-1654.
- [15] SHI Bo, TAO Zong-ming, MA Xiao-min, *et al.* Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(5): 48-53.  
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):48-53.
- [16] CAO Kai-fa, DU Xiao-yong, WANG Shao-lin, *et al.* Determination of lidar geometric form factor with pure rotational raman scattering signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1349-1354.  
曹开法,杜小勇,汪少林,等. 纯转动拉曼法确定激光雷达几何因子[J]. 光学学报,2007,**27**(8): 1349-1354.
- [17] FILIP ĆI Ć A, HORVAT M, VEBERI Ć D, *et al.* Scanning lidar based atmospheric monitoring for fluorescence detector of cosmic showers [J]. *Astroparticle Physics*, 2003, **18**(5): 501-512.
- [18] MARKUS P, VALDIMIR A K, MARC B P. Calibration method for multiangle lidar measurements [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**: 2948-2956.
- [19] KOVALEV V A, EICHINGER W E. Elastic lidar: theory, practice, and analysis methods [M]. New Jersey(USA): Wiley-Interscience, 2004.
- [20] GAO F, BERGANT K, FILIPĆIĆ A, *et al.* Observations of the atmospheric boundary layer across the land-sea transition zone using a scanning Mie lidar [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2011, **112**(2): 182-188.
- [21] GAO F, SAMO S, KLEMRN B, LI Y, *et al.* Application of the ultraviolet scanning elastic backscatter lidar for the investigation of aerosol variability [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(5): 6320-6335.
- [22] DINA G K. Multianglelidar performance in the presence of horizontal inhomogeneities in atmospheric extinction and scattering [J]. *Applied Optics*, 1993, **32**: 3266-3272.
- [23] KOVALEV V, WOLD C, PETKOV A, *et al.* Modified technique for processing multianglelidar data measured in clear and moderately polluted atmospheres [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**: 4957-4966.
- [24] WANG Lin, XIE Chen-bo, HAN Yong, *et al.* Comparison of retrieval methods of planetary boundary layer height from lidar data[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2012, **07**(4): 241-247.  
王琳,谢晨波,韩永,等. 测量大气边界层高度的激光雷达数据反演方法研究[J]. 大气与环境光学学报,2012, **07**(4): 241-247
- [25] STULL R B. An introduction to boundary layer meteorology [M]. London: Kluwer Academic Publishers; 1998: 1.
- [26] MIN C. Local level set method in high dimension and codimension[J]. *Journal of Computational Physics*, 2004, **200**: 368.
- [27] ANSMANN A, RIEBESELL M, WANDINGER U, *et al.* Combined Raman elastic-backscatter LIDAR for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter, and lidar ratio [J]. *Applied Physics*, 1992, **55**(1): 18-28.
- [28] HU Shun-xing, ZHAO Pei-tao, WANG Shao-lin, *et al.* ARL-1 Raman lidar system for atmospheric CO<sub>2</sub> measurements

[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2009, **4**(6): 401.

胡顺星,赵培涛,汪少林,等. ARL-1 Raman 激光雷达系统探测大气二氧化碳[J]. 大气与环境光学学报, 2009, **4**(6): 401.

[29] HU Shun-xing, WANG Zhen-zhu, XU Qing-shan, *et al.* Studies on methods for aerosol optical depth measurements by lidar [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 307-310.

胡顺星,王珍珠,徐青山,等. 激光雷达测量大气气溶胶光学厚度方法研究[J]. 量子电子学报, 2006, **23**(3):307-310.

[30] U.S. Government Printing Office. U.S. Standard Atmosphere[S]. Washington D.C.: National Aeronautics and Space Administration, 1976.

---

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (Nos.41627807,41305023,41775035), the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (Nos.2014JQ5174, 2014KJXX-64) and the China Postdoctoral Science Foundation (No. 2014M560799)