

基于改进的道格拉斯-普克算法确定大气激光雷达消光系数边界值

费若男, 孔政, 官振峰, 梅亮*

大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024

摘要 大气激光雷达已广泛应用于大气污染源水平扫描测量, 而水平扫描测量激光雷达信号的消光系数边界值求解及廓线反演是其量化应用的关键。针对这一问题, 提出了一种基于改进的道格拉斯-普克(DP)算法确定消光系数边界值的新方法, 并结合经典Klett方法实现水平扫描测量时的大气消光系数稳健反演。系统性地研究了经典DP算法在消光系数边界值求解时的性能及潜在的问题。在此基础上, 提出将对数激光雷达信号与对应直线线段的偏离方差作为阈值控制手段, 以替代经典DP算法中的最远距离阈值, 从而更加准确地获取对数激光雷达曲线的线性区间, 进而利用斜率法求解消光系数边界值。通过消光系数反演结果的对比分析, 验证了改进DP算法的有效性。利用该方法反演的消光系数与周围空气污染监测站的PM₁₀颗粒物浓度具有较高的相关性(>0.88)。研究结果表明, 提出的改进DP算法可为水平扫描激光雷达信号的消光系数边界值求解和廓线反演提供有效的方法。

关键词 大气光学; 沙氏激光雷达; 道格拉斯-普克算法; 边界值; 消光系数; 大气污染

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221138

1 引言

作为一种主动式光学遥感探测技术, 激光雷达具有高时空分辨率和快速实时探测等特点, 被广泛应用于大气环境监测领域^[1-4]。通过将米散射大气激光雷达系统布设在城市制高点, 并对周围大气进行扫描式测量, 可探测水平方向上360°的大气激光雷达信号, 进而获取大气颗粒物的水平分布特征^[5-7]。虽然直接分析激光雷达信号的扫描时空图也可定性获取大气污染源的分布特征及其规律, 但无法实现量化分析。因此, 实现大气气溶胶消光系数的反演成为扫描式大气激光雷达定量测量的关键。

对于米散射激光雷达而言, 常见的反演消光系数的方法主要有适用于均匀大气的Collis斜率法、考虑单组分大气的Klett法以及考虑双组分大气(分子和气溶胶)的Fernald法等^[8-9]。在应用最为广泛的Klett-Fernald反演方法中, 如何精确地确定消光系数边界值对准确反演消光系数廓线至关重要。近年来, 国内外许多学者已在消光系数边界值的确定及反演等问题上开展了大量的研究工作。对于可实现高空探测的米散射激光雷达而言, 可在高度大于10 km处选取一个几乎不含气溶胶的区域作为参考点, 通过标准大气模型

与分子瑞利散射理论得到大气分子的后向散射系数, 从而作为Fernald反演算法的边界值。然而, 当米散射激光雷达系统有效探测距离不足以覆盖大气洁净层时, 边界值的确定将面临很大挑战。1993年, Kovalev等^[10]提出了一种适用于双组分散射大气激光雷达信号的迭代反演方法, 通过迭代求解气溶胶和分子消光系数之比的最小值来求解气溶胶消光系数边界值。2010年, Marchant等^[11]在先验约束条件下, 将激光雷达方程以矢量的形式表示, 并使用迭代最小二乘法进行求解。该方法能处理任意数量的通道, 并在参考点以上和低信噪比的情况下生成了稳定的解。同年, 陈涛等^[12]提出了用于低层大气消光系数反演的散射比迭代法, 该方法通过寻找弱气溶胶层并建立信号与边界值之间的等式关系, 利用穷举法获得该高度处气溶胶散射比值, 以此来确定消光系数边界值。2011—2012年, 熊兴隆等^[13-17]将确定大气气溶胶消光系数边界值的问题转化为求解函数不动点, 通过不动点迭代求得大气消光系数边界值, 并提出了一种基于改进牛顿法的大气消光系数边界值确定方法。2017年, 李红旭等^[18]通过构建非线性方程, 利用弦截法确定消光系数的初始边界值, 并利用迭代对边界值的结果进行修正。2018年, 孙国栋等^[19]提出利用Broyden算法求解非线性方程来确定

收稿日期: 2022-08-11; 修回日期: 2022-09-09; 录用日期: 2022-09-22; 网络首发日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075025)、大连市高层次人才创新支持计划(2020RQ018)、中央高校基本科研业务费(DUT22JC17)

通信作者: *meiliang@dlut.edu.cn

大气消光系数边界值。2019年,陈晓楠等^[20]提出了利用横向 Steffensen 型 3 阶方法求解消光系数边界值的非线性方程,从而获得消光系数边界值的反演算法。2022年,杨彬等^[21]提出了一种基于 Fernald 法后向积分并结合分段斜率法的迭代拼接方法,用于大气激光雷达突变信号的反演,并验证了该方法的可行性。虽然上述方法能够在特定情况下较为准确地获取消光系数/后向散射系数边界值及廓线,但其可靠性、稳健性还有待进行大数据量的验证。另一方面,上述求解方法大多需要利用弱气溶胶层的假设,主要应用于垂直观测时边界值的求解及大气廓线反演。针对水平扫描测量,大气激光雷达边界值求解的方法一般是选取大气均匀的区间,从而运用斜率法求解^[22]。

近年来,沙氏激光雷达技术逐渐应用于大气环境监测领域,尤其是大气污染源扫描溯源方面^[23-25]。由于沙氏激光雷达以成像的方式实现距离分辨的大气回波信号探测,导致其系统距离分辨率随测量距离而变化。此外,由于扫描测量时激光雷达信号响应时间较短(一般小于 10 s),使得远距离信号的信噪比普遍不高,也导致了边界值及廓线反演不确定性的增加。因此,水平扫描测量时气溶胶消光系数的可靠反演依然是沙氏激光雷达定量化测量及应用的主要挑战之一。针对这一难题,本文提出一种基于改进的道格拉斯-普克(DP)算法确定消光系数边界值的新方法,并结合经典 Klett 方法实现水平扫描测量时大气消光系数的稳健反演。

2 扫描式沙氏激光雷达系统及测量

2.1 扫描式沙氏激光雷达系统

沙氏激光雷达(SLidar)是一种基于沙氏成像原理的大气激光雷达技术,近年来已逐渐应用于气溶胶的

时空分布和偏振特性及痕量气体的遥感探测等领域^[23, 26-30]。沙氏成像原理是指当物面、像面和透镜面相交于一条直线时,成像系统可以拥有理论上的无穷远景深。据此,SLidar系统在采用大口径成像光学系统的同时,可实现大景深、远距离清晰成像。与时间分辨的脉冲式激光雷达不同,SLidar基于角度分辨原理实现距离分辨,因此可采用低成本、高功率的连续波二极管激光器作为光源,采用图像传感器作为探测器。SLidar系统的典型结构如图1所示。激光光束经准直之后发射到大气中,其后向散射信号通过大口径的望远镜收集并利用倾斜放置的CMOS图像传感器进行探测。SLidar系统安装在旋转云台上,可实现360°不间断的扫描测量。本文的数据来源于安装在陕西省咸阳市的SLidar系统。该系统水平扫描测量时的仰角根据视野范围内建筑物的遮挡情况进行调整,一般约为3°。扫描的旋转步长为2°,扫描周期约20 min。相关硬件参数如表1所示。

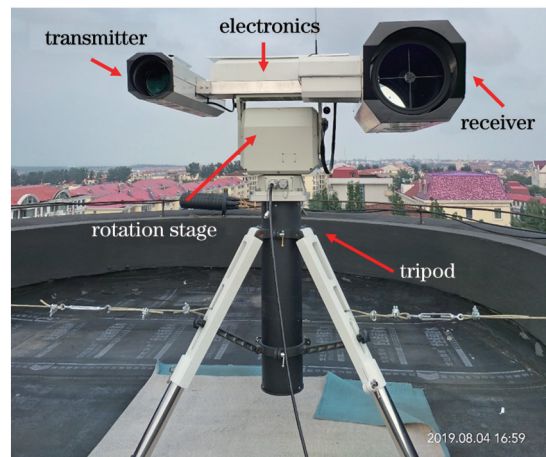


图1 SLidar系统实物图

Fig. 1 Picture of SLidar system

表1 沙氏激光雷达系统参数

Table 1 Parameter configurations of SLidar system

Component	Model	Specifications
Laser source	High-power diode laser	Wavelength 808 nm, output power 5 W
Collimator	Tianlang refractor telescope	Focal length 600 mm, diameter 100 mm
Receiver	Skywatcher Newtonian telescope	Focal length 800 mm, diameter 200 mm
Detector	Lumenera CMOS camera Lt225NIR	Frame rate 170 frame/s, bit depth 8 bit, resolution 2048 pixel×1088 pixel, tilt angle 45°
Filters	808 nm interference filter & SCHOTT RG 780 nm filter	Full width at half maximum (FWHM) 3 nm

图2为SLidar系统扫描测量时测得的不同时段的大气回波信号强度分布图。从图2可以看出,大气回波信号的时空分布比较均匀。然而,边界值求解的准确性易受到小范围波动的影响,进而在反演消光系数过程中产生较大误差。SLidar技术的特点之一是随着距离的增加距离分辨率会下降,因此虽然回波信号在近距离能够十分精确地体现气溶

胶的分布情况,但在远距离会产生一定的平滑效果。

2.2 沙氏激光雷达方程及大气参数反演

SLidar采用面阵相机探测后向散射信号,并根据系统的几何光学关系实现大气回波信号的距离分辨。基于沙氏成像原理及大气探测激光雷达理论,SLidar技术探测的大气激光雷达方程可表示为

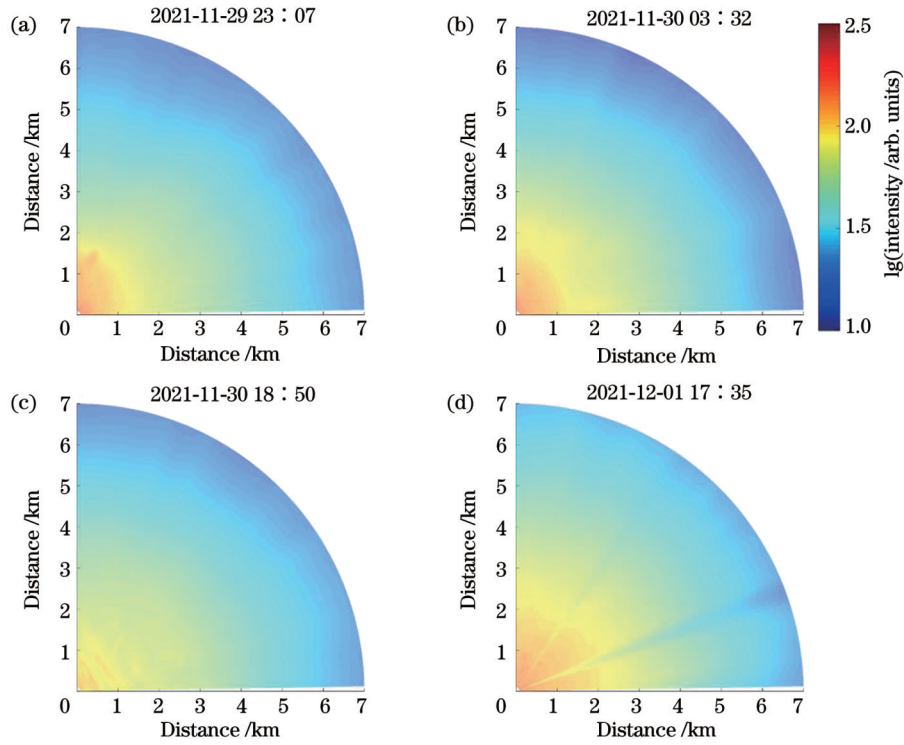


图 2 扫描式 SLidar 系统在不同时刻测得的大气回波信号分布。(a)2021 年 11 月 29 日 23:07; (b)2021 年 11 月 30 日 03:32; (c)2021 年 11 月 30 日 18:50; (d)2021 年 12 月 1 日 17:35

Fig. 2 Distribution of atmospheric echo signal measured by scanning SLidar system at different time. (a) 23:07, 2021-11-29; (b) 03:32, 2021-11-30; (c) 18:50, 2021-11-30; (d) 17:35, 2021-12-01

$$P(z, \lambda) = KO(z)P_0(\lambda)\beta(z, \lambda)\exp\left\{-2\int_0^z \alpha(z, \lambda) dz'\right\}, \quad (1)$$

式中： λ 为激光器中心波长； K 为激光雷达系统常数； $P_0(\lambda)$ 为激光器发射功率； $O(z)$ 为激光雷达系统的几何重叠因子； $\beta(z, \lambda)$ 为大气气溶胶的后向散射系数； $\alpha(z, \lambda)$ 为大气气溶胶的消光系数。

由于 SLidar 测量的距离分辨率与距离平方成反比，因此式(1)中不含距离平方因子，也即激光雷达信号不随距离平方衰减，不仅无需进行距离校正，而且对探测器的动态范围要求不高。考虑到激光器的波长为近红外波段(808 nm)，且测量期间多为雾霾天气，大气分子散射和消光效应较小，因此本文采用 Klett 法反演激光雷达方程。

根据 Klett 方法，大气消光系数和后向散射系数关系为

$$\beta(z) = \frac{\alpha(z)^k}{S_1}, \quad (2)$$

式中： k 为常数，一般认为取值范围是[0.67, 1.3]，通常取典型值 1； S_1 为激光雷达比，在 808 nm 波段， S_1 可设置为 50 sr^[31]。

根据以上关系式，可知大气消光系数的表达式为

$$\alpha(z) = \frac{P(z)}{\frac{P(z_c)}{\alpha(z_c)} + 2\int_z^{z_c} P(z) dz}, \quad (3)$$

式中： $P(z)$ 为激光雷达回波信号强度； z_c 为参考距离； $\alpha(z_c)$ 为气溶胶消光系数边界值。

由于系统为单波长米散射激光雷达，因此在上述表达式中省略了波长。由式(3)可以看到，求解消光系数的关键是确定消光系数边界值，即参考距离 z_c 处的消光系数 $\alpha(z_c)$ ^[29]。然而，利用高空洁净大气寻找边界值的方法对于低空探测的扫描式激光雷达系统并不适用。针对这一问题，本文在探测范围内选取一段大气均匀区间，利用斜率法求得该区间内的气溶胶消光系数作为边界值。依据大气激光雷达方程，当距离校正激光雷达信号为一条直线时(强度取对数)，该区域内大气是均匀的。因此，可将边界值求解转化为寻找对数激光雷达信号的线性区间问题。下面将重点探讨如何利用 DP 算法获取线性区间并求解边界值。

3 分析与讨论

3.1 道格拉斯-普克算法

DP 算法由 Douglas 和 Peucker^[32]于 1973 年提出，作为一种有效简化曲线的手段，常被用于线状地物化简与矢量数据压缩。实现该算法的一般步骤如下。

如图 3(a)所示，连接曲线的首尾端点 A 和 B，在遍历曲线上其余的点后，即可求得这些点到直线 AB 的距离。选取距离直线最远点 M，记该点到直线 AB 的距离为 d_{max} 。将 d_{max} 与阈值距离 ϵ_d 比较，若小于阈值($d_{max} <$

ϵ_d), 则略去曲线上所有的中间点, 直线 AB 即为化简结果; 若 d_{\max} 大于等于阈值 ($d_{\max} \geq \epsilon_d$), 保留点 M , 则曲线被分为 AM 、 BM 两部分处理, 如图 3(b) 所示。对每一段曲线重复以上步骤进行迭代操作, 直至所有线段均满足阈值条件 ($d_{\max} < \epsilon_d$), 如图 3(c) 和图 3(d) 所示。

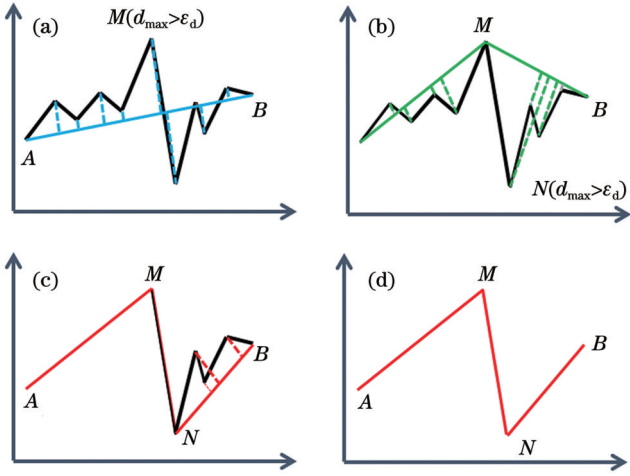


图 3 DP 算法示意图

Fig. 3 Schematic of DP algorithm

上述算法可以在保留曲线形状的基础上将曲线简化, 而通过调整阈值 ϵ_d 的大小, 可以控制直线结果与原曲线的逼近程度。如果将 ϵ_d 设置得足够小, 则得到的直线结果与原曲线相似程度就足够高。因此, 可以通过 DP 算法得到距离校正激光雷达信号的线性区间, 利用斜率法求得消光系数边界值, 从而反演大气气溶胶消光系数。DP 算法的程序流程如图 4 所示。

3.2 道格拉斯-普克算法确定边界值

利用 DP 算法求解边界值的核心思想, 是将确定消光系数边界值的问题转化为寻找对数激光雷达信号中满足条件的线性区间问题。换言之, 就是利用 DP 算法将激光雷达曲线分解成若干线性区间, 然后选取符合要求的线性区间, 并利用斜率法求得该距离处的消光系数作为边界值。由于 Klett 反演方法从远距离反演时结果更加稳定, 因此本文在寻找线性区域时优先选取远距离的线性区间。同时, 因测量仰角的存在, 远距离的探测高度会更高, 近地面污染物对激光雷达信号的影响更小。图 5 给出了该算法的步骤流程, 图中 L 为区间 (线段) 对应的距离长度, L_{Th} 为线性区间长度的最低要求, N_p 为该区间 (线段) 包含的原始像素点数。从图 4 和图 5 不难看出, 利用 DP 算法求解消光系数边界值的核心在于两个方面: 首先是确定激光雷达曲线分解的阈值, 其次是判定线性区间是否符合要求。下面将首先介绍如何判定线性区间, 再详细探讨激光雷达曲线分解的阈值问题。

为满足斜率法的应用条件并保证边界值的准确性, 用于求解边界值的线性区间应足够长且需确保该段区域内大气的均匀性。此外, 与传统脉冲激光雷达

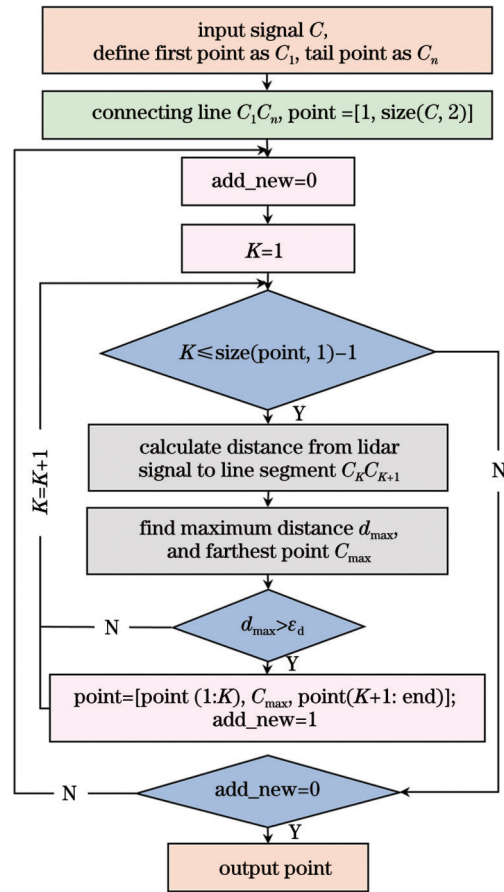


图 4 DP 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of DP algorithm

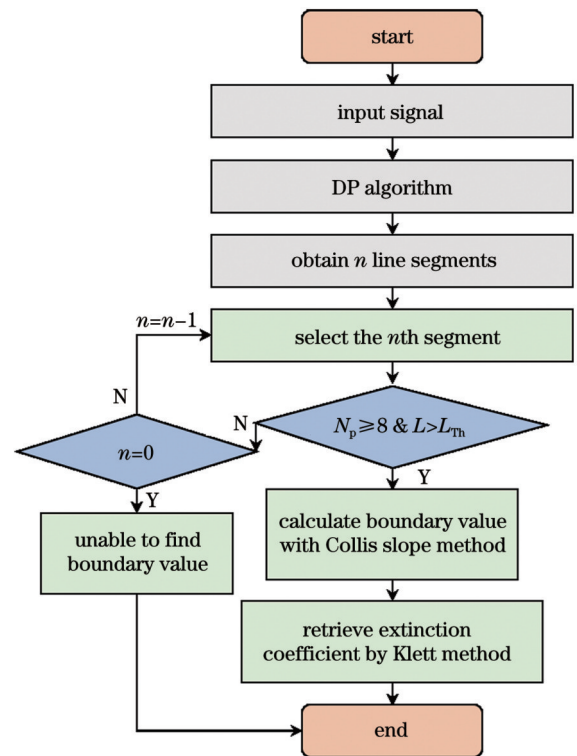


图 5 利用 DP 算法确定边界值及消光系数反演流程图

Fig. 5 Flow chart for determining boundary value by DP algorithm and retrieving extinction coefficient

不同,沙氏激光雷达的距离分辨率随着距离增加而下降($\propto z^2$),例如 1 km 时距离分辨率为 6 m,3 km 时距离分辨率约为 50 m。因此,在寻找均匀大气的区域时,需要考虑激光雷达距离分辨率的变化。当测量距离达到 7 km 时,系统距离分辨率为 300 m 左右,因此所寻找的线性区间应显著大于 300 m 才能避免局部信号波动的影响。另一方面,线性区间的范围也不能过大,否则会导致无法找到符合要求的线性区间,从而使得消光系数边界值求解失败。综合上述两方面的因素,避免气溶胶团影响结果的准确性,用于求解消光系数边界值的线性区间的长度需同时满足两个条件:(1)当大

气均匀的区间不小于 500 m 时方可用于计算消光系数边界值($L \geq L_{Th} = 500 \text{ m}$);(2)线性区间至少包含 8 个原始像素点($N_p \geq 8$)。

为了研究 DP 算法分解激光雷达曲线的阈值问题,选取了图 2(a)中的两条曲线,利用经典 DP 算法在不同阈值条件下对激光雷达曲线进行分析,结果如图 6 所示。从图 6 的结果中可以看出,不同阈值条件下 DP 算法得到的线性区间有所不同,可能影响最终求解的消光系数边界值。为了进一步厘清 DP 算法阈值的影响,下面将对不同阈值条件下获得的消光系数进行定量对比分析。

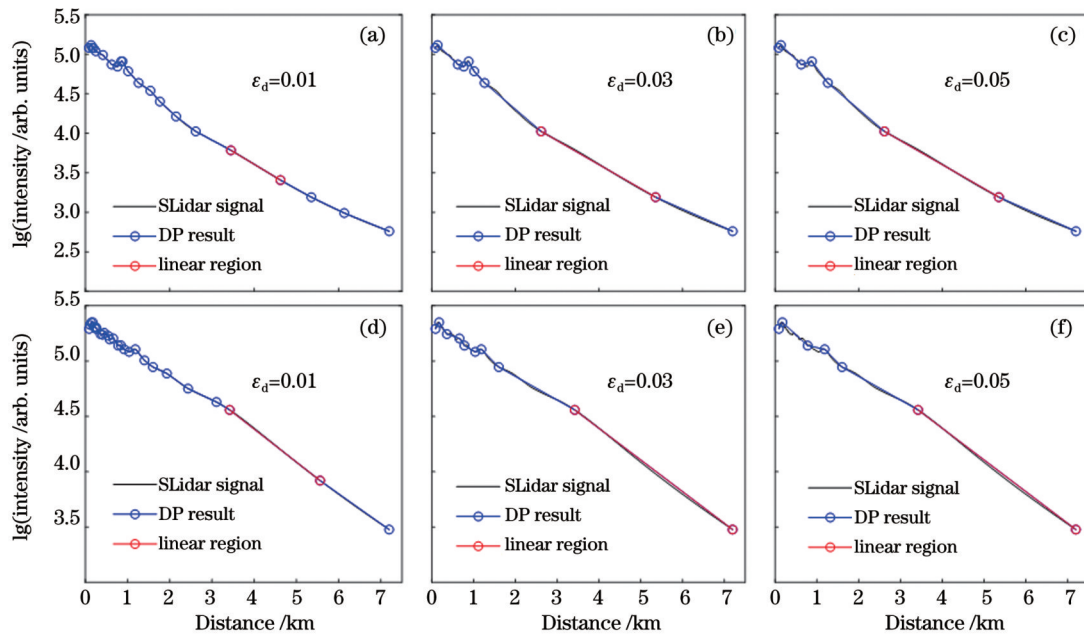


图 6 不同阈值条件下经典 DP 算法结果。(a)~(c)2021 年 11 月 29 日 23:07 测量信号在不同阈值条件下的结果;(d)~(f)2021 年 11 月 30 日 18:50 测量信号在不同阈值条件下的结果

Fig. 6 Results of classical DP algorithm with different threshold values. (a)~(c) Lidar signal measured at 23:07, 2021-11-29; (d)~(f) lidar signal measured at 18:50, 2021-11-30

图 7 展示了 2021 年 11 月 29 日 23:07 和 11 月 30 日 18:50 两组扫描测量数据在 $\epsilon_d = 0.01, 0.03, 0.05$ 的条件下得到的消光系数反演结果,其中深蓝色部分表示阈值设置过小无法寻找线性区间,导致无法反演消光系数的情形。从强度图来看,该测量区间内的大气是均匀的,但在不同阈值条件下得到的消光系数分布均存在显著起伏的情况,表明反演结果存在一定的误差。为了寻找合适的阈值与验证反演结果的准确性,选取在大范围内线性度较好的激光雷达曲线作为参考曲线,用于对比分析。一般而言,参考曲线选取存在线性区间长度大于 3500 m 且线性拟合程度(R^2)超过 0.9999 的区间。

图 8 和图 9 展示了 2021 年 11 月的两组数据在 DP 算法不同阈值条件下的反演结果与参考信号的对比情况。根据图 8(a)的激光雷达信号对比图可以看出,两条曲线整体强度变化趋于一致,其对应的消光系数应

基本一致。如图 8(d)所示,仅当 $\epsilon_d = 0.01$ 时,消光系数结果与参考曲线较为相近,即更接近真实值。根据图 9(d)的反演结果, $\epsilon_d = 0.03$ 时反演得到的消光系数曲线与参考值最为接近,其余两个阈值的反演结果存在明显误差。由此可以看出,阈值过大或过小均有可能产生较大的测量误差。单纯调节阈值大小难以适应所有的激光雷达曲线。究其根本,主要是因为经典 DP 算法判断的标准是最大偏离距离,无法有效反映激光雷达线段与对应直线的偏离程度。因此,有必要在经典 DP 算法的基础之上,提出新的阈值判断标准,实现更加准确的线性区间搜索。

3.3 改进的 DP 算法确定边界值

经典 DP 算法中的阈值 ϵ_d 为曲线中最远点到直线的距离,即最远点相对直线的偏离程度,这无法体现原曲线的线性程度,因此得到的区间内原曲线会呈现不同状态。图 10 是对于两条不同激光雷达曲线的经典

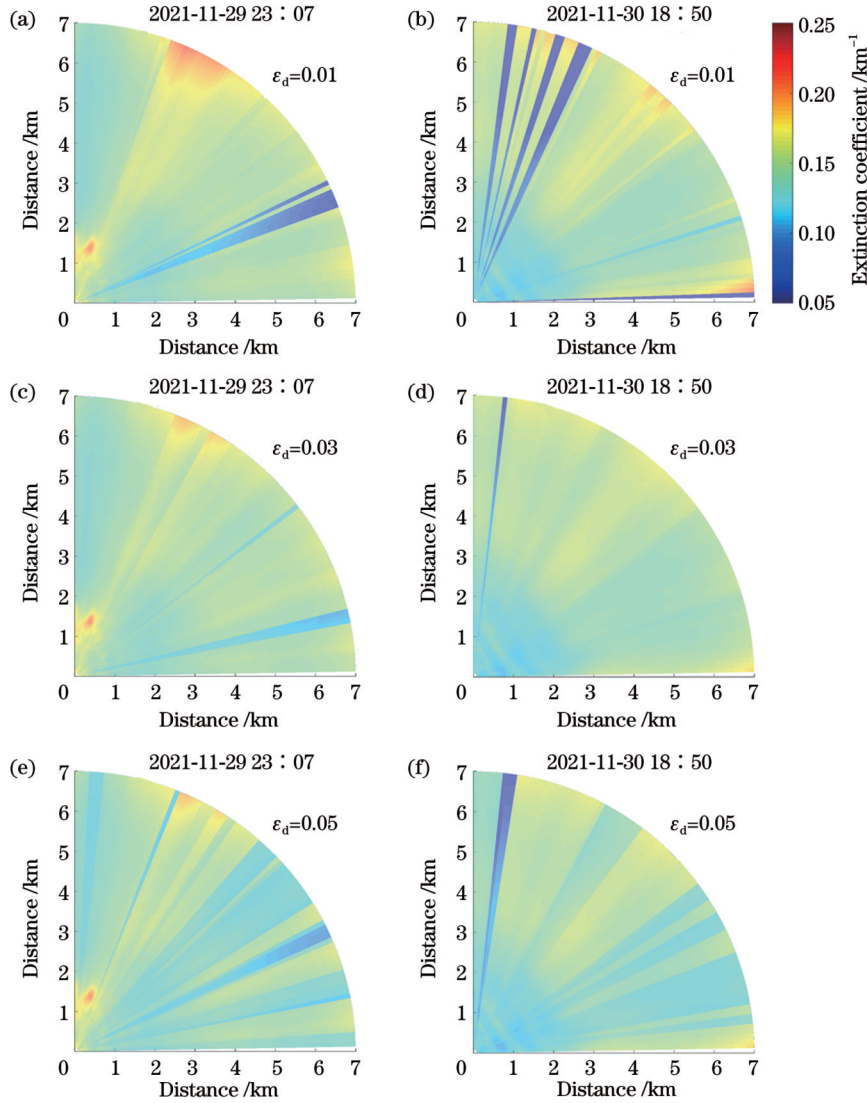


图 7 不同阈值条件下经典 DP 算法反演消光系数分布图。(a), (c), (e) 2021 年 11 月 29 日 23:07 的消光系数分布图; (b), (d), (f) 2021 年 11 月 30 日 18:50 的消光系数分布图

Fig. 7 Distribution of aerosol extinction coefficient retrieved by classical DP algorithm with different threshold values. (a), (c), (e) Distribution of aerosol extinction coefficient retrieved from lidar signals measured at 23:07, 2021-11-29; (b), (d), (f) distribution of aerosol extinction coefficient retrieved from lidar signals measured at 18:50, 2021-11-30

DP 算法求解的线性区间结果, 图中 d_{max} 为区间内最远点离直线距离, R^2 为 Pearson 相关系数, σ^2 为对数激光雷达曲线与直线距离的方差。图 10(a) 中确定边界值区间内的线性拟合程度高于图 10(b), 说明在考虑线性程度时, 同样阈值条件下的拟合结果存在较大差异。虽然通过控制阈值可提高拟合结果的线性程度, 但单纯控制阈值无法适用于所有曲线, 也很难精确进行阈值设定。另一方面, 图 10 中两条激光雷达曲线所搜寻到的线性区间的相关系数 (R^2) 均高达 0.99 以上。许多研究亦表明, 利用相关系数确定曲线或者变量的线性程度并不可靠^[33-36]。针对这一问题, 本文将方差分析

方法融入 DP 算法, 实现更优的激光雷达曲线简化。

若要判断整条曲线相对于首尾点连线的偏离度, 需要考虑曲线上所有点到直线的距离, 而方差分析是实现这一功能最为有效的手段之一。常规的方差分析表征的是曲线(或离散数据点)与期望的离散程度。在本文中, 方差应表征原始激光雷达曲线相对于其首尾点连线的偏离程度。因此, 方差公式可表示为

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=2}^N d_i^2}{N-2}, \quad (4)$$

式中:

$$d_i = \frac{(\ln P_N - \ln P_1) z_i - (z_N - z_1) \ln P + z_N \ln P_1 - z_1 \ln P_N}{\sqrt{(\ln P_N - \ln P_1)^2 + (z_N - z_1)^2}}, \quad (5)$$

式中: d_i 为对数激光雷达曲线上第 i 点到直线线段的距离; N 为原曲线数据点的个数; P_i 为第 i 点强度; z_i 为第

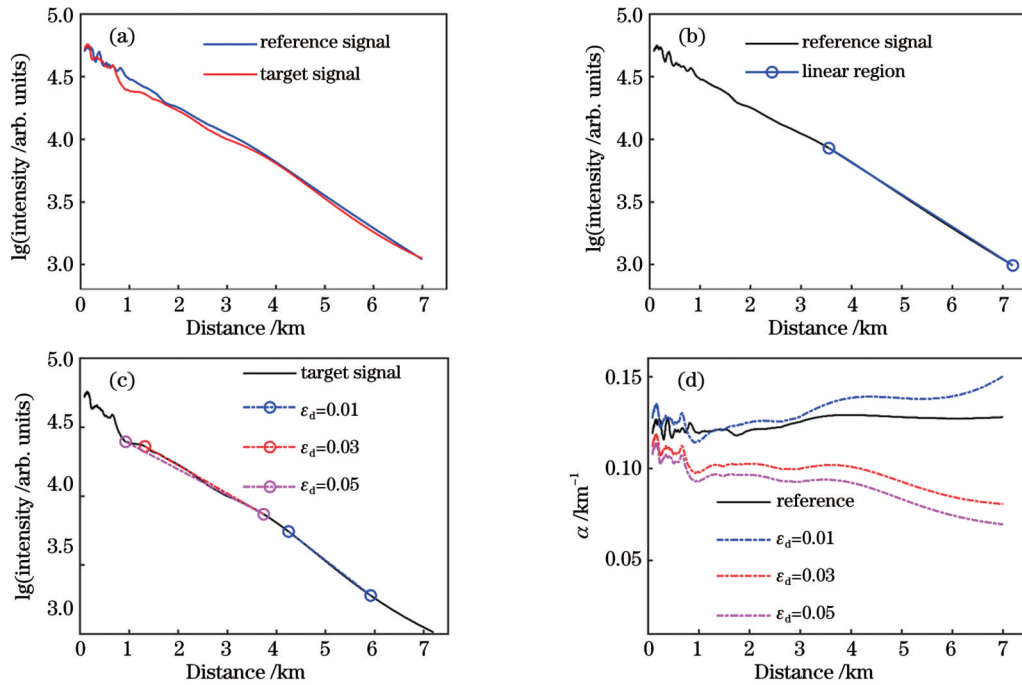


图8 2021年11月29日23:07的待分析曲线与参考曲线分析结果对比。(a)待分析曲线强度与参考曲线强度对比图;(b)参考曲线及由DP算法搜寻到的线性区间;(c)不同阈值条件下经典DP算法得到的线性区间;(d)不同阈值条件下待分析曲线与参考曲线的消光系数

Fig. 8 Comparisons between target signal and reference signal measured at 23:07, 2021-11-29. (a) Lidar signals of target signal and reference signal; (b) reference signal and corresponding linear region found by DP algorithm; (c) linear regions found by classical DP algorithm with different threshold values for target signal; (d) comparisons between aerosol extinction coefficient profiles of target signal and reference signal

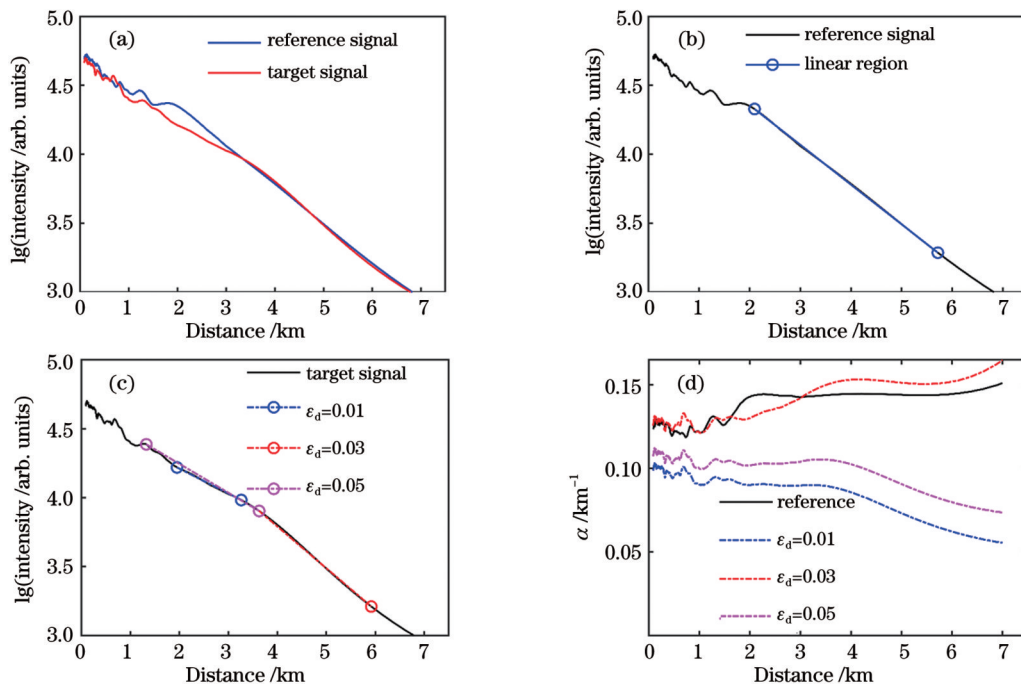


图9 2021年11月30日18:50的待分析曲线与参考曲线分析结果对比。(a)待分析曲线强度与参考曲线强度对比图;(b)参考曲线及由DP算法搜寻到的线性区间;(c)不同阈值条件下经典DP算法得到的线性区间;(d)不同阈值条件下待分析曲线与参考曲线的消光系数

Fig. 9 Comparisons between target signal and reference signal measured at 18:50, 2021-11-30. (a) Lidar signals of target signal and reference signal; (b) reference signal and corresponding linear region found by DP algorithm; (c) linear regions found by classical DP algorithm with different threshold values for target signal; (d) comparisons between aerosol extinction coefficient profiles of target signal and reference signal

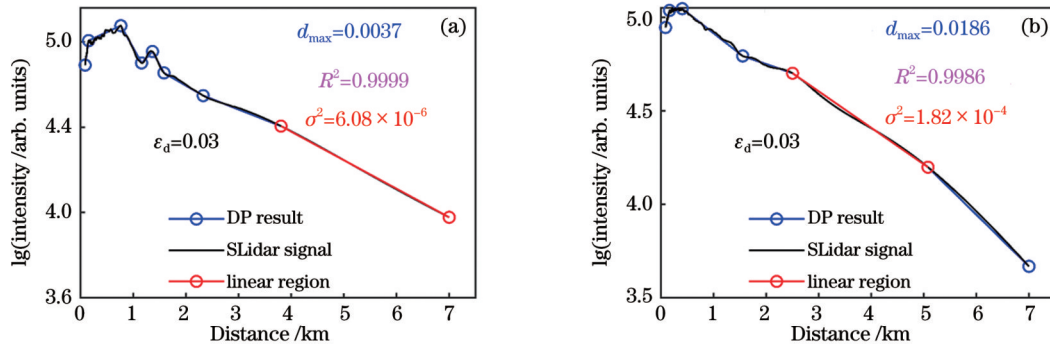


图 10 不同时刻激光雷达信号用经典 DP 算法求解的线性区间结果及相关参数。(a)2021 年 12 月 2 日 07:17; (b)2021 年 12 月 3 日 22:26

Fig. 10 Evaluation results by classical DP algorithm for lidar signals measured at different time. (a) 07:17, 2021-12-02; (b) 22:26, 2021-12-03

i 点的测量距离。

σ^2 的物理意义为曲线相对于首尾端点连线所在直线的距离的方差。图 10 中所标注的 σ^2 值相差近 30 倍, 而 d_{max} 的值仅差 5 倍, 相关系数也很接近。因此, 相比于最远点距离 d_{max} 或者相关系数, σ^2 能更好地体现原曲线与直线结果的偏离程度, 我们可使用方差 σ^2 替代原 DP 算法中的距离 d_{max} 。此外, 需要特别强调的是, 式(5)计算的距离 d_i 与激光雷达的系统常数无关, 其描述的是相对变化, 具体计算结果不会随着激光雷达信号强度的整体变化而发生变化。因此, 在方差阈

值选取方面具有普适性, 不需要考虑激光雷达信号的绝对强度大小。

为了选取合适的方差阈值(ϵ_{σ^2}), 选取线性拟合程度良好($R^2 > 0.9999$), 并且能选出足够长线性区间(> 3500 m)的激光雷达信号作为参考信号, 从而对比不同阈值条件下目标曲线求解边界值的结果。图 11 为 2021 年 12 月 2 日 07:17 的实验数据。如图 11(a) 所示, 选取周围与目标曲线相似且大气均匀的回波信号作为参考, 图 11(b) 为参考曲线选取边界值的结果。在 1 km 内目标曲线与参考曲线走势一致, 表明在区间内的大

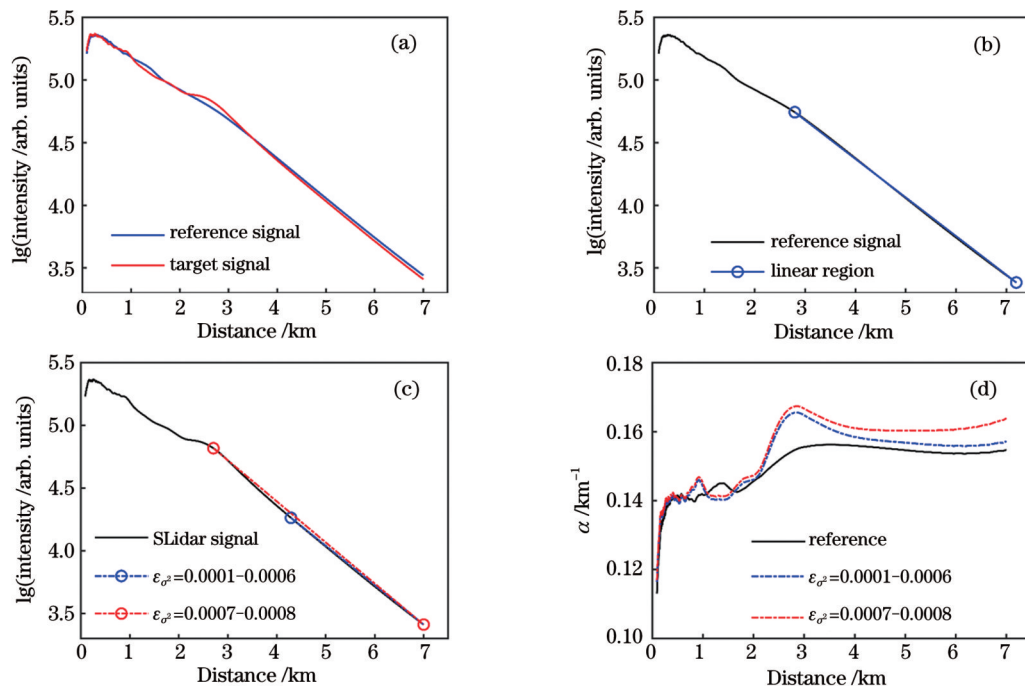


图 11 2021 年 12 月 2 日 07:17 的待分析曲线与参考曲线分析结果对比。(a)待分析曲线强度与参考曲线强度对比图;(b)参考曲线及由 DP 算法搜寻到的线性区间;(c)不同阈值条件下改进 DP 算法得到的线性区间;(d)不同阈值条件下待分析曲线与参考曲线的消光系数

Fig. 11 Comparisons between target signal and reference signal measured at 07:17, 2021-12-02. (a) Lidar signals of target signal and reference signal; (b) reference signal and corresponding linear region found by DP algorithm; (c) linear regions found by improved DP algorithm with different threshold values for target signal; (d) comparisons between aerosol extinction coefficient profiles of target signal and reference signal

气环境是相近的。在 1~4 km 内大气存在波动,4~7 km 内两条曲线几乎重叠。图 11(c)为 $\epsilon_{\sigma^2}=0.0001\sim 0.0008$ 时用于求解边界值的不同区间,可以看出,阈值越小,所选区间信号的线性拟合程度越高。将不同边界值分别用于 Klett 算法,反演得到的消光系数如图 11(d)所示。在 1 km 以内反演得到的消光系数与参考信号一致,4~7 km 处大气环境相似,且距离校正信号近似为一条直线,说明该区间内的消光系数几乎不变,因此

在 $\epsilon_{\sigma^2}=0.0001\sim 0.0006$ 时得到的消光系数更接近真实值。图 12 为 2021 年 12 月 3 日 22:26 的实验数据。如图 12(a)所示,在小于 1 km 与 4~7 km 两个距离区间内回波信号的重合度很高,说明这两段范围内的大气条件基本一致。通过分析图 12(d)中的消光系数对比曲线,可以看到在 $\epsilon_{\sigma^2}=0.0001$ 时,小于 1 km 与 4~7 km 两个距离区间内的消光系数与参考信号的消光系数基本一致。综上所述,本文在 DP 算法实现时取 $\epsilon_{\sigma^2}=0.0001$ 。

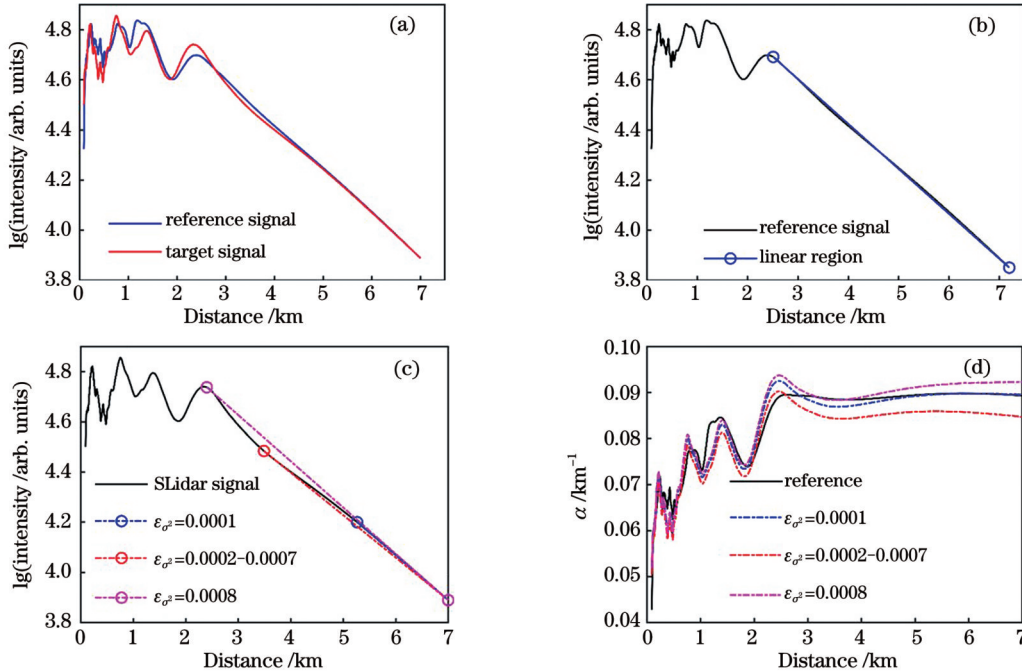


图 12 2021 年 12 月 3 日 22:26 的待分析曲线与参考曲线分析结果对比。(a)待分析曲线强度与参考曲线强度对比图;(b)参考曲线及由 DP 算法搜寻到的线性区间;(c)不同阈值条件下改进 DP 算法得到的线性区间;(d)不同阈值条件下待分析曲线与参考曲线的消光系数

Fig. 12 Comparisons between target signal and reference signal measured at 22:26, 2021-12-03. (a) Lidar signals of target signal and reference signal; (b) reference signal and corresponding linear region found by DP algorithm; (c) linear regions found by improved DP algorithm with different threshold values for target signal; (d) comparisons between aerosol extinction coefficient profiles of target signal and reference signal

图 13 对比了经典 DP 算法与改进 DP 算法反演得到的消光系数。从图 13(a)可以看出,改进 DP 算法与

经典 DP 算法 $\epsilon_d=0.03$ 和 $\epsilon_d=0.05$ 时的反演结果一致,且与相似程度高的参考曲线反演得到的消光系数

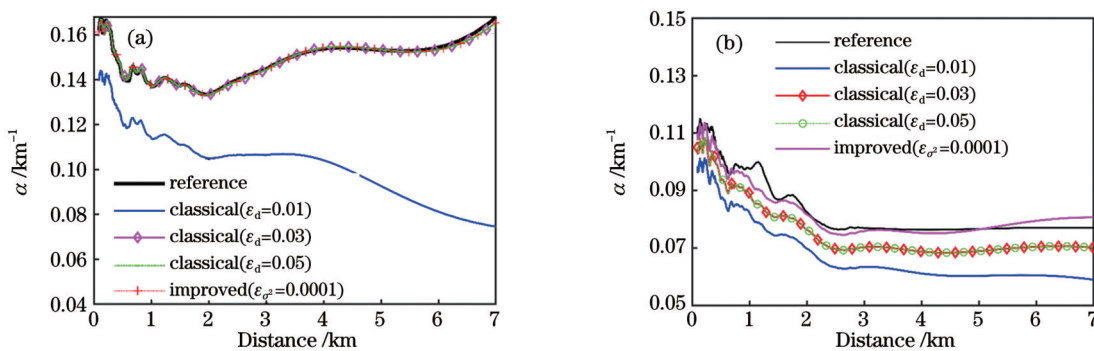


图 13 改进的 DP 算法及经典 DP 算法反演消光系数结果对比。(a)2021 年 11 月 29 日 23:07 待分析曲线及参考曲线反演结果;(b)2021 年 11 月 30 日 18:50 待分析曲线及参考曲线反演结果

Fig. 13 Comparisons between aerosol extinction coefficients retrieved by classical DP algorithm and improved DP algorithm. (a) Retrieved aerosol extinction coefficients for lidar signal measured at 23:07, 2021-11-29; (b) retrieved aerosol extinction coefficients for lidar signal measured at 18:50, 2021-11-30

曲线基本一致。如图 13(b)所示,改进 DP 算法反演得到的消光系数结果与参考消光系数曲线最为相近,准确度更高。

为了进一步验证本文方法的可行性和准确性,对连续一周的大气污染扫描测量结果进行详细的分析讨论。测量期间,天气晴朗,最高温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,最低温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$,2021 年 12 月 6 日前平均风速为 2 m/s ,2021 年 12 月 6 日后平均风速为 5.7 m/s 。利用改进的 DP 算

法求得的边界值反演获得大气消光系数分布图,并将反演结果与陕西省咸阳市空气污染监测站测得的 PM_{10} 浓度进行对比分析。图 14 是利用改进的 DP 算法反演得到的消光系数分布图,图中星号为空气污染监测站点所在位置。将图 14 与图 7 的结果对比可以看出,经典 DP 算法反演的消光系数容易受到信号波动的影响而产生突变,改进后的 DP 算法有效避免了信号波动产生的影响,反演的消光系数结果更加稳定。

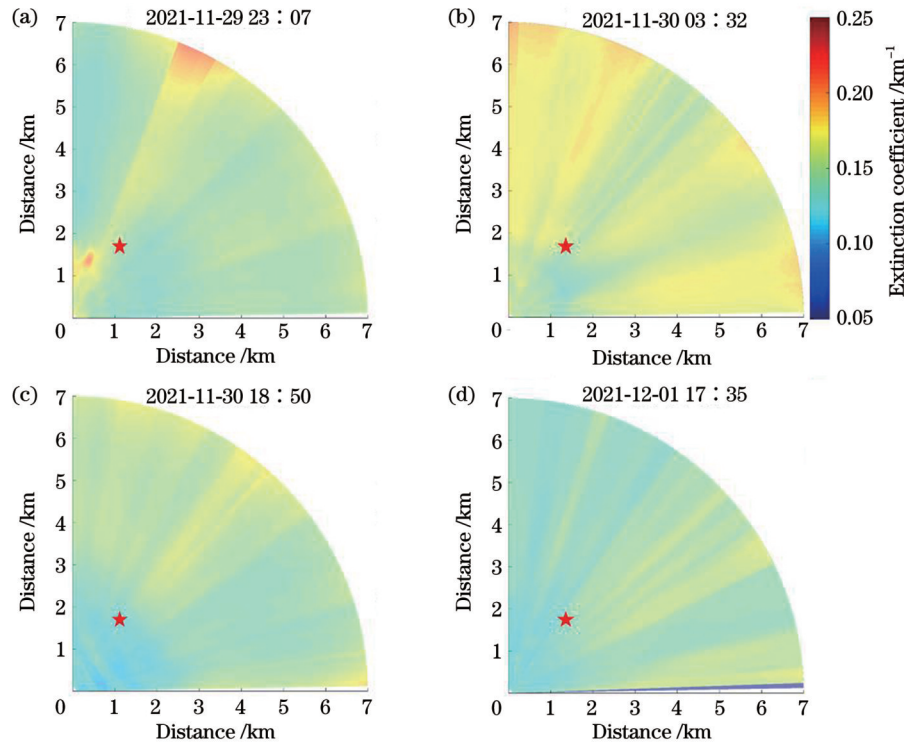


图 14 改进后 DP 算法反演的不同时刻的消光系数分布图。(a) 2021 年 11 月 29 日 23:07; (b) 2021 年 11 月 30 日 03:32; (c) 2021 年 11 月 30 日 18:50; (d) 2021 年 12 月 1 日 17:35

Fig. 14 Distributions of extinction coefficient at different time retrieved by improved DP algorithm. (a) 23:07, 2021-11-29; (b) 03:32, 2021-11-30; (c) 18:50, 2021-11-30; (d) 17:35, 2021-12-01

同时,我们获取了距离扫描式 SLidar 系统 2 km 的国家环境监测站点数据。图 15(a)为 2021 年 11 月 30 日—2021 年 12 月 08 日空气污染监测站点测得的相对湿度数据,图 15(b)为监测站点 PM_{10} 的浓度变化曲线与反演得到的对应位置方圆 50 m 的消光系数平均值对比结果,时间分辨率为 1 h 。从图 15 可以看出 SLidar 系统反演得到的消光系数与监测站点 PM_{10} 的浓度变化呈现出很好的一致性,相关系数为 0.88 。分析图中消光系数的变化趋势可以看出,在该段时间内,大气气溶胶颗粒物普遍呈现夜间浓度升高、下午浓度降低的趋势。以上分析结果表明,利用本文所提出的改进 DP 算法能够准确地获取测量范围内大气均匀的区域,从而依据斜率法有效求解消光系数边界值,最终成功反演消光系数时空分布。另一方面,颗粒物浓度、相对湿度以及消光系数三者之间存在较高的相关性。为了更清晰地展示湿度的影响,图 16 示了不同湿度条

件下 PM_{10} 浓度和气溶胶消光系数的关系。可以看到,当湿度大于 60% 时,两者偏差明显增加,可见湿度的变化会使得消光系数与干粒子的浓度的相关性降低。

4 结 论

本文提出了一种基于改进 DP 算法确定消光系数边界值的方法。寻找探测区域内的均匀大气区间,利用斜率法求解其消光系数并作为边界值代入 Klett 方法反演消光系数廓线。经典 DP 算法采用最远距离阈值实现激光雷达信号的分解,无法有效反映激光雷达线段与对应直线的偏离程度,阈值过大或过小均会产生一定的误差。本文首先系统性地研究了经典 DP 算法在消光系数边界值求解中的主要问题,在此基础上将对数激光雷达信号与对应直线线段的距离方差作为阈值控制手段,替代经典 DP 算法中的最远距离阈值,

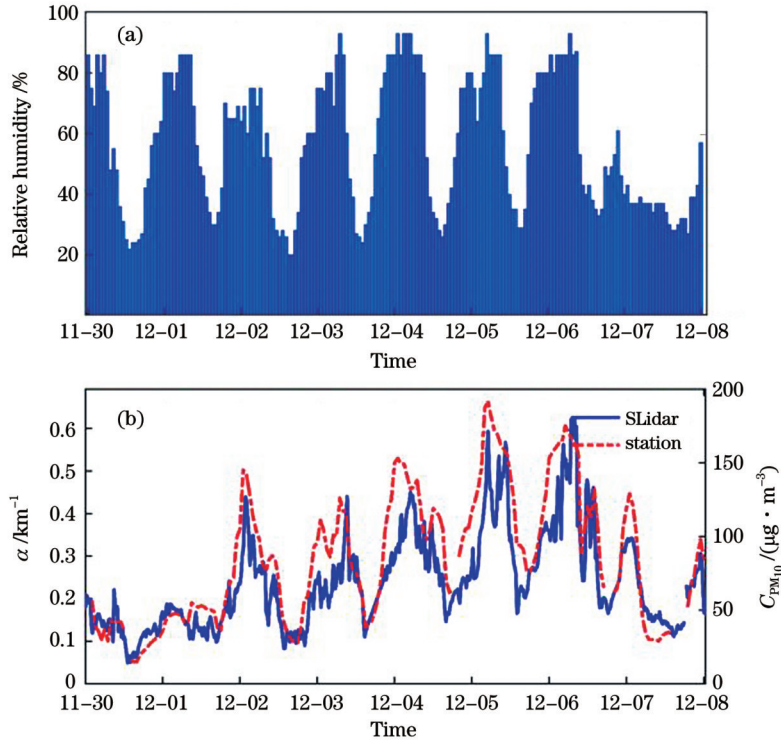


图 15 SLidar 扫描测量结果与空气污染监测站点数据对比。(a) 空气污染监测站点测得的相对湿度数据; (b) SLidar 测量的气溶胶消光系数与空气污染监测站点 PM₁₀ 浓度对比

Fig. 15 Comparison between measurement results obtained from SLidar technique and air-pollution monitoring station. (a) Relative humidity measured by air-pollution monitoring station; (b) comparison between aerosol extinction coefficient evaluated from SLidar technique and PM₁₀ concentration obtained from air-pollution monitoring station

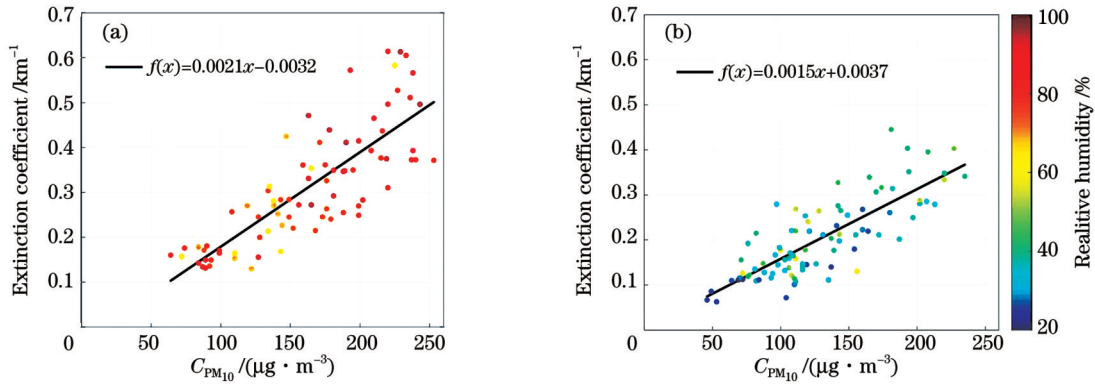


图 16 不同湿度下 PM₁₀ 浓度和气溶胶消光系数散点图。(a) RH 大于等于 60%; (b) RH 小于 60%

Fig. 16 Scatter plot of PM₁₀ concentration and aerosol extinction coefficient under different relative humidities (RHs). (a) RH higher than or equal to 60%; (b) RH less than 60%

从而更加准确地获取对数激光雷达曲线的线性区间并利用斜率法求解消光系数边界值。通过消光系数反演结果的对比分析,确定了改进 DP 算法的方差阈值,并验证了其在线性区间搜索方面的可行性及可靠性。利用本文提出的方法对连续一周扫描测量结果进行反演,发现与国家环境监测站点测量的 PM₁₀ 浓度具有良好的-一致性(相关系数 0.88)。此外,湿度的变化也会影响消光系数与干粒子的浓度的相关性。研究结果表明,本文提出的改进 DP 算法可为水平扫描激光雷达信号的消光系数边界值求解及反演提供有效的方法。

参 考 文 献

[1] 吕阳. 基于地基和星载激光雷达的大气颗粒物污染遥感监测研究[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2018.
Lü Y. A remote sensing study on monitoring of atmospheric particulate matters pollution using ground-based and satellite lidar [D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, 2018.

[2] 狄慧鸽, 侯晓龙, 赵虎, 等. 多波长激光雷达探测多种天气气溶胶光学特性与分析[J]. 物理学报, 2014, 63(24): 244206.
Di H G, Hou X L, Zhao H, et al. Detections and analyses of aerosol optical properties under different weather conditions using multi-wavelength Mie lidar[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(24): 244206.

- [3] 翟崇治, 周乾, 余家燕, 等. 偏振米散射激光雷达在大气监测中的应用[J]. 激光杂志, 2013, 34(1): 34-36.
Zhai C Z, Zhou Q, Yu J Y, et al. The application of the polarization-Mie lidar in environmental monitoring[J]. Laser Journal, 2013, 34(1): 34-36.
- [4] Chen W B, Kuze H, Uchiyama A, et al. One-year observation of urban mixed layer characteristics at Tsukuba, Japan using a micro pulse lidar[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(25): 4273-4280.
- [5] Yang Y, Guan P, Mei L. A scanning Scheimpflug lidar system developed for urban pollution monitoring[J]. EPJ Web of Conferences, 2018, 176: 01013.
- [6] Palm S P, Melfi S H, Carter D L. New airborne scanning lidar system: applications for atmospheric remote sensing[J]. Applied Optics, 1994, 33(24): 5674-5681.
- [7] 莫祖斯, 卜令兵, 王勤, 等. 基于 GRNN 神经网络模型结合气溶胶消光系数和气象要素评估颗粒物质量浓度[J]. 中国激光, 2022, 49(17): 1710001.
Mo Z S, Bu L B, Wang Q, et al. Estimation of particulate matter mass concentration based on generalized regression neural network model combining aerosol extinction coefficient and meteorological elements[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(17): 1710001.
- [8] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns[J]. Applied Optics, 1981, 20(2): 211-220.
- [9] Fernald F G. Analysis of atmospheric lidar observations: some comments[J]. Applied Optics, 1984, 23(5): 652-653.
- [10] Kovalev V A. Lidar measurement of the vertical aerosol extinction profiles with range-dependent backscatter-to-extinction ratios[J]. Applied Optics, 1993, 32(30): 6053-6065.
- [11] Marchant C C, Moon T K, Gunther J H. An iterative least square approach to elastic-lidar retrievals for well-characterized aerosols[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(5): 2430-2444.
- [12] 陈涛, 吴德成, 刘博, 等. 低层大气中确定气溶胶后向散射系数边界值的新方法[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1531-1536.
Chen T, Wu D C, Liu B, et al. A new method for determining aerosol backscatter coefficient boundary value in the lower troposphere[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1531-1536.
- [13] 熊兴隆, 冯帅, 蒋立辉, 等. 一种新的大气消光系数边界值确定方法[J]. 光电子·激光, 2011, 22(11): 1699-1705.
Xiong X L, Feng S, Jiang L H, et al. A novel method for determining the boundary value of the atmospheric extinction coefficient[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2011, 22(11): 1699-1705.
- [14] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅. Mie 散射激光雷达回波信号处理方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 89-95.
Xiong X L, Jiang L H, Feng S. Return signals processing method of Mie scattering lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 89-95.
- [15] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 改进的牛顿法确定大气消光系数边界值[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1744-1749.
Xiong X L, Jiang L H, Feng S, et al. Using improved Newton method to determine the boundary value of atmospheric extinction coefficient[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1744-1749.
- [16] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 非线性方程法确定低空探测机载激光雷达消光系数边界值[J]. 光电子·激光, 2012, 23(7): 1356-1362.
Xiong X L, Jiang L H, Feng S, et al. Constructing and solving the nonlinear equation of airborne lidar for determining the boundary value of the extinction coefficient for atmospheric aerosol in lower atmosphere[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(7): 1356-1362.
- [17] 熊兴隆, 蒋立辉, 冯帅, 等. 基于不动点原理的大气气溶胶消光系数边界值确定方法[J]. 光电子·激光, 2012, 23(2): 303-309.
Xiong X L, Jiang L H, Feng S, et al. Determination of the boundary value of atmospheric aerosol extinction coefficient based on fixed point principle[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2012, 23(2): 303-309.
- [18] 李红旭, 常建华, 朱玲嫵, 等. 基于微脉冲激光雷达的能见度反演算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(10): 1555-1560.
Li H X, Chang J H, Zhu L Y, et al. Visibility inversion algorithm based on micro pulse lidar[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(10): 1555-1560.
- [19] 孙国栋, 秦来安, 张巳龙, 等. 一种测量大气消光系数边界值的新方法[J]. 物理学报, 2018, 67(5): 054205.
Sun G D, Qin L A, Zhang S L, et al. A new method of measuring boundary value of atmospheric extinction coefficient[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(5): 054205.
- [20] 陈晓楠, 毕京平, 王凯欣, 等. 一种确定消光系数边界值的新算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240102.
Chen X N, Bi J P, Wang K X, et al. Method for determining boundary value of extinction coefficient[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(24): 240102.
- [21] 杨彬, 莫祖斯, 刘海蛟, 等. 大气探测激光雷达突变信号处理方法研究(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1): 20211117.
Yang B, Mo Z S, Liu H J, et al. Study on abrupt signal processing method of atmospheric lidar (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20211117.
- [22] 吕立慧, 刘文清, 张天舒, 等. 微脉冲激光雷达水平探测气溶胶两种反演算法对比与误差分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1774-1778.
Lü L H, Liu W Q, Zhang T S, et al. Two data inversion algorithms of aerosol horizontal distribution detected by MPL and error analysis[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2015, 35(7): 1774-1778.
- [23] 梅亮. 沙氏大气激光雷达技术及其研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090004.
Mei L. Atmospheric Scheimpflug lidar technique and its progress [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090004.
- [24] Liu Z, Li L M, Li H, et al. Preliminary studies on atmospheric monitoring by employing a portable unmanned Mie-scattering Scheimpflug lidar system[J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 837.
- [25] 梅亮, 孔政, 林宏泽, 等. 基于沙氏成像原理的激光雷达技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 20210033.
Mei L, Kong Z, Lin H Z, et al. Recent advancements of the lidar technique based on the Scheimpflug imaging principle (Invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3): 20210033.
- [26] Kong Z, Liu Z, Zhang L S, et al. Atmospheric pollution monitoring in urban area by employing a 450-nm lidar system[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1880.
- [27] Mei L, Kong Z, Guan P. Implementation of a violet Scheimpflug lidar system for atmospheric aerosol studies[J]. Optics Express, 2018, 26(6): A260-A274.
- [28] Mei L, Guan P, Yang Y, et al. Atmospheric extinction coefficient retrieval and validation for the single-band Mie-scattering Scheimpflug lidar technique[J]. Optics Express, 2017, 25(16): A628-A638.
- [29] Mei L, Brydegaard M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system[J]. Optics Express, 2015, 23(24): A1613-A1628.
- [30] Mei L, Brydegaard M. Continuous-wave differential absorption lidar[J]. Laser & Photonics Review, 2015, 9(6): 629-636.
- [31] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan, from 1990 to 1993[J]. Applied Optics, 1996, 35(24): 4941-4952.
- [32] Douglas D H, Peucker T K. Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. Cartographica: the International Journal for Geographic Information and Geovisualization, 1973, 10(2): 112-122.
- [33] Jurado J M, Alcázar A, Muniz-Valencia R, et al. Some practical considerations for linearity assessment of calibration curves as function of concentration levels according to the fitness-for-purpose approach[J]. Talanta, 2017, 172: 221-229.
- [34] Andrade J M, Gómez-Carracedo M P. Notes on the use of Mandel's test to check for nonlinearity in laboratory calibrations[J]. Analytical Methods, 2013, 5(5): 1145-1149.

[35] Van Loco J, Elskens M, Croux C, et al. Linearity of calibration curves: use and misuse of the correlation coefficient[J]. Accreditation and Quality Assurance, 2002, 7(7): 281-285.

[36] Akritas M G, Papadatos N. Heteroscedastic one-way ANOVA and lack-of-fit tests[J]. Journal of the American Statistical Association, 2004, 99(466): 368-382.

Determination of Boundary Value of Extinction Coefficient Based on Improved Douglas-Peucker Algorithm

Fei Ruonan, Kong Zheng, Gong Zhenfeng, Mei Liang*

School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China

Abstract

Objective Atmospheric lidar has been widely used in horizontal scanning measurements for air pollution monitoring in recent years. The determination of the boundary value of the aerosol extinction coefficient (AEC) and the retrieval of the AEC profile are the key issues for quantitative atmospheric applications. In this work, a new method based on an improved Douglas-Peucker (DP) algorithm is proposed to find the linear region in the logarithmic lidar curve, from which the boundary value of the AEC is estimated. Combined with the classical Klett method, the AEC profile can be obtained in horizontal scanning measurements. The feasibility and performance of the improved DP algorithm has been validated through comparison studies of the AEC scanning map.

Methods The experimental data evaluated in this work were obtained by a scanning Scheimpflug lidar (SLidar) system installed in Xianyang City, Shaanxi Province (Fig. 1), employing high power laser diodes as light sources and area image sensors as detectors. The elevation angle of the SLidar system during horizontal scanning measurements is about 3° . The scanning period is about 20 min with a rotation step of 2° . The DP algorithm has been proposed to automatically search linear regions in the logarithmic lidar signal. The DP algorithm decimates the original logarithmic lidar curve to a similar curve with fewer points through an iterative end-point fit algorithm. Besides, the variance of the distance between the logarithmic lidar signal and the corresponding line segment is used as the threshold to replace the farthest/maximum distance threshold in the classical DP algorithm, which can be used to obtain the linear region of the logarithmic lidar curve more accurately. The slope method is then employed for the determination of the AEC boundary value in the linear region, where the atmosphere is considered to be homogeneous. With the boundary value of the AEC as the input, the AEC profile can be obtained in horizontal scanning measurements according to the Klett method. Long enough linear regions (>3500 m) with an R^2 correlation coefficient beyond 0.9999 are selected as reference signals, from which the AEC profile can be reliably obtained. By comparing with the AEC profile retrieved from the reference signal, the performances of the classical DP algorithm and the improved DP algorithm are evaluated.

Results and Discussions It has been found out that the maximum distance threshold used in classical DP algorithm cannot be well adapted to different atmospheric conditions. On the other hand, the variance of the distance between the logarithmic lidar signal and the corresponding line segment, considering the deviations of all data points in the potential linear region, is more reliable for evaluating the linearity of the logarithmic lidar signal segment. According to comprehensive comparison studies, the variance threshold can be set to 1×10^{-4} to obtain the optimum result under various atmospheric conditions. The improved DP algorithm based on the variance threshold is then utilized to retrieve the boundary value of AEC from lidar signals. Finally, the AEC map can be obtained according to the Klett method (Fig. 14). It can be seen that the AEC retrieved by the classical DP algorithm (Fig. 7) is prone to sudden changes due to the influence of signal fluctuations. The improved DP algorithm can effectively avoid the influence of signal fluctuations, and the retrieved AEC result is more robust. To further verify the feasibility and accuracy of this method, statistical analysis on a one-week measurement is carried out. It can be seen from Fig. 15 that the AEC retrieved by the SLidar system and the proposed algorithm is in good agreement with the PM_{10} concentration reported by a nearby monitoring station with a correlation coefficient of 0.88. Figure 16 shows the relationship between PM_{10} concentration and aerosol extinction coefficient under different humidity conditions, implying that relative humidity also has a large impact on the relationship between AEC and the mass concentration of dry particles.

Conclusions In this work, an improved DP algorithm based on a variance threshold is proposed for automatically searching linear region in the logarithmic lidar signal. The slope method is employed for the determination of the boundary value in a subinterval linear region, where the atmosphere is homogeneous. The AEC profile is then retrieved by the Klett method. The feasibility and performance of the classical and the improved DP algorithms are validated through detailed AEC comparison studies. It has been found that the retrieved AEC based on the improved DP algorithm is in good agreement with the PM_{10} concentration reported by a nearby air pollution monitoring station for a continuous measurement campaign. The promising results demonstrate that the improved DP algorithm can provide an effective approach for determining the boundary value in horizontal scanning lidar measurements.

Key words atmospheric optics; Scheimpflug lidar; Douglas-Peucker algorithm; boundary value; extinction coefficient; atmospheric pollution