

大气探测激光雷达突变信号处理方法研究 (特邀)

杨 彬^{1,2}, 莫祖斯¹, 刘海姣², 卜令兵^{1*}

(1. 南京信息工程大学 大气物理学院 气象灾害预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;
2. 南京牧镭激光科技有限公司, 江苏 南京 210038)

摘要: 在大气探测激光雷达的实际应用中, 当激光探测路径上存在后向散射系数很大的云雾、烟尘或硬目标, 且由其引起的突变信号强烈到一定程度时, 使用 Fernald 法后向积分反演消光系数会在突变信号后向数据中产生明显的反演误差。根据 Fernald 法后向积分的特点并结合分段斜率法, 提出了一种新的反演方法以应对上述情况, 优化了传统算法的反演策略。即通过判断突变信号位置不断更新参考距离和边界值进行迭代反演, 并将更准确的反演数据拼接覆盖到初始反演数据中。使用垂直和水平探测所得到的实测数据对反演方法进行有效性验证, 并且对被优化数据和邻近无突变信号时相应的数据进行了对比。结果表明, 相比传统算法, 垂直和水平探测的相关数据在新的反演方法下分别优化了消光系数相对误差约 79% 和 96%, 验证了该方法具有一定的可行性。

关键词: 激光雷达; 气溶胶; 消光系数; 边界值; 突变信号

中图分类号: TN958.98 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211117

Study on abrupt signal processing method of atmospheric lidar (Invited)

Yang Bin^{1,2}, Mo Zusi¹, Liu Haijiao², Bu Lingbing^{1*}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. Nanjing Mulei Laser Technology Co., LTD, Nanjing 210038, China)

Abstract: In the practical application of atmospheric lidar, when there are clouds, smoke or hard targets with large backscatter coefficient on the laser detection path, and the abrupt signal is strong enough, the backward integration inversion of extinction coefficient by Fernald method will produce obvious inversion error in the backward data of abrupt signal. Based on the characteristics of Fernald backward integration and combined with the piecewise slope method, a new inversion method was proposed to deal with the above situation and optimize the inversion strategy of the traditional algorithm. That is, by judging the position of the abrupt signal, the reference distance and boundary value were constantly updated for iterative inversion, and more accurate inversion data were spliced and overwritten into the initial inversion data. The validity of the inversion method was verified by using the measured data obtained from vertical and horizontal detection, and the optimized data was compared with the corresponding data when there was no abrupt signal nearby. The results show that,

收稿日期: 2021-12-28; 修订日期: 2022-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (42175145)

作者简介: 杨彬, 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。

通讯作者: 卜令兵, 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光雷达大气探测方面的研究。

compared with the traditional algorithm, the relative errors of extinction coefficients of vertical and horizontal detection data are optimized by the new inversion method, which is about 79% and 96%, respectively, verifying the feasibility of the new method.

Key words: lidar; aerosol; extinction coefficient; boundary value; abrupt signal

0 引言

大气气溶胶是指悬浮有液体或固体微粒时的气体和悬浮物的总体系,是地球—大气—海洋系统的重要组成部分,其通过影响地气辐射能量的收支以及作为云凝结核影响水汽的循环,已成为全球气候变化的重要影响因子^[1]。此外,气溶胶还对空气质量、人类健康有着至关重要的影响^[2]。因此,无论在气象观测还是环保监测领域,气溶胶的光学特性、时空分布等都是当下科研人员的研究重点^[3]。

随着主动遥感探测技术的发展,激光雷达在大气探测领域中越来越凸显出其重要的作用,已成为气象和环保部门用于探测气溶胶的重要手段,甚至在机载和星载环境下都有着广泛的应用^[4]。激光雷达使用激光作为信息的载体,利用激光的振幅、频率、偏振和相位来搭载信息,拥有测量精度高、时空分辨率高等优势,可进行多种模式、大探测跨度、全天候的连续观测^[5]。

米散射激光雷达方程的反演方法是获取大气气溶胶垂直或水平分布的关键。反演方法中发展成熟的算法主要有 Collis 斜率法、Klett 法和 Fernald 法^[6]。Collis 斜率法(以下称斜率法)主要应用于大气气溶胶分布均匀的大气状况,而实际应用中几乎不存在上述大气条件。即使采用分段的方法可求解出消光系数廓线,但是,若探测路径上出现污染物时容易得出负值的消光系数,显然违背了其物理意义。因此,反演时较少直接使用斜率法求解。但是,斜率法由于具有明确的物理意义,常用于后述两种方法中确定边界值。在实际大气状况下,通常采用 Klett 法或 Fernald 法去求解出消光系数或后向散射系数。其中, Fernald 法相较于 Klett 法,将分子散射和气溶胶散射分开来考虑,理论上反演过程相对更加严谨,因此,其在具体应用中使用得相对更加频繁。但是,无论是 Klett 法还是 Fernald 法进行反演时,均需要在选定的参考距离上获取边界值,边界值的获取会引入一定的反演误

差。在上述反演方法应用过程中,很多学者针对反演误差进行了多方面的研究。Sasano 的研究表明 Fernald 提出的后向积分相较前向积分更加稳定^[7]。曹开法认为 Fernald 提出的后向积分法标准偏差小于 13%^[8]。冯帅提出应对含有突变信号的迭代处理算法,通过查找并剔除突变点后再迭代反演的方式获取消光系数均值,得到更客观的全局能见度^[9]。刘厚通提出一种气溶胶消光系数迭代算法,可相对准确地求解出边界值^[10]。除了上述学者提出讨论的问题外,当在参考距离内存在后向散射系数较大的云雾、烟尘或硬目标时,由于激光在上述物质中存在多次散射以及激光雷达比不稳定等原因,使用 Fernald 法后向积分反演消光系数会在突变信号后向数据中产生较大的反演误差。上述问题在气溶胶激光雷达观测中较为常见,且多款激光雷达给出的数据产品中均存在此问题。但是,目前尚无研究针对此问题进行探讨及给出解决方案。文中提供一种新的反演方法,即依据 Fernald 法后向积分反演误差收敛可得到稳定解的特点,通过对激光雷达信号反演迭代拼接的方法(以下称迭代拼接法),可高效优化存在突变信号时反演消光系数的误差。通过对垂直及水平实测数据进行反演,分别与传统算法进行比对,验证了其可行性。

1 反演方法分析

1.1 传统算法

利用激光雷达探测到的回波信号反演消光系数的关键基础是激光雷达方程,对于所用气溶胶激光雷达,距离激光雷达 r 处的后向散射信号功率 $P(r)$ 可用激光雷达方程表示为^[11]:

$$P(r) = C \cdot P_0 \cdot O(r) \cdot \frac{A_T}{r^2} \cdot \beta(r) \cdot \exp\left[-2 \int_0^r \alpha(r) dr\right] \quad (1)$$

式中: C 为激光雷达系统常数; P_0 为激光出射功率; $O(r)$ 为几何重叠因子,该值表征出射激光束与望远镜接收视场的重合程度,当完全不重合时为 0,完全重合时为 1; A_T 为望远镜的有效接收面积; $\beta(r)$ 为大气后向

散射系数; $\alpha(r)$ 为大气消光系数。

Fernald 法将激光雷达方程里的大气后向散射系数和大气消光系数分别拆分为分子和气溶胶的贡献进行考虑, 一般将分子的消光后向散射比取值为 $\frac{8\pi}{3}$, 气溶胶的消光后向散射比取值为 50^[12]。气溶胶的消

光后向散射比设为定值后, 意味着假设气溶胶的分布仅由数密度改变, 其粒子尺度谱分布均匀、化学组成不变^[13]。

依据 Fernald 法可求解出气溶胶消光系数的后向积分公式为^[13]:

$$\alpha_a(r) = -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r) dr\right]}{\frac{P(r)r^2}{\alpha_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r_c)} + 2 \int_r^{r_c} P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_r^{r_c} \alpha_m(r') dr'\right] dr} \quad (2)$$

前向积分公式为:

$$\alpha_a(r) = -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[-2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_{r_c}^r \alpha_m(r) dr\right]}{\frac{P(r)r^2}{\alpha_a(r_c) + \frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r_c)} - 2 \int_{r_c}^r P(r)r^2 \exp\left[-2\left(\frac{S_a}{S_m} - 1\right) \int_{r_c}^r \alpha_m(r') dr'\right] dr} \quad (3)$$

式中: 下标 a 表示气溶胶; m 表示大气分子; S_a 和 S_m 分别为大气气溶胶和大气分子的消光后向散射比; r_c 为参考距离; $\alpha_a(r_c)$ 和 $\alpha_m(r_c)$ 分别为参考距离的大气气溶胶和大气分子的消光系数边界值。从公式中可以看出, 由于已假设了分子和气溶胶的消光后向散射比, 且由大气模式可得出分子的消光系数边界值, 只要在探测路径上获取参考距离 r_c 处的气溶胶消光系数边界值, 即可得出探测路径上任意距离的消光系数。

参考距离的初步定位一般可通过设定在一定距离范围内 $P(r)r^2/\beta_m(r)$ 的最小值所在的位置确定^[10], 即由距离修正信号与大气分子后向散射系数之比的最小值进行确定。该位置的选取是为了尽可能利用 Fernald 法后向积分公式进行反演, 原因是后向积分相对于前向积分的误差更加收敛, 容易得到稳定解。而边界值的获取, 在垂直观测时通常会将参考距离选取在几乎不含气溶胶的大气清洁层, 再由散射比的经验公式得出^[14]。但是, 针对环保监测领域最常用的气溶胶激光雷达为了追求实用性, 通常设计的探测距离约 5 km 左右, 垂直探测时达不到平流层的高度, 且如果进行水平探测则更加无法保证大气清洁。因此, 当水平探测时通常采用分段斜率法和 Fernald 法相结合的方法去反演大气气溶胶的消光系数^[15]。边界值在参考距

离附近采用分段斜率法确定, 即确定其中大气最均匀的一段使用斜率法估算出参考距离处的消光系数边界值, 再代入 Fernald 法反演公式中求解。由于现阶段气溶胶激光雷达的时间和空间分辨率基本达到了秒级和米级, 因此, 上述传统算法不局限于水平探测, 在垂直探测时也可认为高度方向在小尺度范围内大气均匀, 采用分段斜率法去获取边界值也能保证较高的准确性。

当在参考距离内存在后向散射系数较大的云雾、烟尘或硬目标时, 使用 Fernald 法后向积分反演消光系数会在突变信号后向数据中产生较大的反演误差。其主要原因是激光在上述物质中存在多次散射以及激光雷达比不稳定等因素, 使得 Fernald 法后向积分反演时在突变信号位置引入了较大的误差, 从而导致该位置后向积分数据中产生了一定的反演误差。笔者在垂直和水平探测时, 将信号反演得到的消光系数绘制成时序伪彩图时可容易观察到该现象, 在图 1 和图 2 中, 可看出红色方框中的数据与邻近无突变信号时数据对比明显呈现出阶跃性的偏差, 即为探测路径上存在消光系数高值时导致后向数据的反演误差。

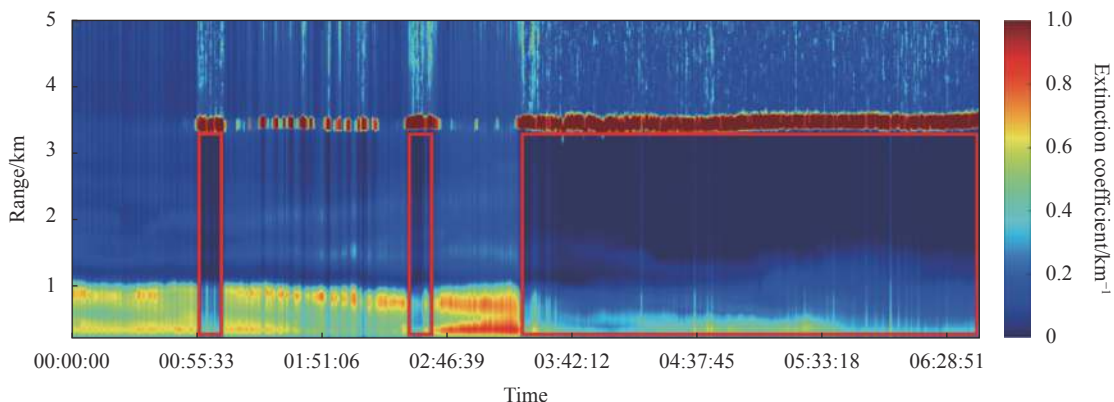


图 1 垂直探测下传统算法反演的消光系数时空变化图

Fig.1 Spatio-temporal variation diagram of extinction coefficient retrieved by traditional algorithm in vertical detection

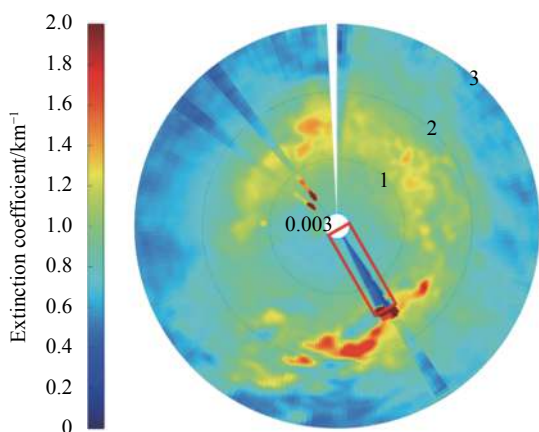


图 2 水平探测下传统算法反演的消光系数时空变化图

Fig.2 Spatio-temporal variation diagram of extinction coefficient retrieved by traditional algorithm in horizontal detection

的前提下优化了反演策略,将探测的数据通过迭代计算拼接出相对更准确的反演结果。具体来说,迭代拼接法是基于分段斜率法结合 Fernald 法反演出消光系数廓线后进行阈值判断,如出现突变信号则定位参考距离后向的第一个突变点位置,从而重新将参考距离判断依据 $P(r)r^2/\beta_m(r)$ 的范围设定在该突变点后向,进而迭代一次 Fernald 法后向积分求解出新的消光系数数据。该次后向积分反演出的消光系数数据拼接覆盖至上一次反演的数据基础上,然后再根据突变信号判断重复上述流程直至没有突变点结束。由于每次迭代时所取边界值是通过分段斜率法获取,该方法获取的边界值具有明确的物理意义,每次迭代反演时获取相对更准确的边界值,因此基于该边界值后向积分直至下一个突变点之前反演出的数据相对误差较小。迭代拼接法的反演流程如图 3 所示。

1.2 迭代拼接法

文中所提出的迭代拼接法是基于传统算法理论

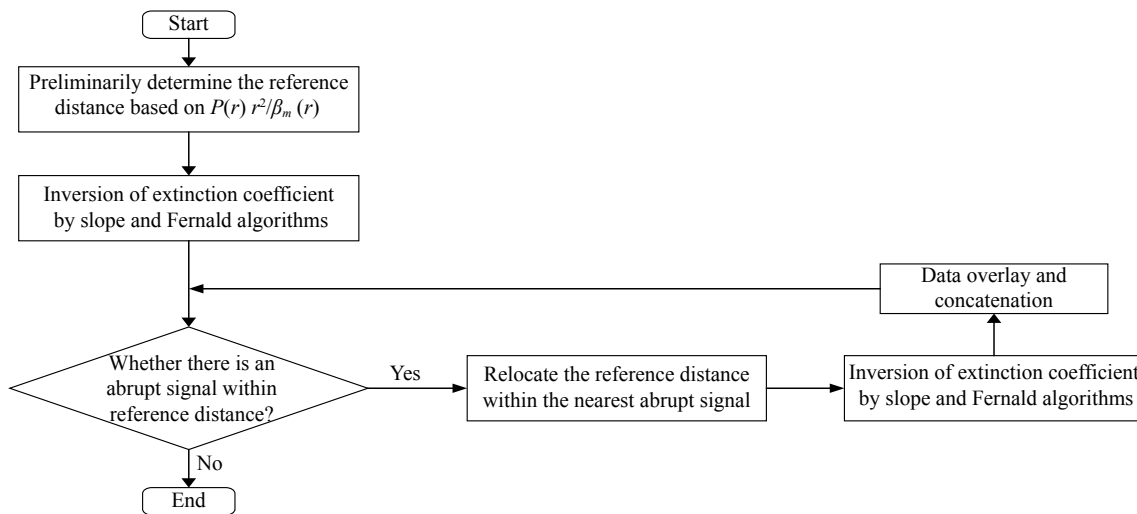


图 3 迭代拼接法流程图

Fig.3 Flow chart of iterative splicing method

以下使用探测典型原始信号示意图说明迭代拼接法的反演过程。图 4 所示为激光雷达探测典型原始信号示意图,横轴为距离,纵轴为信号强度,图中可直观看出探测路径上存在两处强烈的突变信号。算法开始使用分段斜率法结合 Fernald 法进行消光系数反演,确定参考距离为 D 点处,因此后向积分时得到 A 点~ D 点的消光数据,可将数据分段表示为 $AB+BC+CD$ 。第一次迭代反演时更新参考距离为最近的突变信号之前,即 C 点位置。从 C 点后向积分进行反演得到的数据,即 A 点~ C 点的消光数据标记为 $A'B'+$

$B'C'$,进行覆盖拼接至上一次反演的数据中,此时存储的消光数据则为 $A'B'+B'C'+CD$ 。由于 C 点位置前仍有突变信号,因此进行第二次迭代反演更新参考距离为距离 C 点最近的突变信号之前,即 B 点位置。从 B 点后向积分反演得到的数据,即 A 点~ B 点的消光数据标记为 $A''B''$,进行覆盖拼接至上一次反演的数据中,最终存储的消光数据则为 $A''B''+B'C'+CD$ 。因此,如在上述有两处突变信号情况下,相应距离 r 处的消光系数可由下式得出:

$$\alpha_a(r) = \begin{cases} -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_r^{r_B}\alpha_m(r)dr\right]}{\alpha_a(r_B) + \frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r_B) + 2\int_r^{r_B}P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_r^{r_B}\alpha_m(r')dr'\right]dr}, & A < r \leq B \\ -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_r^{r_C}\alpha_m(r)dr\right]}{\alpha_a(r_C) + \frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r_C) + 2\int_r^{r_C}P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_r^{r_C}\alpha_m(r')dr'\right]dr}, & B < r \leq C \\ -\frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r) + \frac{P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_r^{r_D}\alpha_m(r)dr\right]}{\alpha_a(r_D) + \frac{S_a}{S_m}\alpha_m(r_D) + 2\int_r^{r_D}P(r)r^2 \exp\left[2\left(\frac{S_a}{S_m}-1\right)\int_r^{r_D}\alpha_m(r')dr'\right]dr}, & C < r \leq D \end{cases} \quad (4)$$

式中: r_B 、 r_C 和 r_D 指分别以 B 点、 C 点和 D 点作为参考距离。

上述过程中,边界值的获取是通过分段斜率法确定的。即通过固定窗口大小在确定距离范围内滑动拟合得到一组相关系数后,通过获取相关系数最大值时的消光系数做为边界值,对应参考距离点即设为该最大值所处的窗口中点位置。文中研究中所用激光雷达的空间分辨率为 3 m ,选取的窗口为 11 个点,即对应 33 m 。由于滑动窗口范围较小,因此即使在垂直

探测较低层的大气时,也可认为窗口范围内大气相对均匀,采用分段斜率法去获取边界值也能保证较高的准确性。

如上所述,即为迭代拼接法的简要反演算法过程,通过突变信号阈值的优化判断以及考虑激光雷达自身穿透能力的限制,通常在存在突变信号的情况下迭代一次或两次即可结束反演流程,实现高效优化存在突变信号时反演消光系数的误差。

2 仪器参数

图 5 所示为环保监测领域最为常用的气溶胶激光雷达光学原理示意图。激光器出射 532 nm 线偏振激光后经由扩束镜组将激光远场发散角压缩至设计范围,从而提高远场探测能力。激光经由反射镜控制指向发射至大气中,与大气气溶胶和分子相互作用后产生的回波信号由望远镜进行接收,在望远镜焦平面处放置小孔光阑以压缩接收视场的同时控制背景噪声强度。经小孔光阑后的信号由透镜准直,并通过窄

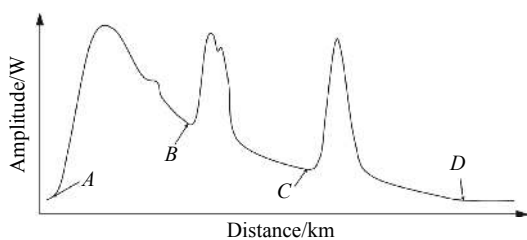


图 4 激光雷达探测典型原始信号示意图

Fig.4 Schematic diagram of typical original signal detected by lidar

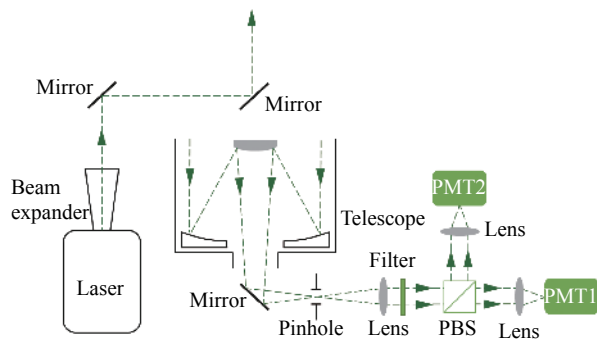


图 5 气溶胶激光雷达光学原理示意图

Fig.5 Schematic diagram of optical principle of aerosol lidar

带滤光片实现背景噪声的进一步抑制,从而有效提升信噪比。之后再通过偏振分束器 PBS 将回波信号的水平偏振和垂直偏振分离,由于当线偏光与探测路径

中的沙尘或冰晶等非球形粒子相互作用时,回波信号会产生退偏现象,因此通过探测退偏比可进一步判断气溶胶的种类。偏振分离后的信号分别再通过透镜聚焦后由光电倍增管 PMT 接收,将光信号转换为电信号。最后,电信号由采集卡采集并存储原始信号,从而进行相应的数据产品反演。

文中研究探测所用的便携式气溶胶激光雷达可用于实时监测局部高密度污染源,配合云台控制可实现垂直观测、水平扫描以及走航观测等多模式场景应用。其特点是基于超高的时空分辨率对局部污染源以及高密度气团进行快速响应,分析气溶胶的组成结构和时空演变。该激光雷达的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab.1 The main technical parameters

Technical parameters	Specification
Laser wavelength/nm	532
Pulse energy/ μ J	>500
Repetition frequency/kHz	5
Telescope aperture/mm	150
Time resolution/s	1 or several times
Spatial resolution/m	3 or several times
Host weight/kg	<25

3 实测数据分析讨论

为了验证算法的有效性,笔者所在课题组利用上述气溶胶激光雷达分别进行垂直定点和水平扫描探测,将得到的实测数据使用传统算法和迭代拼接法分别进行反演对比。由于研究使用的激光雷达时间分辨率高达 1 s,短时间内相邻数据的大气消光系数变化不会太大,且对比发现相邻数据原始信号的距离平方修正数据重合度较高。因此,采用与邻近无突变信号数据进行反演误差对比,从而进行算法优化程度的相对比较。

3.1 垂直定点探测数据对比

垂直定点探测数据于 2021 年 11 月 29 日测得,图 6 是使用迭代拼接法反演得到当日凌晨的消光系

数时空变化图。对比前文中图 1 的红色方框内数据,可明显看出:当天空中出现较厚的云层时,图 1 中得到的云下数据与邻近数据对比明显出现阶跃性的偏差,而图 6 的结果则呈现出消光系数更真实的过渡变化。同时,在数据上进行了相应的平滑处理,从而使得呈现的整体数据效果更好。由于本研究中所用激光雷达的时间分辨率为 1 s,因此可假设短时间内的消光系数几乎没有变化,从而通过提取垂直探测范围内相邻多条有突变信号和无突变信号情况下的消光系数廓线做相对误差计算,以此来评估算法优化程度。如图 7 所示为两种反演方法的相对误差对比,在传统算法反演下,消光系数的相对误差平均值达到 0.081 km^{-1} ,迭代拼接法反演后该值则减小到 0.017 km^{-1} ,对应数据的消光系数相对误差优化了约 79%。

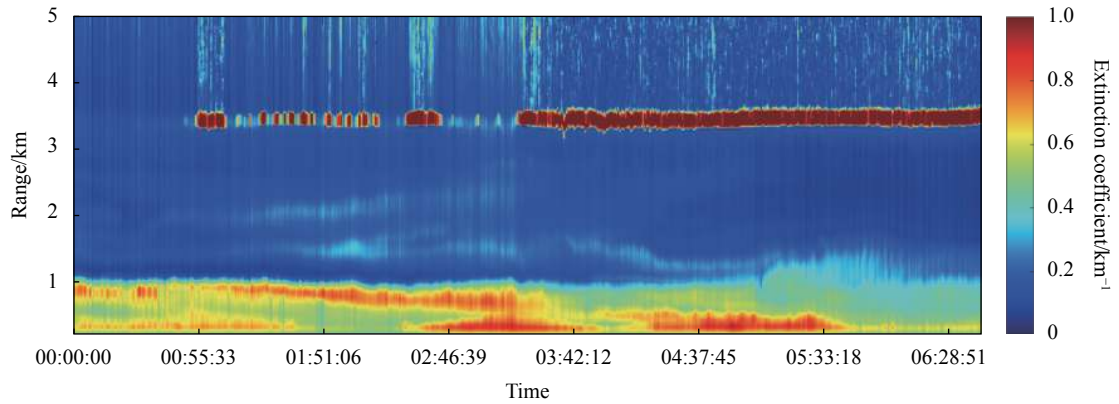


图 6 垂直探测下迭代拼接法反演的消光系数时空变化图

Fig.6 Spatio-temporal variation diagram of extinction coefficient retrieved by iterative splicing method in vertical detection

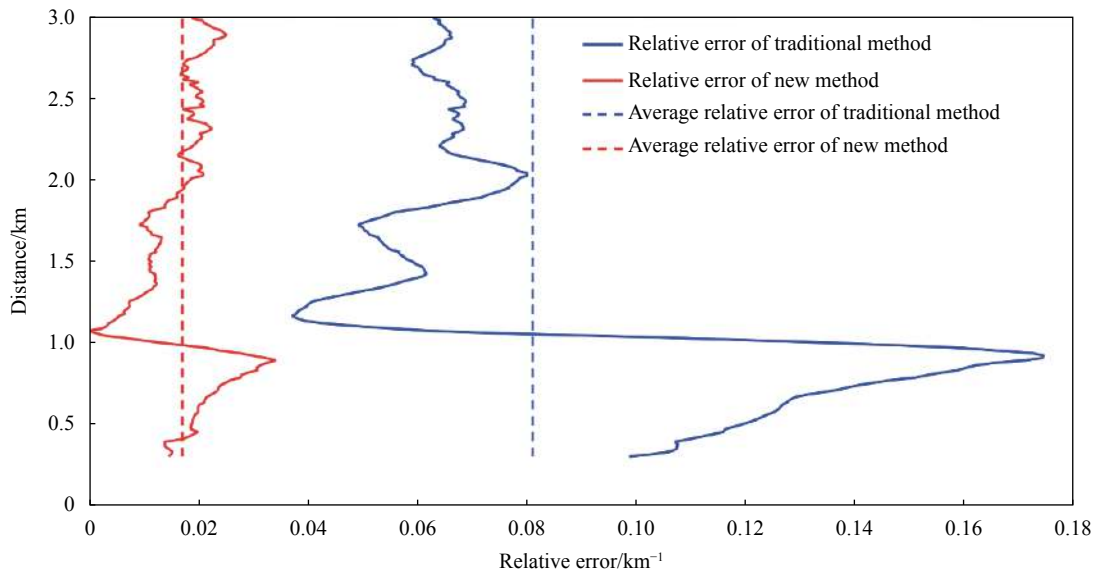


图 7 垂直探测下两种反演方法的相对误差对比

Fig.7 Comparison of relative errors between two inversion methods in vertical detection

3.2 水平扫描探测数据对比

水平扫描探测数据于 2021 年 12 月 11 日测得, 图 8 是使用迭代拼接法反演得到扫描一周的消光系数时空变化图。对比前文中图 2 的红色方框内数据, 可明显看出: 当探测路径上出现消光系数高值时, 图 2 得到的突变信号内数据与邻近数据对比明显出现阶跃性的偏差, 而图 8 反演出的结果则呈现出消光系数更真实的过渡变化。同样的, 通过提取水平扫描范围内相邻多条有突变信号和无突变信号情况下的消光系数廓线做相对误差计算, 以此来评估算法优化程度。如图 9 所示为两种反演方法的相对误差对比, 在传统算法反演下, 消光系数的相对误差平均值达到 0.382 km^{-1} , 迭代拼接法反演后该值则减小到

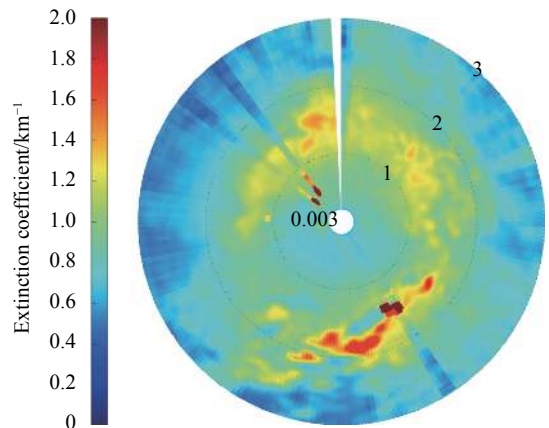


图 8 水平探测下迭代拼接法反演的消光系数时空变化图

Fig.8 Spatio-temporal variation diagram of extinction coefficient retrieved by iterative splicing method in horizontal detection

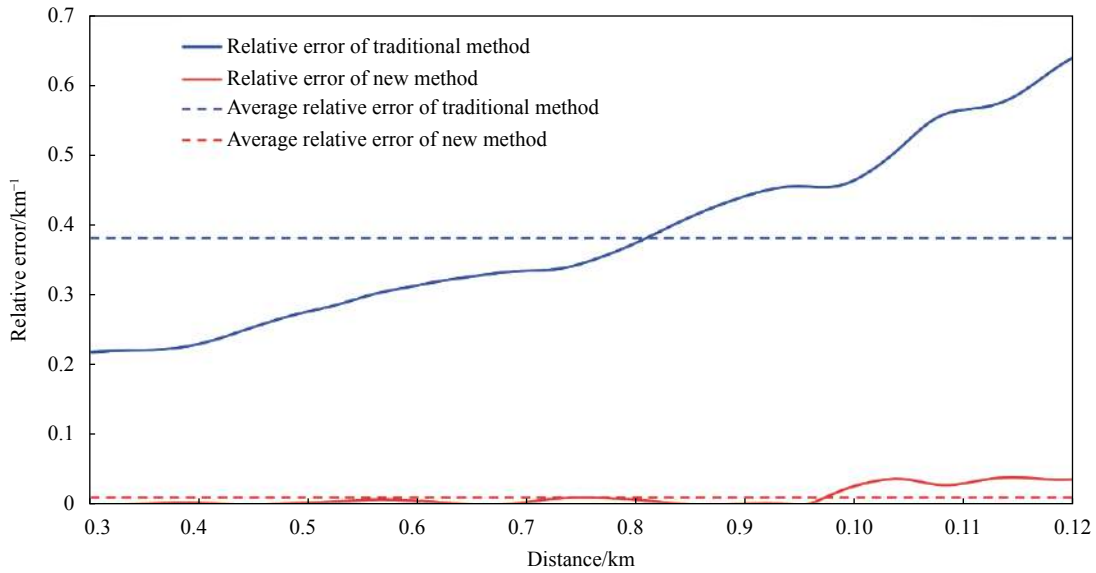


图 9 水平探测下两种反演方法的相对误差对比

Fig.9 Comparison of relative errors between two inversion methods in horizontal detection

0.014 km⁻¹, 对应数据的消光系数相对误差优化了约 96%。

4 结 论

经过近些年的快速发展,大气探测类激光雷达早已不局限应用在气象观测领域,在环保监测领域已实现广泛且相对更成熟的应用。而在具体应用中,容易出现观测到突变信号时导致后向数据明显误差变大的情况,到目前为止未见有相关研究讨论。文中提出了一种基于 Fernald 法后向积分特点发展的迭代拼接法,并利用便携式气溶胶激光雷达进行了相关观测验证。通过与传统算法的对比,初步验证了迭代拼接法可在一定程度上优化相应的反演误差,在实测数据中能够较为明显地优化了突变信号内的数据。同时,该方法处理数据高效、稳定,可应用于气溶胶激光雷达信号的数据反演分析,对数据产品的可靠性以及研究气溶胶的光学特性等方面具有重要的意义。

参考文献:

[1] Cui Tingwei, Huang Tingxuan, Mu Bing, et al. Spatiotemporal pattern of aerosol types over the Bohai and Yellow Seas observed by CALIOP [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(6): 20211030. (in Chinese)

[2] Lv Lihui, Liu Wenqing, Zhang Tianshu, 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. (in Chinese)

[3] Di Huige, Hua Dengxin. Research status and progress of Lidar for atmosphere in China (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20210032. (in Chinese)

[4] Li Lu, Xie Chenbo, Zhuang Peng, et al. Opto-mechanical system structure and research progress of space-borne lidar for cloud-aerosol [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190501. (in Chinese)

[5] Teng Man, Zhuang Peng, Zhang Zhanye, et al. New all-weather outdoor Raman-Mie scattering lidar system used in atmospheric aerosol pollution monitoring [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706001. (in Chinese)

[6] Tian Pengfei, Zhang Lei, Cao Xianjie, et al. A novel approach based on Fernald's and Klett's method to determine the atmospheric extinction coefficient boundary value [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(1): 57-65. (in Chinese)

[7] Sasano Y. Tropospheric aerosol extinction coefficient profiles derived from scanning lidar measurements over Tsukuba, Japan from 1990 to 1993 [J]. *Applied Optics*, 1996, 35: 4941-4952.

[8] Cao Kaifa, Wang Shaolin, Wang Zhenzhu, et al. Study for measurement of lidar constant [J]. *Laser & Infrared*, 2008, 38(5): 429-432. (in Chinese)

[9] Feng Shuai, Jiang Lihui, Xiong Xinglong, et al. Lidar visibility inversion with breakpoint signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 0330001. (in Chinese)

- [10] Liu Houtong, Mao Minjuan. An accurate inversion method of aerosol extinction coefficient about ground-based lidar without needing calibration [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(7): 167-174. (in Chinese)
- [11] Yu Siqu, Liu Dong, Xu Jiwei, et al. Optimization method for planetary boundary layer height retrieval by lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0728002. (in Chinese)
- [12] Chen Xiaonan, Bi Jingping, Wang Kaixin, et al. Method for determining boundary value of extinction coefficient [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(24): 240102. (in Chinese)
- [13] Zhou Jun, Yue Guming, Qi Fudi, et al. Optical properties of aerosol derived from lidar measurements [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1998, 15(2): 140-148. (in Chinese)
- [14] Chen Tao, Zhao Yujie, Liu dong, et al. Inversion of micro-pulse lidar signals with a new calibration method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 0514001. (in Chinese)
- [15] Zhang Wenjuan, Lv Bo, Sun Fengjuan, et al. Research on inversion method of PM2.5 mass concentration by aerosol extinction coefficient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200367. (in Chinese)