

文章编号:1001-5078(2023)06-0822-08

· 激光应用技术 ·

基于改进微分增强法的激光雷达云参数反演算法

王博业¹, 臧磊¹, 李想¹, 孟园园¹, 周妹¹, 陈思成¹, 常建华^{1,2}

(1. 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044;

2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要:微分法是激光雷达云参数反演的一类传统方法,本文在微分增强法的基础上,优化一阶与二阶微分信号的拟合点数,平衡失真与噪声对检测结果的影响。以距离修正的回波信号代替云峰与云边界函数中的原始回波信号,增强云区域与非云区域的对比。对于因低层云存在而造成二次阈值过大的问题,通过扩大一次阈值的排除区间,有效减少对云层的漏判情况。采用激光雷达数据进行的实验结果表明,与改进前的算法相比,云底高度的相关系数由0.8930提高至0.9328,均方根误差由0.4924 km降低至0.2991 km,云顶高度的相关系数由0.8174提高至0.8598,均方根误差由0.7637 km降低至0.5912 km,改进后的算法具备更佳的反演结果。

关键词:激光雷达;大气光学;云层检测;微分增强法

中图分类号:P413;TN958.98 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.06.003

LiDAR cloud parameter inversion algorithm based on improved differential enhancement method

WANG Bo-ye¹, ZANG Lei¹, LI Xiang¹, MENG Yuan-yuan¹, ZHOU Mei¹, CHEN Si-cheng¹, CHANG Jian-hua^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The differential method is a traditional method for LiDAR cloud parameter inversion. In this paper, based on the differential enhancement method, the numbers of fitting points of the first-order and second-order differential signals are optimized to balance the effects of distortion and noise on the detection results. The distance-corrected echo signal is used to replace the original echo signal in the cloud peak and cloud boundary functions to enhance the contrast between the cloud and non-cloud regions. For the problem of excessive secondary thresholds due to the presence of low-level clouds, the exclusion interval for primary thresholds is expanded to effectively reduce the missed detection of clouds. The experiment results using LiDAR data show that the correlation coefficient of cloud bottom height is improved from 0.8930 to 0.9328, and the root mean square error is reduced from 0.4924 km to 0.2991 km. The correlation coefficient of cloud top height is improved from 0.8174 to 0.8598, and the root mean square error is reduced from 0.7637 km to 0.5912 km, which proves that the improved algorithm has better inversion results.

Keywords: LiDAR; atmospheric optics; cloud detection; differential enhancement method

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61875089; No. 62175114);江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(No. 202110300055)资助。

通讯作者:常建华(1978-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光雷达,全固态脉冲激光器等方面的研究。E-mail: jianhuachang@nuist.edu.cn

收稿日期:2022-06-27; **修订日期:**2022-08-19

1 引言

云是一种漂浮在空气中的可见聚合物^[1],对地球辐射和人类生产生活有着极大的影响^[2]。因此,研究云的时空分布具有重要的意义。云的探测手段分为人工观测和仪器观测^[3],目前基于各类主被动仪器的观测成为主流的云层探测方式,如红外辐射计^[4-5]、毫米波云雷达^[6]、激光雷达^[7]等。其中,激光雷达因其全天候、高精度探测的优势得到了广泛应用^[8]。

云层的宏观参数有云底高度和云顶高度,利用激光雷达反演云层参数的算法可分为消光系数反演法^[9-10]、滑动窗口法^[11-12]、光子计数概率法^[13]、微分法^[14-15]等。消光系数反演法通过计算气溶胶消光系数^[16]进一步得到云层分布;滑动窗口法通过检测窗口内回波信号特征判断云层的存在;光子计数概率法通过提取单脉冲计数率高于检测阈值,并且多次测量统计概率高于设定概率的空间点探测云层;微分法根据回波信号的一阶或二阶微分提取云层信息。

综上所述不难看出,如何将云层部分回波信号从原信号中提取是激光雷达云参数反演算法的关键,由于激光入射云层时产生的回波信号易受气溶胶、环境噪声的影响,很难直接获得云层信息,基于此,本文提出了改进的微分增强法,优化了一阶与二阶微分回波信号的拟合点数,平衡过拟合造成的失真和欠拟合无法有效抑制噪声的问题。利用距离修正信号对云峰函数和云边界函数进行优化,增强云区域与非云区域的对比,同时扩大一次阈值筛选的云层区域,有效减少了原算法对云层的漏判情况。最后对比改进前后的算法得出,改进后的算法可提高云底与云顶高度反演的准确性。

2 方法与原理

2.1 激光雷达探测云层原理

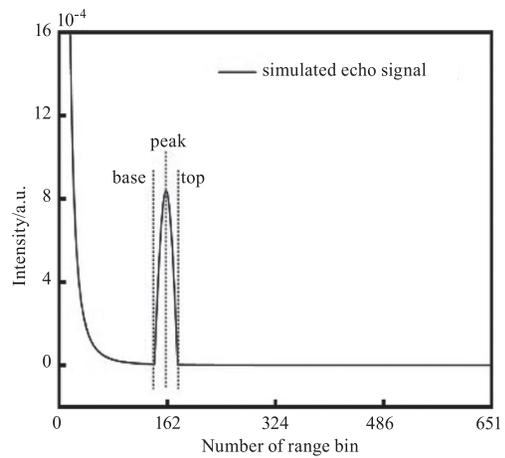
当激光雷达进行大气探测时,激光雷达方程^[17]可以写作:

$$P(r) = \frac{O(r)CE\beta(r)r^{-2} \exp[-2 \int_0^r \sigma(r') dr'] + P_b + P_{ap}(r)}{D(P(r))} \quad (1)$$

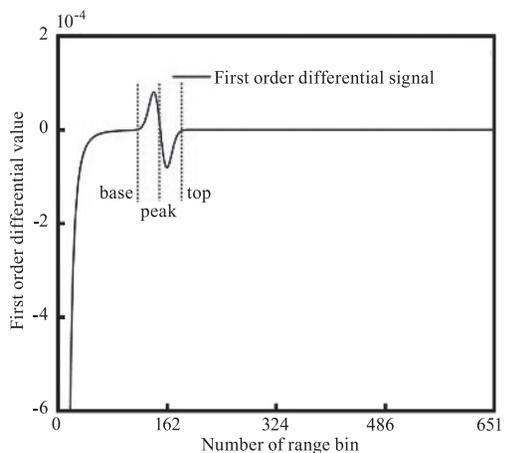
式中, $P(r)$ 表示高度 r 处激光雷达的回波信号强度; $O(r)$ 是几何重叠校正因子; C 为激光雷达的系统常数; E 为激光雷达的发射能量; $\beta(r)$ 为所有类型的大

气散射而形成的后向散射系数; $\sigma(r)$ 为大气消光系数, P_b 为环境光噪声; $P_{ap}(r)$ 表示激光束在激光雷达系统内部传输时引起的后脉冲噪声; $D(P(r))$ 是处理光子短暂饱和现象的延迟校正因子。

由于云的后向散射系数和消光系数均大于气溶胶,若高度 $r_1 - r_2$ 处存在云层,则该范围的 $P(r)$ 会显著大于附近非云区域,具体表现为:由云底 C_{base} 至云峰 C_{peak} , $P(r)$ 快速上升至最大值;由云峰 C_{peak} 至云顶 C_{top} , $P(r)$ 快速下降至背景噪声水平。图 1(a)、(b)和(c)为出现一层云时,模拟的激光雷达回波信号及其一阶和二阶微分信号。图 1(a)中的突起是回波信号产生了激增现象,此处可以看作一个典型的云回波信号,其在一阶微分信号图 1(b)上对应于一组相邻的波峰和波谷,与微分值等于 0 的三个交点(零点)从下往上可分别对应云底、云峰和云顶。而在二阶微分信号图 1(c)上,则可以看出云峰对应于一个负极值,而云底和云顶附近则是两个正极值,较准确的云底和云顶高度分别在两个正极值临近的两个零点处。



(a) 模拟的单层云回波信号



(b) 模拟信号的一阶微分

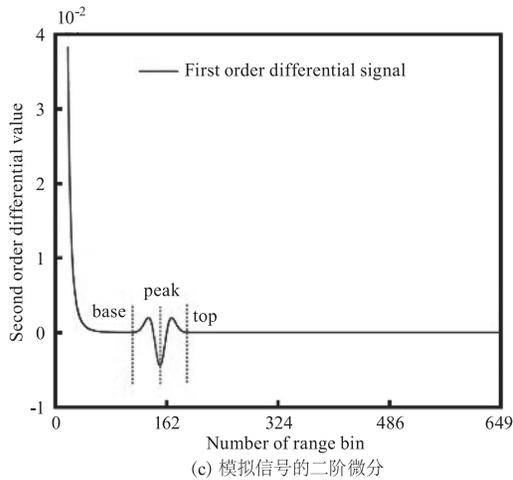


图 1 模拟的激光雷达回波信号
Fig. 1 Simulated LiDAR echo signal

2.2 激光雷达数据来源说明

本文的激光雷达实测数据来自美国俄克拉荷马州 (Oklahoma), 拉蒙特 (Lamont), 南部大平原 (Southern Great Plains, SGP) 站点提供的相关增值产品, 其中的云参数由多传感联合反演法^[18] 得到, 具有较高的准确性。该产品由美国大气辐射量计划 (Atmospheric Radiation Measurement, ARM) 的数据中心免费提供, 所使用的 ARM 主动测云设备对云的时空分布、降水量、太阳辐射、温度、风速、湿度、温度等气象因素进行测量。这些数据会被国家海洋和大气管理局 (NOAA)、全球能源和水循环实验 (GEWEX) 采用, 从而帮助建立各种气象模型, 对全球气候进行研究分析。

2.3 改进的微分增强法

为了提高微分增强法 (DE) 反演云参数的准确性, 本文提出了改进的微分增强法 (IDE), 主要包含以下三个方面:

- (1) 确定合适的滑动窗口点数进行一阶和二阶微分信号的拟合;
- (2) 优化云峰函数和云边界函数表达式;
- (3) 扩大一次阈值的排除区间。

算法流程图如图 2 所示, 以 2020 年 6 月 20 日 SGP 站点, 12:44:34 的激光雷达数据为例, 具体步骤如下:

(1) 回波信号的预处理。图 3(a) 为该时刻激光雷达的原始回波信号, 由图可以看出该时刻在 A、B 和 C 三个区域有云层信息, 但图 3(a) 中 B、C 区域的原始回波信号由于 r^2 的衰减效应, 云回波信号增幅下降, 容易造成漏判。因此, 常采用距离修正对原

始回波信号进行预处理, 如图 3(b) 所示的距离修正的回波信号, A、B 和 C 三个区域的信号幅度, 与附近非云区域的信号更加具有可比性。

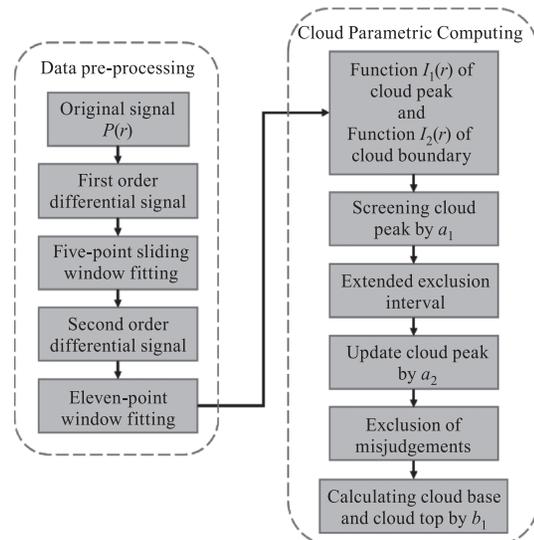
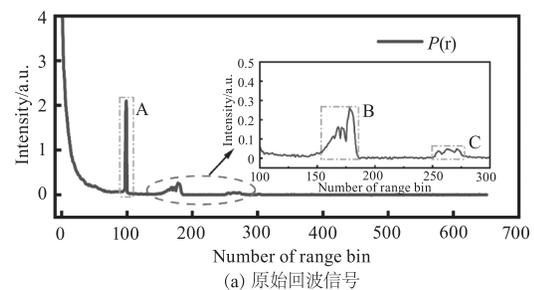
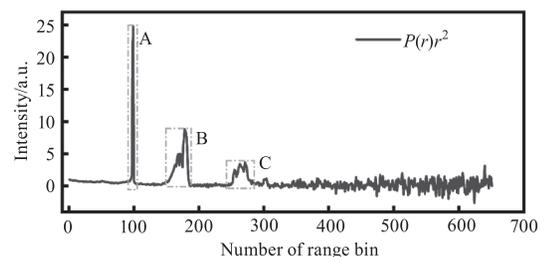


图 2 算法流程图

Fig. 2 Algorithm flow chart



(a) 原始回波信号



(b) 距离修正的回波信号

图 3 实测的激光雷达回波信号

Fig. 3 Measured LiDAR echo signal

(2) 微分信号的拟合。需要指出的是, 距离修正会放大高处的信号, 这种放大效应会随着距离增加更加明显。此外, 因距离修正会放大噪声, 远端回波信号的微分也在正值和负值之间来回振荡, 幅值会出现和云层信号一样的起伏变化, 如图 4(a) 的一阶微分信号和图 4(b) 的二阶微分信号所示, 随着微分阶数的增加, 微分信号的起伏更加明显。

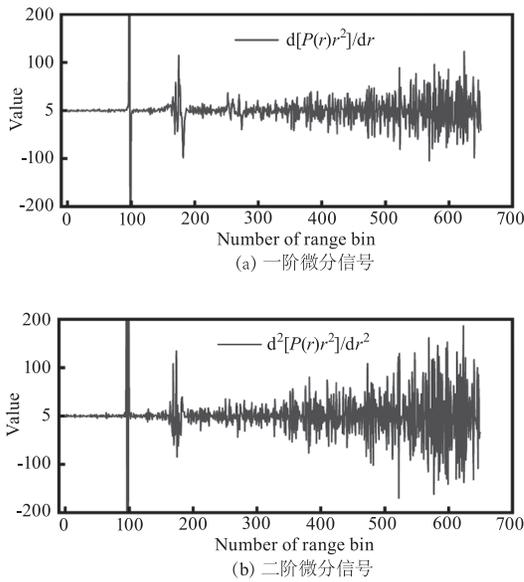


图4 实测的激光雷达微分信号

Fig. 4 Measured differential LiDAR signal

由于直接求微分信号会使噪声极大地影响检测结果,Pal^[14]等人提出在求微分信号时,对数据进行5~11个点的拟合,即利用n点的滑动窗口,将窗口内的回归直线斜率作为该点的斜率值。拟合点数过少,无法有效削弱噪声的影响,而拟合点数过多会使信号失真。DE提出对数据进行11点的拟合,但测试发现直接对一阶微分信号使用11点的滑动窗口拟合会使信号失真,微弱变化的云层无法被筛选出来,出现的漏判情况较多。因此IDE首先对一阶微分信号进行5点滑动窗口拟合,避免信号拟合过度失真,二阶微分信号在拟合后的一阶微分信号基础上继续进行11点的滑动窗口拟合,从而尽可能突出云层区间,同时也有效规避了两次微分造成的噪声过度放大问题。如图5(a)和(b)所示,拟合的一阶微分和二阶微分信号,既保留了三层云的信息,又较好的克服了噪声过度放大的问题。

(3) 云峰和云边界函数的构造。对于云层的二阶微分信号,云底和云顶的边界处在正极值附近,云峰处在负极值,针对该特点,DE将二阶微分信号的正负值分离,对云峰和云边界的特征进行区分,同时原始信号和一阶微分信号的强度也可以反映云峰和云边界的特征强度,因此DE将二阶微分信号的正值区与一阶微分信号相乘,负值区与原信号相乘,达到云的特征增强作用。DE中云峰函数的表达式 $X_1(r)$ 如式(2)所示,云边界函数的表达式 $X_2(r)$ 如式(3)所示:

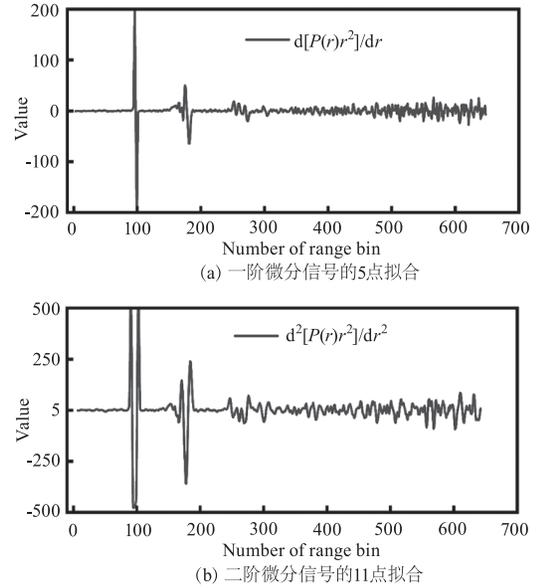


图5 激光雷达微分信号的拟合

Fig. 5 Fitting of LiDAR differential signals

$$X_1(r) = \begin{cases} -P(r)r^2 \frac{d^2[P(r)]}{dr^2}, \frac{d^2[P(r)]}{dr^2} \leq 0 \\ 0, \frac{d^2[P(r)]}{dr^2} > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$X_2(r) = \begin{cases} 0, \frac{d^2[P(r)]}{dr^2} \leq 0 \\ \frac{d[P(r)]}{dr} \frac{d^2[P(r)]}{dr^2}, \frac{d^2[P(r)]}{dr^2} > 0 \end{cases} \quad (3)$$

DE中不对距离修正后的回波信号进行微分是为了避免高层过度放大的噪声被带入到微分信号中,但由于信号的预处理中已经对噪声进行了有效的抑制,因此IDE中将距离修正的回波信号代替原始回波信号,使得边界特征增强,IDE中的云峰函数 $I_1(r)$ 如式(4)所示,云边界函数 $I_2(r)$ 如式(5)所示:

$$I_1(r) = \begin{cases} -P(r)r^2 \frac{d^2[r^2P(r)]}{dr^2}, \frac{d^2[P(r)r^2]}{dr^2} \leq 0 \\ 0, \frac{d^2[P(r)r^2]}{dr^2} > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$I_2(r) = \begin{cases} 0, \frac{d^2[P(r)r^2]}{dr^2} \leq 0 \\ \frac{d[P(r)r^2]}{dr} \frac{d^2[P(r)r^2]}{dr^2}, \frac{d^2[P(r)r^2]}{dr^2} > 0 \end{cases} \quad (5)$$

(4) 云层的筛选。DE确定云层数量时,结合 X_1

(r) 的均值和标准差, 首先通过较大的一次阈值 a_1 初步寻找 $X_1(r) > a_1$ 的区间, 记为 $D_1(r)$, 排除以上区间后再使用二次阈值 a_2 确定 $X_1(r) > a_2$ 的区间, 区间数即为云层数。此方法在单层云的情况下可以有效筛选出云层部分的信号, 但当出现三层及三层以上的多层云时, 由于低层云的存在, 其在云峰函数中表现为一个很高的峰。对于 DE 使用的一次阈值, 排除的范围局限在较小的一部分, 即使二次阈值反复调整, 也难以将中高层云的小峰筛选出来, 存在较高的漏判率。

对于这类缺陷, IDE 先使用一次阈值 b_1 筛选出部分云层区间, 然后结合经验阈值 3 和 -1, 在每个初选云层的云峰高度上下, 将云边界函数上满足 $I_1(r) > 3$ ($I_2(r) < -1$) 的区间下(上)界作为排除的区间, 记为 $D_1(r)$ 。最后使用二次阈值 b_2 确定云层层数。 b_1 和 b_2 的表达式分别如式(6)和(7)所示:

$$b_1 = \overline{I_1(r)} + n_1 \sigma_1 \quad (6)$$

$$b_2 = \overline{I_1(r)'} + n_2 \sigma_1 \quad (7)$$

式中, $\overline{I_1(r)}$ 表示 $I_1(r)$ 的均值; n_1 为经验阈值, 本文中取 2。式(7)中 $\overline{I_1(r)'}$ 表示排除一次阈值筛选 $D_1(r)$ 后, $I_1(r)$ 的均值, n_2 为经验阈值, 本文中取 4。利用 b_1 得到的 $D_1(r)$ 如图 6(a) 所示, 利用 b_2 筛选的云层如图 6(b) 所示。

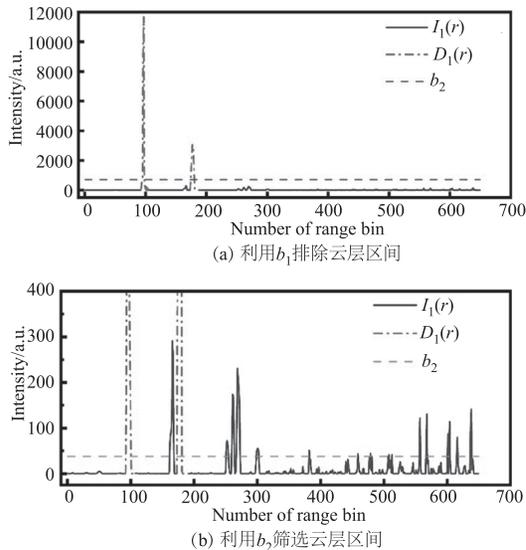


图 6 利用云峰函数确定云层层数

Fig. 6 Determining the number of cloud layers using the cloud peak function

(5) 云参数的反演。根据云峰函数得到云层层数和云峰高度 r_{peak} 后, 利用阈值 c_1 和云边界函数

$I_2(r)$ 得到每层云的云底高度 r_{base} 和云顶高度 r_{top} , c_1 的表达式如式(8)所示:

$$c_1 = n_3 \sigma_3 \quad (8)$$

本文中 n_3 取 2, σ_3 为去除 $D_1(r)$ 在云边界函数对应位置中的元素后, $I_2(r)$ 的标准差, $I_2(r)$ 如图 7(a) 所示。从每层云的 r_{peak} 开始(图 7(b) 三角形), 向下寻找 $I_2(r) > +c_1$ 的区间下界作为该层云的 r_{base} , 向上寻找 $I_2(r) < -c_1$ 的区间上界作为该层云的 r_{top} , 若不存在同时满足这两个条件的区间, 则该云层被视作误判, 如图 7(b) 所示。

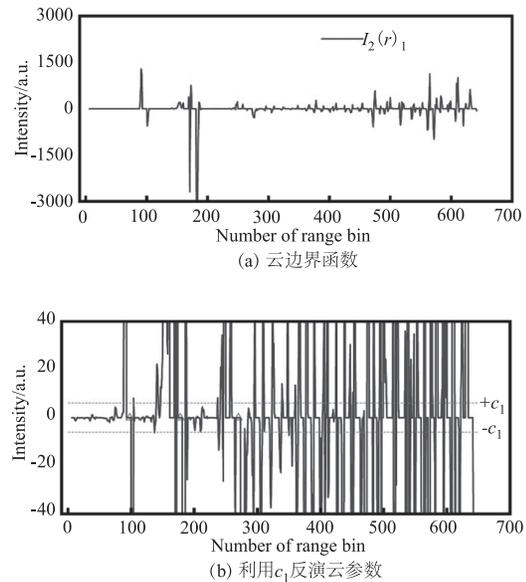


图 7 利用云边界函数反演云参数

Fig. 7 Inversion of cloud parameters using cloud boundary function

(6) 误判的排除。IDE 算法能够减少 DE 对多层云的漏检, 但也同时存在过检测现象, 因此对得到的云参数, 还需要去除厚气溶胶或背景光造成的误判情况。根据 Morille^[19] 等人所述, 对每层云的云峰和云底, 利用其对应的距离修正信号强度之比 X 进行误判的排除, 对于云峰不高于 5 km 的云层, 将 X 小于 4 的云层剔除。对于云峰高于 5 km 的云层, 将 X 小于 1.5 的云层剔除, 如式(9)所示:

$$X = \begin{cases} \frac{P(r_{\text{peak}})r_{\text{peak}}^2}{P(r_{\text{base}})r_{\text{base}}^2} \geq 40 & < r_{\text{peak}} \leq 5 \\ \frac{P(r_{\text{peak}})r_{\text{peak}}^2}{P(r_{\text{base}})r_{\text{base}}^2} > 4 & r_{\text{peak}} > 5 \end{cases} \quad (9)$$

3 实验与分析

以 2022 年 1 月 14 日 SGP 站点的 24 h 微脉冲激光雷达观测数据为例, 图 8 展示了 $\ln(P(r)r^2)$ 的时空分布图。

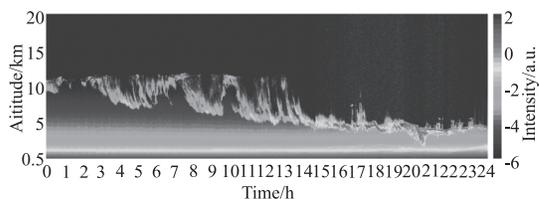


图8 2022年1月24日SGP站点激光雷达回波信号时空分布图

Fig.8 Spatial and temporal distribution of LiDAR backscatter signals at the SGP site on 24th January 2022

分别使用DE和IDE算法对该天的数据进行云层信息的反演,得到的云时空分布图如图9(a)和图9(b)所示。

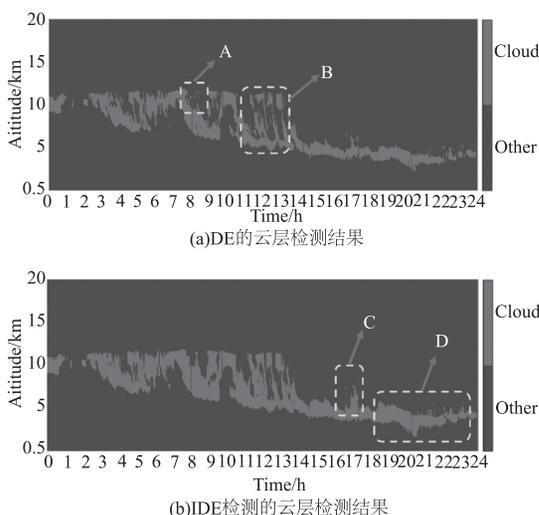


图9 2022年1月24日0时至24时不同算法的云层检测结果比较

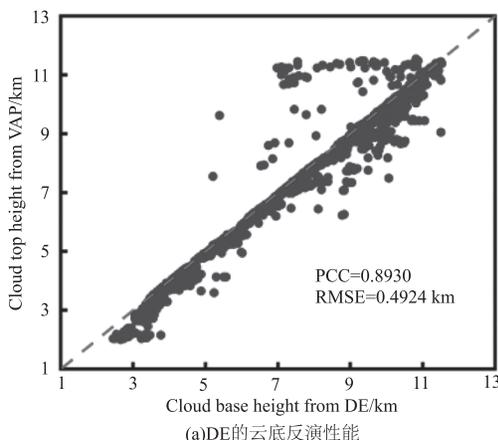
Fig.9 Comparison of cloud detection results of different algorithms from 0h to 24h on 24th January 2020

由检测结果图可以看出,对于该天的激光雷达回波信号数据,改进后的算法反演结果相较于原算法,直观上更加“饱满”,这是因为改进后的算法,通过扩大一次阈值的排除区间,使得二次阈值能够筛选出更多中高层的候选云峰,从而提高了云层的检出率,因此图9(b)具备更好的时间和空间一致性。对比图9(a)与图9(b)可以发现,在背景噪声较弱的0时~6时的时间段内,DE与IDE表现出了较好的一致性,但随之太阳辐射变强,背景噪声变大,DE出现了明显的误判、漏判现象。如图9(a)中的A区域,在8时左右出现的狭小顶层云被DE算法漏判,初步判断为DE算法中固定化的阈值设定致使该部分云层被漏判;相较而言,改进后的算法通过扩大一次阈值并一次阈值后全局筛选的设定规避了这一问题的发生。除此之外,通过图9(a)中B区域与图9

(b)中对应区域的比较可以发现,本文提出的IDE算法检测结果具有更好的连续性,与ARM提供的站点标准值有着更好的一致性。在17时左右的时间段内,通过原始激光雷达回波信号图可以发现,在6~8km的垂直高度范围内存在明显云层,对应于图9(b)中的C区域,但在图9(a)中的对应区域可以发现,DE算法造成了大面积的漏判现象,需要指出的是,在C区域顶部改进后的算法出现了轻微的误判情况,这是由于夹杂在此处云层信号附近的强气溶胶层信号造成的。对比图9(a)与图9(b)中的区域发现,改进后的算法表现出了更优秀的反演性能,云底高度、云顶高度与激光雷达回波信号保持着脚高的一致性,而原算法反演结果普遍出现云顶高度较低、云底高度较高的问题,致使整个云层与实际参考值相差较大。

对DE和IDE,分别将其云层检测结果与站点结果进行匹配,利用皮尔逊相关系数(Pearson Correlation Coefficient, PCC)和均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)分析算法的性能,云底高度的反演性能如图10(a)和图10(b)所示,云顶高度的反演性能如图10(c)和图10(d)所示。

由图10(a)和图10(b)可以看出,对于反演的云底高度,IDE获得的结果比DE更加集中。由图10(c)和图10(d)可以看出,对于反演的云顶高度,IDE减小了反演结果与真实值的偏离程度。云底和云顶高度的相关系数均有了明显的提升,均方根误差也有了大幅度的下降。表明了改进后的算法能够获得更好地准确度。对于反演的云顶高度较实际值均偏低的表现,这是由于激光雷达发射的脉冲在能够穿透云层的情况下,在还未穿透时便下降到背景噪声水平,也是激光雷达反演云层参数时出现的不可避免的情况。



(a)DE的云底反演性能

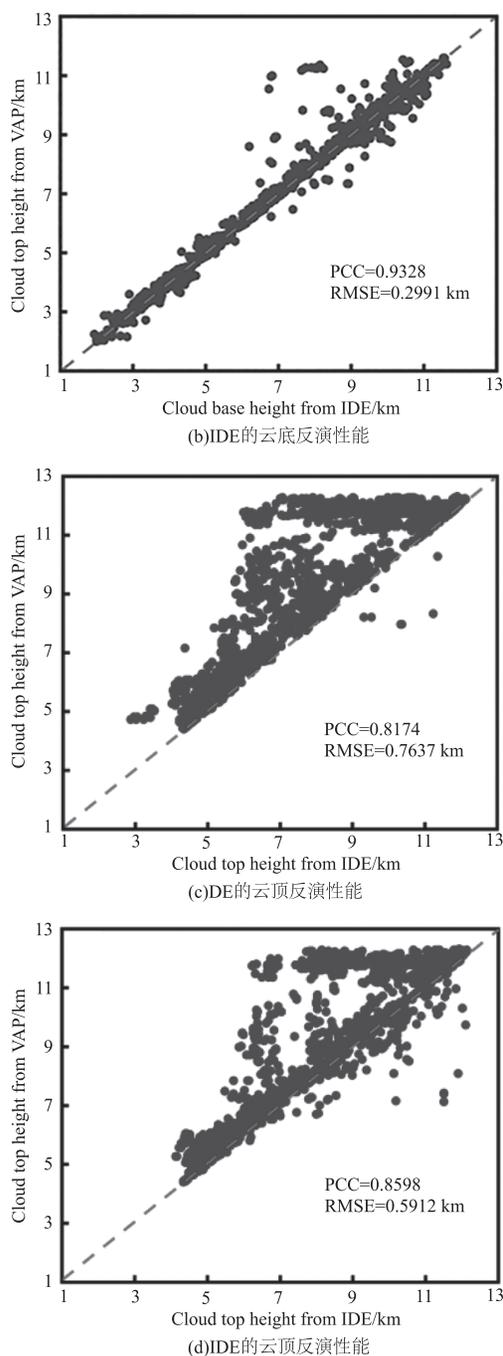


图 10 2020 年 1 月 14 日 0 时至 24 时两种算法对云顶高度反演性能的比较

Fig. 10 Comparison of cloud-top height inversion performance of the two algorithms from 0h to 24 h on 14th January 2020

4 结 论

本文基于微分增强法,通过优化拟合点数、改进云峰和云边界函数表达式以及扩大一次阈值的排除区间,提出了改进算法用于反演云层的垂直结构。针对激光雷达的一阶和二阶微分回波信号,分析了拟合点数对于失真度和噪声的影响,以距离修正的回波信号代替原始回波信号,增加了

云区域与非云区域的对比。通过扩大一次阈值的排除区间,筛选出了更多的候选云峰,同时也使得云底和云顶高度更加接近真实值。利用 SGP 站点实测激光雷达数据进行反演结果的分析,使用 IDE 算法得到的云底高度及云顶高度的相关系数均大于原算法,均方根误差均小于原算法,验证了改进后算法的准确性。

参考文献:

- [1] Zhang Chunguang, Zhang Yujun, Han Daowen, et al. Development of the technology for retrieving cloud [J]. The Journal of Light Scattering, 2007, 19(4): 388 - 394. (in Chinese)
张春光, 张玉钧, 韩道文, 等. 测云技术研究进展 [J]. 光散射学报, 2007, 19(4): 388 - 394.
- [2] Zhang Xiaoye, Liao Hong, Wang Fenjuan. The effects of aerosols and clouds on climate change and their responses [J]. Climate Change Research, 2014, 10(1): 37 - 39. (in Chinese)
张小曳, 廖宏, 王芬娟. 对 IPCC 第五次评估报告气溶胶—云对气候变化影响与响应结论的解读 [J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 37 - 39.
- [3] Mo Weiqiang, Yin Shuxian. A comparative analysis of cloud height measurement by LiDAR and artificial observation [C]//The 32nd annual meeting of Chinese Meteorological Society S16 Ground-Based Remote Sensing Observation Technology and Application, 2015. (in Chinese)
莫伟强, 尹淑娴. 激光雷达测云高与人工观测的对比分析 [C]//第 32 届中国气象学会年会, 2015.
- [4] Wang J, Liu C, Yao B, et al. A multilayer cloud detection algorithm for the Suomi-NPP Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS) [J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 227: 1 - 11.
- [5] Wang Jian, Cui Tianxiang, Wang Yi, et al. Cloud detection for GF-5 visible-shortwave infrared advanced hyperspectral image [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(9): 0928003. (in Chinese)
王健, 崔天翔, 王一, 等. 高分五号可见短波红外高光谱影像云检测研究 [J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928003.
- [6] Cheng Z, Wei M, Zhu Y, et al. Cloud type identification for a landfalling typhoon based on millimeter-wave radar range-height-indicator data [J]. Frontiers of Earth Science, 2019, 13(4): 829 - 835.

- [7] Di Huijie, Hua Dengxin. Research progress of LiDAR in cloud detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42 (6): 0600002. (in Chinese)
狄慧鸽, 华灯鑫. 云探测中的激光雷达技术研究进展 [J]. *光学学报*, 2022, 42(6): 0600002.
- [8] Xu Fan, Chang Jianhua, Liu Binggang, et al. De-noising method research for LiDAR echo signal based on variational mode decomposition [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48 (11): 1443 - 1448. (in Chinese)
徐帆, 常建华, 刘秉刚, 等. 基于 VMD 的激光雷达回波信号去噪方法研究 [J]. *激光与红外*, 2018, 48 (11): 1443 - 1448.
- [9] Klett J D. Stable analytical inversion solution for processing LiDAR returns [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(2): 211 - 220.
- [10] Fernald F G. Analysis of atmospheric LiDAR observations: some comments [J]. *Applied Optics*, 1984, 23 (5): 652 - 653.
- [11] Han Daowen, Liu Wenqing, Zhang Yujun, et al. Memorable glide window integral algorithm for retrieving cloud height [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 1 - 5. (in Chinese)
韩道文, 刘文清, 张玉钧, 等. 用于反演云层高度的记忆式滑动窗口积分算法 [J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 1 - 5.
- [12] Mao F Y, Gong W, Zhu Z. Simple multiscale algorithm for layer detection with LiDAR [J]. *Applied Optics*, 2011, 50 (36): 6591 - 6598.
- [13] Li Zichen, Hao Minglei, Zan Yu Xuan. Review on cloud-base recognition algorithms with LiDAR [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2016, 33 (4): 73 - 79. (in Chinese)
- 李子晨, 郝明磊, 咎宇暄. 激光雷达云底识别算法综述 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2016, 33(4): 73 - 79.
- [14] Pal S R, Steinbrecht W, Carswell A I. Automated method for LiDAR determination of cloud-base height and vertical extent [J]. *Applied Optics*, 1992, 31 (10): 1488 - 1494.
- [15] Bu Lingbin, Zhuang Yizhou, Xu Zhongbing, et al. Differential enhancing method of laser ceilometer for detection of cloud [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (8): 2226 - 2230. (in Chinese)
卜令兵, 庄一洲, 徐中兵, 等. 用于激光云高仪的微分增强云检测方法 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 2226 - 2230.
- [16] Dou Xiaolei, Chang Jianhua, Liu Zhengxin, et al. An aerosol extinction coefficient inversion method based on Mie scattering LiDAR [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49 (9): 1047 - 1053. (in Chinese)
豆晓雷, 常建华, 刘振兴, 等. 基于 Mie 散射激光雷达的气溶胶消光系数反演方法 [J]. *激光与红外*, 2019, 49 (9): 1047 - 1053.
- [17] Campbell J R, Hlavka D L, Welton E J, et al. Full-time, eye-safe cloud and aerosol LiDAR observation at atmospheric radiation measurement program sites: instruments and data processing [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(4): 431 - 442.
- [18] Wang Z, Sassen K. Cloud type and macrophysical property retrieval using multiple remote sensors [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(10): 1665 - 1683.
- [19] Morille Y, Haefelin, et al. Strat: an automated algorithm to retrieve the vertical structure of the atmosphere from single-channel LiDAR data [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2007, 24(5): 761 - 775.