

基于双向重构后向散射信号的微脉冲激光雷达 云层检测算法

孟园园¹, 常建华^{1,2*}, 陈思成¹, 周妹¹, 戴腾飞^{1,2}, 王博业¹, 姜炎宋¹

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 在理想的洁净大气条件下, 微脉冲激光雷达后向散射信号强度具有随高度单调变化的特征。提出了一种基于插值重构方法的云层垂直结构反演算法, 以探测距离最低处和最高处为起点和参考点, 筛选预处理信号中相应的插值点进行 Akima 插值。将得到的前向和后向重构信号进一步作平均处理以模拟无云信号。所提算法先结合自适应阈值与经验阈值区分云和气溶胶, 确定候选云层区间, 再在此基础上, 对比模拟的无云信号与预处理信号强度, 提取候选云层的云底和云顶高度。利用微脉冲激光雷达数据进行的验证表明, 相比于直接反演的传统算法, 所提算法的云底和云顶高度的相关系数分别提高至 0.9836 和 0.9334, 均方根误差分别减小至 43.8 m 和 280.2 m, 有效提高了云层检测的精度。

关键词 遥感; 微脉冲激光雷达; 云层检测; 插值; 重构; 大气光学

中图分类号 TN958.98

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2428003

Cloud Detection Algorithm of Micro-Pulse Lidar Based on Bidirectional Reconstruction of Backscatter Signal

Meng Yuanyuan¹, Chang Jianhua^{1,2*}, Chen Sicheng¹, Zhou Mei¹, Dai Tengfei^{1,2},
Wang Boye¹, Jiang Yansong¹

¹*School of Electronics & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;*

²*Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China*

Abstract Under ideal clean atmosphere conditions, the backscatter signal intensity of micro-pulse lidar has a monotonic variation with height. An inversion algorithm of cloud vertical structure based on the interpolation and reconstruction method is proposed to screen the corresponding interpolation points in the pre-processed signal for Akima interpolation, with the places with the lowest and highest detection distances as the starting point and reference point, respectively. The obtained forward and backward reconstructed signals are further averaged to simulate the cloud-free signal. Clouds and aerosols are first distinguished by the proposed algorithm combining the adaptative threshold and empirical threshold to determine the candidate cloud interval. On this basis, the intensity of the simulated cloud-free signal is compared with that of the pre-processed signal, and the cloud base and cloud top heights of the candidate clouds are extracted. The validation using micro-pulse lidar data shows that compared with the results of the traditional direct inversion algorithm, the correlation coefficients of the cloud base and cloud top are improved to 0.9836 and 0.9334, and the root mean square errors are reduced to 43.8 m and 280.2 m, which indicates that the proposed method effectively improves the accuracy of cloud detection.

Key words remote sensing; micro-pulse lidar; cloud detection; interpolation; reconstruction; atmospheric optics

收稿日期: 2022-02-24; 修回日期: 2022-04-17; 录用日期: 2022-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(61875089, 62175114)、江苏省高等学校大学生创新创业训练计划(202010300040)

通信作者: jianhuachang@nuist.edu.cn

1 引言

云是由湿空气上升使得水汽凝结、凝华或小水滴冻结而形成的,是大气中水滴、冰晶、雪晶的单一或者混合聚合体^[1]。它覆盖地球表面约三分之二的地区,是地球上庞大水循环的有形结果^[2],是地球-大气系统中维持能量平衡最重要的调节器^[3-4],也是影响气候变化的最大不确定性因素之一^[5-7]。因此,云在气候研究和人类生产生活中扮演着关键角色,强化对云的探测具有十分重要的意义。

云的观测手段分为两种:一种是人工目测,但这种方式存在观测次数少、时空不连续等缺点,不能对天空中的云进行实时观测^[8];另一种是利用搭载在地基和空基平台上的仪器进行探测,包括红外辐射计^[9-10]、中分辨率成像光谱仪^[11]、全天空成像仪^[12]等被动遥感装置和毫米波云雷达^[13]、激光云高仪^[14]、无线电探空仪^[15]、激光雷达^[16-17]等主动遥感装置。微脉冲激光雷达(MPL)作为一种具有高时空分辨率的主动遥感设备,在云的探测领域中,主要用于确定连续时间的云层垂直结构等信息。利用MPL观测的后向散射信号数据反演云层参数的算法,主要可分为微分法^[18-19]、统计学算法^[20]和滑动窗口法^[21-22]。微分法根据后向散射信号的一阶或二阶微分特性识别云层,如毛飞跃等^[18]在微分零交叉算法(DZC)^[19]的基础上,提出了改进的微分零交叉算法(IDZC),提高了云层反演的准确性。统计学算法能够有效削弱噪声的影响,如Zhao等^[20]采用值分布均衡法(VDE)有效地区分了云和气溶胶。滑动窗口法利用不同的区域特性检测云层^[21],如陈思颖等^[22]提出了改进的简单多尺度法(SMS-SF),实现了云层的有效识别。此外,还有结合云毫米波雷达数据的多传感器联合反演算法^[23-24]。此类算法在提高反演精度的同时,也对探测设备提出了更高的要求,有效的应用场景往往会受到很大限制。

值得注意的是,基于后向散射信号数据探测云层的传统算法在区分云和气溶胶时往往需要根据经验阈值判断云层信息,受系统参数和主观性影响较大。此外,在反演云顶高度方面,虽然Pal等^[19]的方法有较强的适用性,但是在云层过厚(激光能够穿透而尚未穿透)的情况下,反演的云顶处附近的后向散射信号仍处在快速下降阶段,并非真实云顶。为了对云和气溶胶进行更准确地区分,摆脱传统云顶定义方法的缺陷,获得更加接近真实情况的云层分布情况,本文提出了一种基于双向重构后向散射信号(BRBS)的云层检测算法。该算法在经验阈值的基础上,加入了自适应阈值,对云层进行了更准确的识别和划分。在候选云层区间内,以云峰为界将区间分为两段,将重构的模拟无云信号的强度作为参考值,通过比较预处理信号强度与对

应的参考值大小,分别确定云底高度和云顶高度。该方法能够减少传统算法利用云底后向散射信号强度确定云顶高度时反演结果较真实值过低的情况,实现了更高的云层检出率和反演准确率。

2 方法与原理

2.1 微脉冲激光雷达探测原理

微脉冲激光雷达方程的形式为

$$P(r) = \frac{O_i(r)CE\beta(r)r^{-2}\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right] + P_b + P_{ap}(r)}{D_{tc}[P(r)]}, \quad (1)$$

式中: $P(r)$ 为 r 高度处微脉冲激光雷达的后向散射信号的强度; $O_i(r)$ 为视场冲突造成的几何重叠的校正因子; C 为微脉冲激光雷达的系统常数; E 为发射能量; $\beta(r)$ 为总的大气后向散射系数; $\sigma(\cdot)$ 为大气消光系数; $\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right]$ 为大气透过率; P_b 为背景噪声; $P_{ap}(r)$ 为后脉冲噪声; $D_{tc}[P(r)]$ 为探测器死区时间校正因子。

Campbell等^[25]提出的激光雷达仪器校准方法中,几何重叠校正因子、死区时间校正因子、背景噪声和后脉冲噪声被移至等式左侧并进行了距离平方修正,可表示为

$$\frac{\{P(r)D_{tc}[P(r)] - P_b - P_{ap}(r)\}r^2}{O_i(r)E} = C\beta(r)\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right]. \quad (2)$$

Campbell等将式(2)右端 $C\beta(r)\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right]$

定义为距离修正的归一化相对后向散射信号(B_{NR}),此值作为大气辐射测量计划(ARM)部分MPL云增值产品(VAP)中的基线产品^[26],VAP中的云层检测和其他重要光学参数计算都以该基线为起点进行后续处理。在反演云层垂直结构方面,ARM根据多传感器联合反演算法,针对不同的探测情况,利用 B_{NR} 和云微波雷达同步数据的特点反演云层的垂直结构,其结果具有相当高的准确度。ARM在其云VAP的检测报告^[27]中指出,当微脉冲激光雷达信号的信噪比很低时,会出现云层误判的情况,这种情况在10 km以上的区域中更容易出现,具体表现为在连续时间内的云时空分布图中,出现只占据几个时间或空间分辨率距离的孤立云层,这些云层虽然能够满足算法的筛选标准,但实际上它们是由噪声或气溶胶引起的误判。在图1所示的云时空分布图中,椭圆标记的区域被认为是误判的云层。

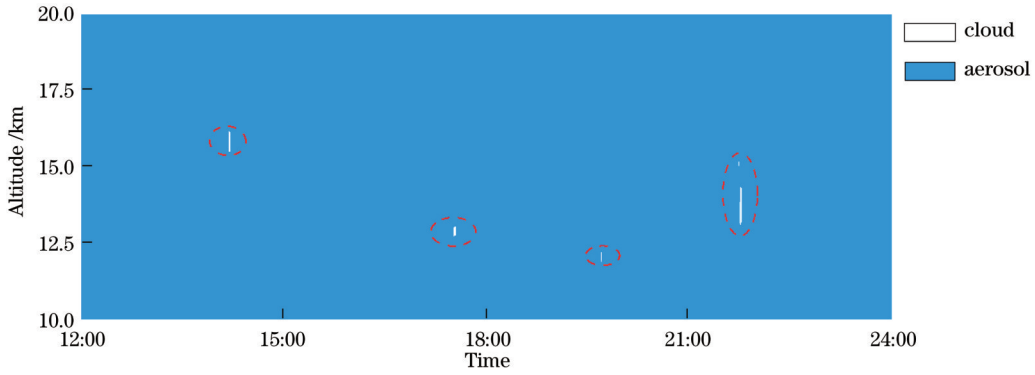


图 1 误判的孤立云层
Fig. 1 Misjudged isolated clouds

2.2 微脉冲激光雷达数据的预处理

由式(1)和式(2)可知,在理想的洁净大气条件下, $P(r)$ 或 $B_{NR}(r)$ 的值呈现出单调变化的趋势。图 2(a)

为在理想的洁净大气条件下根据式(1)模拟的 $P(r)$ 。可以看出,随着高度的增加, $P(r)$ 强度逐渐减小,且变化趋势逐渐变缓。

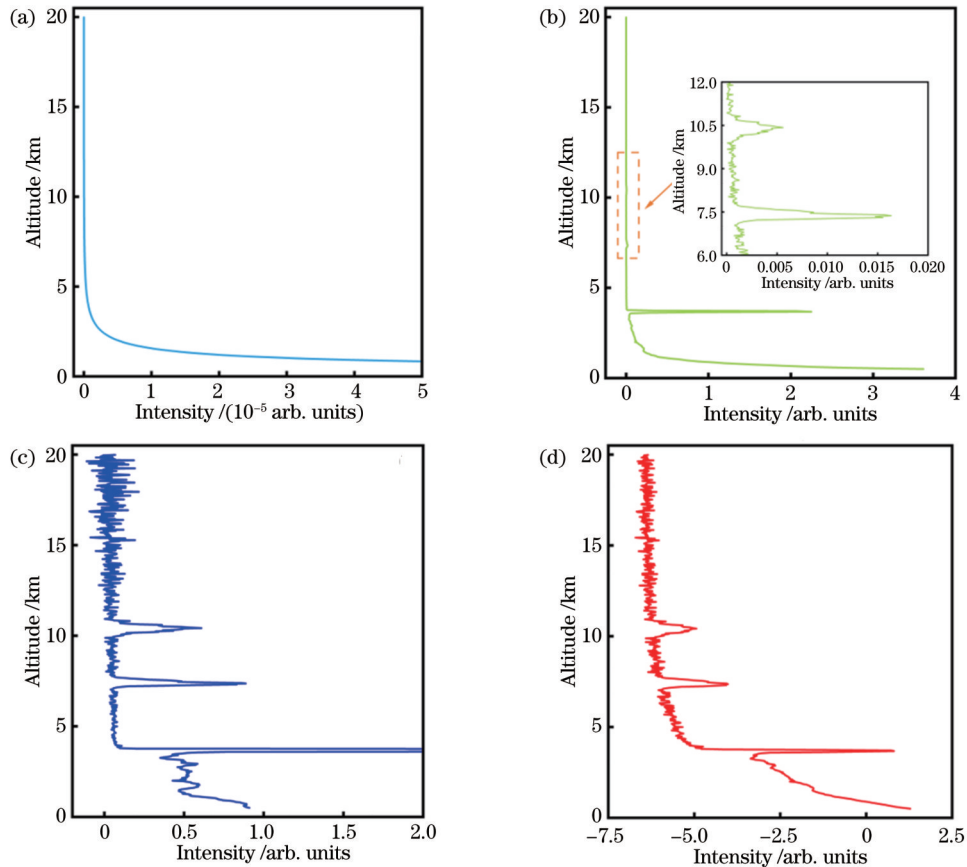


图 2 不同的后向散射信号的对比。(a)大气消光均匀情况下的模拟无云信号;(b)未距离修正的归一化相对后向散射信号;(c)距离修正后的归一化相对后向散射信号;(d)对数修正后的后向散射信号

Fig. 2 Comparison of different backscatter signals. (a) Simulated cloud-free signal under uniform atmospheric extinction; (b) normalized relative backscatter signal without range correction; (c) normalized relative backscatter signal with range correction; (d) logarithmic-corrected backscatter signal

在有云的实际探测场景下,由于云粒子比气溶胶粒子数密度大^[28],消光系数显著大于附近的非云区域,故其对MPL发射的激光脉冲会发生强散射现象,造成接收到的后向散射信号强度显著大于附近非云区域,

而在非云区域中后向散射信号强度会呈现随高度增加波动下降的趋势。传统算法大多采用距离平方修正对信号进行预处理,但因 r^2 因子的存在,随着高度的增加,信号的起伏将更加明显,不可避免地会放大探测远

端的噪声,进而影响检测的准确性。此外, P_b 的计算尚未有统一的标准,一般选取探测距离最高处 3~5 km 范围内的 $P(r)$,将其若干倍标准差或均值作为背景噪声^[20-22,25],而背景噪声的修正在信噪比较差的情况下也会使 B_{NR} 中出现负值。考虑上述情况,本文基于式(1),将几何重叠校正因子、死区时间校正因子、后脉冲噪声移至等式左侧,但保留背景噪声,可表示为

$$\frac{\{P(r)D_{ic}[P(r)] - P_{ap}(r)\}}{O_i(r)E} = \frac{C\beta(r)\exp\left[-2\int_0^r\sigma(r')dr'\right]}{r^2} + \frac{P_b}{O_i(r)E} \quad (3)$$

进一步地,对式(3)右端进行对数修正并将式(2)中距离修正的 B_{NR} 引入,以 P'_b 代替 $P_b/[O_i(r)E]$,从而构造新的后向散射信号 B_{LN} ,其表达式为

$$B_{LN}(r) = \ln\left[\frac{B_{NR}(r)}{r^2} + P'_b\right] \quad (4)$$

相较于未距离修正的 B_{NR} 和距离修正的 B_{NR} ,通过该预处理方法得到的 B_{LN} 既能够突出强散射区域,又能够避免距离修正放大远端噪声问题的出现。

本文采用 ARM 中位于美国俄克拉何马州、拉蒙特、南部大平原(SGP)站点的 MPL 实测数据(时间分辨率为 30 s、空间分辨率为 0.03 km)进行分析,图 2(b)~(d)分别显示了 2020 年 4 月 22 日 VAP 中第 200 根 MPL 廓线的 B_{NR}/r^2 、 B_{NR} 与 B_{LN} 的对比。图 2(b)中未距离修正的 B_{NR} 只有第一层云可以明显看出,而第二层云和第三层云的信号强度相较于第一层云,变化幅度非常小。虽然图 2(c)所示的距离修正的 B_{NR} 和图 2(d)所示的 B_{LN} 在 3~4 km、7~8 km 和 10~11 km 处展示了明显的云层信息,但是图 2(d)所示的预处理信号在非云区域总体上保持了强度随高度增加而下降的趋势,有效克服了远端噪声对检测结果的影响。

2.3 基于双向重构后向散射信号的云层检测

由式(4)可知,在理想的洁净大气条件下, B_{LN} 也会呈现出随高度单调变化的趋势。根据此趋势,本文结合实测的微脉冲激光雷达后向散射信号的特征,提出了一种基于双向重构后向散射信号的云层检测算法,其流程图如图 3 所示。

利用 Akima 插值比三次样条插值更平滑和自然的独特优势^[29],本文从探测距离最低处和最高处两个方向分别筛选 B_{LN} 中相关插值点进行 Akima 插值,得到与 B_{LN} 探测位置一一对应的向前和后向重构信号,平均后可得到无云情况下的模拟信号,并将其强度作为 B_{LN} 相应位置上的参考值。算法先根据前向重构信号和 B_{LN} 的差异,结合自适应阈值与经验阈值区分云和气溶胶,确定候选云层区间,再以云峰为界将候选云层区间分为两段,筛选 B_{LN} 中小于相应参考值的元素,最后根据筛选的元素个数反演云层垂直结构。具体步骤

如下。

1) 前向插值点的选取与信号重构

在实际测量中,受背景噪声等因素的影响, B_{LN} 的最小值往往不是出现在最大高度处。此现象会对插值点的选取产生较大影响,降低反演结果的准确率。因此,本文首先按 B_{LN} 的强度进行升序重组,构建一个新的上升序列 $P_s(i)$, B_{LN} 信号的长度记为 n ,新序列中第 i 个元素在 B_{LN} 中的位置记为 $I(i)$,即

$$P_s(i) = B_{LN}[I(i)], \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

接着,将探测距离最高处前 f 个分辨率距离内 B_{LN} 强度的最小值记为 M_s ,去除 B_{LN} 中比 M_s 小的元素(不包含探测距离最高处的元素),排除的元素位置记为 $D_1(i)$ 。由式(4)可知, $D_1(i)$ 应包含 $I(i)$ 中前若干个连续位置的元素,其表达式为

$$D_1(i) = I(i), \quad \text{subject to } P_s(i) < M_s \quad (6)$$

在去除 B_{LN} 中 $D_1(i)$ 位置上的元素后,从探测距离最低处开始,筛选出 B_{LN} 中满足“随高度增加,强度逐渐减小”的元素,组成一个单调下降的序列,与探测距离最高处的元素一起作为前向插值点 B_1 ,如图 4(a)所示。在本文中, f 的取值为 10。

将前向插值点 B_1 以空间分辨率为间隔,利用 Akima 插值得到与 B_{LN} 中每个位置一一对应的向前重构信号 B_{A1} ,如图 4(b)所示。

2) 候选云峰区间的确定

将序列 B_1 中元素所对应的高度按照连续性分成若干个特征段 $T(k)$ ($k = 1, 2, 3, \dots$),即特征段内相邻的两个元素相差一个空间分辨率的距离,将特征段的左端点定义为左特征点 T_{Lk} ,右端点定义为右特征点 T_{Rk} 。如特征段的长度为 1,则该点既作为左特征点,又作为右特征点。

将前向插值点 B_1 以空间分辨率为间隔,利用 Akima 插值得到与 B_{LN} 中每个位置一一对应的向前重构信号 B_{A1} ,如图 4(b)所示。残差信号 R_1 的表达式为

$$R_1 = B_{LN} - B_{A1} \quad (7)$$

R_1 中大于零的元素即为 B_{A1} 与 B_{LN} 中对应位置的残差,将其均值记为 t_{mean} ,取 t_{mean} 的 a 倍作为云峰检测的自适应阈值 T_h ,其表达式为

$$T_h = a \cdot t_{\text{mean}} \quad (8)$$

此时 R_1 中大于阈值 T_h 的每个极大值点便为筛选的云峰,将其定义为 C_{Pj} ($j = 1, 2, 3, \dots$),如图 5(a)所示。在本文中, a 的取值为 3。

由步骤 1) 可知,筛选的云峰会出现在两个特征段之间,即每个云峰 C_{Pj} 处于某前一个特征段的 T_{Rk} 与后一特征段的 $T_{L_{k+1}}$ 之间,如图 5(b)所示。

3) 云峰区间的合并与误判的排除

一般认为两层云之间的距离不小于 0.05 km^[24]。为了避免单层多峰云被误分为多层云,在步骤 2) 之后还需根据微脉冲激光雷达的空间分辨率对相邻候选云

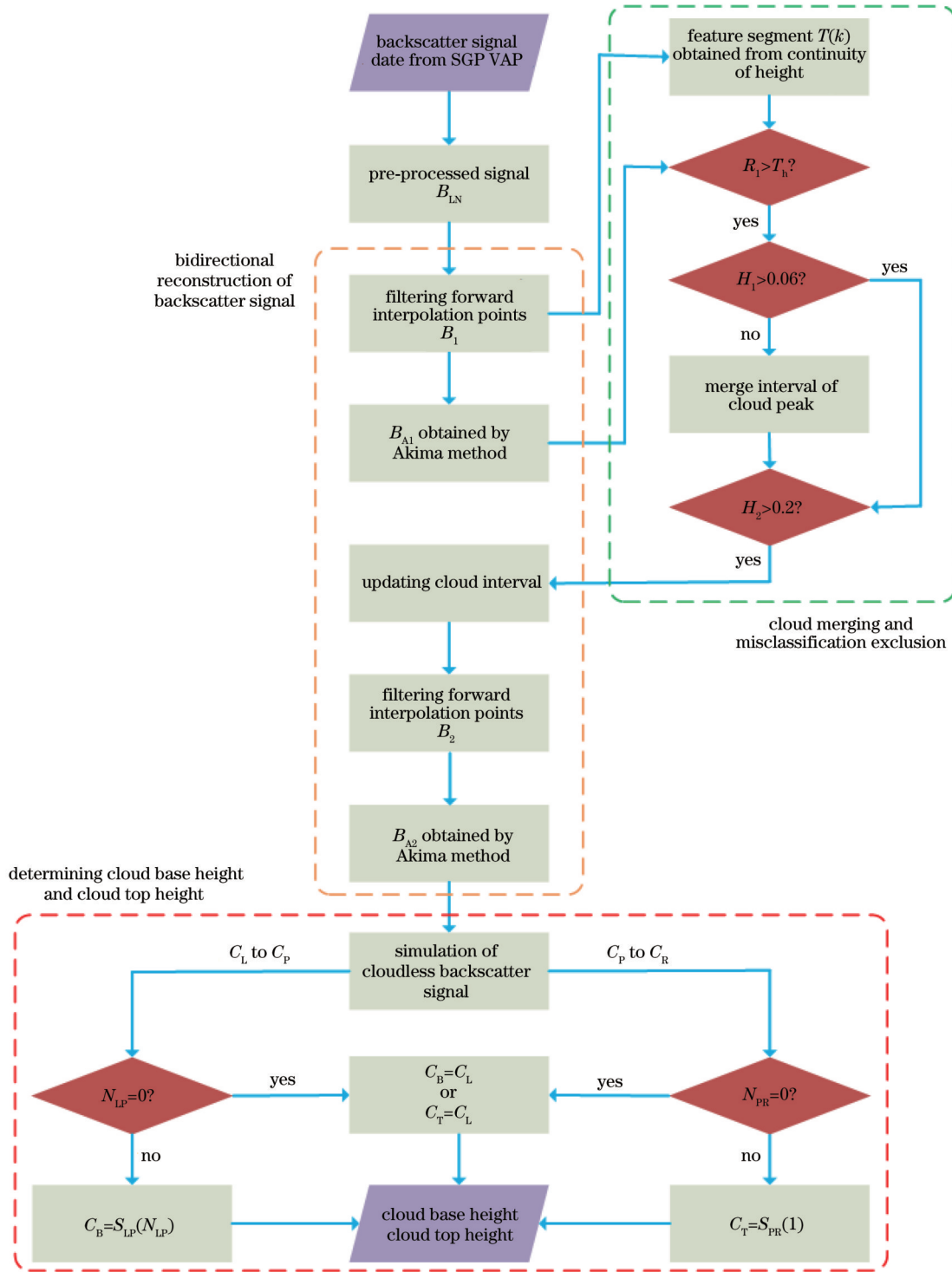


图 3 双向重构后向散射信号的云层检测算法流程图

Fig. 3 Flow chart of cloud detection algorithm of backscatter signal based on bidirectional reconstruction

峰间的距离进行判断,将单层多峰云归为一层云。设第 x 个候选云峰在 T_{R_m} 和 $T_{L_{m+1}}$ 之间,第 $x+1$ 个候选云峰在 T_{R_n} 和 $T_{L_{n+1}}$ 之间 ($0 \leq x \leq j-1, 0 \leq m \leq k-1, 0 \leq n \leq k-1$)。利用距离阈值 H_1 进行单层多峰云的判断,其表达式为

$$H_1 = H_{R_n} - H_{L_{m+1}} \begin{cases} > 0.06, \text{ double-layer cloud} \\ \leq 0.06, \text{ single-layer cloud} \end{cases}, (9)$$

式中: H_{R_n} 和 $H_{L_{m+1}}$ 分别为 T_{R_n} 和 $T_{L_{m+1}}$ 对应的高度,其单位为 km。若出现单层多峰云的情况,则将候选云峰区间进行合并,同时更新候选云峰位置。虽然利用式(7)和式(8)可以检测到绝大多数的云峰,但是在探测近端 1~2 km 内的 R_1 容易受到厚气溶胶的影响,出现和云层一样强的后向散射信号,从而被错误地筛选出来,在探测远端大于 17 km 处的 R_1 也可能会因信噪比低而

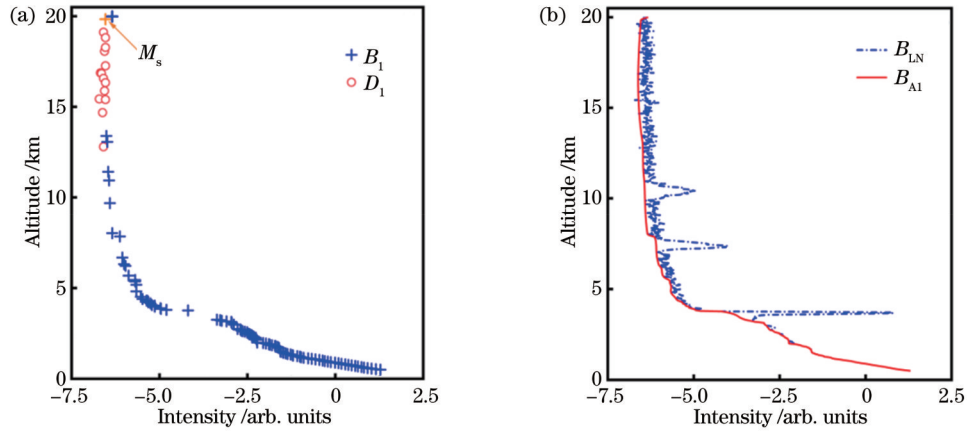


图 4 后向散射信号的前向重构。(a)前向插值点的筛选;(b)利用前向插值点得到的 B_{A1}

Fig. 4 Forward reconstruction of backscatter signal. (a) Screening results of forward interpolation points; (b) B_{A1} obtained by forward interpolation points

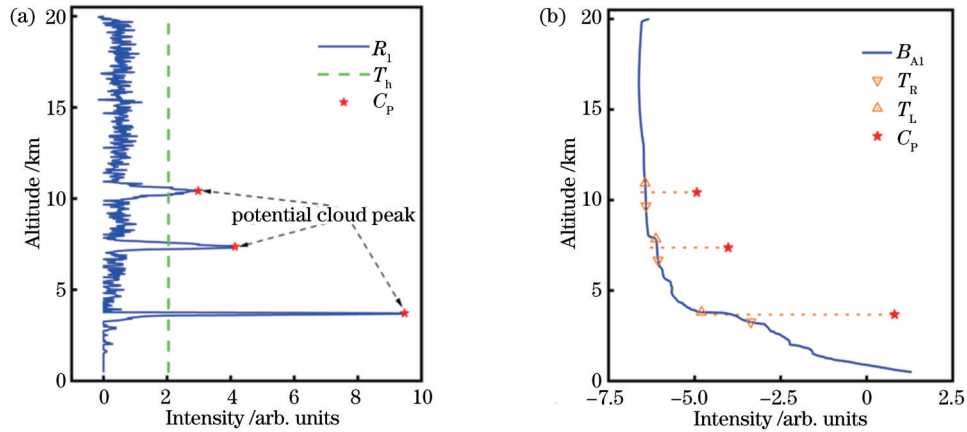


图 5 候选云峰区间的定义。(a)利用自适应阈值筛选的云峰;(b)利用左右特征点确定候选云峰范围

Fig. 5 Definition of candidate cloud peak interval. (a) Cloud peaks screened by adaptive threshold; (b) range of candidate cloud peak determined by left and right typical points

被错误地筛选出来。与真实云层不同的是,这两种情况下 T_L 与 T_R 之间的距离一般都很小。因此,本文利用云层厚度阈值 H_2 对每个候选云峰区间进行误判的排除,其表达式为

$$H_2 = H_{L_{w+1}} - H_{R_w} \begin{cases} > 0.2, \text{ cloud} \\ \leq 0.2, \text{ else} \end{cases} \quad (10)$$

式(10)展示了对第 x 个候选云峰区间长度进行判别的过程。步骤 3) 的处理考虑到了云层本身的厚度和相邻云层之间的距离,可作为进一步反演的基础。

4) 候选云层区间的更新

由于每个特征段内的元素也满足单调变化的条件,符合云峰-云顶段的特征。因此,在步骤 2) 和步骤 3) 确定的候选云峰区间的基础上,候选云层区间扩大为前一特征段的右特征点到后一特征段的右特征点,即每个云峰 C_P 所在的候选云层区间为某前一个特征段的 T_{R_i} 到后一特征段的 $T_{R_{i+1}}$, 记为云区间左端点 C_{L_i} 与右端点 C_{R_i} 。

5) 后向插值点的选取与信号重构

将步骤 4) 中每个候选云层区间中的元素组成的集合记为 $D_2(i)$, 在去除 B_{LN} 中 $D_2(i)$ 位置上的元素后,从探测距离最高处开始,筛选出 B_{LN} 中满足“随高度减小,信号强度逐渐增大”的元素组成一个单调上升的序列 B_2 作为后向插值点,如图 6(a) 所示。

将后向插值点 B_2 以距离分辨率为间隔,利用 Akima 插值得到与 B_{LN} 中每个位置一一对应的后向重构信号 B_{A2} , 如图 6(b) 所示。

6) 云底与云顶高度的反演

将步骤 2) 中的前向重构信号 B_{A1} 与步骤 5) 中的后向重构信号 B_{A2} 取平均得到重构信号 B_A , 如图 7(a) 所示,其表达式为

$$B_A = \frac{B_{A1} + B_{A2}}{2} \quad (11)$$

B_A 模拟了 B_{LN} 在无云条件下的信号,将 B_A 的强度作为 B_{LN} 对应位置的参考值。对于云底和云顶高度的反演,所提算法将候选云层区间以 C_P 为中心一分为二,分别在 $C_L \sim C_P$ 段内反演云底高度,在 $C_P \sim C_R$ 段内

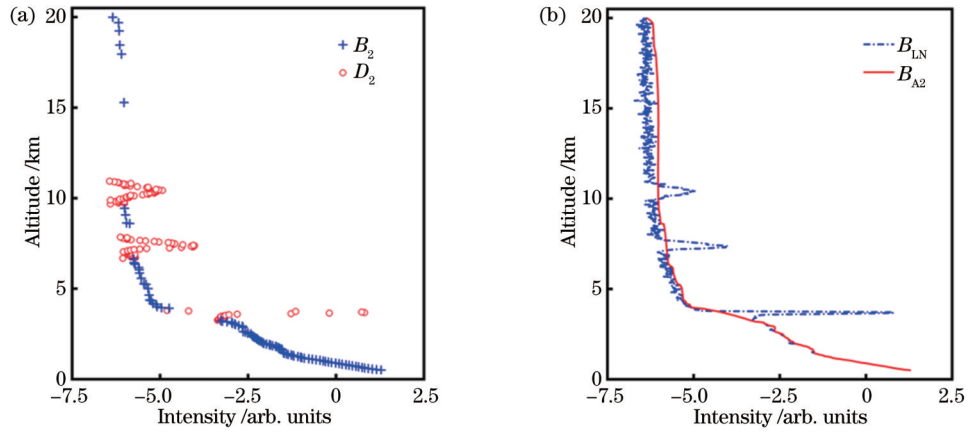


图 6 后向散射信号的后向重构。(a)后向插值点的筛选;(b)利用后向插值点得到的 B_{A2}

Fig. 6 Back reconstruction of backscatter signal. (a) Screening results of back interpolation points; (b) B_{A2} obtained by back interpolation points

反演云顶高度。 B_{LN} 中云底和云顶位置的确定分别如图 7(b)~(d)所示。

由于云的消光系数比气溶胶大,故 $C_L \sim C_P$ 段内 B_{LN} 总体呈现出快速上升到云峰位置的趋势,而 $C_P \sim C_R$ 段内 B_{LN} 总体呈现由云峰位置快速下降的趋势直至达到

背景噪声水平。对于云顶高度的确定,在 $C_L \sim C_P$ 段内将 B_{LN} 中小于 B_A 的元素记为 $S_{LP}(i)$,元素个数记为 N_{LP} ,对应的高度记为 $H_{S_{LP}(i)}$,云底高度 H_{C_b} 的表达式为

$$H_{C_b} = \begin{cases} H_{S_{LP}(N_{LP})}, & N_{LP} \neq 0 \\ H_{C_L}, & N_{LP} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

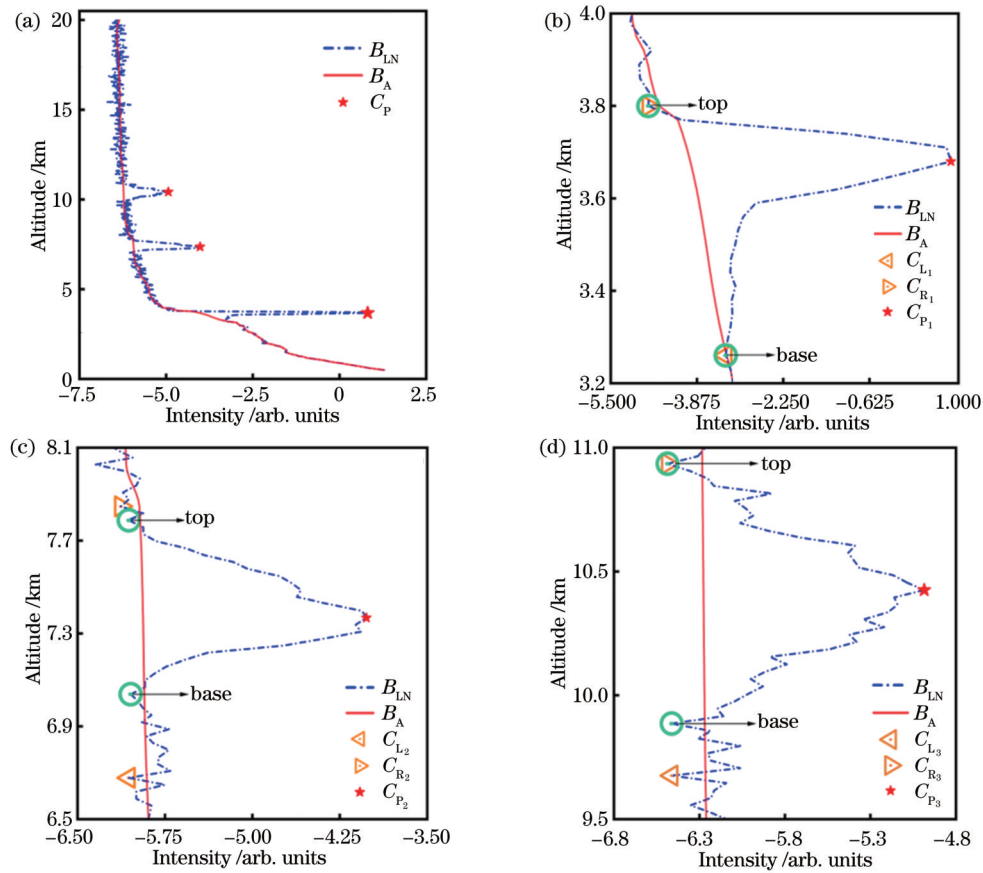


图 7 利用 B_A 与 B_{LN} 反演云层信息。(a) B_A 与 B_{LN} 的对比;(b) 第一层云的反演结果;(c) 第二层云的反演结果;(d) 第三层云的反演结果

Fig. 7 Cloud layer information retrieved by B_A and B_{LN} . (a) Comparison between B_A and B_{LN} ; (b) inversion result of first-layer cloud; (c) inversion result of second-layer cloud; (d) inversion result of third-layer cloud

同理, $C_P \sim C_R$ 段内 B_{LN} 中小于 B_A 的元素记为 $S_{PR}(i)$, 元素个数记为 N_{PR} , 对应的高度记为 $H_{S_{PR}(i)}$, 云顶高度 H_{C_T} 的表达式为

$$H_{C_T} = \begin{cases} H_{S_{PR}(1)}, & N_{PR} \neq 0 \\ H_{C_T}, & N_{PR} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

式(12)中 $S_{LP}(N_{LP})$ 为 $C_L \sim C_P$ 段内最接近云峰的位置, 即将 B_{LN} 中小于 B_A 且距 C_P 最近的位置定义为云底 C_{B_0} 。式(13)中 $S_{LP}(1)$ 为 $C_P \sim C_R$ 段内最接近云峰的位置, 即将 B_{LN} 中小于 B_A 且距离 C_P 最近的位置定义为云顶 C_{T_0} 。若 $C_L \sim C_P$ 或 $C_P \sim C_R$ 段没有满足 B_{LN} 小于 B_A 这一条件的元素, 则将 C_L 作为 C_{B_0} 或将 C_R 作为 C_{T_0} 。

以图 7(b) 所示的第一层云的反演为例, 图 8 展示了 BRBS 和 Pal 等提出的 DZC 中云顶定义的比较, 其中 A 点和 D 点分别为 SGP 站点提供的云底位置和云顶位置; B 点是以 A 点为标准, 利用 DZC 反演的云顶位置; C 点为利用 BRBS 反演的云顶位置。

对于云顶高度的定义, Pal 等^[19]提出了采用距离修正信号, 在反演的云底高度 r_b 的基础上确定云顶高度 r_t , 相应的表达式为

$$P(r_t)r_t^2 < P(r_b)r_b^2 \quad (14)$$

虽然该定义在大多数情况下能获得较接近真实值的结果, 但是对于激光能穿透的厚云层, r_t 处尚在云层内部, 并未被穿透, 这种情况在低层云的垂直结构反演中尤为明显。由图 8 可以看出, B 点前后的信号依然符合 $C_P \sim C_R$ 段的特征, 因此并未下降到背景噪声水平。相较于此方法, 所提算法对云顶高度的间接反演结果更加接近真实值。

3 实验结果与分析

以 SGP 站点 VAP 提供的云层数据为标准, 图 7 中的第一层云对应的云底和云顶高度为 3.35 km 和

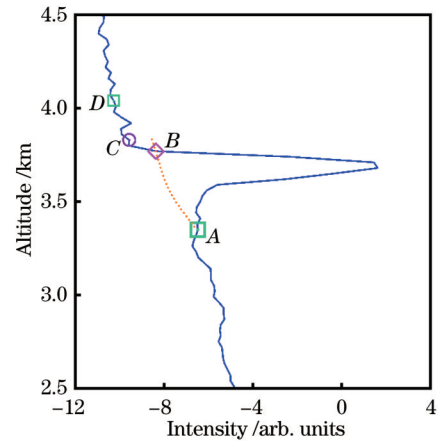


图 8 不同云顶定义的比较

Fig. 8 Comparison of different cloud top definitions

4.04 km, 第二层云对应的云底和云顶高度为 7.10 km 和 8.00 km, 第三层云对应的云底和云顶高度为 9.89 km 和 10.94 km。对 2022 年 4 月 22 日第 200 根廓线分别采用 IDZC、VDE、SMS-SF 和 BRBS 进行云层信息的反演, 反演结果及其与 SGP 站点结果的误差如表 1 所示。“+”表示比站点结果高, “-”表示比站点结果低。由不同算法反演的云底和云顶高度数据可以得出, IDZC 和 SMS-SF 反演的云顶高度较实际情况相差 8~9 个分辨率距离, 尤其在反演中低层云时, 定义的云顶位置对应的信号水平并未下降到背景噪声水平, 因此会出现较实际云顶高度过低的情况。VDE 受经验阈值选取的影响^[20], 反演的云底高度较实际情况过高, 云顶高度较实际情况过低, 因此得到的云层厚度偏小。所提 BRBS 算法将误差控制在了 3 个分辨率距离, 云顶高度的误差控制在了 7 个分辨率距离, 相较于其他算法, 反演结果更加接近真实值。

表 1 不同算法反演的云层信息及其与 SGP 站点结果的误差

Table 1 Cloud layer information inverted by different algorithms and their errors with SGP station results

Algorithm	Cloud layer No.	Base height /km	Error /km	Top height /km	Error /km
IDZC	1	3.44	+0.09	3.80	-0.24
	2	7.04	-0.06	7.73	-0.27
	3	9.95	+0.06	10.70	-0.24
VDE	1	3.56	+0.21	3.83	-0.21
	2	7.19	+0.09	7.70	-0.30
	3				
SMS-SF	1	3.50	+0.15	3.77	-0.27
	2	7.01	-0.09	7.73	-0.27
	3	9.95	+0.16	10.91	-0.03
BRBS	1	3.26	-0.09	3.83	-0.21
	2	7.04	-0.06	7.79	-0.21
	3	9.89	0	10.94	0

本文选取 SGP 站点 2020 年 1 月 3 日 00:00—24:00 共 24 h、2880 根廓线的云 VAP 进行分析。该 VAP 中云底高度与云顶高度的反演采用了联合云毫米波雷达的多传感器联合反演算法,并且通过了质量保证,具有一定的准确度,为所提算法与传统算法的评估和比较提供了依据。由于云的消光系数比气溶胶的消光系数大,当激光能够穿过云层时,云的后向散射信号会显著增大,因此可以利用包含空间、时

间、后向散射信号强度三个参数的时空分布图来直观地反映连续时间内信号强度变化的情况,从而预知云的大概位置。图 9 为采用所提预处理方法得到的 B_{LN} 时空分布图。可以看出,00:00—09:00 和 10:00—16:00 时间段内 3~6 km 范围内有非常明显的云层信息。

这天 SGP 站点 VAP 中提供的云层信息如图 10 所示,图中已排除 2.1 节中所述的误判云层。

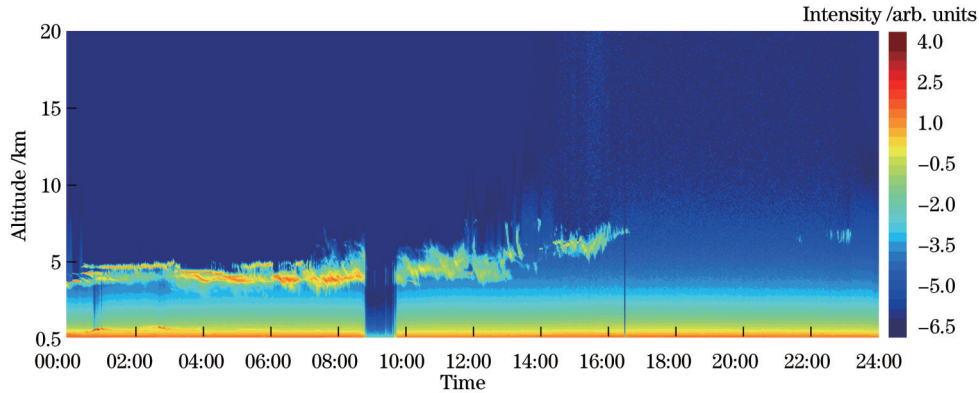


图 9 预处理的后向散射信号时空分布图

Fig. 9 Spatiotemporal distribution of preprocessed backscattering signals

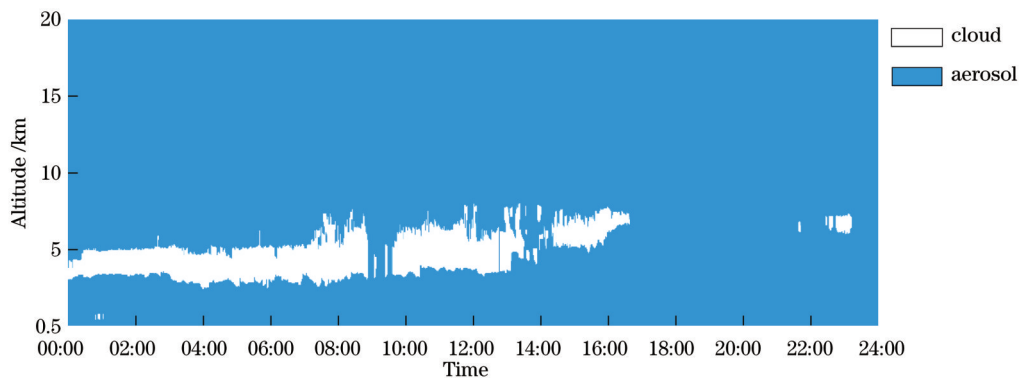


图 10 SGP 站点云增值产品的检测结果

Fig. 10 Detection result of cloud value-added product from SGP station

分别使用 IDZC、VDE、SMS-SF 和 BRBS 对 2020 年 1 月 3 日 24 h 内 VAP 中的 MPL 后向散射信号进行云层信息的反演,结果如图 11 所示。与图 10 相比,图 11(a) 中 IDZC 需要选取一阶微分信号持续大于零的点数阈值,在信噪比较差的情况下,一阶微分信号过零点频繁且无规则,会存在明显的漏判,因此得到的云分布图时间连续性较差。图 11(b) 中 VDE 由于需要选择背景噪声阈值平滑信号,但云底处和云顶处附近的信号和非云区域的差别不大,平滑后反演的云底和云顶位置实则属于云层内部,故该算法反演的云层厚度较小,而从云的时空分布图来看,反演结果具有良好的时间连续性。图 11(c) 中 SMS-SF 与图 11(d) 中 BRBS 反演的云层信息基本一致,直观上具有较为满意的准确度,但不可避免会出现漏检与误检的情况,如:在

01:00 时 5 km 附近的位置处 SMS-SF 检测的云层高度较站点结果有一定差距,而 BRBS 与站点结果较为接近;在 03:00 时 1 km 附近的位置处 BRBS 出现了误判的云层信息,其原因可以由图 9 得出,即该处具有和云区域相当的后向散射信号强度;与 BRBS 相比, SMS-SF 漏检的情况较多,而 BRBS 出现误检的情况较多。

为了定性分析不同算法反演的云层数据质量,以 SGP 站点的 VAP 中提供的云层信息为标准,将每个算法的反演结果与站点结果进行匹配,利用皮尔逊相关系数 (R) 和均方根误差 (E_{RMS}) 来表征 4 个算法的性能, R 和 E_{RMS} 的结果如表 2 所示。

云底高度和云顶高度的反演性能分别如图 12 和图 13 所示。在图 12 中, IDZC 与 VDE 反演的云底高度较实际情况总体偏高,而 SMS-SF 和 BRBS 反演的云

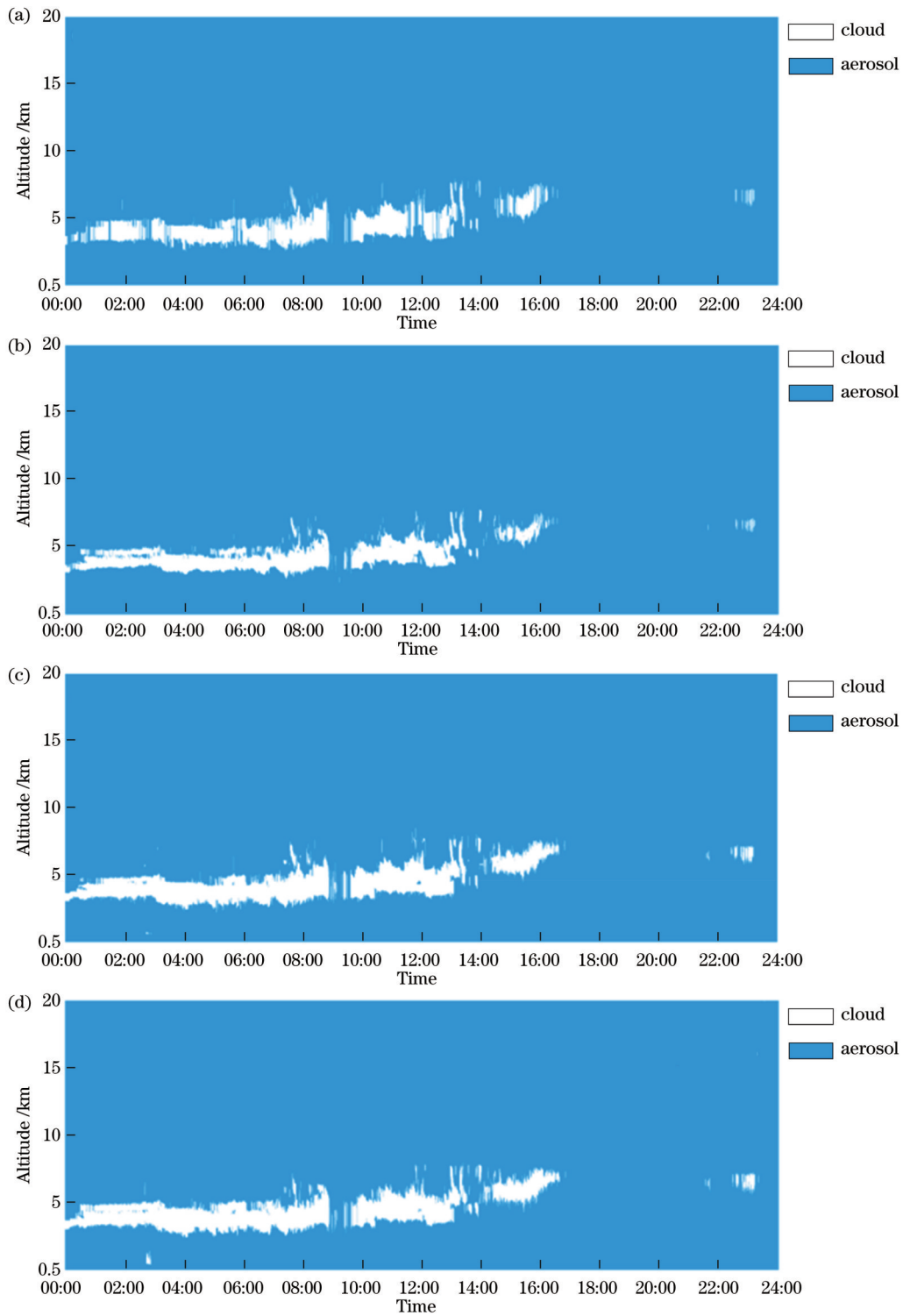


图 11 不同算法的云层检测结果比较。(a) IDZC; (b) VDE; (c) SMS-SF; (d) BRBS

Fig. 11 Comparison of cloud layer detection results obtained by different algorithms. (a) IDZC; (b) VDE; (c) SMS-SF; (d) BRBS

底高度总体具有良好的一致性。相较而言, BRBS 的云底相关系数与均方根误差表明所提算法能够达到更加接近实际情况的要求。图 13 中 4 种算法总体均表现出比实际情况偏低的现象, 这是由 MPL 发射的激光脉冲尚未穿过云层便衰减到背景噪声水平造成的, 也是反演中无法避免的情况。然而, 相对于其他算法, BRBS 的反演结果与实际情况相比, 集中程度最好, 相

关系数达到了 0.9 以上, 均方根误差也降到了 300 m 以下。

为了进一步验证所提算法的性能, 选取 2020 年 SGP 站点一年内通过质量保证的云 VAP, 去除误判的云层信息后进行误差分析。对于每个时间分辨率与空间分辨率所指示的位置: 若算法反演结果与站点结果都表示该处有云, 则视为检出; 若算法反演结果表示该

表 2 不同算法反演得到的相关系数和均方根误差

Table 2 Correlation coefficient and root-mean-square error obtained by different algorithms

Algorithm	R of cloud base height	E_{RMS} of cloud base height /m	R of cloud top height	E_{RMS} of cloud top height /m
IDZC	0.8647	221.3	0.8334	528.9
VDE	0.9464	177.4	0.8850	455.9
SMS-SF	0.9774	57.7	0.8904	327.4
BRBS	0.9836	43.8	0.9334	280.2

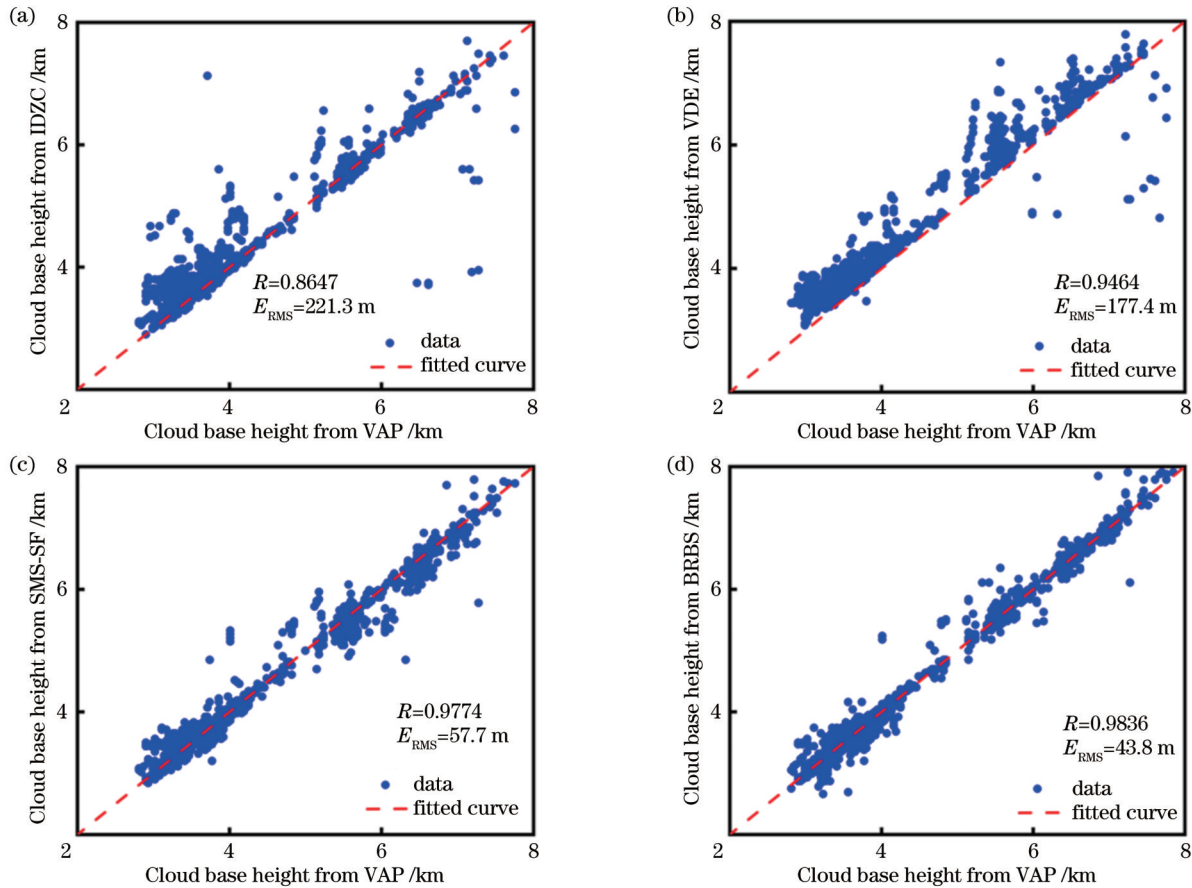


图 12 2020 年 1 月 3 日 00:00—24:00 时间段内不同算法对云底高度反演性能的比较。(a) IDZC;(b) VDE;(c) SMS-SF;(d) BRBS

Fig. 12 Comparison of cloud base height inversion performance of different algorithms from 00:00 to 24:00 on January 3, 2020.

(a) IDZC;(b) VDE;(c) SMS-SF;(d) BRBS

处有云而站点结果表示该处无云,则视为误检;若算法反演结果表示该处无云而站点结果表示此处有云,则视为漏检。分别对 IDZC、VDE、SMS-SF、BRBS 算法的检测结果进行统计,得到每个算法对于 SGP 站点 2020 年所有廓线中云层的检出率(R_D)、误检率(R_E)和漏检率(R_M),如图 14 所示。可以发现:IDZC 有接近 60% 的检出率,但受到实测的一阶微分信号过零点个数阈值的影响,在信噪比较低的条件下,存在较高的误判率;VDE 的检出率和误检率最低,漏检率最高,符合图 11(b)中检测的云层厚度较实际小而产生的情况;SMS-SF 与 BRBS 相比误判率较低,这是因为 BRBS 能够检测出更多的 0~3 km 高度范围内的气溶胶层,并不会将其误判为云,而 BRBS 对云顶的定义摆脱了传

统算法的问题,进而在一年的实验中有着最低的漏检率。综合分析得出,BRBS 能够达到最高的检出率,最低的漏检率,误检率也控制在 3% 左右,有着最佳的反演效果。

4 结 论

根据理想洁净大气条件下 MPL 后向散射信号的特征,结合实际探测场景对信号的影响,提出了一种 BRBS 方法以间接地反演云层垂直结构。所提算法从探测距离的上下限开始,筛选出不同的单调下降和单调上升序列,利用 Akima 插值重构和平均处理得到无云情况下的模拟信号。所提算法先结合自适应阈值与经验阈值提取云层区间,再以云峰处为界将区间分为

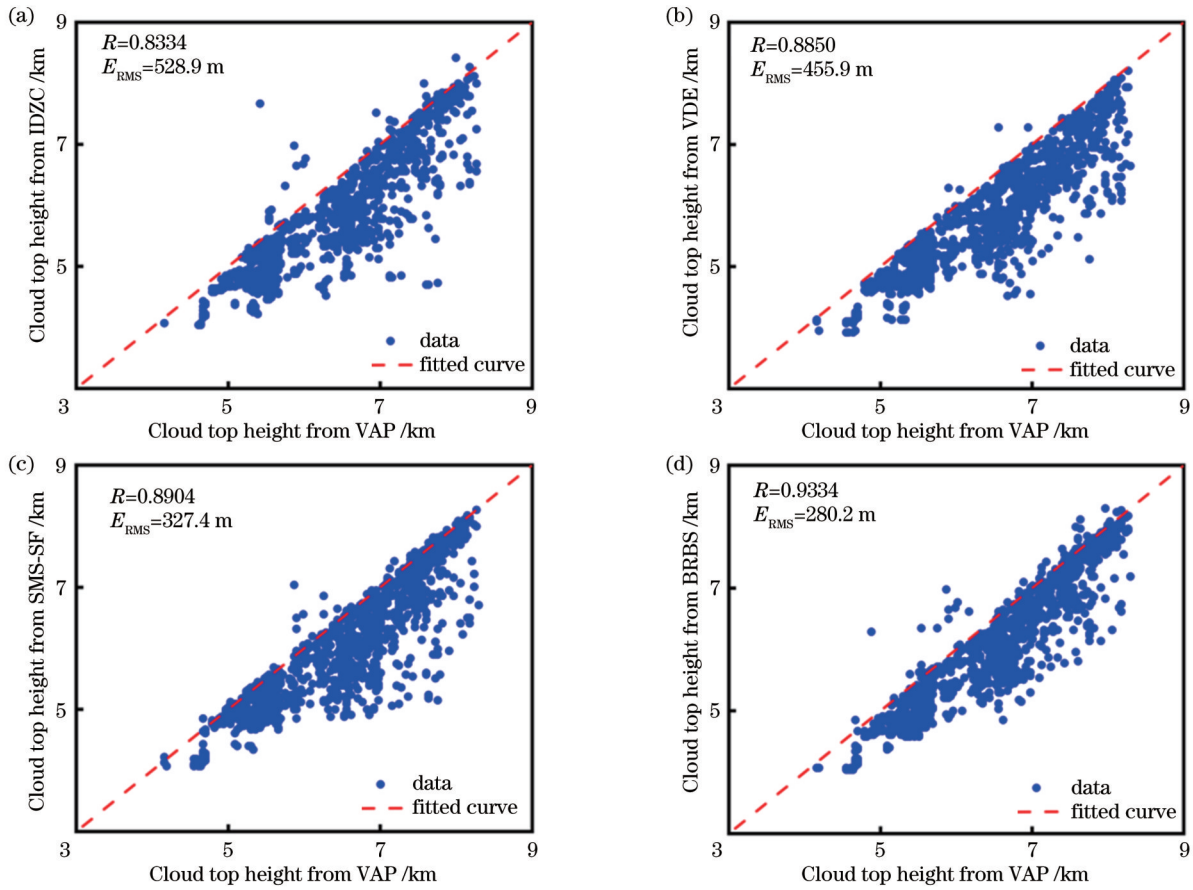


图 13 2020 年 1 月 3 日 00:00—24:00 时间段内不同算法对云顶高度反演性能的比较。(a) IDZC; (b) VDE; (c) SMS-SF; (d) BRBS
 Fig. 13 Comparison of cloud top height inversion performance of different algorithms from 00:00 to 24:00 on January 3, 2020.
 (a) IDZC; (b) VDE ;(c) SMS-SF; (d) BRBS

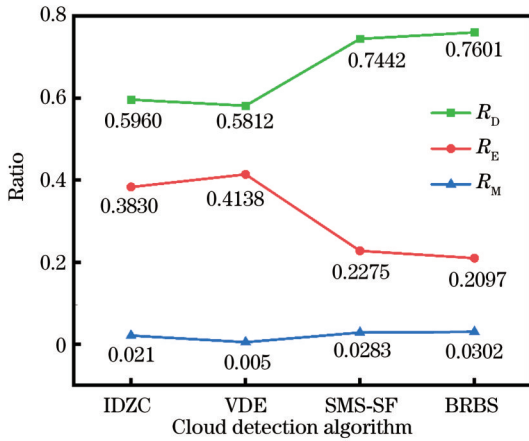


图 14 不同算法对 2020 年 SGP 站点数据反演结果的误差分析
 Fig. 14 Error analysis of different algorithms for data inversion results of SGP station in 2020

两段,在段内分别选取预处理信号中强度小于模拟信号的若干个元素,最后根据元素个数确定云底或云顶高度。利用 SGP 站点的 VAP 进行的反演和验证表明,与选择的传统算法相比,BRBS 能够获得更高的相关系数和更低的均方根误差,并具备更高的可靠性。在 SGP 站点一年的云层反演中,BRBS 具有最高的检

出率和最低的漏检率,并表现出了良好的反演性能以适应实际应用需求,为后续利用微脉冲激光雷达研究云的宏观和微观物理性质提供了保证。

参 考 文 献

[1] 张华,王菲,汪方,等. 全球气候变化中的云辐射反馈作用研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(3): 400-417.
 Zhang H, Wang F, Wang F, et al. Advances in cloud radiative feedbacks in global climate change[J]. Scientia Sinica: Terrae, 2022, 52(3): 400-417.

[2] Stapf J, Ehrlich A, Jäkel E, et al. Reassessment of shortwave surface cloud radiative forcing in the Arctic: consideration of surface-albedo-cloud interactions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(16): 9895-9914.

[3] 朱首正,卜令兵,刘继桥,等. 机载高光谱分辨率激光雷达探测大气气溶胶光学特性及污染研究[J]. 中国激光, 2021, 48(17): 1710003.
 Zhu S Z, Bu L B, Liu J Q, et al. Study on airborne high spectral resolution lidar detecting optical properties and pollution of atmospheric aerosol[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(17): 1710003.

[4] 常钰阳,孙斌,黄禅,等. 多角度偏振云检测及云参数

- 反演[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 1101002.
- Chang Y Y, Sun B, Huang S, et al. Cloud detection and parameter inversion using multi-directional polarimetric observations[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 1101002.
- [5] Lohmann U, Gasparini B. A cirrus cloud climate dial? [J]. *Science*, 2017, 357(6348): 248-249.
- [6] Thorsen T J, Fu Q, Comstock J M. Cloud effects on radiative heating rate profiles over Darwin using ARM and A-train radar/lidar observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(11): 5637-5654.
- [7] Qin D, Stocker T, Boschung J, et al. Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Computational Geometry*, 2013, 18(2): 95-123.
- [8] 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 S16 地基遥感观测技术与应用. 北京: 中国气象学会, 2015.
- Mo W Q, Yin S X. 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. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2015.
- [9] 王海涛, 王一琛, 王永强, 等. 基于 MS-UNet 的 Landsat 影像云检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(14): 1401002.
- Wang H T, Wang Y C, Wang Y Q, et al. Cloud detection of Landsat image based on MS-UNet[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(14): 1401002.
- [10] 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.
- Wang J, Cui T X, Wang Y, et al. Cloud detection for GF-5 visible-shortwave infrared advanced hyperspectral image[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928003.
- [11] 胡方超, 王振会, 张兵, 等. 遥感试验数据确定大气气溶胶类型的方法研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(2): 312.
- Hu F C, Wang Z H, Zhang B, et al. Study on method for determining atmospheric aerosol type using remote sensing experimental data[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(2): 312.
- [12] Nouri B, Kuhn P, Wilbert S, et al. Cloud height and tracking accuracy of three all sky imager systems for individual clouds[J]. *Solar Energy*, 2019, 177: 213-228.
- [13] Cheng Z J, Wei M, Zhu Y P, 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.
- [14] He J F, Liu W Q, Zhang Y J, et al. Atmosphere boundary layer height determination and observation from ceilometer measurements over Hefei during the total solar on July 22, 2009 eclipse[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(5): 439-442.
- [15] Zhang J Q, Li Z Q, Chen H B, et al. Validation of a radiosonde-based cloud layer detection method against a ground-based remote sensing method at multiple ARM sites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(2): 846-858.
- [16] 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.
- Di H G, Hua D X. Research progress of lidar in cloud detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600002.
- [17] 陈思成, 常建华, 刘振兴, 等. 基于聚类分析的双阈值激光雷达云层检测算法[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1110001.
- Chen S C, Chang J H, Liu Z X, et al. Double-threshold lidar cloud layer detection algorithm based on cluster analysis[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1110001.
- [18] 毛飞跃, 龚威, 李俊, 等. 基于改进微分零交叉法的米氏散射激光雷达云检测与参数反演[J]. *光学学报*, 2010, 30(11): 3097-3102.
- Mao F Y, Gong W, Li J, et al. Cloud detection and parameter retrieval based on improved differential zero-crossing method for Mie lidar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(11): 3097-3102.
- [19] 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.
- [20] Zhao C F, Wang Y Z, Wang Q Q, et al. A new cloud and aerosol layer detection method based on micropulse lidar measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(11): 6788-6802.
- [21] Mao F Y, Gong W, Zhu Z M. Simple multiscale algorithm for layer detection with lidar[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(36): 6591-6598.
- [22] 陈思颖, 王嘉奇, 陈和, 等. 改进简单多尺度法的激光雷达云检测[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(S2): 20200379.
- Chen S Y, Wang J Q, Chen H, et al. Lidar cloud detection based on improved simple multiscale method[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(S2): 20200379.
- [23] Wang Z E, Sassen K. Cloud type and microphysical property retrieval using multiple remote sensors[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2001, 40(10): 1665-1682.
- [24] Wang Z E, Sassen K. Cirrus cloud microphysical property retrieval using lidar and radar measurements. Part II: midlatitude cirrus microphysical and radiative properties[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2002, 59(14): 2291-2302.
- [25] 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.
- [26] Cromwell E, Flynn D. Lidar cloud detection with fully convolutional networks[C]//2019 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, January

- 7-11, 2019, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE Press, 2019: 619-627.
- [27] Flynn D, Sivaraman C, Comstock J, et al. Micropulse Lidar Cloud Mask (MPLCMASK) value-added product for the fast-switching polarized micropulse lidar technical report[R]. Oak Ridge: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2020.
- [28] 莫欣岳, 李欢, 张镭. 全球气候变化背景下气溶胶和云相互作用研究愈发重要[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 135-136.
- Mo X Y, Li H, Zhang L. Increasing importance of aerosol-cloud interaction studies in the context of global climate change[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(20): 135-136.
- [29] Xie Y H, Dai C H, Wang Y F, et al. Approximation of a melting plateau of large area HTFP cells used for spectral irradiance realization[J]. Applied Optics, 2021, 60(7): 1827-1833.