

1.57 μm IPDA 激光雷达云回波信号 CO_2 柱浓度测量研究

高雪洁^{1,2}, 刘继桥^{1,2,3*}, 樊纯璨^{1,3}, 陈橙^{1,2,3}, 杨巨鑫^{1,2,3}, 李世光¹, 谢缘¹, 竹孝鹏^{1,2}, 陈卫标^{1,2,3}

¹中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;

³中国科学院上海光学精密机械研究所空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800

摘要 路径积分差分吸收(IPDA)激光雷达可装载于飞机或卫星上探测大范围大气 CO_2 浓度, 具有全天时和探测精度高的优势。全球云的平均覆盖率达 60%, 因此在激光穿透大气射向地面的探测过程中, 除了地面和海洋回波信号, 还有很多云层回波信号。结合机载大气探测激光雷达(ACDL)信号采集特点, 针对复杂的云层回波信号, 提出一种基于中位数绝对偏差的离群值筛选法提取信号, 可分离多层云回波信号及云层与地面回波信号同时存在的信号。分析云信号的探测能力, 并利用云层回波信号积分值反演云上 CO_2 柱浓度, 结果与原位测量仪测量结果变化趋势一致, 二者偏差为 2.8 $\mu\text{L/L}$ 。

关键词 遥感; 差分吸收激光雷达; 二氧化碳柱浓度; 云回波信号; 差分吸收光学厚度; 大气遥感

中图分类号 P407.5

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230575

1 引言

国际社会普遍认为, 人类活动排放的 CO_2 等温室气体导致全球变暖, 引起海平面上升, 使生态系统遭受破坏, 加剧气候系统的不稳定性, 从而使得一些地区干旱、台风、沙尘暴等极端天气频繁发生^[1]。2016年, 《巴黎协定》设定了全球大气长期气温升温目标, 将全球平均增温控制在相对工业革命前 2 K 以内, 期望在 21 世纪末, 将气温增温限制在 1.5 K 以内。2020 年 9 月 22 日, 中国提出“碳达峰碳中和”目标, 即 CO_2 排放在 2030 年前达到峰值, 在 2060 年前实现碳中和^[2]。自工业革命以来, 化石燃料燃烧和土地利用变化等人为活动造成了前所未有的碳排放, 超过了陆地和海洋生态系统的碳汇能力, 全球大气中的 CO_2 浓度在过去的几十年里增加了约 30%, 到 2022 年 CO_2 浓度达到 418 $\mu\text{L/L}$ 。为了满足各国有效实施碳排放和管理的需求, 需要提高监测碳循环和了解碳动态的能力^[3]。

目前, 大气 CO_2 的监测手段可根据观测平台分为地基观测、机载观测和星载观测。主要的地面 CO_2 监测网络包括美国国家海洋和大气管理局地球系统研究实验室的全球温室气体参考网络(NOAA-ESRL)及总

碳柱观测网络(TCCON)。NOAA-ESRL 提供周更新的用玻璃瓶收集的 CO_2 样品的测量数据, 这些样本分布在全球各地 106 个地区, 主要集中在发达国家, 以及来自 8 座高塔和 4 个基线观测台的连续现场 CO_2 测量。TCCON 使用高分辨率傅里叶变换光谱仪(FTS)来测量 CO_2 柱平均干空气摩尔分数(X_{CO_2})。由于 TCCON 可以提供精确的测量值(优于 0.25%)^[4], 其所测量的 X_{CO_2} 已被广泛用于评估卫星反演的准确性。虽然地面观测网络可以提供精确的 CO_2 数据, 但建立和维护地面监测网络的成本高, 地面站点分布稀疏, 因此, 仅使用地面观测站来描述 CO_2 的全球分布是困难的。为了补充地面观测, 移动监测主要使用船舶和飞机将 CO_2 观测从陆地扩展到海洋, 从地表扩展到行星边界层以上。在过去的 10 年中, 有许多用于 CO_2 观测的卫星任务, 如 GOSAT-1/2^[5]、OCO-2/3^[6]、TanSat^[7]、GF-5 和 FY-3D^[3], 然而, 被动遥感存在一定的限制, 例如这些任务无法进行三维空间测量, 且受太阳光光源限制无法对夜间和高纬度地区进行较好的探测^[8]。主动遥感技术可以补充被动遥感技术的不足, 因而一些国家和地区也提出了利用激光雷达探测大气 CO_2 的方法, 例如欧洲航天局(ESA)提出了 A-SCOPE 计划, 美国航空航天局(NASA)提出了 ASCENDS 计划^[9]。NASA

收稿日期: 2023-03-01; 修回日期: 2023-03-23; 录用日期: 2023-04-11; 网络首发日期: 2023-04-21

基金项目: 中国科学院国际合作伙伴关系计划(18123KYSB20210013)、上海科技创新行动计划(22dz208700)、中国科学院战略性重点研究计划(XDA19090100)

通信作者: *liujqiao@siom.ac.cn

的戈达德航天中心开发出一种多波长路径积分差分吸收(IPDA)脉冲激光雷达,兰利研究中心开发了一种基于IPDA测量原理的强度调制连续波(IM-CW)激光吸收光谱仪(LAS),均进行了一系列地基和机载验证^[10-13]。中国于2015年开始计划发射搭载1.57 μm IPDA激光雷达的大气环境监测卫星(DQ-1),用于大气CO₂的主动探测,最终于2022年4月成功发射,在轨运行。此前,分别于2019年、2021年进行机载飞行试验验证,多个研究团队对数据进行了处理分析^[14-18],得到良好的结果, X_{CO_2} 的测量精度在1 μL/L以内。

IPDA激光雷达由于其主动探测的优势,除了获得来自地面的回波信号,还可以获得来自部分云层的回波信号。Mao^[19]和Ramanathan等^[20]针对机载云层回波信号进行了研究。但由于云层和地面不具有连续性,且云层回波信号的提取和处理更复杂,很多研究人员在对数据进行批量处理时,通常会剔除云的回波信号^[14-18]。全球60%以上的地区被云覆盖^[21],对于星载IPDA激光雷达来说,如果能够有效地利用云回波信号数据,将更有利于全球CO₂的源汇分析。为此,本文提出一种IPDA激光雷达的云信号提取方法,该方法能够有效地从具有多个回波信号的数据中分离出云回波信号。利用2019年飞行试验数据,分析云信号探测能力,针对其中的云回波信号,研究有效的数据处理方法,并利用本文研究的CO₂柱浓度反演算法计算云上CO₂柱线浓度,将结果与原位测量仪的数据进行对比分析。

2 IPDA激光雷达CO₂柱浓度探测原理

IPDA激光雷达利用待测痕量气体对激光脉冲吸收性质的不同,交替发射两束激光:一束称为online,位于CO₂吸收线较强的位置;另一束称为offline,位于CO₂吸收线较弱的位置。由于两束激光的波长非常接近,在穿过大气时对于除了CO₂以外的物质,大气透过率几乎相同,因此可以通过比较这两个波长激光的回波信号来提取大气CO₂浓度的信息。

根据激光雷达方程,由目标反射的回波信号功率可以表示为:

$$P_e(\lambda, R_A) = \eta_r \cdot O_r \cdot \frac{A}{(R_A - R_G)^2} \cdot \frac{E(\lambda)}{\Delta t(\lambda)}$$

$$\rho \cdot \exp\left\{-[\tau_{\text{CO}_2}(\lambda, R) + \tau_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda, R) + \tau_a(\lambda, R)]\right\}, \quad (1)$$

式中: P_e 为回波信号功率; λ 为激光出射波长; η_r 为系统的光学效率; O_r 为重叠因子; A 为望远镜接收面积; R_A 为载荷平台的海拔高度; R_G 为目标的海拔高度; E 为激光发射能量; Δt 为回波信号的脉冲宽度; ρ 为目标反射率; τ_{CO_2} 为大气CO₂分子的双程光学厚度; $\tau_{\text{H}_2\text{O}}$ 为大气H₂O分子的双程光学厚度; τ_a 为大气分子和气溶胶的双程光学厚度; R 是载荷平台与目标间的距离。机

载IPDA激光雷达探测示意图如图1所示。

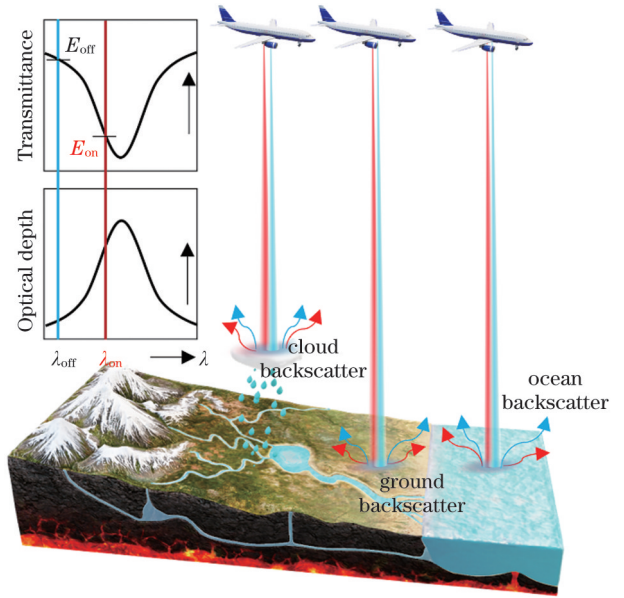


图1 机载IPDA激光雷达探测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of airborne IPDA lidar detection

由于online和offline波长非常接近,可以忽略大气中分子和气溶胶光学厚度差异的影响,CO₂的单体差分吸收光学厚度 $\Delta\tau_{\text{CO}_2}$ 可表示为

$$\Delta\tau_{\text{CO}_2} = \int_{R_G}^{R_A} \Delta\sigma_{\text{CO}_2}[p(r), T(r)] \cdot N_{\text{CO}_2}(r) dr = \frac{1}{2} \ln\left(\frac{P_{\text{off}} P_{\text{on}_0}}{P_{\text{on}} P_{\text{off}_0}}\right), \quad (2)$$

式中: $\Delta\tau_{\text{CO}_2}$ 是差分吸收截面,随压强 p 和温度 T 变化, p 和 T 在不同高度 r 下的数值不同; N_{CO_2} 是CO₂的分子数密度; P_{on} 和 P_{off} 分别代表online和offline波长的回波信号功率; $P_{\text{on}_0} = E_{\text{on}}/\Delta t_{\text{on}}$ 和 $P_{\text{off}_0} = E_{\text{off}}/\Delta t_{\text{off}}$ 分别代表online和offline波长的监测信号功率。

CO₂干空气混合比 X_{CO_2} 为:

$$X_{\text{CO}_2} = N_{\text{CO}_2}(r)/N_{\text{dry}}(r), \quad (3)$$

式中: N_{dry} 是干空气分子数密度。

结合式(2), X_{CO_2} 可以写为

$$X_{\text{CO}_2} = \frac{\Delta\tau_{\text{CO}_2}}{F_{\text{IW}}}, \quad (4)$$

$$F_{\text{IW}} = \int_{R_G}^{R_A} \frac{N_A \cdot p(r) \Delta\tau_{\text{CO}_2}[p(r), T(r)]}{R_i \cdot T(r) \cdot [1 + X_{\text{H}_2\text{O}}(r)]} dr, \quad (5)$$

式中: F_{IW} 为积分权重函数; N_A 为阿伏伽德罗常数; R_i 为理想气体常数; $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 为H₂O干空气混合比,

$$X_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d \times 29}{18 \times 1000}, \quad (6)$$

$$d = \frac{622 \cdot H_R \cdot p_s}{p - H_R \cdot p_s}, \quad (7)$$

$$p_s = 610.78 \cdot \exp\left[17.269 \times \frac{T - 273.16}{T - 35.86}\right], \quad (8)$$

式中： d 为含湿量(g/kg)； H_R 为相对湿度(%)； p_s 为水蒸气分压力(Pa)，这里计算 p_s 的式(8)为经验公式； p 为大气压力(Pa)； T 为大气温度(°C)。

3 IPDA 激光雷达系统及机载飞行试验装置

IPDA 激光雷达系统由激光发射系统、激光接收

系统、环境控制系统、仪器控制系统四个部分组成。激光发射系统由种子激光器、稳频系统、脉冲激光器和中继光学元件组成；激光接收系统由能量监测光路、望远镜、探测器和中继光学元件组成；环境控制系统由温度控制仪器和水冷却器组成；仪器控制系统由数字转换器、电子控制设备和计算机组成。原理部分在 Zhu 等^[15]的文章中详述。IPDA 激光雷达系统示意图如图 2 所示。

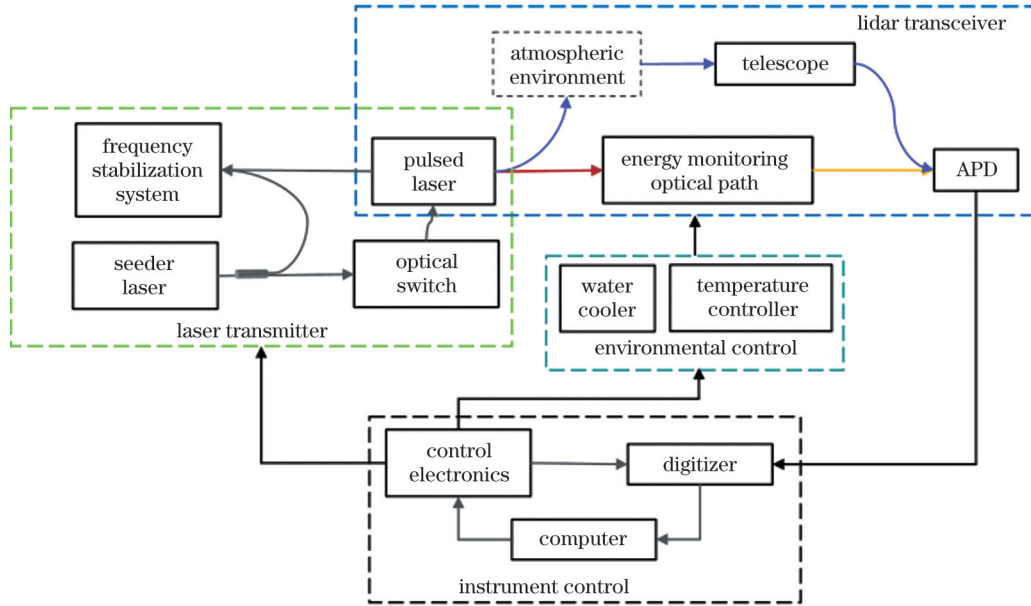


图 2 IPDA 激光雷达系统示意图

Fig. 2 Schematic of IPDA lidar system

接收系统元件组成及光路图如图 3 所示，种子激光器产生 1572.024 nm 和 1572.085 nm 两个稳定波长用作 online 和 offline 的种子激光。采用重复频率为 30 Hz 的光开关实现二者的切换。分光比为 1:9 的分束镜 BSM1 将脉冲激光器发射的激光分为两部分，一部分 10% 能量的激光用于能量监测，通过带通滤波器 BF1 进入积分球 IS 后，耦合进纤芯直径为 300 μm 的多

模光纤，然后经过准直透镜 CL1、衰减片 BA、反射镜 RM1、分束镜 BSM2、带通滤波器 BF2、聚焦透镜 FL，最终聚焦在 1572 nm 铟镓砷雪崩光电二极管(InGaAs APD)探测器上。另一部分 90% 能量的激光进入大气，被硬目标反射，回波信号光由直径为 150 mm 的卡塞格林望远镜收集，由反射镜 RM2 反射通过光阑 ID 抑制杂散光，然后经过准直透镜 CL2，在分束镜 BSM2 处与监测光合束后通过带通滤波器 BF2，由聚焦透镜 FL 聚焦后被同一探测器接收。

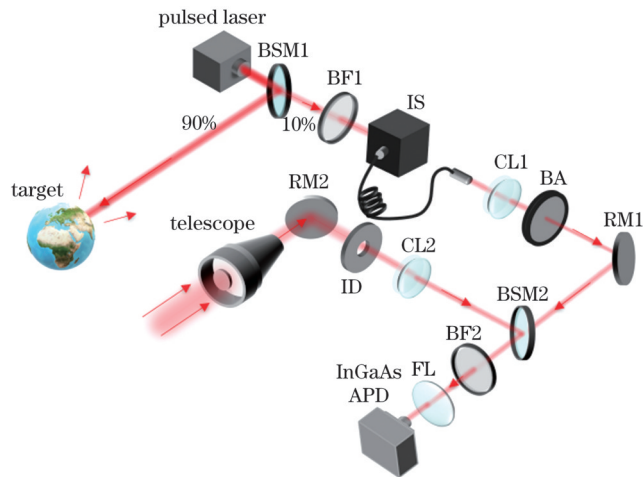


图 3 IPDA 激光雷达接收系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of IPDA lidar transceiver system

2019 年 3 月，在河北秦皇岛地区开展了机载飞行观测试验，飞行具体细节及仪器原理介绍 Wang 等^[18]有详细说明。搭载在飞机上的大气探测激光雷达(ACDL)有 532、1064、1572 nm 三个工作波长，其中 1572 nm 通道用于通过 IPDA 技术测量大气 CO₂ 柱浓度，532 nm 和 1064 nm 通道用于通过高光谱分辨率激光雷达(HSRL)技术测量云和气溶胶^[22]。系统的主要参数见表 1，辅助对比设备主要是 LGR-UGGA 原位 CO₂ 浓度测量仪以及可见光相机(记录地形地貌信息)。

机载相机记录了飞行轨迹下的不同地貌，在被云层挡住的部分可以看出云的薄厚。图 4 所示为飞行过程中拍摄到的云层图片。

表 1 机载 1.57 μm 双脉冲 IPDA 激光雷达主要系统参数
Table 1 Main system parameters of airborne 1.57 μm double-pulse IPDA lidar

| Parameter | Value |
|---|-------------------|
| Wavelength (on/off) /nm | 1572.024/1572.085 |
| Pulse energy (on/off) /mJ | 6/3 |
| Pulse width (on/off) /ns | 17 |
| Pulse separation / μs | 200 |
| Optical frequency /Hz | 30 |
| Emission optical efficiency | 0.8955 |
| Receiver optical efficiency | 0.3797 |
| Telescope diameter /mm | 150 |
| Data acquisition rate /($\text{MSa}\cdot\text{s}^{-1}$) | 125 |
| Vertical sampling resolution /m | 1.2 |
| Horizontal footprint resolution /m | 3.7 |

4 机载数据处理及分析

4.1 数据处理流程

机载 IPDA 激光雷达的数据处理流程如图 5 所示。首先对原始数据进行预处理,提取数据中的辅助信息,

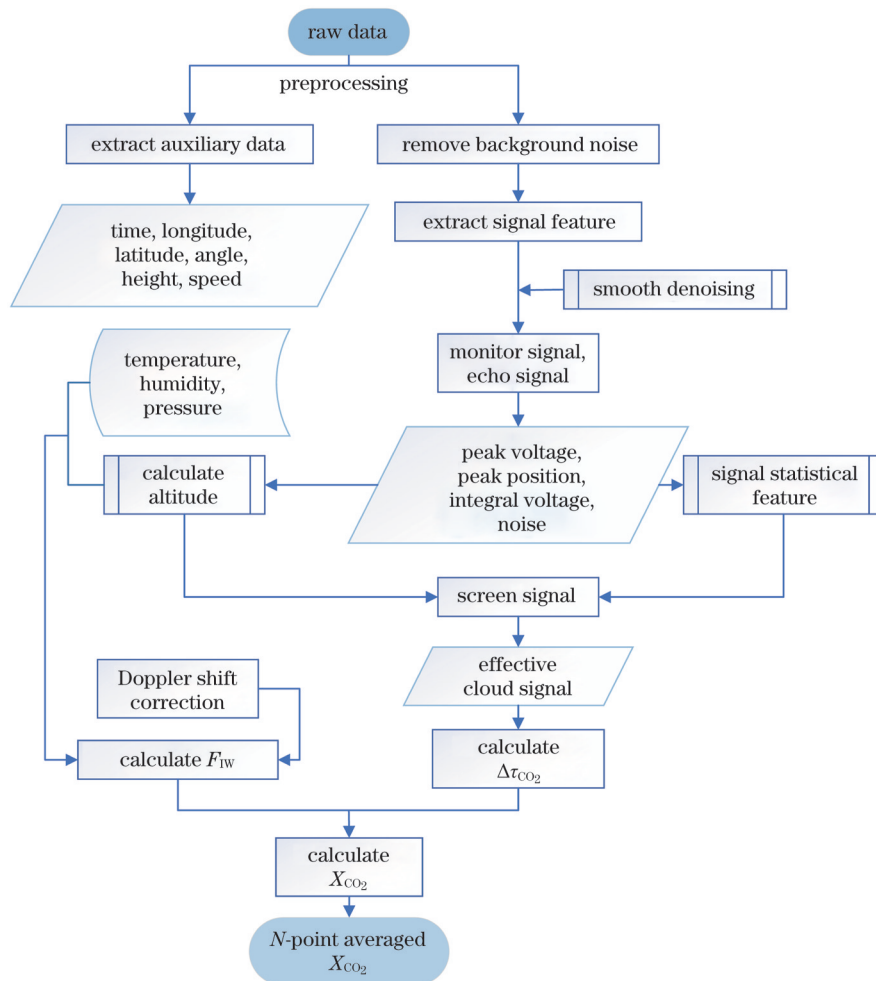


图 5 数据处理流程图

Fig. 5 Data processing flow chart

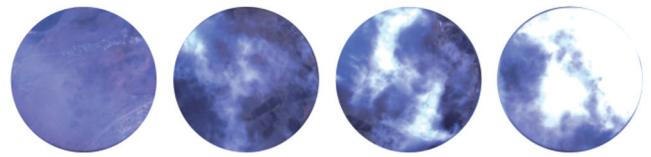


图 4 机载相机拍摄云层图片。从左至右云量依次增多, 云层变厚

Fig. 4 Images of clouds taken by onboard camera. From left to right, it is seen that cloud cover increases successively and clouds become thicker

包括时间、载荷偏航角、俯仰角、横滚角、经度、纬度、飞行高度、飞行速度,同时去除本底噪声。由于随着探测距离的增大,激光雷达回波信号强度逐渐衰减,在探测过程中,距离较远处的回波信号会受到噪声影响,因此在提取信号特征之前,还需对数据进行平滑去噪^[23],利用去噪后的数据提取监测信号和回波信号的峰值电压、峰值位置、脉冲点积分范围及积分值。利用高度阈值和信号统计特征筛选出有效的云信号,并计算 $\Delta\tau_{\text{CO}_2}$ 。利用温湿度数据和积分高度计算 F_{1w} ,最后根据式(4)计算 X_{CO_2} 。

载荷与硬目标的距离 R 由监测信号和回波信号的峰值位置之差计算得出:

$$R = 0.5 \times (R_{\text{on}} + R_{\text{off}}), \quad (9)$$

$$R_{\text{on/off}} = \frac{0.5c}{125 \times 10^6} (I_{\text{on/off}} - I_{\text{on}_0/\text{off}_0} + I_0), \quad (10)$$

式中: R 为载荷到硬目标的距离(m); R_{on} 和 R_{off} 分别为用 online 脉冲和 offline 脉冲计算的载荷到硬目标质心的距离(m); c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s; $I_{\text{on/off}}$ 为 online/offline 回波信号点位置; $I_{\text{on}_0/\text{off}_0}$ 为 online/offline 监测信号点位置; I_0 为延时校正点数。

在计算目标高度时, 考虑到飞机在飞行时姿态位置会发生变化, 需要对式(9)中的 R 进行校正, 以获取硬目标的对地高程。图 6 所示为机载激光雷达目标高度校正示意图, 硬目标的高程是通过当地地理坐标系 z 轴方向的飞行高度减去校正后的距离得到的。飞机飞行高度和姿态角由惯导系统获取。定义 R_T 为目标海拔高度:

$$R_T = R_H - R \cdot \cos \gamma_P \cdot \cos \gamma_R, \quad (11)$$

式中: R_H 为飞机飞行高度; γ_P 为俯仰角; γ_R 为滚转角。

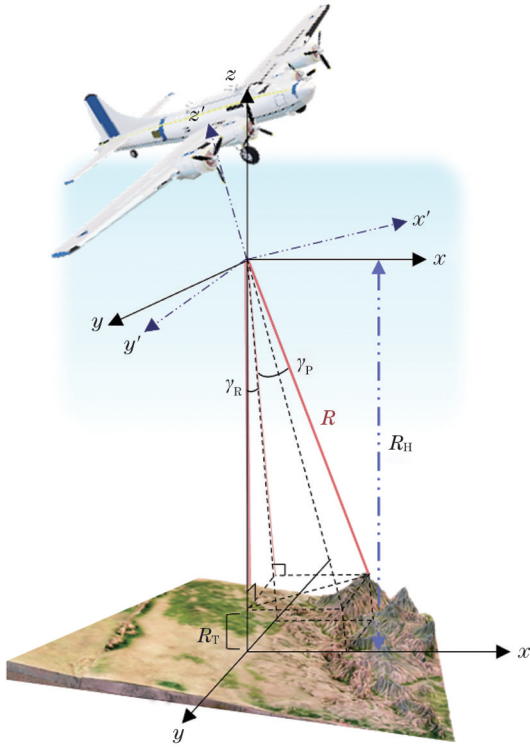


图 6 机载激光雷达目标高度校正示意图

Fig. 6 Schematic diagram of target altitude calibration with airborne lidar

4.2 云回波信号提取方法

在已有的 IPDA 激光雷达信号处理算法研究中, 通常采用最大值法提取信号, 针对弱信号采用匹配滤波法^[15]。这些方法适合仅有地面、海面或单层云反射信号的规整脉冲波形的批量获取, 但对于一组发射信号有多层云及云层和地面混合的回波信号的情况来说, 最大值法及匹配滤波法只能找到一个硬目标反射的回波信号, 不能提取出全部的回波信号,

造成有用信号的缺失或 online 和 offline 信号不匹配问题。

图 7 所示为机载 IPDA 激光雷达接收信号, 图中列出了可能接收到的回波信号类型。利用式(9)~式(11)对探测目标的海拔高度进行计算, 在机载的惯导系统数据中找到探测该目标时飞机所在位置的经纬度, 对数字高程模型(DEM)进行插值, 得到对应经纬度的地表海拔高度, 将目标的海拔高度与地表海拔高度做差运算, 本文将差值在 100 m 以上对应的目标归为云回波信号, 将差值在 10 m 以下对应的目标归为地面回波信号。通过对机载激光雷达测量的云回波信号脉冲宽度的长期监测, 可分辨的单层云脉冲宽度对应的平均采样点数约 100 个, 相应的高度为 120 m。当两个回波信号来自同一对发射脉冲时, 本文将两个脉冲峰值位置距离小于 120 m 的信号视为同一层云的信号。图 7(a)为单层多峰云回波信号, 混叠信号中的两个脉冲峰值距离之差约 28 m, 在回波上显示信号的混叠; 图 7(b)为双层云回波信号, 两层云距离大约为 150 m; 图 7(c)为单层云回波信号, 云高约 4 km; 图 7(d)为地面回波信号, 海拔高度约 450 m, 为山地的回波信号; 图 7(e)为云和地面回波信号同时存在的接收信号, 云高约 4 km, 山地海拔高度约为 500 m。

云回波信号波形复杂, 针对以上提到的所有情况回波信号的提取, 提出基于中位数绝对偏差的离群值筛选法。一组数据中, 随机噪声遵循高斯分布^[15], 信号点在服从高斯分布的随机噪声数据中可认为是其中的离群值。离群值是指与中位数相差超过三倍于经过换算的中位数绝对偏差的值。对于数据集 X_1, X_2, \dots, X_n , M_{mad} 定义为数据点到中位数的绝对偏差的中位数:

$$M_{\text{mad}} = M_{\text{median}}[X_i - M_{\text{median}}(X_i)], i = 1, 2, \dots, n, \quad (12)$$

式中: $M_{\text{median}}(X)$ 表示数据的中位数; X_i 表示第 i 个数据点。

为了将 M_{mad} 当作标准差 σ 估计的一种一致估计量, 使用 $\sigma = k \cdot M_{\text{mad}}$, 其中 k 为比例因子常量, 对于正态分布数据, $k \approx 1.4826$ 。则信号点满足

$$\begin{cases} X_i > M_{\text{mad}} + 3 \cdot \sigma \\ X_i < M_{\text{mad}} - 3 \cdot \sigma \end{cases} \quad (13)$$

探测器输出的是负信号, 为了减少计算量, 选取数据中的所有极小值点作为待筛选数据集, 筛选出的离群点则是信号的峰值点。如图 8(a)所示, 图中接收信号为截取的存在回波信号的部分, 从左到右依次为预触发信号段、能量监测信号段、回波信号段。可以看到, 在回波信号段出现两个回波信号, 利用基于中位数绝对偏差的离群值筛选法提取信号, 可以定位到监测信号和两个回波信号的峰值位置。在确定脉冲信号积分范围时, 需保证相对应的 online 和 offline 信号积分窗长度一致, 且峰值位置及峰值前后所取信号点数一致, 如图 8(b)所示。

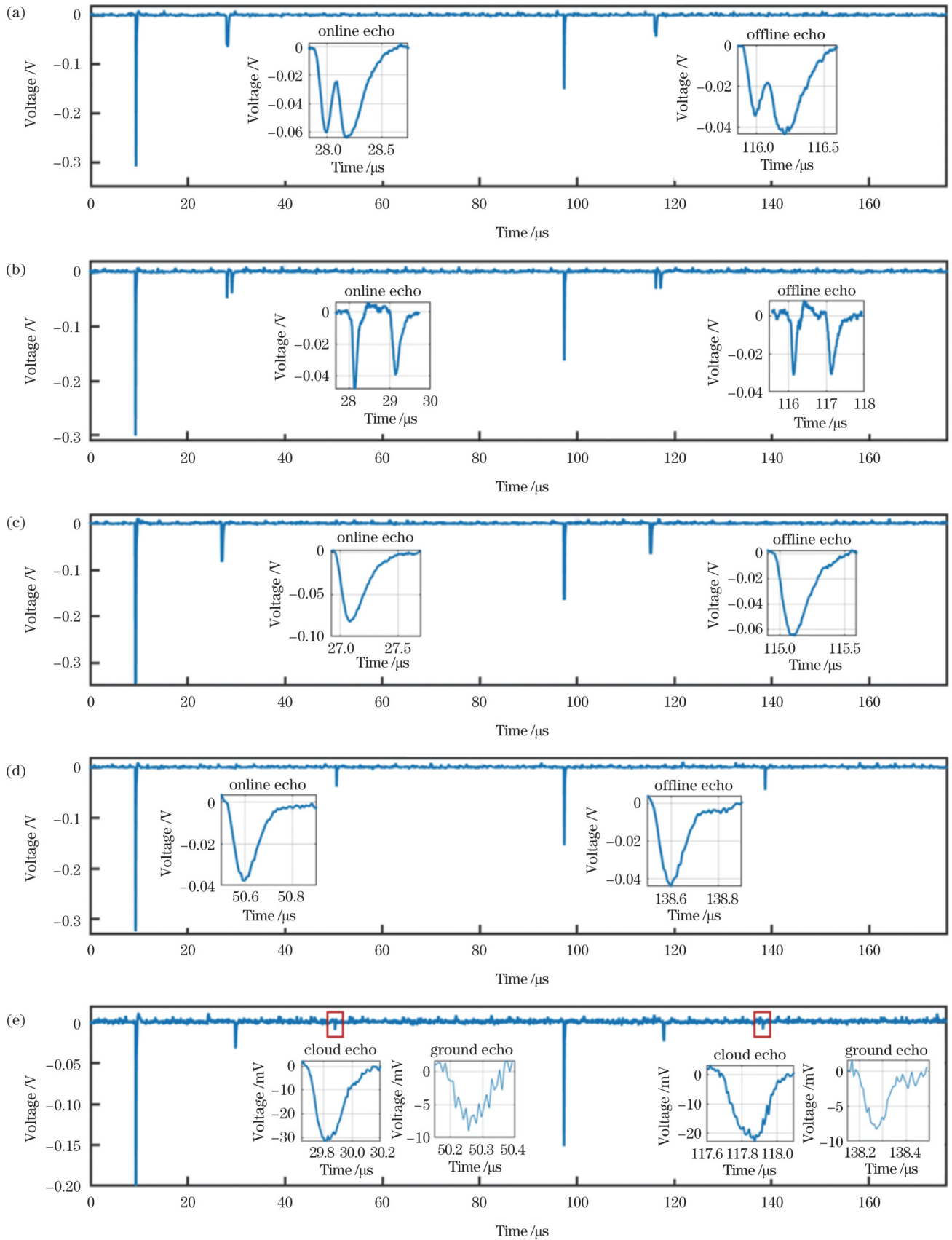


图7 IPDA激光雷达接收信号。(a)混叠的云回波信号;(b)双层云回波信号;(c)单层云回波信号;(d)地面回波信号;(e)云及地面回波信号

Fig. 7 Signals received by IPDA lidar. (a) Aliasing cloud echo signal; (b) two-layer cloud echo signal; (c) single-layer cloud echo signal; (d) ground echo signal; (e) cloud and ground echo signals

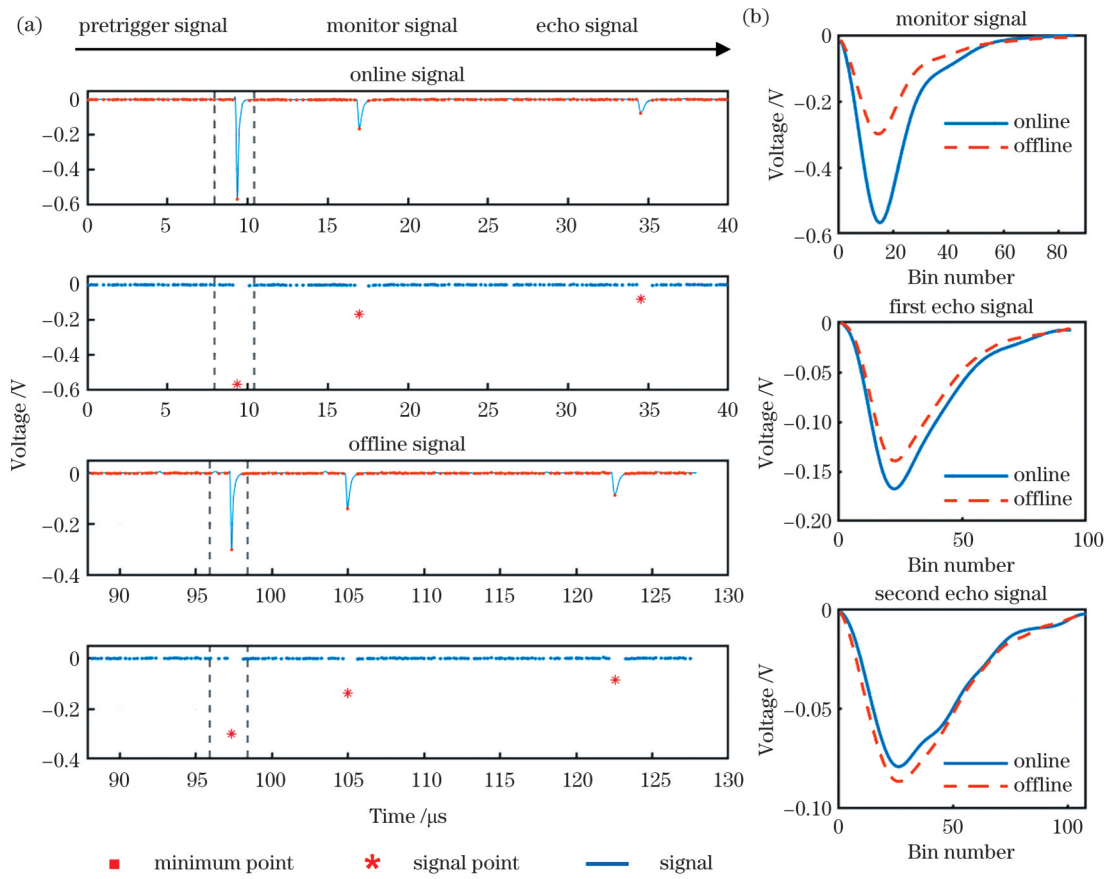


图 8 云信号提取方法示意图。(a) 回波信号提取示意图; (b) 提取积分范围一致的信号示意图

Fig. 8 Schematic diagram of cloud signal extraction method. (a) Diagrams of echo signal extraction; (b) diagrams of extracted signal with same integral range

利用式(11)对图8中举例的云信号进行高度校正,得到校正后不同高度的后向散射剖面电压幅值,如图9(a)所示;图9(b)为第一个回波信号在校正前后不

同高度的后向散射电压幅值的对比;图9(c)为第二个回波信号在校正前后不同高度的后向散射电压幅值的对比。校正后的高度比未进行校正的高度大。在

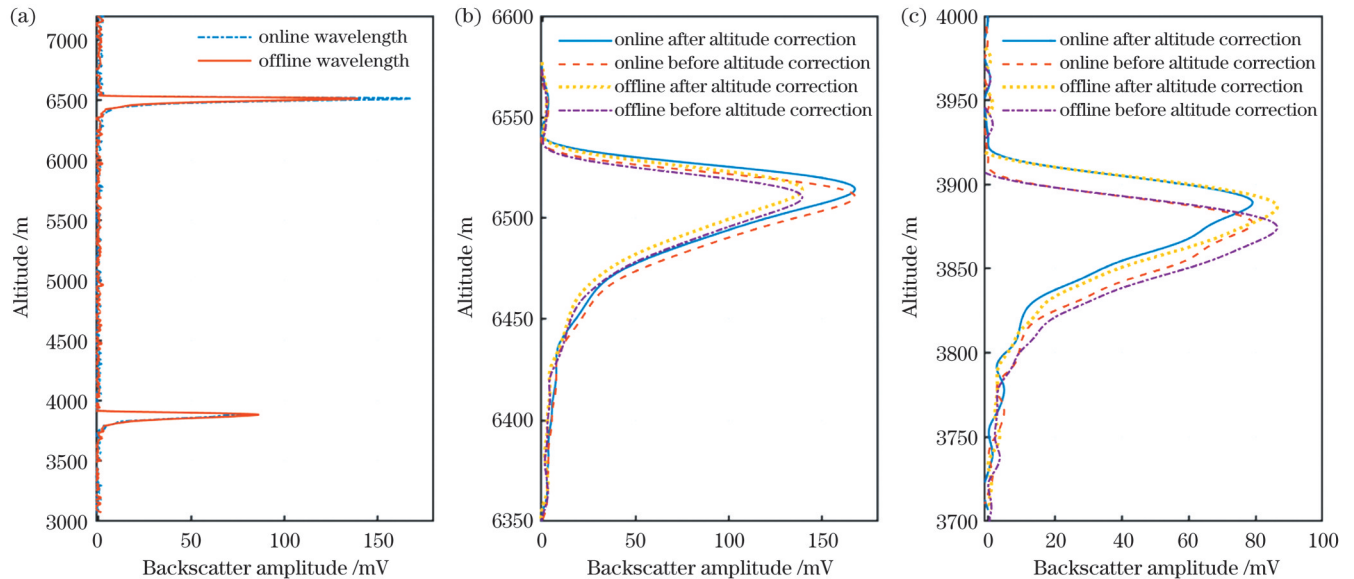


图 9 随高度变化的后向散射剖面电压值。(a) 高度校正后的回波信号; (b) 第一个回波信号在校正前后不同高度的后向散射电压幅值对比; (c) 第二个回波信号在校正前后不同高度的后向散射电压幅值对比

Fig. 9 Voltage values of backscatter profile varying with height. (a) Echo signal after altitude correction; (b) comparison of first echo signal before and after altitude correction; (c) comparison of second echo signal before and after altitude correction

3888.4 m 和 6513.9 m 高度出现回波信号,根据高度可判断这两个回波信号为云层回波信号。由于脉冲激光指向是由飞机到地面,且 online 波长激光出射能量大于 offline 波长的对应值,因此在高处云层,online 波长的回波信号电压幅值大于 offline 波长的对应值;由于大气中 CO₂ 对 online 波长的吸收比对 offline 波长的大,因此在低处云层,offline 波长的回波信号电压幅值大于 online 波长的对应值。可以利用 offline 波长激光能量衰减受大气影响较小这一特性,计算云层的表面反射率,结合高度来判断云的类型。

4.3 云的探测及 CO₂ 柱浓度反演

分别采用最小值法及基于中位数绝对偏差的离散值筛选法,对 2019 年 3 月 14 日飞机飞行路径下的回波信号进行提取,最小值法用 MIN 代表,基于中位数绝对偏差的离散值筛选法用 MAD 代表。图 10 给出了 IPDA 激光雷达在两种方法处理后随高度分辨的信号提取。数据在没有对时间和高度进行平均的情况下,使用 MAD 得到的云回波信号数量是使用 MIN 得到的 1.9 倍,使用 MAD 得到的地面回波信号数量是使用 MIN 得到的 1.03 倍,并且可以得到同一路径下多层云的回波信号以及云和地面的回波信号。在整个飞行路径中,分别在北京时间 10:57—11:16、11:33—12:05、12:42—12:44、13:01—13:04 出现了云层,均可与机载相机拍摄的云图片对应,云的高度基本在 3~4 km,

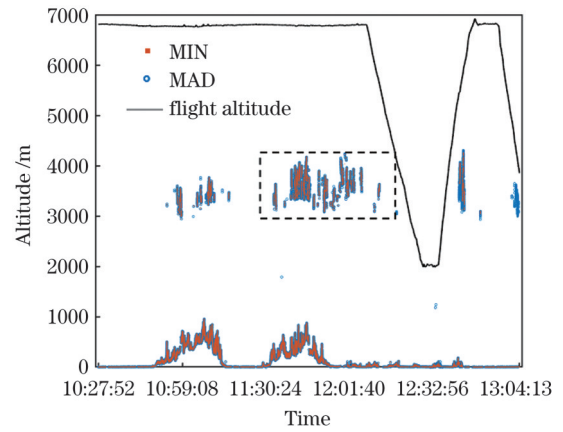


图 10 2019 年 3 月 14 日 IPDA 激光雷达测量结果汇总图
Fig. 10 Summary plot of IPDA lidar measurements on 2019-03-14

山区、居民区上空云量多于海面上空。

图 10 中虚线框内部分云信号在飞机起飞 1 h 后采集。图 11 为该段云信号的监测信号能量与回波信号能量变化趋势,online 监测信号能量均值的绝对值为 0.312 V,标准差为 0.024 V;offline 监测信号能量均值的绝对值为 0.156 V,标准差为 0.011 V。该段信号探测于飞机平飞状态下,其间经过山区、居民区、海洋区,因此选取图 10 中虚线框内的云信号进行 X_{CO₂} 反演。

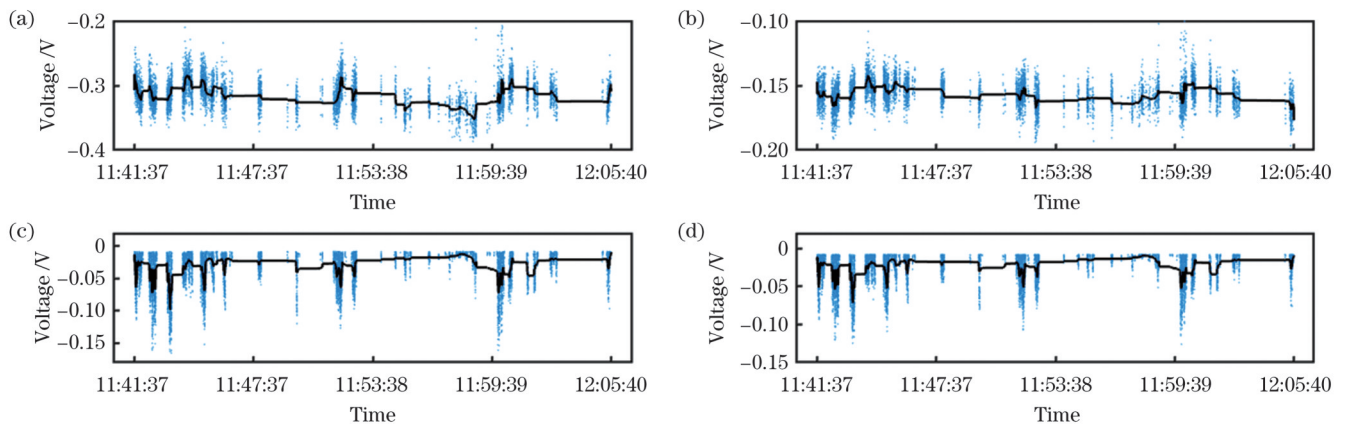


图 11 云信号的监测信号能量与回波信号能量变化趋势。(a)online 监测信号;(b)offline 监测信号;(c)online 回波信号;(d)offline 回波信号

Fig. 11 Trends of monitor signal energy and echo signal energy of cloud signal. (a) Online monitor signal; (b) offline monitor signal; (c) online echo signal; (d) offline echo signal

为了比较云层的表面反射率,引入相对反射率的概念:

$$r_s = \frac{E_r}{E_{tr}} \quad (14)$$

式中: E_r 为回波信号脉冲能量; E_{tr} 为激光发射能量。

由于大气对 offline 波长的吸收小,offline 在整个路径上与大气成分相互作用造成的能量衰减小,可以利用 offline 波长的监测信号能量与回波信号能量计算云表面的相对反射率。对时间进行 10 s 平均,高度上每

50 m 进行划分,得到相对反射率的时间和高度分布网格图,如图 12 所示。试验时,山区上空云层的相对反射率平均值为 0.21,居民区上空云层相对反射率平均值为 0.15,海面上空云层相对反射率平均值为 0.11。

将时间-高度网格区域内的信号点数进行统计,得到云密度图,如图 13 所示,颜色越深表示该网格内的云回波信号点数越多,云量越大。激光雷达向大气发射出激光,被目标反射,由探测器接收后向散射信号。云层厚时对应的回波信号强度大,相对反射率大,同时

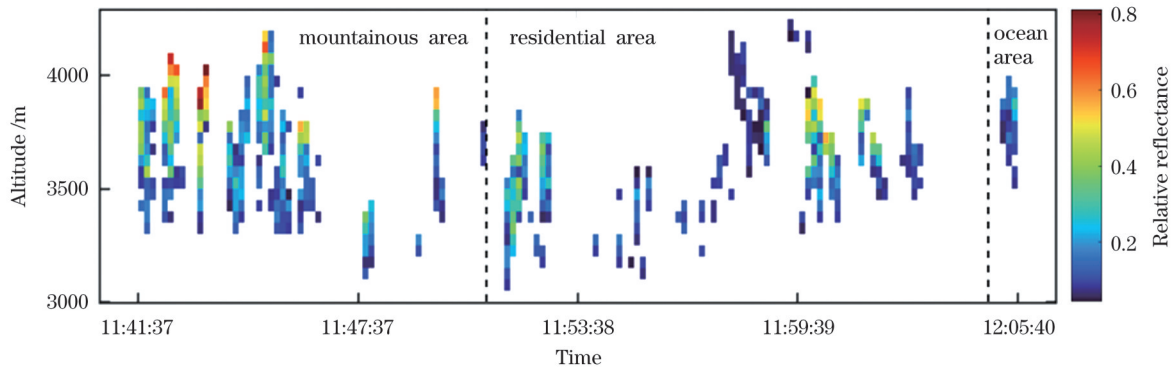


图 12 云的相对反射率示意图
Fig. 12 Diagram of relative reflectance of clouds

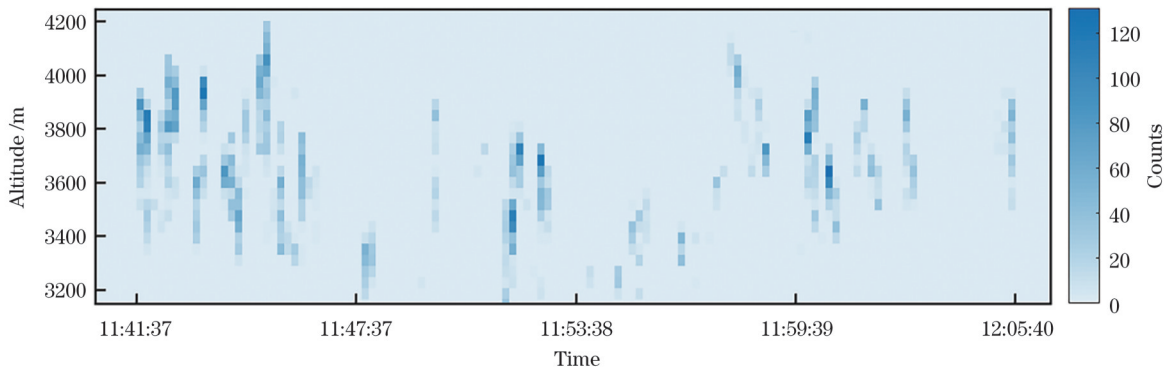


图 13 云密度分布图
Fig. 13 Diagram of cloud density distribution

会伴随着多次散射,探测器接收到多层云反射的回波信号,在数据段上表现为不规则多子波回波;云层薄,激光会穿过云层到达地面(或较低云层),一部分能量由云层反射,另一部分能量由地面(或较低云层)反射,

相对反射率小,在数据段上表现为两个分立的回波。

以 11:41:37 开始出现的云层为例,在机载相机拍摄的照片中找到对应位置,如图 14 所示,在连续的有云图片中每 6 s 取一张照片,可以看到云量在飞机飞行

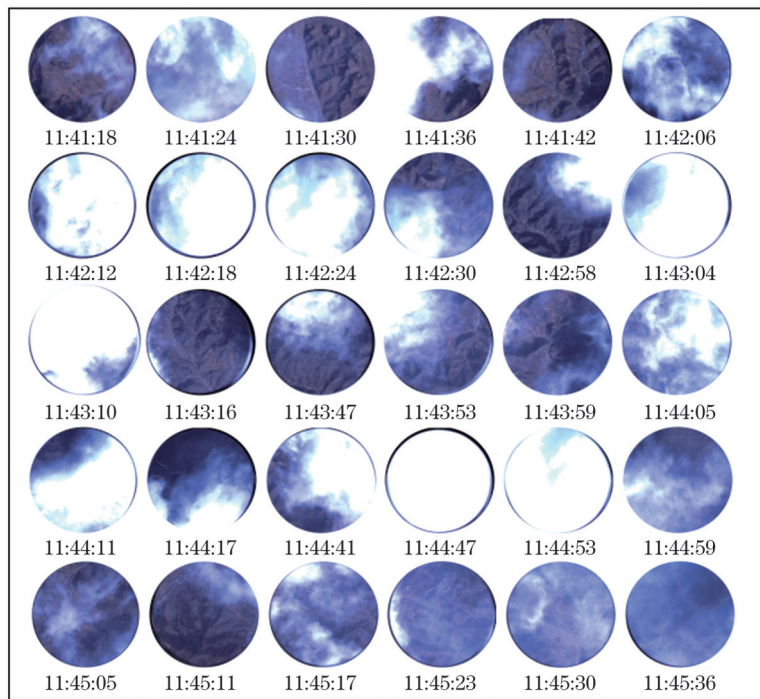


图 14 机载相机拍摄的云量变化图
Fig. 14 Images of cloud cover change captured by onboard camera

轨迹下的变化,薄云的云顶在 3400 m 左右,厚云的云顶在 3800 m 左右。

对于云回波信号,采取脉冲积分法计算差分吸收光学厚度,根据高度校正方法对差分吸收光学厚度在激光路径上进行校正,式(2)的 $\Delta\tau_{\text{CO}_2}$ 可修正为

$$\Delta\tau_{\text{CO}_2} = \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_{\text{off}})_i \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\text{off}}^0)_i}{\sum_{i=1}^n (P_{\text{on}})_i \cdot \sum_{i=1}^n (P_{\text{on}}^0)_i} \right] \cdot \cos\gamma_p \cdot \cos\gamma_R, \quad (15)$$

式中: $(P_{\text{on}})_i$ 和 $(P_{\text{off}})_i$ 表示 online 和 offline 回波信号脉冲上第 i 点的电压值; $(P_{\text{on}}^0)_i$ 和 $(P_{\text{off}}^0)_i$ 表示 online 和 offline 监测信号脉冲上第 i 点的电压值。

在飞机飞行过程中,飞行速度的变化会引入多普勒频移,进而对权重函数产生影响。根据高度校正方法对积分权重函数的积分路径进行校正,式(5)中的 F_{IW} 可以修正为

$$F_{\text{IW}} = \int_{R_r}^{R_A} \frac{N_A \cdot \rho(r) \cdot [\sigma_r(\nu_{\text{on}} + \Delta\nu, r) - \sigma_r(\nu_{\text{off}}, r)]}{R_r \cdot T(r) \cdot [1 + X_{\text{H}_2\text{O}}(r)]} dr, \quad (16)$$

式中: $\Delta\nu$ 为由多普勒效应引起的频移; σ_r 为 r 处的二氧化碳分子吸收截面。

利用上述差分光学厚度和积分权重函数得到随飞行路径变化的云上 CO_2 柱浓度,如图 15 所示,将其变化趋势与飞机上的原位测量仪测得的单点 CO_2 浓度变化趋势进行比对。图 15 中从左至右用虚线划分,依次为山区、居民区、海洋区,IPDA 激光雷达测量的山区上空云上 CO_2 柱浓度平均值为 $415.51 \mu\text{L/L}$,标准偏差为 $4.24 \mu\text{L/L}$;居民区上空云上 CO_2 柱浓度平均值为 $418.07 \mu\text{L/L}$,标准偏差为 $4.84 \mu\text{L/L}$;海洋区上空云上 CO_2 柱浓度平均值为 $414.06 \mu\text{L/L}$,标准偏差为 $1.68 \mu\text{L/L}$ 。原位测量仪测量的山区上空 CO_2 浓度平均值为 $413.63 \mu\text{L/L}$,标准偏差为 $0.32 \mu\text{L/L}$;居民区上空 CO_2 浓度平均值为 $413.99 \mu\text{L/L}$,标准偏差为 $0.59 \mu\text{L/L}$;海洋区上空云上 CO_2 柱浓度为 $413.5 \mu\text{L/L}$,标准偏差为 $0.19 \mu\text{L/L}$ 。IPDA 激光雷达测量的云上 CO_2 柱浓度,在居民区最高,在海洋区最小;同样,原位测量仪测量的 CO_2 浓度,在居民区最高,在海洋区最小。IPDA 激光雷达测得的云上 CO_2 柱浓度的平均值为 $416.58 \mu\text{L/L}$,原位测量仪测得的单点二氧化碳浓度的平均值为 $413.78 \mu\text{L/L}$,偏差为 $2.8 \mu\text{L/L}$ 。IPDA 激光雷达测得的云上 CO_2 柱浓度变化趋势与飞机上原位测量仪测得的二氧化碳浓度变化趋势一致,验证了反演结果的可靠性。

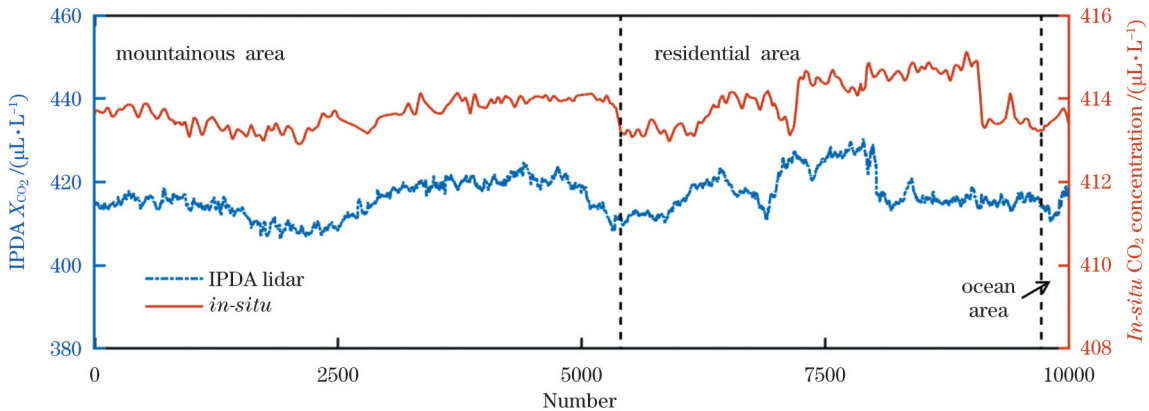


图 15 云上 IPDA 激光雷达测得二氧化碳柱浓度变化趋势与原位测量仪测得单点二氧化碳浓度变化趋势对比

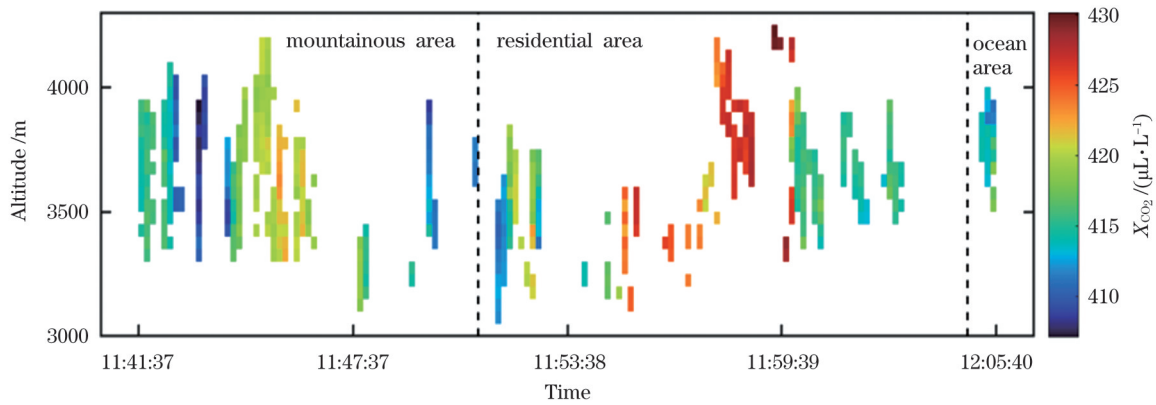
Fig. 15 Comparison between trend of CO_2 column concentration on cloud measured by IPDA lidar and trend of single-point CO_2 concentration measured by *in-situ* measuring instrument

同样对时间进行 10 s 平均,高度上每 50 m 进行划分,得到云上 CO_2 柱浓度的时间-高度分布,如图 16 所示。居民区上空出现 CO_2 柱浓度高值,在排除信噪比影响后,考虑人为因素影响使 CO_2 柱浓度明显增加, CO_2 浓度分布不均匀。海洋区上空的云上 CO_2 柱浓度标准差最小,说明海洋区上空的 CO_2 混合较为均匀。考虑到云层高度变化大,其变化不连续,所以 IPDA 激光雷达计算的云上 CO_2 柱浓度标准差大于原位测量仪测量的 CO_2 浓度标准差。

5 结 论

本文对由机载 IPDA 激光雷达云回波信号获取

CO_2 柱浓度展开研究,提出了一种基于中位数绝对偏差的离散值筛选法提取云回波信号,可以提高机载平台测量数据有效利用率。选取机载试验中平飞阶段的稳定云回波信号进行分析,用 offline 波长回波信号计算云的相对反射率,分析了试验中云的不同空间分布及其反射率变化。分析云上 CO_2 柱浓度数据,并同同机装载的原位二氧化碳测量仪的数据进行比较,两者测量的 CO_2 浓度变化趋势具有很好的一致性,平均偏差为 $2.8 \mu\text{L/L}$ 。本文开展的研究可为利用星载激光雷达云回波信号计算 CO_2 浓度提供重要参考。

图 16 云上 CO₂ 柱浓度示意图Fig. 16 Schematic diagram of CO₂ column concentrations on clouds

参 考 文 献

- [1] Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(2): 480-491.
- [2] Sun L L, Cui H J, Ge Q S. Will China achieve its 2060 carbon neutral commitment from the provincial perspective?[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2022, 13(2): 169-178.
- [3] He C P, Ji M R, Grieneisen M L, et al. A review of datasets and methods for deriving spatiotemporal distributions of atmospheric CO₂[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 322: 116101.
- [4] Wunch D, Toon G C, Blavier J F L, et al. The total carbon column observing network[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2011, 369(1943): 2087-2112.
- [5] Taylor T E, O'Dell C W, David C, et al. An 11-year record of X_{CO2} estimates derived from GOSAT measurements using the NASA ACOS version 9 retrieval algorithm[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(1): 325-360.
- [6] Eldering A, O'Dell C W, Wennberg P O, et al. The Orbiting Carbon Observatory-2: first 18 months of science data products[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(2): 549-563.
- [7] Liu Y, Yang D X, Cai Z N. A retrieval algorithm for TanSat X_{CO2} observation: retrieval experiments using GOSAT data[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(13): 1520-1523.
- [8] 刘东, 陈斯婕, 刘群, 等. 星载环境探测激光雷达及其关键技术[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1701001.
Liu D, Chen S J, Liu Q, et al. Spaceborne environmental detection lidar and its key techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1701001.
- [9] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. A lidar approach to measure CO₂ concentrations from space for the ASCENDS Mission [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7832: 78320D.
- [10] Abshire J B, Riris H, Allan G R, et al. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric CO₂ column absorption[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2010, 62(5): 770-783.
- [11] Abshire J B, Ramanathan A, Riris H, et al. Airborne measurements of CO₂ column concentration and range using a pulsed direct-detection IPDA lidar[J]. *Remote Sensing*, 2013, 6(1): 443-469.
- [12] Wolff S, Ehret G, Kiemle C, et al. Determination of the emission rates of CO₂ point sources with airborne lidar[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(4): 2717-2736.
- [13] Sun X L, Abshire J B, Ramanathan A, et al. Retrieval algorithm for the column CO₂ mixing ratio from pulsed multi-wavelength lidar measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(5): 3909-3922.
- [14] Xiang C Z, Ma X, Zhang X Y, et al. Design of inversion procedure for the airborne CO₂-IPDA lidar: a preliminary study[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 14: 11840-11852.
- [15] Zhu Y D, Yang J X, Chen X, et al. Airborne validation experiment of 1.57-μm double-pulse IPDA lidar for atmospheric carbon dioxide measurement[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 1999.
- [16] Shi T Q, Han G, Ma X, et al. Quantifying CO₂ uptakes over oceans using lidar: a tentative experiment in Bohai Bay[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(9): 091160.
- [17] Wang Q, Mustafa F, Bu L B, et al. Monitoring of atmospheric carbon dioxide over a desert site using airborne and ground measurements[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(20): 5224.
- [18] Wang Q, Mustafa F, Bu L B, et al. Atmospheric carbon dioxide measurement from aircraft and comparison with OCO-2 and carbon tracker model data[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(10): 6601-6617.
- [19] Mao J P, Ramanathan A, Abshire J B, et al. Measurement of atmospheric CO₂ column concentrations to cloud tops with a pulsed multi-wavelength airborne lidar[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(1): 127-140.
- [20] Ramanathan A K, Mao J P, Abshire J B, et al. Remote sensing measurements of the CO₂ mixing ratio in the planetary boundary layer using cloud slicing with airborne lidar[J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(6): 2055-2062.
- [21] 唐雅慧, 周毓荃, 蔡森, 等. 基于 CloudSat 与 CALIPSO 联合观测研究全球云分布特征[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(5): 917-931.
Tang Y H, Zhou Y Q, Cai M, et al. Global distribution of clouds based on CloudSat and CALIPSO combined observations[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(5): 917-931.
- [22] 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.
- [23] 丁红波, 王珍珠, 刘东. 激光雷达信号去噪方法的对比研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(24): 2401001.
Ding H B, Wang Z Z, Liu D. Comparison of de-noising methods of lidar signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(24): 2401001.

Carbon Dioxide Column Concentration Measurement Based on Cloud Echo Signal of 1.57 μm IPDA Lidar

Gao Xuejie^{1,2}, Liu Jiqiao^{1,2,3*}, Fan Chuncan^{1,3}, Chen Cheng^{1,2,3}, Yang Juxin^{1,2,3}, Li Shiguang¹,
Xie Yuan¹, Zhu Xiaopeng^{1,2}, Chen Weibiao^{1,2,3}

¹Space Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract

Objective Since the industrial revolution, anthropogenic activities have resulted in unprecedented carbon emissions that exceed the carbon sink capacity of terrestrial and marine ecosystems, with CO₂ concentrations increasing by approximately 30% over the last few decades to 418 $\mu\text{L/L}$ by 2022. To meet the needs to effectively implement carbon emission management, lidar detection based on the differential absorption principle has been proposed using the existing technology. With an average global cloud coverage of up to 60%, there are many cloud echo signals in addition to ground and ocean echo signals when laser penetrates the atmosphere to the ground, and effective use of cloud echo signals can improve data utilization and contribute to the analysis of carbon sources and sinks. For complex cloud echo signals, an outlier screening method based on the absolute deviation from the median is proposed to extract signals, which can separate multi-layer cloud echo signals and the signals in which the cloud and ground echo signals co-exist. In addition, this paper analyzes the detection capability of cloud signals, studies effective data processing methods for cloud echo signals to calculate the CO₂ column concentration on the cloud, and compares the results with the data obtained with *in-situ* instrument.

Methods This paper uses data from an airborne flight experiment conducted by the integrated path differential absorption (IPDA) lidar system in Qinhuangdao in March 2019. Firstly, the types of signals that may be received by the IPDA lidar are analyzed, and an outlier screening method based on the absolute deviation from the median is proposed to extract the echo signals. A correction method for the target altitudes is proposed, and the extraction results are compared with those extracted using the traditional minimum method. Secondly, the online and offline monitor signals and echo signals of the clouds are analyzed, and data suitable for CO₂ column concentration inversion are selected. Then, the relative reflectance of the clouds is calculated using the offline monitor signals and echo signals. The relationship between the relative reflectance and cloud density is investigated by combining the cloud density distribution with the cloud images taken by the airborne camera. Finally, the CO₂ column concentration on the clouds is obtained by using the differential optical thickness and the integral weighting function corrected for Doppler shift, and the results are compared with the trends of single-point CO₂ concentrations measured by *in-situ* instruments. Meanwhile, the relationship between cloud altitude and CO₂ column concentration on the clouds is also investigated.

Results and Discussions According to the signal extraction results, the amount of valid cloud signal extracted using the outlier screening method based on the absolute deviation from the median is 1.9 times greater than that extracted using the minimum value method (Fig. 10). The relative reflectance of the clouds is obtained by the offline monitor signals energy and the echo signals energy. Based on the experiment, the relative reflectance of the clouds over the mountainous area is 0.1897, that over the residential area is 0.1418, and that over the sea is 0.1656 (Fig. 12). The number of signal points in the time-altitude grid area is counted to get the cloud density distribution, and combined with the photographs taken by the airborne camera (Figs. 13 and 14), the cloud tops are found to be around 3400 m for thin clouds and 3800 m for thick clouds on the day of the experiment. We use differential optical depth and the integral weighting function corrected for Doppler shift to calculate the concentrations of CO₂ on clouds (Fig. 15). On the day of the experiment, the average CO₂ column concentration over the cloud is 415.98 $\mu\text{L/L}$, the average CO₂ column concentration over the residential area is 416.96 $\mu\text{L/L}$, and the average CO₂ column concentration over the sea area is 413.92 $\mu\text{L/L}$, with an overall average value of 416.23 $\mu\text{L/L}$. The trend is consistent with those of the single-point CO₂ concentrations measured by the *in-situ* instrument. The altitude variation of CO₂ column concentrations over clouds (Fig. 16) is calculated to show the distribution of CO₂ column concentrations over clouds with altitude in different regions.

Conclusions In this paper, cloud echo signals from an airborne IPDA lidar are investigated to obtain the CO₂ column concentration. An outlier screening method based on the absolute deviation from the median to extract cloud echo signals is proposed, which can improve the effective utilization of the data measured by the airborne platforms. The stable cloud echo signals from the level flight phase of the airborne experiment are selected for analysis. The offline wavelength echo signals are used to calculate the relative

reflectance of the clouds, and the different spatial distributions of the clouds and their reflectance variations in the experiment are analyzed. The CO₂ column concentration data on the clouds are analyzed and compared with the data from the onboard *in-situ* carbon dioxide instrument equipped on the same aircraft. The CO₂ concentration trends measured by the two methods are in good agreement, with an average deviation of 2.8 μL/L. The research conducted in this paper provides an important reference for processing the cloud echo signals of the spaceborne lidar to calculate the CO₂ concentration.

Key words remote sensing; differential absorption lidar; carbon dioxide column concentration; cloud echo signal; differential absorption optical depth; atmospheric remote sensing