

## 光学学报

## 相干差分吸收二氧化碳激光雷达仿真与误差分析

李因营<sup>1</sup>, 陈相成<sup>1</sup>, 于翠荣<sup>2</sup>, 戴光耀<sup>1</sup>, 吴松华<sup>1,3,4\*</sup><sup>1</sup>中国海洋大学信息科学与工程学部海洋技术学院, 山东 青岛 266100;<sup>2</sup>青岛镭测创芯科技有限公司, 山东 青岛 266101;<sup>3</sup>崂山实验室, 山东 青岛 266237;<sup>4</sup>中国海洋大学海洋高等研究院, 山东 青岛 266100

**摘要** 阐述了相干差分吸收激光雷达(CDIAL)探测大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)的原理,设计了 1.57 μm 波段微脉冲相干探测系统,并对系统的回波信号进行了仿真。通过仿真计算分别探究了温度、压力、波长等因素对差分光学厚度计算及 CO<sub>2</sub> 体积分数的反演精度的影响。仿真结果显示:当波长漂移为 0.5 pm、温度不确定度为 1 K、压强不确定度为 1 hPa、水汽体积分数测量不确定度为 10% 时,这些参数引起的总体误差为 0.45%;在大气中 CO<sub>2</sub> 的体积分数为 4×10<sup>-4</sup> 时,微脉冲相干激光雷达探测 CO<sub>2</sub> 体积分数的测量误差约为 1.8×10<sup>-6</sup>。

**关键词** 大气光学; 二氧化碳体积分数; 相干差分吸收; 激光雷达; 仿真与性能评估

**中图分类号** TN958.98; TN249 **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/AOS230805

## 1 引言

自 20 世纪中叶以来,受温室效应的影响,全球平均地表温度在 1880 年到 2012 年间上升了 0.85 °C<sup>[1]</sup>,并且部分地区出现更大程度的变暖。大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)作为引起温室效应的主要气体之一,在全球气候变化中扮演重要作用。了解不同区域的大气 CO<sub>2</sub> 体积分数的时空分布格局,有助于掌握 CO<sub>2</sub> 气体“源”与“汇”的足迹,便于实现国内减排控制,加快推进我国绿色低碳的高质量发展。

高时空分辨率、高精度的 CO<sub>2</sub> 体积分数数据是进行气候研究的基础。传统的观测手段是利用卫星搭载被动遥感观测设备,以进行全球大尺度的 CO<sub>2</sub> 体积分数观测,包括欧洲航天局的 ENVISAT<sup>[2]</sup> 和极轨气象卫星 METOP-A<sup>[3]</sup>, 美国 NASA 的 EOS/Aqua<sup>[4]</sup> 和 OCO-2<sup>[5]</sup> 卫星,日本的温室气体监测卫星 GOSAT<sup>[6]</sup>, 以及我国 CO<sub>2</sub> 监测科学实验卫星 TanSat<sup>[7]</sup> 等。但被动遥感受限于自身观测特性,存在着夜间难测量、高纬度区域探测性能差、易受云和气溶胶影响,以及近地面 CO<sub>2</sub> 观测精度不足等问题。

激光雷达主动遥感技术能够很大程度上弥补以上问题。相干差分吸收激光雷达(CDIAL)技术作为主动遥感技术之一,具有对点源、城市和重点区域进行全天时、高精度探测的能力。2004 年, Koch 等<sup>[8-9]</sup> 研究了

一种测量大气 CO<sub>2</sub> 体积分数的脉冲能量地基 CDIAL,其利用相干探测技术获得足够高的信噪比(SNR),用于测量大气边界层中 CO<sub>2</sub> 的体积分数,并具有通过相干多普勒测风技术进行风廓线测量的附加功能。Gibert 等<sup>[10-11]</sup> 研制了一种 2.0 μm CDIAL 系统,用于高精度监测大气边界层中 CO<sub>2</sub> 体积混合比,并在 2015 年展示了其连续时间段内 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线的监测结果<sup>[12]</sup>,该团队<sup>[13]</sup> 在 2021 年尝试用 2.05 μm 的全光纤脉冲激光源借助相干技术进行 CO<sub>2</sub> 体积分数和风速的测量。

国内陶小红等<sup>[14-15]</sup> 在 2008 年对大气 CO<sub>2</sub> 相干探测激光雷达系统进行了仿真计算,通过估算信噪比,对系统性能及探测精度进行了分析。此外,刘豪等<sup>[16-19]</sup> 对大气 CO<sub>2</sub> 柱浓度观测进行了研究,我国研制的全球首颗探测大气 CO<sub>2</sub> 体积分数的星载 IPDA 系统 ACDL 已于 2022 年 4 月成功升空,该系统可全天时获得卫星轨迹方向全球大气 CO<sub>2</sub> 柱浓度分布信息。2015 年,韩舸等<sup>[20]</sup> 研制了一台地基直接能量探测的 CO<sub>2</sub> 差分吸收激光雷达(DIAL),以获取时间上连续的 CO<sub>2</sub> 浓度垂直廓线观测结果。2021 年,余赛芬<sup>[21]</sup> 提出了一种基于激光雷达的光子计数分布式自由空间光谱技术,结合频率梳扫描激光源和超导纳米线单光子探测器,对大气中 CO<sub>2</sub> 和 HDO 的体积分数进行观测。

但目前对于微脉冲相干差分吸收 CO<sub>2</sub> 激光雷达来

收稿日期: 2023-04-12; 修回日期: 2023-06-10; 录用日期: 2023-08-03; 网络首发日期: 2023-08-15

基金项目: 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202201202)、青岛市新兴产业培育计划(22-3-4-xxgg-8-gx)

通信作者: \*wush@ouc.edu.cn

说,其系统结构复杂,且在探测能量有限的情况下研制难度大,因此其相关研究较少。为了能够辅助雷达硬件系统的参数指标设计,探究系统的探测性能,研究了相干激光雷达方程中参数变化对于差分光学厚度(DAOD)计算产生的影响,并对系统测量 CO<sub>2</sub> 体积分数的误差进行了理论分析。

## 2 CDIAL 原理

DIAL 通过发射两束对 CO<sub>2</sub> 气体敏感程度不同的激光脉冲,借助大气分子及气溶胶的后向散射作用,使用望远镜接收两波长的回波信号并进行处理,通过两者吸收衰减程度的不同,计算待测气体体积分数<sup>[22-23]</sup>。DIAL 发射的两束激光波长相近,但 CO<sub>2</sub> 气体对两束激光的吸收程度相差很大,且该波段激光受其他干扰气体的影响小。因为发射间隔极短,可认为大气状况以及激光雷达系统条件等并未发生改变,故可以通过信号处理反演 CO<sub>2</sub> 体积分数。

结合相干探测技术,望远镜接收到的回波信号

$$P_{sd}(r, \lambda) = k_{in} E_0 \frac{A}{r^2} \frac{c}{2} \beta(r, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_0(r, \lambda) + N_{CO_2}(r) \sigma_{CO_2}(r, \lambda)] dr \right\}, \quad (2)$$

式中:  $k_{in}$  为激光雷达系统常数;  $E_0$  为激光发射能量;  $A$  为接收望远镜的面积;  $r$  为探测距离;  $\beta(r, \lambda)$  为气溶胶后向散射系数;  $\alpha_0(r, \lambda)$  为除 CO<sub>2</sub> 气体之外大气总的消光系数;  $N_{CO_2}(r)$  和  $\sigma_{CO_2}(r, \lambda)$  分别为 CO<sub>2</sub> 分子数密度和分子吸收截面。CDIAL 利用分子具有不同的吸收特征这一事实,提供了对大气中气体体积分数的测量方法。采用 1572 nm 波段中的两束相近波长: 其中一个

与出射激光分离出的本振光信号在光纤耦合器处混合,混合光在平衡探测器 PIN 管光敏面混频<sup>[24]</sup>,完成光电信号转换,最终得到光电流信号,即相干信号;然后,利用采集板将信号数字化,并把接收到的电信号划分为等间隔距离门,使系统具备距离分辨的观测能力;最后,对各门频谱最大值附近的功率谱分量进行求和,其积分值表示实际大气后向散射功率<sup>[25]</sup>:

$$\langle P(r) \rangle = \frac{1}{N} \left( 2 \frac{\eta_q e \lambda}{hc} R_{in} G \right)^2 \eta_{LO} P_{LO} \eta_h(r, \lambda) P_{sd}(r, \lambda), \quad (1)$$

式中:  $N = 512$  为每个距离门中的数字量;  $\eta_q$  为探测器的量子效率;  $e$  为单位电子的电荷量;  $h$  为普朗克常数;  $\lambda$  为出射激光波长;  $c$  为光速;  $R_{in}$  为采集卡的输入阻抗;  $G$  为接收链增益;  $\eta_{LO}$  和  $\eta_h(r, \lambda)$  分别为本振光的截断效率和系统的外差效率;  $P_{LO}$  和  $P_{sd}(r, \lambda)$  分别为本振光功率和大气后向散射功率;  $P_{sd}(r, \lambda)$  为望远镜接收到的大气回波信号的功率,其表达式为

波长选在靠近 CO<sub>2</sub> 吸收峰的位置,记为  $\lambda_{on}$ ; 另一个波长选在吸收波谷位置,记为  $\lambda_{off}$ , 从而形成较大的吸收差异。这样,在相近的激光波长以及极短的发射间隔情况下,大气后向散射系数、消光系数等大气参数以及系统光学参数可被抵消。因此,在只考虑干洁大气的条件下,结合理想气体状态方程,最终得到的 CO<sub>2</sub> 体积分数的反演公式为

$$N_{CO_2}(r) = \frac{1}{2\Delta r [\sigma_{CO_2}(\lambda_{on}, r) - \sigma_{CO_2}(\lambda_{off}, r)]} \ln \frac{P(\lambda_{off}, r_{top}) P(\lambda_{on}, r_{bottom})}{P(\lambda_{on}, r_{top}) P(\lambda_{off}, r_{bottom})}, \quad (3)$$

$$X_{CO_2}(r) = \frac{N_{CO_2}(r)}{N_{air}(r)} = \frac{RT(r)}{2\Delta \sigma_{CO_2}(r) \Delta r P(r) N_A} \ln \frac{P(\lambda_{off}, r_{top}) P(\lambda_{on}, r_{bottom})}{P(\lambda_{on}, r_{top}) P(\lambda_{off}, r_{bottom})}, \quad (4)$$

式中:  $r_{top}$  和  $r_{bottom}$  分别为  $\Delta r$  距离库的上、下高度边界,即  $\Delta r = r_{top} - r_{bottom}$ ;  $R$  为理想气体常数;  $N_A$  为阿伏伽德罗常数;  $T(r)$  为温度;  $P(r)$  为压力;  $\Delta \sigma_{CO_2}(r) = \sigma_{CO_2}(\lambda_{on}, r) - \sigma_{CO_2}(\lambda_{off}, r)$  为 CO<sub>2</sub> 分子吸收截面差。

## 3 CDIAL 系统仿真

### 3.1 CDIAL 系统设计

为了实现大气 CO<sub>2</sub> 体积分数高分辨率、高精度探测,对 CDIAL 系统进行了设计。设计主要包括三大单元模块: 种子激光单元模块、激光收发器单元模块、数据采集和处理单元模块。图 1 为 CDIAL 系统结构设计图。

两台种子激光器(DFB\_LD)通过驱动光纤光开关(OSW)形成  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  的连续激光交替出射,使  $\lambda_{on}$  和  $\lambda_{off}$  激光的出射间隔锁定在大气“冻结”时间<sup>[26]</sup>内。预放大

器(EDFA\_1)将交替出射的连续光放大,提高连续光输出功率,并通过耦合器进行分光。一束光为本振光(LO),用于与回波信号进行拍频;另一束进入高消光比的声光调制器后被调制成脉冲光束,然后经两级脉冲放大器进行信号放大,经信号放大的脉冲光进入环形器后,经过基于大模场光纤的光纤耦合非球望远镜发射到大气中。

本振光和大气后向散射光在光纤耦合器中混合,混合光经平衡探测器(BD)完成光电信号转换;平衡探测器输出的电信号经过滤波器的降噪处理,最终通过数字采集卡(DAQ)完成数据采集。数据采集处理模块完成对大气后向散射信号的混频、光电转换、采集和处理,并且作为系统的核心控制模块控制各个子系统以及系统整体的工作流程。表 1 为 CDIAL 系统设计参数。

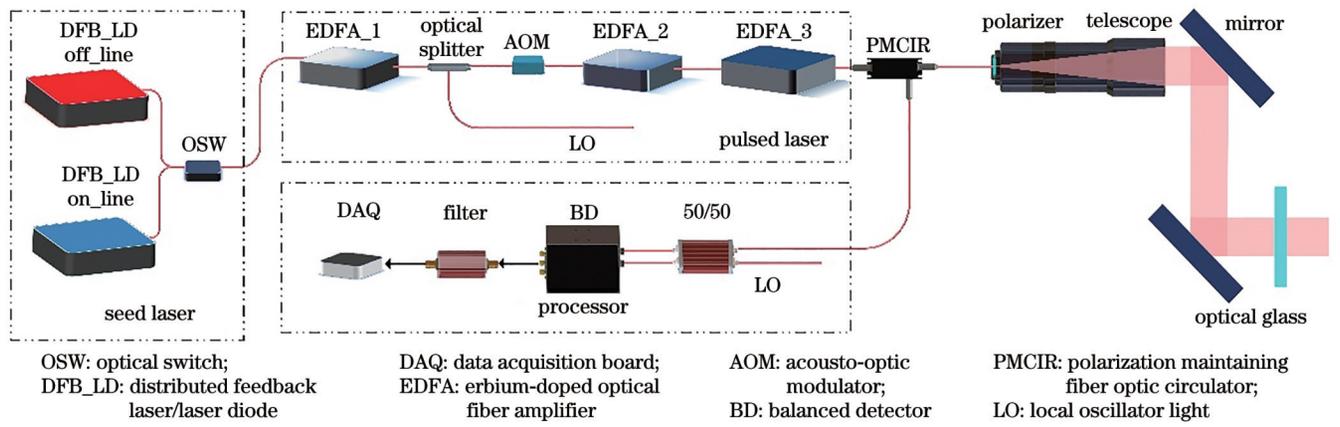


图 1 CDIAL 系统结构设计图  
Fig. 1 Structural design drawing of CDIAL system

表 1 CDIAL 系统参数表  
Table 1 Parameters of CDIAL system

System	Item	Content
Transmission system	Laser	MOPA fiber laser
	Laser wavelength (on) /nm	1572.335
	Laser wavelength (off) /nm	1572.180
	Pulse energy / $\mu\text{J}$	80
	Laser linewidth /kHz	<5
	Repetition frequency /kHz	10
	Intermediate frequency /MHz	80
	Pulse width /ns	400
Acquisition system	Telescope diameter /mm	80
	Detector	Balance detector
	Responsivity /( $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$ )	1
	ADC sampling /( $\text{Gbit/s}$ )	1
	Bandwidth /MHz	200

### 3.2 相干激光雷达信号仿真

根据式(1),  $\lambda_{\text{on}}$  和  $\lambda_{\text{off}}$  对应的回波信号可以通过一系列参数获得, 这些参数包括系统参数、气溶胶及其他大气参数、 $\text{CO}_2$  体积分数廓线、吸收截面等, 其回波信号的模拟流程如图 2 所示。

大气中  $\text{CO}_2$  吸收系数可以根据给定的  $\text{CO}_2$  体积混合比、标准大气温度压力廓线和吸收截面数据进行计算。除待测气体外, 大气总的消光系数可用气溶胶消光系数和大气分子消光系数相加来表示, 两者的消光系数可分别由气溶胶后向散射系数及大气分子模型参数等计算得出, 结合以上参数可由激光雷达方程得到模拟的回波信号, 回波信号仿真参数列于表 2 中。

如图 3 所示, 选取 2022 年 12 月一段时间内不同时间点的气溶胶后向散射数据作为输入数据, 以表示不同的大气状况; 然后结合基于实测的同时期探空数据与 ERA5 再分析数据拟合而成的大气温度、压力模型进行仿真模拟, 获得不同大气状况下的回波信号。其中, 外差效率这一参数受大气湍流等多种大气状况的影响, 此处仿真计算使用 46.1% 进行简单代替。由图 3(a)、(b) 可以看出, 在气溶胶后向散射突然增强的位置, 亦会观察到回波信号强度随之增大的现象。

### 3.3 DAOD 影响分析

差分吸收光学厚度指  $\text{CO}_2$ -DIAL 探测系统中两探测波长回波信号之比的差分, 用来表示  $\text{CO}_2$  吸收所引

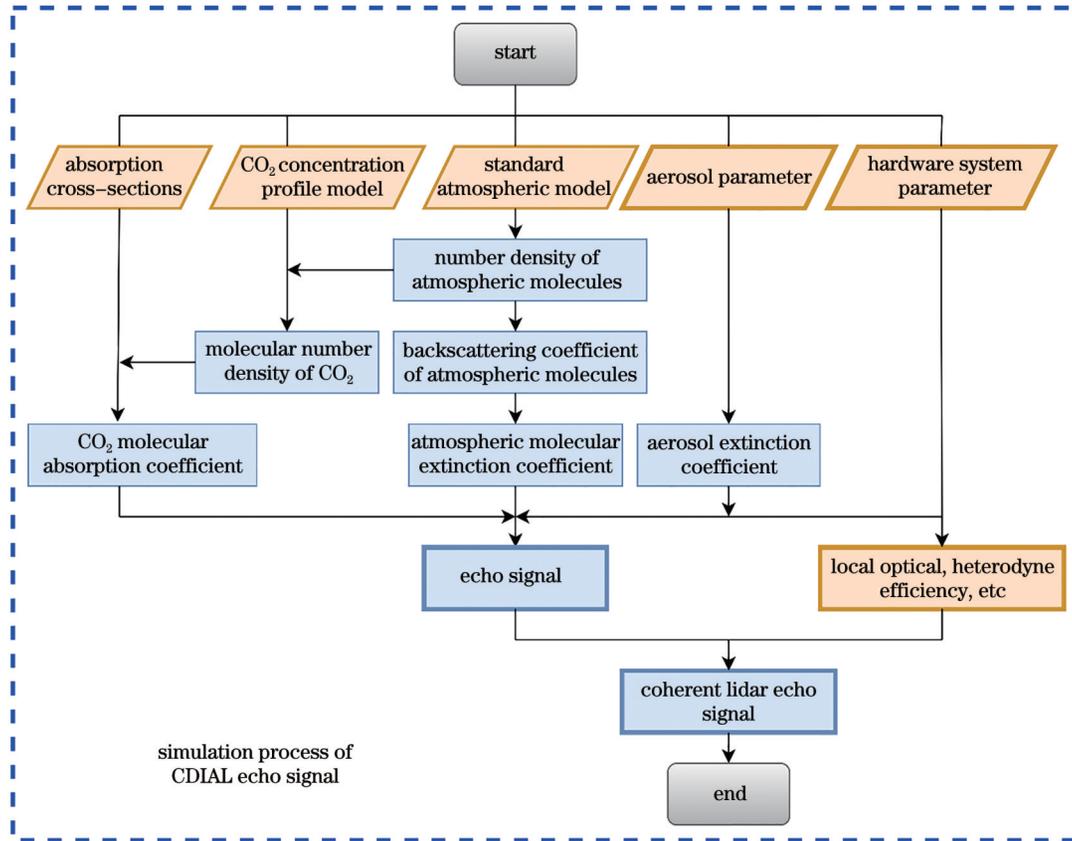


图 2 CDIAL 模拟回波信号流程图

Fig. 2 Flow chart of simulation of echo signal by CDIAL

表 2 回波信号的仿真参数表

Table 2 Simulation parameters of echo signal

Simulation parameter	Value	Simulation parameter	Value
Laser wavelength (on/off) /nm	1572.335/1572.180	Input impedance /Ω	50
Pulse energy /μJ	80	Gain	1000
Quantum efficiency	0.80	Number of range gates	512
Telescope diameter /mm	80	Local oscillator truncation efficiency /mW	2
Instrumental constant	0.6026	Heterodyne efficiency /%	46.1

起的两束激光回波信号的差异,表征着 CO<sub>2</sub> 分子在探测路径上对特定发射激光的吸收效应,由式(3)可以获得 DAOD 的计算式为

$$d_{\text{DAOD}} = \int_{r_{\text{bottom}}}^{r_{\text{top}}} N_{\text{CO}_2}(r) \Delta\sigma_{\text{CO}_2}(r) dr = \ln \frac{P(\lambda_{\text{off}}, r_{\text{top}}) P(\lambda_{\text{on}}, r_{\text{bottom}})}{P(\lambda_{\text{on}}, r_{\text{top}}) P(\lambda_{\text{off}}, r_{\text{bottom}})} \quad (5)$$

通过观察式(5)可知,DAOD 是由 Δr 距离库内的回波信号的比值来进行计算的,其精度也会直接影响后续 CO<sub>2</sub> 体积分数的反演。因此,本部分聚焦于当激光雷达方程中的参数发生变化时,DAOD 会相应发生的变化以及所引起的误差大小。由式(5)可知,光学参数、大气环境参数等会影响回波信号,进而对 DAOD

产生影响,现主要考虑波长漂移、温度及压力变化对 DAOD 的影响情况。

### 3.3.1 波长漂移对 DAOD 计算的影响

首先波长漂移会影响 CO<sub>2</sub> 吸收截面的变化,进而影响接收到的回波信号强度。因此,假定大气环境参数与除波长之外的光学参数不变,便可以在发射波长一定范围内设置若干偏移量,然后计算波长偏移后的回波信号强度与 DAOD,从而观察波长漂移对 DAOD 所产生的影响。

由差分吸收原理可知,在 λ<sub>on</sub> 和 λ<sub>off</sub> 两波长附近,波长偏移对两者吸收截面所引起的变化程度不同,λ<sub>on</sub> 波长处受影响程度较大,而 λ<sub>off</sub> 波长处受影响程度很小,因此,本部分内容主要探究 λ<sub>on</sub> 波长处波长偏移量对于

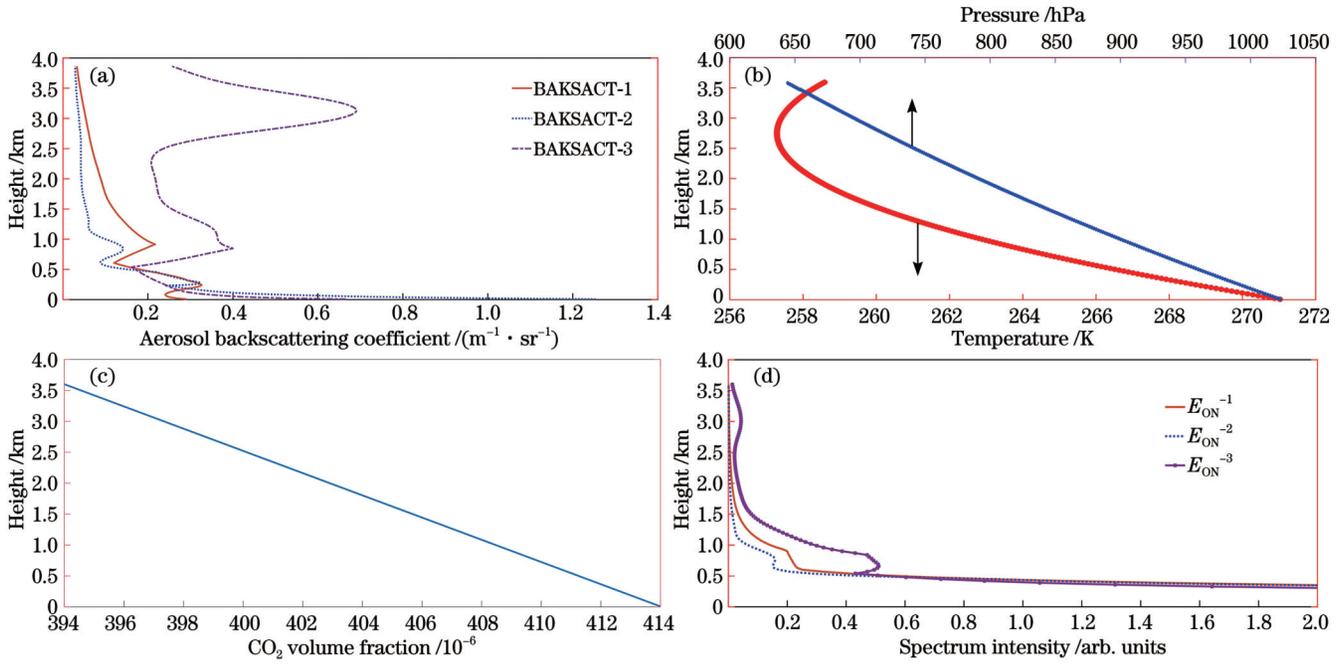


图 3 回波信号仿真结果。(a)气溶胶后向散射系数;(b)标准大气模型;(c)CO<sub>2</sub>体积分数廓线;(d)仿真回波信号

Fig. 3 Simulation results of echo signal. (a) Aerosol backscattering coefficient; (b) standard atmospheric model; (c) CO<sub>2</sub> volume fraction profile; (d) simulated echo signal

DAOD 的影响。

由图 4 可以看出:在相同高度处,DAOD 随  $\lambda_{on}$  波长偏移量增加的变化趋势是一致的,均呈现先增大后减小的趋势,表明不同高度层探测激光能量的吸收效应均是随着波长偏移量的增加而呈现先增强后减弱的趋势,具体原因可结合式(5)和图 5 分析得出。

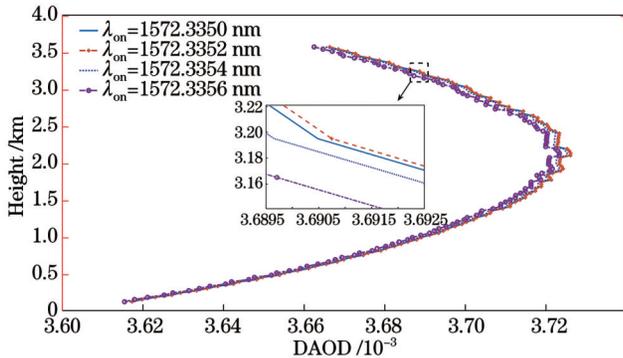


图 4 不同高度处 DAOD 随  $\lambda_{on}$  漂移的变化情况

Fig. 4 Variation of DAOD with drift of  $\lambda_{on}$  at different heights

图 5 是 CO<sub>2</sub> 分子吸收截面在  $\lambda_{on}$  附近随波长变化的情况。从图中可以发现,1572.335 nm 并不是在该波段真正的吸收峰的位置,这是为了避免当探测波长处于吸收峰位置时,相同波长漂移量所引入的 CO<sub>2</sub> 反演误差会大大增加。由图 5 可以看到,随着波长漂移量的增加,吸收截面先经过峰值位置,然后开始下降并慢慢小于 1572.335 nm 对应的吸收截面,因此,其与  $\lambda_{off}$  波长的吸收截面差亦会呈现相同的变化趋势,这导致光学厚度也呈现相同的变化。通过图 4 还可以观察到,在

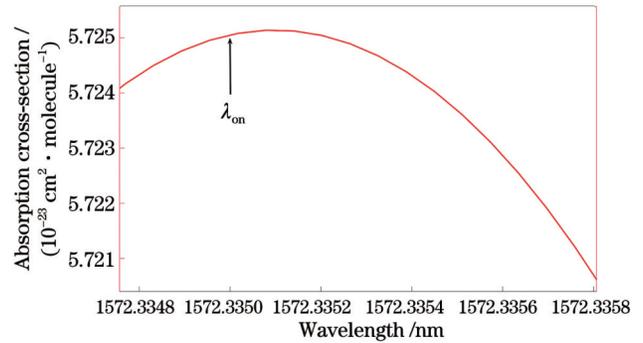


图 5 CO<sub>2</sub> 分子吸收截面随波长的变化情况

Fig. 5 Variation of CO<sub>2</sub> molecular absorption cross section with wavelength

不同高度处,虽然偏移步长并未发生变化,但 DAOD 下降速度有所增加。

图 6 是在不同高度处,不同的  $\lambda_{on}$  偏移所引起的

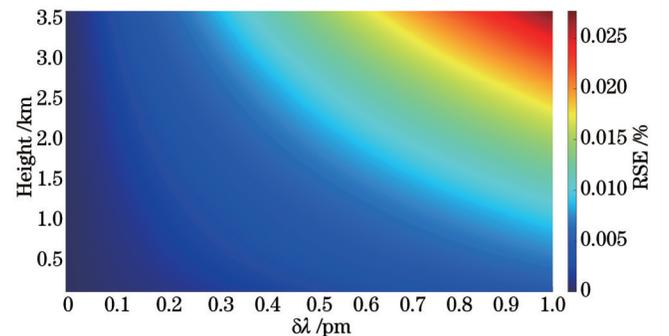


图 6 不同高度处 DAOD 由波长偏移引入的 RSE

Fig. 6 RSE introduced by wavelength shift in DAOD at different altitudes

DAOD 相对系统误差 (RSE)。由图 6 可以看出, 当 3.5 km 附近的波长偏移量小于 0.5 pm 时, RSE 小于 0.015%。随着波长偏移量的增大, 不同高度处 DAOD 的 RSE 也在增大; 而在波长偏移量相同的情况下, 随着高度的增加, DAOD 的 RSE 也呈现上升趋势, 即 DAOD 的计算精度大大下降。由这点也可以得出, 实际观测时, 探测距离越远, 体积分数的反演误差就越大。

### 3.3.2 温度偏差对 DAOD 计算的影响

温度偏差也会影响 DAOD 的计算, 因此通过对假定的温度廓线进行温度偏移量设置, 探究其对 DAOD 计算结果的影响以及所造成的 RSE。

从图 7 可以看出, 在各高度层处, 随着温度偏移量的增加, 利用仿真得到的回波信号所计算的 DAOD 也呈下降趋势。由式 (5) 分析可知, 某一高度层处, 温度变化会通过 CO<sub>2</sub> 分子吸收截面差和 CO<sub>2</sub> 分子数密度来影响 DAOD 的计算。因此, 通过对吸收截面差和分子数密度进行探究, 来判断这两方面对 DAOD 计算精度的影响程度。从图 8 可以看到吸收截面差随温度、压力的变化情况。

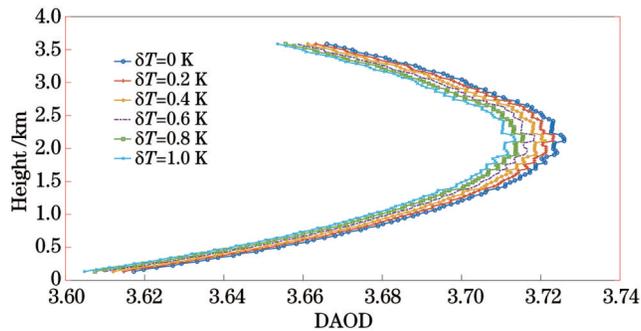


图 7 不同高度处 DAOD 随温度偏移量增大的变化

Fig. 7 Variation of DAOD with increasing temperature offset at different heights

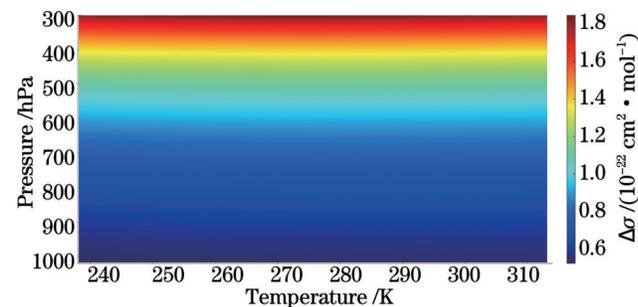


图 8 CO<sub>2</sub> 分子吸收截面差

Fig. 8 CO<sub>2</sub> molecular absorption cross section difference

由图 8 可以明显看到, CO<sub>2</sub> 吸收截面差并不会随温度的变化发生非常明显的变化, 因此, 结合式 (6) 可推出 DAOD 变化的主要原因在于 CO<sub>2</sub> 分子数密度随温度的上升而产生的变化。CO<sub>2</sub> 分子数密度可表示为

$$N_{\text{CO}_2} = X_{\text{CO}_2} N_{\text{air}} = X_{\text{CO}_2} \frac{N_A P}{RT} \quad (6)$$

由式 (6) 可看出, 随着温度的升高 (温度偏差正向增大), CO<sub>2</sub> 分子数密度下降, 因此 DAOD 随之降低, 符合图 7 所观察到的变化规律。图 9 为不同高度处温度偏移量对 DAOD 计算精度的影响, 由此可以看出, 当温度偏差 ≤ 1 K 时, 各高度层 DAOD 的 RSE 在 0.34% 以内。

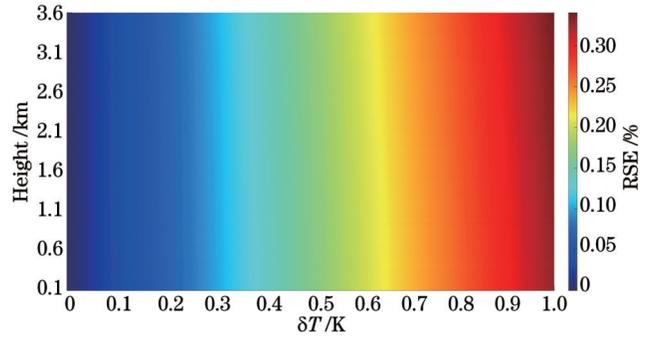


图 9 不同高度处 DAOD 由温度偏差引入的 RSE

Fig. 9 RSE of DAOD at different altitudes induced by temperature bias

### 3.3.3 压力偏差对 DAOD 计算的影响

本节将探究压力偏差对于 DAOD 的影响, 与前面波长漂移及温度偏差对 DAOD 的影响有所不同的是, 由图 10 可以看到, 压强偏移对于 DAOD 引起的变化没有呈现具体的规律, 其原因可以结合图 10 的吸收截面差和式 (6) 得出, 虽然随着压力的增大, 吸收截面差在逐渐减小, 但压力作为参数参与 CO<sub>2</sub> 分子数密度计算时, 会逐渐增大, 因而总体并未呈现一定的变化规律。

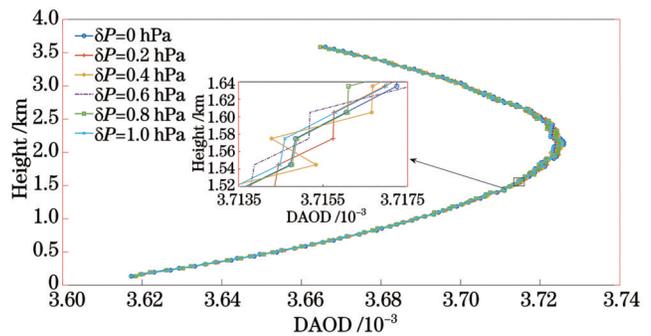


图 10 不同高度处 DAOD 随压强偏移量增大的变化

Fig. 10 Variation of DAOD with increasing pressure offset at different heights

图 11 为不同高度处、不同的压力偏移量所对应的 DAOD RSE, 由图中可以看出, 在全部的仿真范围内, 压力偏移对 DAOD 的计算影响较小, 整体相对误差小于 0.008%。同样, 相对误差除了随压力偏移的增大而增大之外, 不同高度处 DAOD 的相对误差随着高度的增加呈现下降趋势。

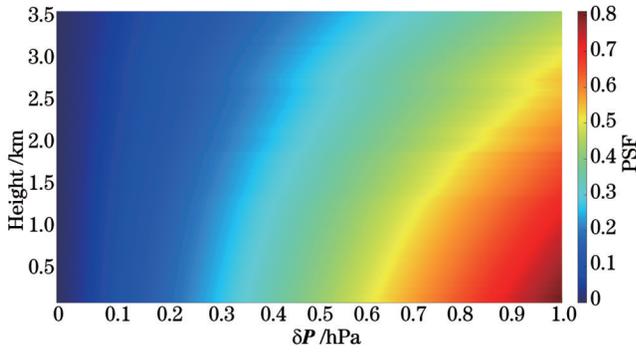


图 11 不同高度处 DAOD 由压力偏差引入的 RSE

Fig. 11 RSE of DAOD at different altitudes induced by pressure bias

综合以上各个因素可发现,在 0~3.5 km 范围内,当系统波长漂移小于 0.5 pm 时,DAOD 的计算误差小于 0.015%,即当大气中 CO<sub>2</sub> 的体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  时,引入的测量误差为  $5.6 \times 10^{-8}$ ;当温度廓线整体变化 1 K 时,DAOD 的计算误差小于 0.34%;当压力廓线整体偏差为 1 hPa 时,DAOD 的计算误差小于 0.008%,即综合引起的 DAOD 计算误差小于 0.34%。

## 4 CDIAL 误差分析

### 4.1 CDIAL 随机误差

CDIAL 数据采集处理模块通过光纤耦合器将本

表 3 平衡探测器系统的参数表

Table 3 Parameters of balance detector system

Parameter	Value	Parameter	Value
Bandwidth /MHz	200	Responsivity /( $A \cdot W^{-1}$ )	1 @1550 nm
Output impedance / $\Omega$	50	Maximum output /V	1.5 @50 $\Omega$
Detector diameter / $\mu m$	75		

发射激光的回波功率测量会受硬件参数等方面的影响,结合仿真得到的平衡探测器输出信噪比,最终得到 CO<sub>2</sub> 体积分数反演的随机误差  $E_r$ <sup>[17]</sup> 为

$$E_r = \frac{RT(r)}{2\Delta\sigma_{CO_2}(r)\Delta r P(r)N_A R_{SN}} \sqrt{2} \quad (8)$$

结合图 12、13 可以了解到,随着高度的升高,不同气溶胶状况下,信噪比呈下降趋势,CO<sub>2</sub> 体积分数的随机误差随之增大,在 0~1 km 的范围内,CO<sub>2</sub> 体积分数的反演的随机误差达到  $2 \times 10^{-5}$ ,因为系统采用了微脉冲低能量的光源,并且以气溶胶为探测目标的 CDIAL 系统的探测精度受限于大气条件,因此系统误差较大,通常该脉冲能量的光源可实现 1 km 内的 CO<sub>2</sub> 体积分数的观测,该精度可实现对城市环境、火灾、工业排放等环境的 CO<sub>2</sub> 空间分布的观测。

### 4.2 CDIAL 系统误差

CDIAL 在测量大气 CO<sub>2</sub> 体积分数时,会受到大气环境因素、仪器自身不稳定因素等多种因素的影响,因

振光和大气后向散射光进行混合,二者混合后在平衡探测器 PIN 光电二极管光敏面进行混频,完成光电信号转换,最终得到相干信号。前文仿真得到的激光雷达回波信号较为理想,排除了噪声等各种因素的影响。与直接探测过程不同,相干探测中本振光引入的散粒噪声为主要噪声源,同时还包括电流的热噪声、背景噪声等。其中,本振光引入散粒噪声的功率远高于其他噪声,同时系统的本振光功率通常为较稳定的值。在 CDIAL 系统中,通常将两台种子激光器输出的本振功率调节成一致,以保证两者回波信号强度接近。通过引入相干探测单脉冲的输出信噪比<sup>[14]</sup>分析 CDIAL CO<sub>2</sub> 体积分数反演的随机误差。

$$R_{SN} = \frac{(2\chi\sqrt{P_{sd}P_1})^2}{2B[\chi e(P_{sd} + P_1 + P_b) + 2kT/R_{in}]}, \quad (7)$$

式中: $R_{SN}$  为信噪比; $\chi$  为探测器的响应度; $B$  为带宽; $P_1$  为本振波功率; $P_{sd}$  为回波功率; $P_b$  为背景功率; $R_{in}$  为输出阻抗; $k$  为玻尔兹曼常数; $T$  为工作温度。选取典型的平衡探测器参数作为计算参数,具体如表 3 所示。探测器为 InGaAs/PIN。

利用仿真得到的回波信号,经过 10 min 的脉冲积累后,最终得到 0~2 km 探测高度范围内的输出信噪比,为 30 dB~50 dB。

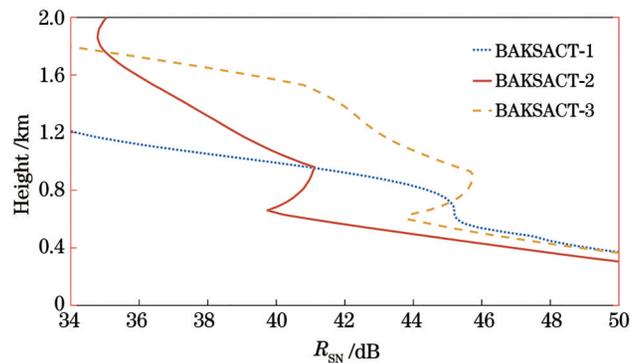


图 12 不同气溶胶状况下  $\lambda_{on}$  回波输出信噪比随高度的变化  
Fig. 12 SNR of echo output varies with height under different aerosol conditions

此回波信号以及反演的 CO<sub>2</sub> 体积分数会与真实情况存在偏差。系统接收到的回波信号经过双程路径吸收,易受大气环境的变化以及背景噪声的影响<sup>[27]</sup>;在反演 CO<sub>2</sub> 体积分数时,需要使用温度、压力等数据,这些信

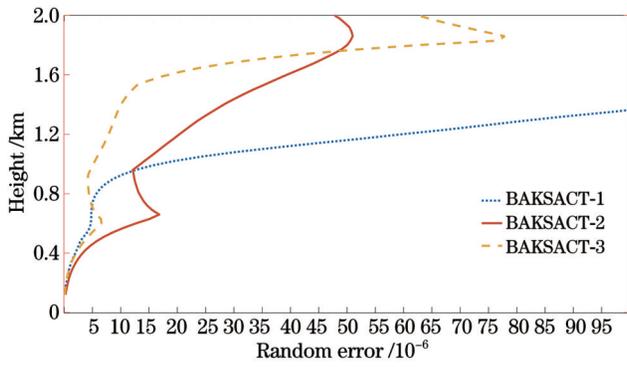


图 13 不同气溶胶状况下  $\text{CO}_2$  体积分数的随机误差随高度的变化

Fig. 13 Random error of  $\text{CO}_2$  volume fraction varies with height under different aerosol conditions

息获取的精度也会对  $\text{CO}_2$  体积分数的反演产生影响。因此,本节主要对这些参数的不确定性造成的  $\text{CO}_2$  体积分数反演的 RSE 进行分析。

#### 4.2.1 波长漂移引入误差

在 3.3.1 节进行波长漂移对 DAOD 的影响分析时已提到,探测激光波长的偏移会影响  $\text{CO}_2$  气体吸收截面的计算,并且  $\lambda_{\text{on}}$  波长处梯度变化明显,易产生明显偏差,而  $\lambda_{\text{off}}$  波长引起的梯度变化较小,因此本节重点分析  $\lambda_{\text{on}}$  波长偏移对  $\text{CO}_2$  体积分数反演的影响,其相对误差为

$$E_{\text{RS}} = \frac{\delta X_{\text{CO}_2}}{X_{\text{CO}_2}} = \frac{1}{X_{\text{CO}_2}} \cdot \frac{\partial X_{\text{CO}_2}}{\partial \lambda} \delta \lambda. \quad (9)$$

正如与分析波长漂移对 DAOD 的影响时一致,以  $\lambda_{\text{on}}$  波长为基准,通过设置一系列波长偏移量,计算其所引起的  $\text{CO}_2$  体积分数反演的相对误差, RSE 如图 14 所示。

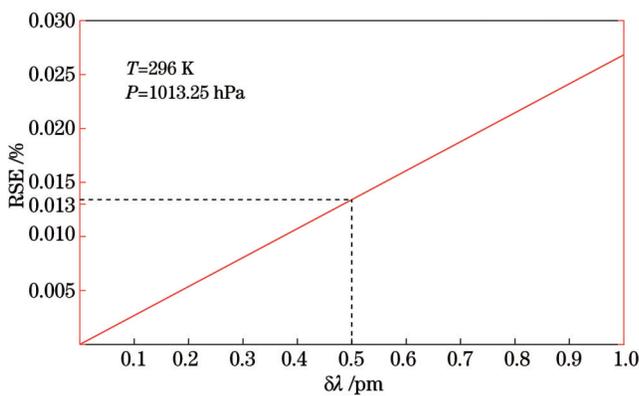


图 14 波长漂移引起的体积分数反演 RSE

Fig. 14 RSE of volume fraction inversion caused by wavelength drift

由图 14 可知,当激光波长偏移为 0.5 pm 时,其所造成的系统相对误差为 0.0132%,当  $\Delta r$  距离范围内  $\text{CO}_2$  的体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  时,系统测量的体积分数误差约为  $5.28 \times 10^{-8}$ 。

#### 4.2.2 温度不确定度引入误差

观察式 (3)、(4) 可知,在进行  $\text{CO}_2$  体积分数反演时,温度、压力作为重要的参数,不仅会影响  $\text{CO}_2$  分子数密度的计算,而且也会作为反演参数参与体积分数反演。一般在实际探测实验中,特别是垂直测量时,需要获得高精度的温度、压力廓线,从而降低  $\text{CO}_2$  体积分数反演的误差。

由于随机影响、系统影响等,通常难以获取准确的温度、压力廓线数据,因而分析温度、压力测量结果偏差所导致的系统不确定度尤为重要,其不确定度为

$$E_{\text{RS}} = \frac{\delta X_{\text{CO}_2}}{X_{\text{CO}_2}} = \frac{1}{X_{\text{CO}_2}} \frac{\partial X_{\text{CO}_2}}{\partial T} \delta T. \quad (10)$$

由式 (10) 可看出,温度偏差对于  $\text{CO}_2$  体积分数反演精度的影响还与基准温度有关,也就是说,在不同的温度基准上,相同温度偏差造成的影响是不同的。具体分析方法可在不同的温度基准值上设置不同的温度偏移量,进而分析温度不确定性对于体积分数反演的影响,从而可以定量描述  $\text{CO}_2$  体积分数反演受温度变化的影响。

由图 15 可以看出:以不同的温度作为基准,相同温度偏移量所引起的系统相对不确定度有所不同,但无明显的随温度变化的趋势,总体来看,当温度偏差为 1 K 时,系统不确定度达到 0.41%,即当  $\Delta r$  距离范围内  $\text{CO}_2$  的体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  时,系统测量的体积分数误差约为  $1.6 \times 10^{-6}$ ,由此得出,温度测量的精度对于  $\text{CO}_2$  的体积分数反演具有重要意义。

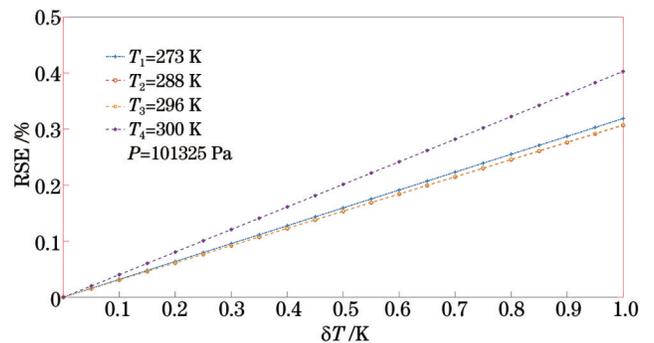
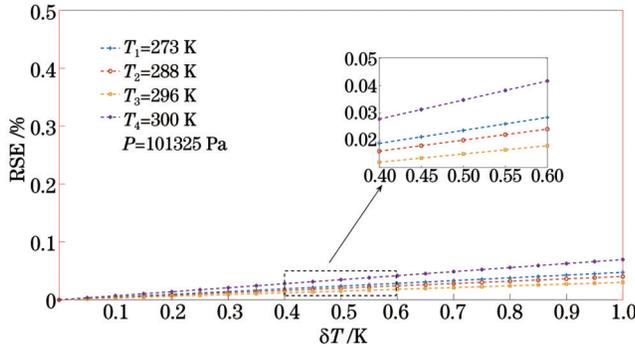


图 15 温度不确定度引入的体积分数反演 RSE

Fig. 15 RSE of volume fraction inversion caused by temperature uncertainty

为了探究温度影响  $\text{CO}_2$  体积分数反演精度的关键之处,可先探究温度对  $\text{CO}_2$  分子数密度计算精度的影响。由图 16 可以观察到温度不确定度所引起的  $\text{CO}_2$  分子数密度的计算误差。

从图 16 不难发现,温度偏差对于  $\text{CO}_2$  分子数密度的影响较小,1 K 的温度不确定度引起的总体偏差不足 0.06%,因此可以推出,温度对于  $\text{CO}_2$  体积分数反演的影响主要在于将  $\text{CO}_2$  分子数密度转换为体积分数时,温度作为直接参数,本身直接参与计算,对反演精

图 16 温度不确定度引起的 CO<sub>2</sub> 分子数密度 RSEFig. 16 RSE of CO<sub>2</sub> molecular number density caused by temperature uncertainty

度影响较大。

#### 4.2.3 压力不确定度引入误差

探究压力不确定度引入误差的方法与温度类似,在不同压力基准之下,不同压力偏移量对 CO<sub>2</sub> 体积分数反演精度的影响程度也并不相同,可以像探究温度一样,针对  $\Delta r$  范围内展开压力变化所产生影响的研究。不同压力基准也代表不同的探测高度,压力对 CO<sub>2</sub> 体积分数反演的影响同样体现在 CO<sub>2</sub> 分子数密度的计算以及本身作为直接参数参与计算两个方面,图 17 体现了压力偏差的影响。

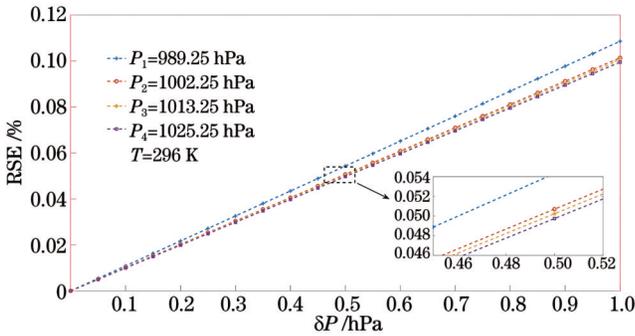
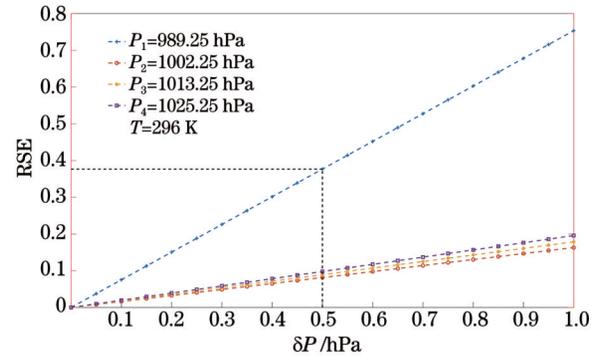


图 17 压力不确定度引入的体积分数反演 RSE

Fig. 17 RSE of volume fraction inversion caused by pressure uncertainty

本部分研究内容分别选取了 989.25~1025.25 hPa 范围内 4 个压力基底作为研究压力,测量不确定度对于反演精度的影响,从图 17 中能直接看出,即使是受压力不确定度影响较大的 989.25 hPa,当压力偏差为 1 hPa 时,其所引起的相对不确定度也仅为 0.11%,绝对误差为  $4.4 \times 10^{-7}$ ,其综合影响较小。

当然,在这里也对压力影响 CO<sub>2</sub> 分子数密度计算精度的程度进行了分析(图 18),与温度效果相似,压力对于 CO<sub>2</sub> 分子数密度的计算精度影响程度不大,当压力偏差为 1 hPa 时,RSE 仅为 0.0078%。因此,压力对 CO<sub>2</sub> 体积分数反演精度的影响主要体现在作为直接参数参与计算时所产生的影响。

图 18 压力不确定度引起的 CO<sub>2</sub> 分子数密度 RSEFig. 18 RSE of CO<sub>2</sub> molecular number density caused by pressure uncertainty

#### 4.2.4 水汽体积分数不确定度引入误差

前文在推导 CO<sub>2</sub> 干空气体积混合比反演方法时未考虑湿空气的大气条件。CO<sub>2</sub> 干空气与干洁大气的区别主要体现在分子数密度上。同样假设空气为理想气体,其分子数密度  $N_{\text{air}}$  包含水蒸气分子数密度  $N_{\text{H}_2\text{O}}$  和干空气分子数密度  $N_{\text{dryair}}$ ,即

$$N_{\text{air}} = N_{\text{dryair}} + N_{\text{H}_2\text{O}} \quad (11)$$

由混合比定义可知,大气中各气体成分的体积分数相当于其分子数密度与干空气分子数密度的比,因此可以推算得出

$$N_{\text{H}_2\text{O}} = X_{\text{H}_2\text{O}} N_{\text{dryair}}, \quad (12)$$

式中:  $X_{\text{H}_2\text{O}}$  为水汽体积分数。

结合理想气体状态方程,可以推算出干空气分子数密度为

$$N_{\text{dryair}} = \frac{N_{\text{air}}}{1 + X_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{N_{\text{A}} P}{RT(1 + X_{\text{H}_2\text{O}})}, \quad (13)$$

$$X_{\text{CO}_2}(r) = \frac{N_{\text{CO}_2}(r)}{N_{\text{dryair}}(r)} =$$

$$\frac{RT(r) [1 + X_{\text{H}_2\text{O}}(r)] \ln \frac{P(\lambda_{\text{off}}, r_{\text{top}}) P(\lambda_{\text{on}}, r_{\text{bottom}})}{2 \Delta \sigma_{\text{CO}_2}(r) \Delta r P(r) N_{\text{A}}}}{P(\lambda_{\text{on}}, r_{\text{top}}) P(\lambda_{\text{off}}, r_{\text{bottom}})} \quad (14)$$

根据式(13)和式(3),最终得出 CO<sub>2</sub> 体积分数反演公式[式(14)]。因此,在将 CO<sub>2</sub> 分子数密度转化为 CO<sub>2</sub> 体积混合比时,需要考虑水汽体积分数测量误差的影响。为探究水汽体积分数探测误差对 CO<sub>2</sub> 体积分数反演精度的影响程度,通过设置不同的水汽体积分数测量偏差,水汽体积分数测量不确定度为

$$E_{\text{RS}} = \frac{\delta X_{\text{CO}_2}}{X_{\text{CO}_2}} = \frac{1}{X_{\text{CO}_2}} \frac{\partial X_{\text{CO}_2}}{\partial X_{\text{H}_2\text{O}}} \delta X_{\text{H}_2\text{O}} \quad (15)$$

由于大气中水汽体积混合比数量级跨度较大,因此,可将基准水汽体积混合比作为水汽体积分数偏移量,进而探究其测量偏差对于 CO<sub>2</sub> 体积分数反演精度的影响情况,如图 19 所示。

在大气环境中,选取正常天气条件下水汽体积混合比作为基底,比如在青岛地区夏季,当温度在 25 ℃、

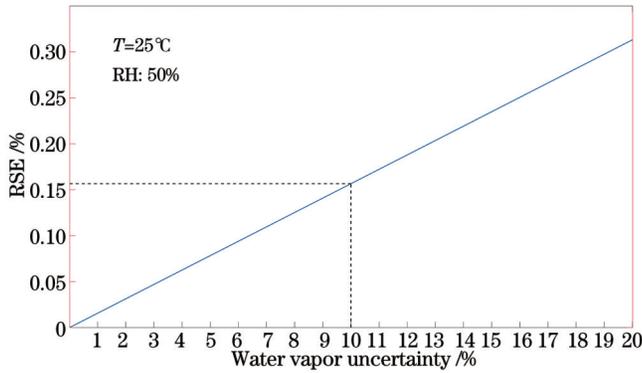


图 19 水汽体积混合比测量偏差引起的  $\text{CO}_2$  体积分数反演 RSE

Fig. 19 RSE of  $\text{CO}_2$  volume fraction caused by measurement deviation of water vapor volume mixing ratio

相对湿度为 50% 时,一般水汽体积混合比为  $1.59093 \times 10^{-2}$ 。由图 19 可知当水汽体积混合比偏差达到 10% 时,系统反演  $\text{CO}_2$  体积分数的不确定度为 0.1566%,当  $\text{CO}_2$  的体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  时,绝对误差约为  $1.24 \times 10^{-7}$ 。

综上所述,针对 CDIAL 系统反演  $\text{CO}_2$  体积分数方法中出现的各个关键参数,包括大气参数、激光参数等,本节分别对它们展开了研究,分析了在获取到的回波信号一定的情况下,这些参数对  $\text{CO}_2$  体积分数反演精度的影响。结果显示,各个参数对于系统造成的总误差为 0.45%,当某一距离库内  $\text{CO}_2$  平均体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  时,以上误差源引起的总体绝对误差为  $1.8 \times 10^{-6}$ ,最终,各误差源的总误差如表 4 所示。

表 4 系统总误差

Table 4 Total error of system

Error source	Uncertainty	Relative system error / %	Absolute error / $10^{-6}$
Wavelength	0.5 pm	0.01	0.04
Temperature	1 K	0.41	1.64
Pressure	1 hPa	0.11	0.44
Water vapor	10%	0.16	0.64
Total	—	0.45	1.80

## 5 结 论

本文开展了微脉冲 CDIAL 仿真计算与误差分析方面的工作。针对典型的系统光学参数、大气参数等,仿真模拟得到雷达系统探测的回波信号,进而通过计算得到不同高度处的 DAOD,通过对参数模型设置不同的偏移量来探究它们对于光学厚度计算精度的影响。仿真计算的结果显示,在 0~3 km 的高度范围内 DAOD 总体计算误差小于 0.1706%。结合平衡探测器相关参数,利用仿真信号,探究了系统探测过程中的信噪比与  $\text{CO}_2$  体积分数的随机误差。此外,还针对某

高度一定距离库,理论分析了大气参数(大气温度、大气压强和水汽体积分数)的不确定度误差以及激光雷达系统波长漂移所引入的误差,并且对这些误差源所引起的  $\text{CO}_2$  体积分数反演的绝对误差进行了评估。结果表明,各误差源引起的总体  $\text{CO}_2$  体积分数反演的 RSE 为 0.45%,即当  $\text{CO}_2$  的体积分数为  $4 \times 10^{-4}$  时,绝对误差为  $1.8 \times 10^{-6}$ 。

本文对 CDIAL 系统 DAOD 计算和  $\text{CO}_2$  体积分数反演进行了研究,这是系统预研阶段的重要环节,仿真计算与误差分析的结果对于硬件系统搭建和指标设计具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, et al. Climate change 2021: the physical science basis[EB/OL]. [2023-04-12]. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Chapter05.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter05.pdf).
- [2] Beirle S, Platt U, Wagner T. Global air pollution map produced by Envisat's SCIAMACHY[R]. France: European Space Agency, 2015.
- [3] Blumstein D, Chalon G, Carlier T, et al. IASI instrument: technical overview and measured performances[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5543: 196-207.
- [4] Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 253-264.
- [5] Canadell J G, Le Quéré C, Raupach M R, et al. Contributions to accelerating atmospheric  $\text{CO}_2$  growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(47): 18866-18870.
- [6] Cogan A J, Boesch H, Parker R J, et al. Atmospheric carbon dioxide retrieved from the Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT): comparison with ground-based TCCON observations and GEOS-Chem model calculations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D21): D21301.
- [7] 刘毅,蔡兆男,杨东旭,等.中国二氧化碳科学实验卫星高光谱探测仪光谱指标影响分析及优化方案[J].科学通报,2013,58(27): 2787-2789.  
Liu Y, Cai Z N, Yang D X, et al. Optimization of the instrument configuration for TanSat  $\text{CO}_2$  spectrometer[J]. Science Bulletin, 2013, 58(27): 2787-2789.
- [8] Koch G J, Barnes B W, Petros M, et al. Coherent differential absorption lidar measurements of  $\text{CO}_2$ [J]. Applied Optics, 2004, 43(26): 5092-5099.
- [9] Koch G J, Beyon J Y, Gibert F, et al. Side-line tunable laser transmitter for differential absorption lidar measurements of  $\text{CO}_2$ : design and application to atmospheric measurements[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 944-956.
- [10] Gibert F, Flamant P H, Bruneau D, et al. Two-micrometer heterodyne differential absorption lidar measurements of the atmospheric  $\text{CO}_2$  mixing ratio in the boundary layer[J]. Applied Optics, 2006, 45(18): 4448-4458.
- [11] Joly L, Marnas F, Gibert F, et al. Laser diode absorption spectroscopy for accurate  $\text{CO}_2$  line parameters at  $2 \mu\text{m}$ : consequences for space-based DIAL measurements and potential biases[J]. Applied Optics, 2009, 48(29): 5475-5483.
- [12] Gibert F, Edouard D, Cénac C, et al.  $2\text{-}\mu\text{m}$  Ho emitter-based coherent DIAL for  $\text{CO}_2$  profiling in the atmosphere[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3093-3096.
- [13] Lahyani J, Le Gouët J, Gibert F, et al.  $2.05\text{-}\mu\text{m}$  all-fiber laser

- source designed for CO<sub>2</sub> and wind coherent lidar measurement [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(15): C12-C19.
- [14] 陶小红, 胡以华, 赵楠翔, 等. 大气 CO<sub>2</sub> 相干探测激光雷达系统性能分析[J]. *量子电子学报*, 2008, 25(2): 230-234.  
Tao X H, Hu Y H, Zhao N X, et al. Analysis of coherent lidar system for measurements of atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2008, 25(2): 230-234.
- [15] 陶小红, 胡以华, 蔡晓春. 差分吸收激光雷达探测大气 CO<sub>2</sub> 精度分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2008, 3(2): 100-103.  
Tao X H, Hu Y H, Cai X C. Accuracy analysis of differential absorption lidar for detecting atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(2): 100-103.
- [16] 刘豪, 舒嵘, 洪光烈, 等. 连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO<sub>2</sub>[J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104214.  
Liu H, Shu R, Hong G L, et al. Continuous-wave modulation differential absorption lidar system for CO<sub>2</sub> measurement[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104214.
- [17] 章桦萍. 差分吸收激光雷达探测二氧化碳柱浓度的数据处理与误差分析[D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2019.  
Zhang H P. Data processing and error analysis of carbon dioxide column concentration detected by differential absorption lidar[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [18] 刘继桥, 谢杨易, 李世光, 等. 用于全球大气温室气体探测的星载激光雷达研究[J]. *红外*, 2013, 34(2): 22-26, 34.  
Liu J Q, Xie Y Y, Li S G, et al. Research on spaceborne lidar for global atmospheric greenhouse gas detection[J]. *Infrared*, 2013, 34(2): 22-26, 34.
- [19] Zhu Y D, Yang J X, Chen X A, et al. Airborne validation experiment of 1.57- $\mu\text{m}$  double-pulse IPDA LIDAR for atmospheric carbon dioxide measurement[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(12): 1999.
- [20] 韩舸, 龚威, 马昕, 等. 地基 CO<sub>2</sub> 廓线探测差分吸收激光雷达[J]. *物理学报*, 2015, 64(24): 244206.  
Han G, Gong W, Ma X, et al. A ground-based differential absorption lidar for atmospheric vertical CO<sub>2</sub> profiling[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(24): 244206.
- [21] 余赛芬. 单光子探测自由空间分布式光谱遥感技术[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.  
Yu S F. Single photon detection free space distributed spectral remote sensing technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021.
- [22] 刘秋武, 王晓宾, 陈亚峰, 等. 基于染料激光器的差分吸收激光雷达探测大气 NO<sub>2</sub> 浓度[J]. *光学学报*, 2017, 37(4): 0428004.  
Liu Q W, Wang X B, Chen Y F, et al. Detection of atmospheric NO<sub>2</sub> concentration by differential absorption lidar based on dye lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(4): 0428004.
- [23] 洪光烈, 王钦, 王建宇, 等. 地基差分吸收激光雷达垂直探测大气压力初步实验[J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0310003.  
Hong G L, Wang Q, Wang J Y, et al. Preliminary investigation of vertical measurement of atmospheric pressure using ground-based differential absorption lidar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0310003.
- [24] 贾晓东. 1.55  $\mu\text{m}$  相干测风激光雷达样机的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.  
Jia X D. Development of 1.55  $\mu\text{m}$  coherent wind lidar prototype [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [25] Chouza F, Reitebuch O, Groß S, et al. Retrieval of aerosol backscatter and extinction from airborne coherent Doppler wind lidar measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(7): 2909-2926.
- [26] Ku R T, Hinkley E D, Sample J O. Long-path monitoring of atmospheric carbon monoxide with a tunable diode laser system [J]. *Applied Optics*, 1975, 14(4): 854-861.
- [27] 谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 大气温度、湿度和压强对星载激光雷达测量 CO<sub>2</sub> 浓度精度的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(s2): s214005.  
Xie Y Y, Liu J Q, Jiang J X, et al. Effects of atmosphere temperature, humidity and pressure for a space-borne lidar measuring atmosphere CO<sub>2</sub> concentrations[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(s2): s214005.

## Simulation and Error Analysis of Coherent Differential Absorption Carbon Dioxide Lidar

Li Yinying<sup>1</sup>, Chen Xiangcheng<sup>1</sup>, Yu Cuirong<sup>2</sup>, Dai Guangyao<sup>1</sup>, Wu Songhua<sup>1,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>College of Marine Technology, Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China;

<sup>2</sup>Qingdao Leice Transient Technology Co., Ltd., Qingdao 266101, Shandong, China;

<sup>3</sup>Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, Shandong, China;

<sup>4</sup>Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, Shandong, China

### Abstract

**Objective** Since the middle of the 20th century, due to the greenhouse effect, the global average surface temperature has increased by 0.85 °C between 1880 and 2012, and larger scale temperature increases have been investigated in some regions. Atmospheric carbon dioxide, as one of the important gases causing the greenhouse effect, plays an important role in global climate change. Due to the characteristics of large emissions and easy accumulation, carbon dioxide is often used as the main indicator of energy conservation and emission reduction. Understanding the spatiotemporal distribution pattern of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration in different regions can help to grasp the footprint of the “source” and “sink” of CO<sub>2</sub> gas, which is conducive to achieving emission reduction control in China and accelerating the high-quality development of green

and low carbon. The traditional methods of observing CO<sub>2</sub> concentration use various meteorological satellites equipped with passive remote sensing observation instruments to observe the global large-scale CO<sub>2</sub> concentration. However, passive remote sensing is limited by its observation characteristics, and there are problems such as difficult measurement at night, poor detection performance in high latitude regions, vulnerability to clouds and aerosols, and insufficient near-surface CO<sub>2</sub> observation accuracy. As one of the active remote sensing technologies, coherent differential absorption lidar technology can work all day and detect with high accuracy. Compared to ground-based or airborne CO<sub>2</sub> column concentration observation methods, it can provide CO<sub>2</sub> concentration profile observation results with higher resolution. This observation method combines two technical systems, i.e., optical heterodyne and differential absorption, and can achieve high sensitivity, high integration, and diversified detection of atmospheric parameters. Coherent differential absorption lidar can obtain information about the vertical profile of carbon dioxide concentration and has the ability to detect point sources, cities, and key areas with high accuracy. However, its system structure is complex, and its development is difficult in the case of limited detection energy, with relatively little research. To assist in the parameter design of the lidar hardware system and explore the detection performance of the system, we explore the impact of atmospheric and optical parameter changes on the differential optical thickness calculation and theoretically analyze the error of the system in retrieving CO<sub>2</sub> concentration.

**Methods** Differential absorption optical thickness refers to the difference in the ratio of backscatter signals at two wavelengths in the carbon dioxide differential absorption lidar detection system. It represents the difference in the two laser backscatter signals caused by the absorption of carbon dioxide molecules and the absorption effect of carbon dioxide molecules on a specific emitted laser on the detection path. Using typical optical parameters of the lidar system and the atmospheric parameters, we simulate the backscatter signals at different detection altitudes within the range of 0–3 km and calculate the differential optical thickness for different distances. By setting a certain amount of deviation for the parameter model used, we explore the impact of these parameter changes on the accuracy of differential optical thickness calculation. In the pre-research stage of a micro pulse coherent differential absorption lidar system, the results of the error estimation are of great significance for the design of hardware system parameters and the evaluation of system performance. For the inversion of carbon dioxide concentration from monopulse backscatter signals, based on the differential absorption principle, it can be approximated that the aerosol backscattering and atmospheric extinction in the atmospheric environment remain constant. As a result, the instability of differential optical thickness caused by the hardware system acquisition can be ignored. We evaluate the detection performance of the system by exploring the relative system error caused by the uncertainty of relevant parameters in the carbon dioxide concentration inversion method.

**Results and Discussions** Through the simulation, we find that at different altitudes, the variation trend of differential optical thickness with the increase in wavelength offset is consistent, showing a trend of increasing first and then decreasing. This indicates that the absorption of probe laser energy at different altitudes increases first and then decreases with the increase in wavelength offset. In the altitude range of nearly 3.5 km, when the wavelength offset is less than 0.5 pm, the relative system error is less than 0.015%. As the wavelength offset increases, the relative system error of differential optical thickness at different heights also increases. At different altitudes, with the increase in temperature offset, the differential optical thickness also shows a downward trend. When the temperature deviation is less than 1 K, the relative system error of differential optical thickness for each altitude layer is less than 0.34%. The pressure measurement deviation does not have a specific impact on calculation results of differential optical thickness. Within the entire simulation range, the pressure offset has a small impact on the calculation of differential optical thickness, with an overall relative error of less than 0.008%. Aiming at the key parameters in the CO<sub>2</sub> concentration inversion method for the coherent differential absorption lidar system, we investigate the error in CO<sub>2</sub> concentration inversion caused by their uncertainty. The results show that the total error caused by each parameter for the system is 0.45%. If the average CO<sub>2</sub> concentration in a certain distance is  $4 \times 10^{-4}$ , the overall absolute error of the system is  $1.8 \times 10^{-6}$ .

**Conclusions** We introduce the simulation calculation and error analysis of micropulse coherent differential absorption lidar. For the typical system optical parameters and the atmospheric parameters, we conduct a simulation to obtain the backscatter signal detected by the lidar system and calculate differential optical thickness at different heights. By setting different offsets for the parameter model, we explore their impact on the accuracy of optical thickness calculation. In addition, we theoretically analyze the uncertainty errors of atmospheric parameters (atmospheric temperature, atmospheric pressure, and water vapor concentration) and the errors introduced by the wavelength drift of the lidar system for a certain altitude and distance database. In addition, the absolute errors of CO<sub>2</sub> concentration inversion caused by these error sources are evaluated. These works are important in the pre-research stage of lidar systems, and the results of simulation calculations and error analysis are of great significance for hardware system parameter design and system performance evaluation.

**Key words** atmospheric optics; carbon dioxide volume fraction; coherent differential absorption; lidar; simulation and performance evaluation