

# LEO-LEO 红外激光掩星 CO<sub>2</sub> 浓度测量技术研究

李文冬<sup>1,2</sup>, 刘继桥<sup>1,2\*</sup>, 朱亚丹<sup>1,2</sup>, 陈卫标<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

**摘要** 利用基于近地轨道(LEO)卫星组网的红外激光掩星(LIO)技术,可对地球大气温室气体垂直廓线进行主动探测,为全球温室气体浓度廓线的测量提供新手段。介绍了基于 LIO 技术的大气温室气体浓度廓线的测量原理,针对最主要的温室气体 CO<sub>2</sub> 建立了 LIO 信号链路模型,通过仿真分析了工作波数对 CO<sub>2</sub> 探测精度的影响,并基于误差最小的仿真结果对 CO<sub>2</sub> 探测波数进行优化选择。采用所选波数对 LIO 技术的探测性能进行分析,最终得到可用于 CO<sub>2</sub> 浓度廓线探测的波数为 4771.6215 cm<sup>-1</sup> 和 4772.0240 cm<sup>-1</sup>。在 5~35 km 高度的有效探测范围内,实现了 0.6~1.4 km 的垂直分辨率,CO<sub>2</sub> 浓度探测的相对随机误差小于 0.8%,最小相对随机误差(0.229%)出现在 10 km 处。研究结果为星载 LIO 大气探测系统原理样机的设计提供了重要参考。

**关键词** 遥感; 红外激光掩星; 主动探测; 二氧化碳浓度廓线; 性能仿真

中图分类号 P412.27

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0810001

## LEO-LEO Infrared Laser Occultation Technique to Measure Atmospheric Carbon Dioxide Concentration

Li Wendong<sup>1,2</sup>, Liu Jiqiao<sup>1,2\*</sup>, Zhu Yadan<sup>1,2</sup>, Chen Weibiao<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The infrared laser occultation (LIO) technique based on the low earth orbit satellite network can perform an active detection for vertical profiles of greenhouse gases in the earth's atmospheric, thereby providing a new method for global greenhouse gas concentration profile measurement. In this paper, the principle of the concentration profile measurement of the LIO technique is introduced. The influence of the operation wavelength on the detection accuracy of the most important greenhouse gas CO<sub>2</sub> is simulated by establishing the LIO signal link model. Subsequently, the detection wavelengths for CO<sub>2</sub> are optimized based on the simulation results with the minimum error. Additionally, the detection performance of the LIO technique is analyzed using the selected wavelengths. Finally, the wavenumbers of 4771.6215 cm<sup>-1</sup> and 4772.0240 cm<sup>-1</sup> available for the CO<sub>2</sub> concentration profile detection are selected. The selected wavelengths can achieve a vertical resolution of 0.6-1.4 km in the altitude range of 5-35 km. The relative random error of profile detection is lower than 0.8%. The minimum relative random error (0.229%) appears at 10 km. The research results can provide an important reference for the design of a prototype of spaceborne LIO atmospheric detection system.

**Key words** remote sensing; infrared laser occultation; active detection; carbon dioxide concentration profile; performance simulation

**OCIS codes** 280.1910; 280.3640

收稿日期: 2019-02-22; 修回日期: 2019-03-27; 录用日期: 2019-04-08

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0104605)、民用航天预研项目(D040103)

\* E-mail: liujqiao@siom.ac.cn

# 1 引 言

自工业革命以来,人类活动加剧,随之而来的酸雨、温室效应等环境问题逐渐显露并日趋严峻。研究表明,以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体是温室效应的主要推力,大气中 CO<sub>2</sub> 浓度的变化对气候的影响备受气候、环境等自然学科的重视。而高时空分辨率的 CO<sub>2</sub> 浓度数据是气候科学研究的重要需求,也是研究大气全球变化、人类活动对大气环境影响的重要参数,对于提高数值天气预报的精度以及研究日地能量传输过程具有重要意义。

星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达具有探测精度高、测量区域广且不受气溶胶干扰等优点<sup>[1]</sup>,刘继桥课题组<sup>[2-3]</sup>针对 CO<sub>2</sub> IPDA 激光雷达开展了广泛研究,目前已研制出原理样机,其对 CO<sub>2</sub> 体积混合比柱浓度的理论测量误差可达到 10<sup>-6</sup>。但是 IPDA 激光雷达获取的是整层大气 CO<sub>2</sub> 柱浓度的平均值,无法提供大气 CO<sub>2</sub> 的垂直变化数据。为了兼顾全球 CO<sub>2</sub> 浓度的测量精度和垂直分辨能力,可以考虑将 IPDA 激光雷达技术应用到新的大气探测方式中。通过卫星组网构成掩星星座,对地球大气进行临边探测,是获得大气参量廓线的有效手段。目前利用无线电信号进行探测的全球导航卫星系统无线电掩星技术 GNSS RO (Global Navigation Satellite System Radio Occultation, GRO),已实现对大气热力学参量廓线的测量,其数据产品已被广泛应用于数值天气预报和全球气候监测<sup>[4]</sup>。鉴于 GRO 技术在大气热力学参量廓线测量中的成功运用,欧洲的 ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And Climate Trends Explorer)<sup>[5]</sup> 提出了在近地轨道 (LEO) 卫星构成的掩星星座上搭载红外激光发射机和接收机的设想,采用主动临边探测的方式进行大气成分和风速的测量,即激光差分吸收与掩星探测相结合的红外激光掩星 (LIO) 技术。Clifford 等<sup>[6]</sup> 也提出了类似的方案,即将搭载有激光发射机的卫星与多个空间反射镜组网进行临边探测,并针对对流层顶到平流层底高度 (UTLS, 5~35 km) 区域水汽的探测进行仿真研究。

LIO 技术结合了激光差分吸收与掩星探测的优点,主动式激光差分吸收光谱技术可达到较高的探测精度,同时 LEO-LEO 掩星探测方式可以实现对全球高覆盖率的测量,获得垂直分辨能力 (约 1 km) 的探测数据。本文主要研究了利用 LIO 技术

测量全球 CO<sub>2</sub> 浓度廓线的方法。建立针对 UTLS 区域 CO<sub>2</sub> 浓度廓线的探测仿真模型,通过计算分析优化选择激光的工作波数,利用选择的工作波数对 LIO 技术的探测性能进行仿真分析。

# 2 基本原理

图 1 为 LIO 方法的几何结构图,  $\alpha$ 、 $a$ 、 $r$ 、 $\theta$ 、 $\Phi$  分别为激光路径弯曲角、碰撞参数、卫星到地心的距离、两颗卫星与地心连线的夹角以及激光传输方向与地心连线之间的夹角,  $\mathbf{V}$ 、 $\mathbf{e}$  分别表示卫星速度矢量和激光传输方向矢量,下标 T、R 分别表示发射机和接收机。如图 1 所示,两颗分别搭载红外激光发射机 (Tx) 和接收机 (Rx) 的 LEO 卫星构成掩星星座。在一定几何位置处,发射机发射两束波长相近的激光,波长分别位于 CO<sub>2</sub> 吸收谱的强吸收 (on-line) 和弱吸收 (off-line) 位置,激光信号穿过地球大气层被接收机接收,然后在两颗卫星相对运动过程中形成下降 (或上升) 掩星事件,实现对大气层从上到下 (或从下到上) 近似垂直的扫描测量,获得剖面信息。利用光学积分路径差分吸收原理和 Abel 积分变换实现 CO<sub>2</sub> 浓度廓线的反演。

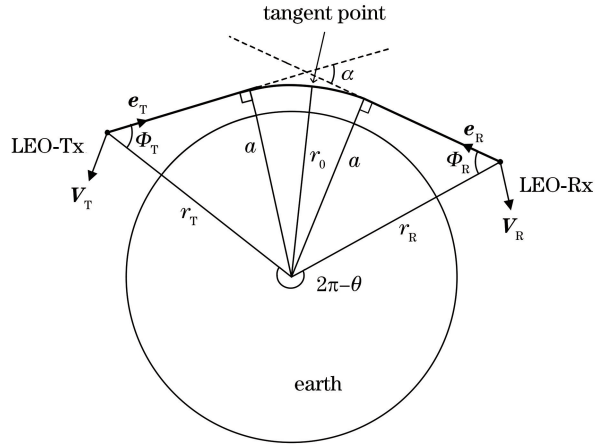


图 1 LIO 几何结构示意图

Fig. 1 Schematic of LIO geometric structure

## 2.1 激光路径的确定

如图 1 所示,在掩星事件中,激光信号穿过大气层时由于大气折射率的不均匀分布,将发生  $\alpha$  角度的弯曲,定义碰撞参数  $a$  和切点半径  $r_0$ 。在大气折射率局部球对称的近似条件下对大气分层进行光线追踪<sup>[7]</sup>,  $\alpha$ 、 $a$ 、 $r_0$  满足

$$a = \mu(r_0)r_0, \quad (1)$$

$$\alpha(a) = 2a \int_{r_0}^{r_{\text{top}}} \frac{d \ln \mu}{dr} \frac{dr}{[(\mu r)^2 - a^2]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

式中： $\mu(r_0)$ 为 $r_0$ 位置处的折射率； $r_{\text{top}}$ 为积分上限，由于高层大气十分稀薄，对积分的贡献可以忽略，在这里将 $r_{\text{top}}$ 取为60 km。

在发生掩星事件时，两颗LEO卫星的位置坐标 $r_{\text{T}}$ 、 $r_{\text{R}}$ 与弯曲角 $\alpha$ 存在特殊的几何关系，即

$$\alpha(a) = \theta - \arccos\left(\frac{a}{r_{\text{T}}}\right) - \arccos\left(\frac{a}{r_{\text{R}}}\right). \quad (3)$$

结合(1)~(3)式可实时对 $\alpha$ 、 $a$ 、 $r_0$ 进行求解。

## 2.2 浓度廓线的反演

on-line和off-line激光在穿过大气层时被 $\text{CO}_2$ 分子吸收，传输路径上的差分吸收光学厚度(DAOD)表示为

$$D_{\text{AOD}} = \int \rho_{\text{CO}_2} (\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}) ds, \quad (4)$$

式中： $s$ 为路径积分的积分变量，表示长度； $\rho_{\text{CO}_2}$ 为 $\text{CO}_2$ 的分子数密度； $\sigma_{\text{on}}$ 、 $\sigma_{\text{off}}$ 分别为 $\text{CO}_2$ 在on-line和off-line波数处的吸收截面。结合(2)式，切点高度为 $r_0$ 时传输路径上的DAOD表示为

$$D_{\text{AOD}}(r_0) = 2 \int_{r_0}^{r_{\text{top}}} \Delta k \frac{\mu r}{(\mu^2 r^2 - \mu_0^2 r_0^2)^{\frac{1}{2}}} dr, \quad (5)$$

式中： $\Delta k = \rho_{\text{CO}_2} (\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})$ ； $\mu$ 为折射率。

对(5)式应用Abel积分变化可以得到

$$\Delta k(r_0) = -\frac{1}{\pi} a'(r_0) \int_{r_0}^{r_{\text{top}}} \frac{dD_{\text{AOD}}}{dr} \frac{\mu r}{(\mu^2 r^2 - \mu_0^2 r_0^2)^{\frac{1}{2}}} dr, \quad (6)$$

根据Beer-Lambert定律， $D_{\text{AOD}}$ 又可以用发射光强和透射光强表示为

$$D_{\text{AOD}} = \ln \frac{P_0(\lambda_{\text{on}})P(\lambda_{\text{off}})}{P_0(\lambda_{\text{off}})P(\lambda_{\text{on}})}, \quad (7)$$

式中： $P_0$ 为激光信号的发射功率； $\lambda_{\text{on}}$ 为吸收通道的工作波长； $P$ 为接收到的激光信号功率； $\lambda_{\text{off}}$ 为参考通道的工作波长。通过(7)式求得 $D_{\text{AOD}}$ 的测量值，将其代入(6)式中，再结合理想气体状态方程，可以得到 $\text{CO}_2$ 体积分数廓线为

$$\chi_{\text{CO}_2}(r_0) = \frac{\Delta k(r_0)k_{\text{B}}T}{(\sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}})p} \cdot 10^6, \quad (8)$$

式中： $\chi_{\text{CO}_2}$ 为 $\text{CO}_2$ 的体积分数； $k_{\text{B}}$ 为玻尔兹曼常数； $T$ 为温度； $p$ 为大气压强。

## 2.3 链路衰减模型

激光信号从发射机到接收机整个传输过程中的损耗主要由三部分组成：自由空间传播损耗、大气损耗和接收机光学系统损耗。由激光雷达方程可知，接收机接收到的激光信号功率为

$$P_{\text{R}} = P_{\text{T}} \left( \frac{d_{\text{R}}}{D_{\text{TR}}\varphi} \right)^2 \exp(-\tau)\eta, \quad (9)$$

式中： $P_{\text{R}}$ 、 $P_{\text{T}}$ 分别为接收功率和发射功率； $d_{\text{R}}$ 、 $D_{\text{TR}}$ 、 $\varphi$ 分别为接收望远镜直径、激光传输距离和激光发散角； $\tau$ 为大气衰减对应的光学厚度； $\eta$ 为接收机光学系统的效率。

大气衰减主要包含 $\text{CO}_2$ 吸收、气溶胶吸收、其他无关气体( $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{O}_2$ 等)吸收、大气分子瑞利散射。瑞利散射产生的等效吸收截面为

$$\sigma_{\text{R}} = \frac{32\pi^3(\mu - 1)^2}{3\lambda^4 N_{\text{air}}}, \quad (10)$$

式中： $\lambda$ 为波长； $N_{\text{air}}$ 为空气的分子数密度。

计算过程中的大气温度、湿度、压强采用美国1976标准大气模型<sup>[8]</sup>获得，红外波段的折射率采用Edlén方程<sup>[9]</sup>获得。利用HITRAN 2016数据库拟合分子的吸收截面，结合(5)式对光学厚度进行计算。

## 3 激光波数的优化选择

### 3.1 on-line 波数选择

目前，学术领域针对 $\text{CO}_2$ 浓度的主动探测主要集中在1.5  $\mu\text{m}$ 和2  $\mu\text{m}$ 的红外波段。在临边探测方式下，考虑到激光信号穿过大气层的路径较长，在1.5  $\mu\text{m}$ 波段处，空气分子的瑞利散射和气溶胶米散射对信号的影响很大，而2  $\mu\text{m}$ 波段处受到的太阳辐射和大气热辐射的影响较小，因此拟将2  $\mu\text{m}$ 作为 $\text{CO}_2$ 浓度廓线探测的优选波段<sup>[5]</sup>。

off-line处的光学厚度很小，DAOD主要由on-line光学厚度决定。如果所选择的on-line处的 $\text{CO}_2$ 吸收过强，则当掩星切点高度较低时，on-line信号就会因穿过大气的路程较长而具有较大的光学厚度，从而被强烈吸收，难以测量；相反，如果on-line处的吸收过弱，则当掩星切点高度较大时，on-line信号穿过大气的路程较小，并且由于高空中的 $\text{CO}_2$ 含量减少，导致光学厚度太小，到达接收机的on-line和off-line信号的差别就比较微弱，不利于减小测量误差。所以，应合理选择on-line波数，使UTLS高度范围(5~35 km)具有较高的探测精度。在切点高度 $r_0$ 处的相对随机误差(RRE)为<sup>[6]</sup>

$$R_{\text{RE}} = \frac{\Delta D_{\text{AOD}}}{D_{\text{AOD}}} g^{\text{Abel}} = \frac{1}{D_{\text{AOD}} \sqrt{N}} \frac{1}{R_{\text{SNR}}} g^{\text{Abel}}, \quad (11)$$

式中： $\Delta D_{\text{AOD}}$ 为DAOD的测量误差； $N$ 为单位垂直

分辨率上的探测次数;  $R_{SNR}$  为接收信号的信噪比;  $g_{Abel}$  为对测量数据进行 Abel 变换时引入的误差放大因子<sup>[10]</sup>。

利用 2.3 节中所述链路衰减模型, 分别对不同 on-line 波数下系统的相对随机误差进行仿真计算, 得到了 5 km 和 35 km 高度处相对随机误差与波数的关系曲线, 如图 2 所示。

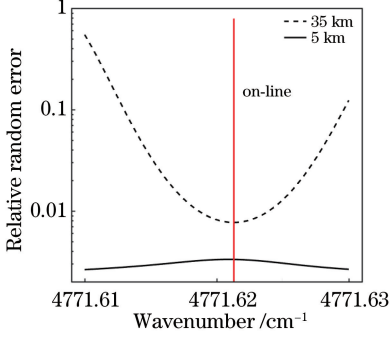


图 2 5 km 和 35 km 高度处相对随机误差随 on-line 波数的变化

Fig. 2 RRE as a function of on-line wavenumber at altitudes of 5 km and 35 km

由图 2 可知, 与 5 km 高度相比, on-line 波数对 35 km 高度的相对随机误差影响更大, 这是因为高海拔处  $CO_2$  吸收谱线的线宽较窄, 当所选用的 on-line 波数偏离吸收谱线中央时,  $CO_2$  光学厚度显著减小, 导致差分效果减弱, 最终使相对随机误差增大。波数对 5 km 高度处相对随机误差的影响比较弱, 故在选择 on-line 波数时, 优先考虑使 35 km 高度相对随机误差最小的波数。最终选定 on-line 波数为  $4771.6215 \text{ cm}^{-1}$ , 5 km 和 35 km 高度处  $CO_2$  浓度测量的相对误差分别为 0.331% 和 0.768%。

### 3.2 off-line 波数选择

为了达到良好的差分效果, off-line 波数应选在  $CO_2$  吸收尽可能弱的位置。为了消除大气宽带效应的影响, 同时降低光源研制的技术难度, off-line 与 on-line 之间的波数间隔不能过大。除此之外, 还应考虑水汽对 on-line 和 off-line 的影响, 在选择 off-line 波数时, 应尽可能使 on-line 和 off-line 处水汽的光学厚度相近。由于大气中的水汽含量随海拔高度的升高而迅速减小, 对  $CO_2$  测量的干扰主要在低空, 仿真计算切点高度为 5 km 时, 激光信号传输路径上  $CO_2$  和  $H_2O$  在  $4771 \text{ cm}^{-1}$  附近的吸收光谱如图 3 所示。

由仿真结果可知, 在选定的 on-line 波数处,  $H_2O$  的光学厚度为 0.013, 将产生约 1.5% 的浓度测

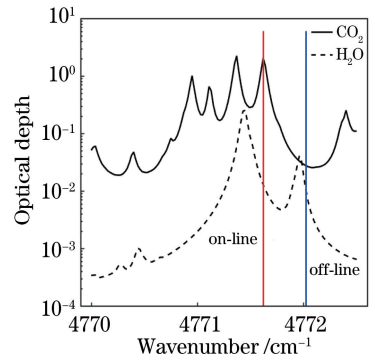


图 3 5 km 高度处  $CO_2$  和  $H_2O$  的吸收光谱

Fig. 3 Absorption spectra of  $CO_2$  and  $H_2O$  at altitude of 5 km

量误差, 影响较大。可以将 off-line 选在与 on-line  $H_2O$  光学厚度接近的  $4772.0240 \text{ cm}^{-1}$  波数处, 以减小水汽的干扰。考虑到在不同高度处温度、压强的差异, 水汽在不同波数处的吸收谱线将有不同程度的展宽, 故 5~35 km 各高度上水汽对  $CO_2$  差分光学厚度的干扰有所差异。水汽对  $CO_2$  差分光学厚度测量结果造成的误差可表示

$$R_{SE} = \frac{D_{AOD}(H_2O)}{D_{AOD}(CO_2)} \quad (12)$$

对所选定的 on-line ( $4771.6215 \text{ cm}^{-1}$ ) 和 off-line ( $4772.0240 \text{ cm}^{-1}$ ), 仿真计算 5~35 km 不同掩星切点高度处水汽干扰产生的相对系统误差 (RSE) 如图 4 所示。结果显示, 对于 on-line 和 off-line 优选波数, 水汽对  $CO_2$  差分光学厚度测量的干扰主要发生在 5~10 km 范围, 且产生的误差保持在 0.15% 以内。可见, 优选波数较大程度地减弱了水汽干扰造成的影响。

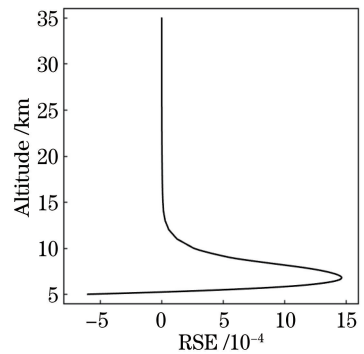


图 4 水汽干扰产生的相对系统误差随高度的变化

Fig. 4 RSE caused by  $H_2O$  as a function of altitude

## 4 探测性能分析

仿真中所采用的激光掩星系统参数和 LEO-LEO 轨道参数设置分别如表 1、表 2 所示。

表 1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

Instrument key parameter	Value
Transmitter	
Pulse energy@2.09 $\mu\text{m}$ /mJ	1.5
Pulse length $\tau$ /ms	1.5
Laser beam divergence $\theta$ /mrad	0.5
Receiver	
Telescope diameter $D$ /m	0.36
System optical efficiency $\eta$	0.40
Detector(PIN,G12183-203k)	
Nominal gain $M$	1
Noise factor $F$	1
Responsivity@2.09 $\mu\text{m}$ $R/(A \cdot W^{-1})$	1.1
Dark current $I_d/nA$	85
Amplifier bandwidth $B$ /kHz	3

表 2 LEO-LEO 轨道参数

Table 2 LEO-LEO orbital parameters

Orbit parameter	LEO(Tx)	LEO(Rx)
Apogee altitude /km	500	650
Perigee altitude /km	500	650
Inclination /( $^\circ$ )	90	90
Argument of perigee /( $^\circ$ )	90	90
Right ascension of ascending node /( $^\circ$ )	180	0
Mean anomaly /( $^\circ$ )	270	270

利用卫星工具包 STK 生成卫星位置坐标,结合(1)~(3)式仿真计算了一次掩星事件中,激光信号扫描高度与时间的关系以及不同高度下的扫描速度,结果如图 5 所示。

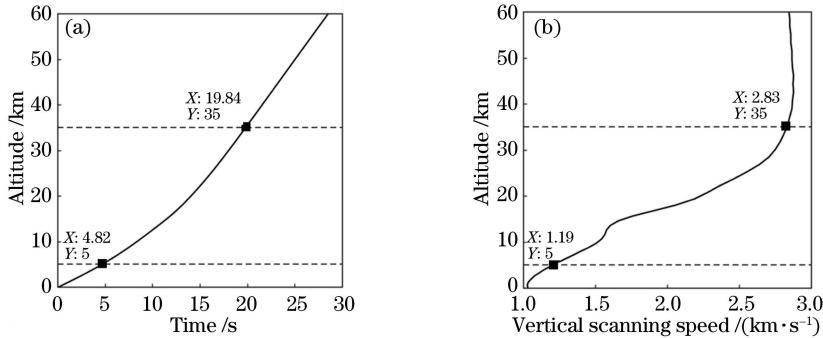


图 5 掩星事件中激光信号的扫描特点。(a)切点高度随时间的变化;(b)不同高度下的垂直扫描速度  
Fig. 5 Scanning characteristics of laser signals in occultation events. (a) Tangent point altitude as a function of time; (b) vertical scanning speed at different altitudes

由图 5 可知,激光信号对 5~35 km 高度扫描持续时间约 15 s,扫描速度为 1.2~2.8 km/s,对于 50 Hz 的脉冲发射频率,25 次脉冲累计次数,将获得 0.6~1.4 km 的垂直探测分辨率。对所选定的 CO<sub>2</sub> on-line (4771. 6215 cm<sup>-1</sup>) 和 off-line (4772.0240 cm<sup>-1</sup>) 进行波数探测,图 6 给出了不同高度处 CO<sub>2</sub> 浓度测量的随机误差的仿真计算结果。计算结果表明,随机误差仿真结果随海拔高度上升,呈先减后增的变化趋势,这是 DAOD 随海拔高度上升由过大变化到过小的缘故,与 3.1 节中的分析一致。随机误差的最小值(0.229%)出现在约 10 km 高度处,并且在 5~35 km 区域内均小于 0.8%,若取 CO<sub>2</sub> 的体积分数为 4×10<sup>-4</sup>,则 35 km 高度处对应的最大绝对误差为 3.2×10<sup>-6</sup>,垂直分辨率为 1.4 km,10 km 高度附近的最小绝对误差约为 9.16×10<sup>-7</sup>,垂直分辨率为 0.76 km,显示出较高的测量精度和剖面分辨能力。

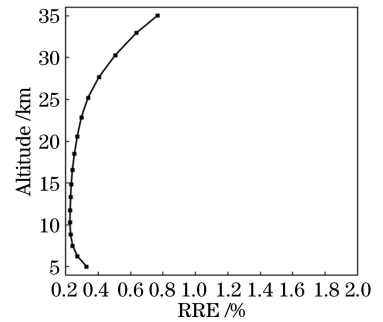


图 6 5~35 km 不同高度处测量得到的 CO<sub>2</sub> 浓度的随机误差  
Fig. 6 RRE of CO<sub>2</sub> concentration profile at different altitudes from 5 km to 35 km

时间内掩星事件在全球分布的情况。图中正三角、倒三角分别表示上升掩星事件和下降掩星事件。由图 7 可知,一个月、一个季度、一年时间内发生的掩星事件数量分别为 1797、5511 和 21866,平均 60 次/d,且均匀地分布在地球各个经纬度地区,水平测量分辨率为 185~267 km。可见,采用 LIO 技术进行大气 CO<sub>2</sub> 浓度测量具有较高的全球覆盖率。

图 7(a)~(c)分别给出了在一个月、一季、一年

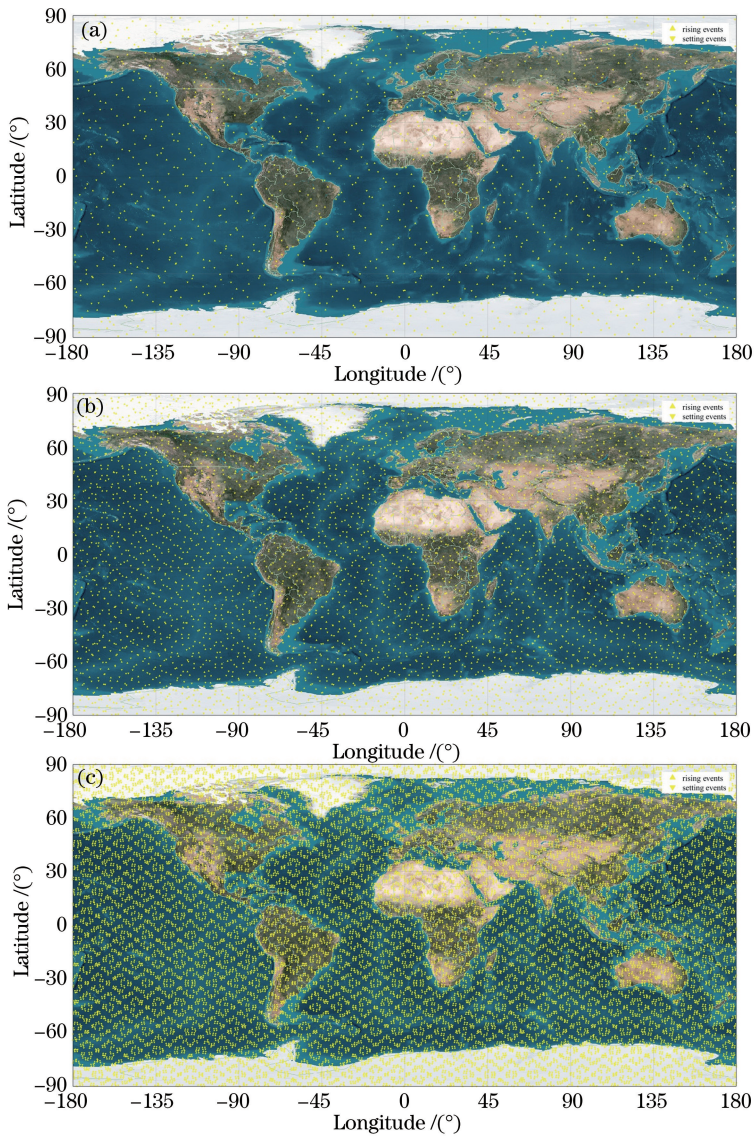


图 7 掩星事件全球分布图。(a)一个月；(b)一季度；(c)一年

Fig. 7 Global distributions of occultation events. (a) One month; (b) one quarter; (c) one year

## 5 结 论

红外激光掩星技术是一种重要的全球大气 CO<sub>2</sub> 浓度测量手段,具有高浓度测量精度和高全球覆盖率的优点,同时具备垂直分辨能力,可以成为 IPDA 大气柱浓度测量方法的重要补充。通过对 CO<sub>2</sub> 浓度测量随机误差进行理论分析和仿真计算,得到了 UTLS 区域边界 CO<sub>2</sub> 廓线测量随机误差随工作波数的变化,基于 UTLS 区域整体测量随机误差水平最小和水汽干扰误差最小的原则,选定 on-line 和 off-line 波数分别为 4771.6215 cm<sup>-1</sup> 和 4772.0240 cm<sup>-1</sup>。探测性能仿真结果显示,所选工作波数对 UTLS 区域 CO<sub>2</sub> 浓度测量的垂直分辨率为 0.6~1.4 km,相对测量误差小于 0.8%,最高探测

精度在 10 km 高度附近可达到 0.229% (对应的体积分数误差为  $9.16 \times 10^{-7}$ )。研究结果表明,LIO 技术在 CO<sub>2</sub> 浓度廓线探测方面具有广阔应用前景,对相关设计具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

- [1] Hu S X, Chen Y F, Liu Q W, *et al.* Differential absorption lidar system for background atmospheric SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> measurements[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911009.  
胡顺星, 陈亚峰, 刘秋武, 等. 差分吸收激光雷达系统探测背景大气 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> [J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911009.
- [2] Xie Y Y, Liu J Q, Jiang J X, *et al.* Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar

- measuring CO<sub>2</sub> concentration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88-93.
- 谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使 CO<sub>2</sub> 浓度测量误差减小的星载激光雷达波长优化[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 88-93.
- [3] Mu Y J, Li R, Wan Y, *et al.* Stray light analysis and suppression for spaceborne lidar system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(5): 0510005.
- 穆永吉, 李蕊, 万渊, 等. 星载激光雷达系统杂散光分析与抑制[J]. *中国激光*, 2018, 45(5): 0510005.
- [4] Wang S Z, Zhu G W, Bai W H, *et al.* For the first time fengyun3 C satellite-global navigation satellite system occultation sounder achieved spaceborne Bei Dou system radio occultation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(8): 089301.
- 王树志, 朱光武, 白伟华, 等. 风云三号 C 星全球导航卫星掩星探测仪首次实现北斗掩星探测[J]. *物理学报*, 2015, 64(8): 089301.
- [5] Proschek V, Kirchengast G, Schweitzer S, *et al.* ACCURATE: greenhouse gas profiles retrieval from combined IR-laser and microwave occultation measurements [C] // EGU General Assembly Conference 2010, May 2-7, 2010, Vienna, Austria. [S.l.: s.n.], 2010: 14352
- [6] Clifford D, Hoffmann A, Weitnauer C, *et al.* A novel mission concept for upper air water vapour observations: active limb sounding with a constellation of retroreflectors [C] // American Geophysical Union, Fall Meeting 2011. [S.l.: s.n.], 2011: A21D-0115.
- [7] Fjeldbo G, Kliore A J, Eshleman V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the mariner V radio occultation experiments [J]. *The Astronomical Journal*, 1971, 76: 123-140.
- [8] Anderson G P, Clough S A, Kneizys F X, *et al.* AFGL atmospheric constituent profiles (0-120 km) [R]. [S.l.: s.n.], 1986.
- [9] Edlén B. The refractive index of air [J]. *Metrologia*, 1966, 2(2): 71-80.
- [10] Sofieva V F, Kyrölä E. Abel integral inversion in occultation measurements [M] // Kirchengast G, Foelsche U, Steiner A K. Occultations for probing atmosphere and climate. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004: 77-85.