中国光学 Chinese Optics 核心期刊

基于激光掩星吸收光谱的二氧化碳探测技术

王玉诏 陶宇亮 孙海青 杨超

Carbon dioxide detection technology based on the laser occultation absorption spectrum

WANG Yu-Zhao, TAO Yu-Liang, SUN Hai-Qing, YANG Chao

引用本文:
王玉诏, 陶宇亮, 孙海青, 杨超. 基于激光掩星吸收光谱的二氧化碳探测技术[J]. 中国光学, 2021, 14(3): 634-642. doi: 10.37188/CO.2020-0201
WANG Yu-Zhao, TAO Yu-Liang, SUN Hai-Qing, YANG Chao. Carbon dioxide detection technology based on the laser occultation absorption spectrum[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 634-642. doi: 10.37188/CO.2020-0201

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2020-0201

文章编号　2095-1531(2021)03-0634-09

基于激光掩星吸收光谱的二氧化碳探测技术

王玉诏[1,2*], 陶宇亮[1,2], 孙海青[1,2], 杨　超[1,2]
(1. 北京空间机电研究所，北京 100094;
2. 中国空间技术研究院空间激光信息感知技术核心专业实验室，北京 100094)

摘要: 本文分析了固定波长激光掩星差分吸收技术的优点和不足，介绍了可调谐激光直接吸收光谱技术测量原理。分析了最优波长透过率与信噪比的关系以及测量误差与背景光干扰的关系。根据高灵敏度探测器的工作波长范围，选择了 6310.915 cm^{-1}、6310.893 cm^{-1}、6310.890 cm^{-1}、6310.8834 cm^{-1} 作为吸收的工作波长，同时选择 6310.15 cm^{-1} 作为参考波长，并对各波长的探测能力进行了仿真分析。通过仿真结果可知，在 1 km 垂直分辨率下，在 5~35 km 内 CO_2 浓度探测误差优于 0.9%，7~42 km 范围内的探测误差优于 0.4%。该技术降低了系统成本和复杂度，有利于星载产品的设计和实现。

关　键　词: 激光掩星；二氧化碳；直接吸收光谱
中图分类号: P407.5, P412.27　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2020-0201

Carbon dioxide detection technology based on the laser occultation absorption spectrum

WANG Yu-Zhao[1,2*], TAO Yu-Liang[1,2], SUN Hai-Qing[1,2], YANG Chao[1,2]
(1. *Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity*, *Beijing* 100094, *China*;
2. *Key Laboratory for Space Laser Information Perception Technology of CAST*, *Beijing* 100094, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *zz0525wyz@163.com*

Abstract: The advantages and disadvantages of fixed-wavelength laser occultation differential absorption technology are analyzed, and the measurement principle of tunable laser direct absorption spectroscopy technology is introduced. The relationship between optimal wavelength transmittance and signal-to-noise ratio and the relationship between measurement error and background light interference are analyzed. According to the working wavelength range of the high-sensitivity detector, 6310.915 cm^{-1}, 6310.893 cm^{-1}, 6310.890 cm^{-1} and 6310.8834 cm^{-1} are selected as the absorption working wavelengths, and 6310.15 cm^{-1} is selected as the reference wavelength, and the detection ability of each wavelength is simulated and analyzed. Simulation results show that the detection error of a CO_2 concentration is better than 0.9% in the range of 5~35 km and better than 0.4% in the range of 7~42 km with a vertical resolution of 1 km. This technology reduces the cost and complexity of the system, and is beneficial to the design and implementation of space-borne products.

Key words: laser occultation; carbon dioxide; direct absorption spectrum

收稿日期: 2020-12-28; 修订日期: 2021-01-08
基金项目: 民用航天十三五预研项目资助 (No. D040105)
Supported by Civil Aerospace 13 th Five-Year Pre-research Project (No. D040105)

1　引　言

近年来, 大气中 CO_2 的含量与气候变化的关系一直是气候研究的热点[1]。为了研究 CO_2 的全球分布及变化, 已经发展了对地探测星载光谱仪[2-3]、星载路径积分差分吸收 (Integrated path differential absorption, IPDA) 激光雷达[4] 两类光学遥感仪器。星载光谱仪具有高分辨、大幅宽的优点, 激光雷达具有高精度探测、抗干扰能力强的优点。然而, 目前两种仪器均主要获取 CO_2 柱浓度信息, 缺乏垂直廓线探测能力。近年来发展的临边探测光谱仪[5-6] 和掩星探测光谱仪[6] 可以用来测量 CO_2 垂直分布, 但由于光谱分辨率和信噪比问题, 在探测精度和垂直分辨率方面有所不足。

在光学掩星探测系统中, 用单频激光源替换掉太阳、月亮或恒星, 不仅可以实现高光谱分辨率的差分吸收探测, 还可以降低接收端的光谱分辨要求。2010 年, Kirchengast 等[7] 在 ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And climate Trends Explorer) 计划中首次提出了激光掩星探测技术。该计划在掩星系统的发射端和接收端分别搭载红外激光发射机和接收机, 用差分吸收探测的方式进行 UTLS(Upper Troposphere And Lower Stratosphere, 5~35 km) 高度区域大气成分和风速测量, 即低轨红外激光掩星 LIO(LEO-LEO Infrared Laser Occultation) 探测技术。在该任务中, 激光被设计为固定波长的脉冲发射模式, 通过工作波长 (λ_{on}) 和参考波长 (λ_{off}) 的波长组合进行差分吸收探测, 直接得到差分吸收光学厚度, 再由 Abel 积分变换反演得到分子数密度分布廓线。其工作波长和参考波长分别为 4771.6214 cm^{-1} 和 4770.15 cm^{-1}。2020 年李文冬等, 在 ACCURATE 工作基础上, 对该技术的探测能力进行了仿真分析[8]。

在激光掩星系统工作过程中, 光源和大气之间存在相对运动。搭载激光光源的卫星在掩星光学路径上的速度分量会引起较大的多普勒频移, 因此, 实际工作中需要对激光波长作相应的频移补偿, 并且需要通过高精度的电流和温度控制实现 2×10^{-8}(20 s)[9] 的稳频能力。其波长监测能力需要达到 MHz 量级。采用激光掩星探测技术, 需要构建多颗卫星的星座才能达到较高的观测效率。在工作中双星轨道面夹角不一定是恒定值, 因此需要对不同的星间条件设置不同的多普勒补偿量。此外, 在掩星探测过程中, 相对运动速度还会发生变化, 使激光波长在到达大气时逐渐变化。上述特性将提高系统的研制成本和实现难度。

ACCURATE 提出的工作波长在 2.5 μm 附近, 这主要是为了兼顾更多的痕量气体成分, 避免太阳和大气背景光干扰, 且具有较好的大气透过率。目前具有高内增益的高灵敏度探测器件主要是光电倍增管 (PMT) 和雪崩光电二极管 (APD), 其工作波长主要在 400~1700 nm 内[10]。ACCURATE 的测量波长与上述高灵敏探测器无法匹配, 信噪比的提升受到限制。

针对上述问题, 本文分析了基于可调谐激光直接吸收光谱技术的激光掩星探测方案, 通过波长连续扫描直接获得大气吸收光谱[11]。该方案可以降低对激光器的控制和监测要求, 从而降低成本和复杂度。通过理论分析和建模仿真, 在 1400 nm~1700 nm 之间优选工作波长, 以匹配 InGaAs-APD 器件的工作波长范围[12], 该波段也具有较高的大气透过率。最后, 本文给出了一组载荷指标, 并通过仿真分析了基于这套载荷指标的系统探测能力。

2　基本原理

2.1　基于可调谐激光直接吸收光谱技术的激光掩星探测原理

直接吸收光谱技术是可调谐二极管激光吸收光谱技术 (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy- TDLAS) 的一种实现途径[13-14]。其基本原理是, 通过控制可调谐二极管激光器的温度和电流连续单调地改变激光波长, 使波长经过待测气体分子的某个特征吸收线, 从而得到待测分子的特征吸收光谱, 再由差分吸收技术获得待测分子浓度。

设入射光强为 I_0, 根据朗伯-比尔定律, 出射光强 I 可以表示为:

$$I = I_0 e^{-N\sigma(\lambda,T,P)L} = I_0 e^{-D} \quad , \tag{1}$$

式中 N 为分子数密度, σ 为指定波长 λ、温度 T 和

气压 P 的分子吸收截面，L 为吸收路径长度，D 为吸收光学厚度。由式 (1) 可得分子数密度的计算公式：

$$N = -\frac{1}{\sigma(\lambda, T, P)L}\ln\frac{I}{I_0} \quad . \tag{2}$$

可见，通过测量出射光强与入射光强之比即可由式 (2) 计算得到分子数密度。公式中吸收截面 σ 可以由 Hitran 数据库、GEISA 数据库等计算获得。

在工程应用中，若通过调节温度和电流使波长单调变化则可以在出射光处得到一条强度曲线（如图 1 所示）$I(t)$。结合波长随时间的变化关系 $\lambda(t)$，可以认为接收端的光强变化曲线为光谱曲线 $I(\lambda)$。此时，可以将吸收峰位置确认为分子工作波长 λ_{on}，对应透过光强 I 也可以写作 I_{on}。对曲线两侧的弱吸收部分进行线性拟合，则可以得到一条基线。基线中与 λ_{on} 对应的拟合信号强度可以作为 I_0，再由公式 (2) 计算分子数密度。

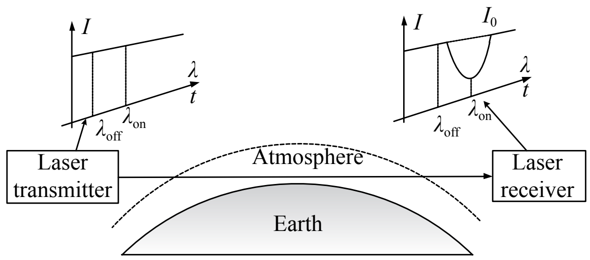

图 1 直接吸收光谱激光掩星探测原理

Fig. 1 Detection principle of laser occultation direct absorption spectroscopy

也可以从曲线两侧的非吸收光谱数据中选取一个位置作为分子参考波长 λ_{off}，再由以下公式 (3) 计算出分子数密度。

$$N = -\frac{1}{(\sigma_{on} - \sigma_{off})L}\ln\frac{I_R(\lambda_{on})I_T(\lambda_{off})}{I_T(\lambda_{on})I_R(\lambda_{off})} \quad , \tag{3}$$

式中，I_R 表示接收端，I_T 表示激光发射端。这两种处理方式都较容易获得吸收峰处的吸收透过率，从而实现分子数密度测量。由于该技术容易实现、成本低、非接触且高可靠，这种激光直接吸收光谱技术已被大量应用在工业在线测量设备中。

如图 1 所示，在激光掩星探测过程中，采用直接吸收光谱技术可以降低波长控制和波长监测的难度。同时，采用直接吸收光谱技术还可以通过较大的波长扫描范围实现不同掩星条件下的多普勒频移补偿。

2.2 浓度测量及反演方法

与地面测量不同，在激光掩星探测过程中，激光将穿过不同大气高度层，观测路径上的温度、气压有极大差异。因而式 (2) 将不再适用，此时可以由式 (1) 计算出吸收光学厚度 $D(h)$：

$$D(h) = -\ln\frac{I_R(\lambda_{on}, h)I_T(\lambda_{off}, h)}{I_T(\lambda_{on}, h)I_R(\lambda_{off}, h)} \quad , \tag{4}$$

式中 h 为待测高度。

Kirchengast 等[7] 通过激光掩星积分模型的研究，推导了 Abel 积分变换公式：

$$\alpha(r_i) = -\frac{1}{\pi}\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}r}\bigg|_{r=r_i}\int_{r_i}^{r_{top}}\frac{\mathrm{d}D(r)}{\mathrm{d}r}\frac{a}{\sqrt{a^2 - a_i^2}}\mathrm{d}r \quad , \tag{5}$$

式中，α 为消光系数，又可以表示为：

$$\alpha(r_i) = N(r_i)\cdot[\sigma_{on}(r_i) - \sigma_{off}(r_i)] \quad . \tag{6}$$

σ_{on} 为工作波长吸收截面，σ_{off} 为参考波长吸收截面，r 为高度层 h 的地心半径：

$$r = r_0 + h \quad . \tag{7}$$

i 为高度层序号。a 为 GNSS 掩星测量系统中定义的碰撞参数，表示为：

$$a = nr \quad , \tag{8}$$

式中 n 为大气折射率。

由式 (5) 可以得到分子数密度计算公式：

$$N(r_i) = \frac{\alpha(r_i)}{\sigma_{on}(r_i) - \sigma_{off}(r_i)} \quad . \tag{9}$$

计算吸收截面 σ 所需的压力 P 和温度 T 有 4 种方式：第一，借鉴 ACCURATE 采用微波折射掩星方案获取；第二，采用激光差分吸收技术测量 O_2 含量反演获得；第三，由背景库获得；第四，在 CO_2 混合比不随高度变化的假设条件下由迭代反演获得。

除了式 (3)~式 (6) 的差分吸收方式外，在获得了完整吸收光谱曲线的条件下还可以由最优光谱法反演分子数密度。这也是当前临边探测系统中常用的反演方法。

3 最优波长选择

通过光谱差分吸收测量痕量气体时，其最优

工作波长选择可以参考 5 个条件:(1)最优透过率;(2)其它成分干扰;(3)非吸收大气透过率;(4)探测灵敏度;(5)背景光干扰。

对于背景光干扰可以通过加入窄带滤光片进行抑制。探测灵敏度条件前文已作出分析,根据该条件将波长范围选为 1 400~1 700 nm, CO_2 在该范围内拥有丰富的吸收谱段。接下来主要分析条件(1)~(3)。

3.1　最优透过率和信噪比关系

当采用差分吸收原理处理数据时,所选工作波长 λ_{on} 的透过率越低则探测系统灵敏度越高,但过低的透过率会导致信号变弱甚至难以测量。因此,差分吸收测量时存在最优的透过率范围,这个范围与信噪比和测量精度存在一定的关系。由式 (1) 可得 CO_2 吸收光学厚度:

$$D_C = N(\sigma_{on} - \sigma_{off})L = -\ln T \quad , \tag{10}$$

式中 T 为吸收透过率。D_C的相对误差公式为:

$$E_{DC} = \frac{\delta D_C}{D_C} = \frac{1}{D_C}\sqrt{\frac{(\delta I_{off})^2}{I_{off}^{\ 2}} + \frac{(\delta I_{on})^2}{I_{on}^{\ 2}}} \quad . \tag{11}$$

在信号较强时,参考波长信号的噪声可以表示为:

$$\delta I_{off} = \varepsilon\sqrt{I_{off}} \quad , \tag{12}$$

式中 ε 为与探测电路有关的常数。在直接吸收光谱探测技术中,接收端共用探测电路,因此工作波长信号的噪声也可以表示为:

$$\delta I_{on} = \varepsilon\sqrt{I_{on}} \quad . \tag{13}$$

结合公式 (1) 可得:

$$E_{DC} = -\frac{\sqrt{1+T}}{S_{NR}T\ln T} \quad , \tag{14}$$

式中, S_{NR} 为探测信噪比。在采用 2.2 小节中的 Abel 积分法进行反演处理时,还将引入误差放大因子g_{Abel}(~2.5),此时式 (14) 改写为:

$$E_{DC} = -\frac{g_{Abel}\sqrt{1+T}}{S_{NR}T\ln T} \quad , \tag{15}$$

式中, T 为透过率。式 (15) 即为最优透过率公式。从式 (15) 可以看出,相对误差与信噪比成反比,且当 T 过大或过小时,都会引起相对误差的增加。在相对误差要求明确时,可以得到信噪比和透过率需求关系:

$$S_{NR} = -\frac{g_{Abel}\sqrt{1+T}}{E_{DC}T\ln T} \quad . \tag{16}$$

设密度相对误差要求分别为 0.3%、0.5%、1%、2%, 则信噪比与透过率关系如图 2 所示。可以看出,最优透过率在 0.3 附近,若将透过率约束在 0.2~0.6 范围内,则可以在同等误差条件下极大地降低信噪比需求。

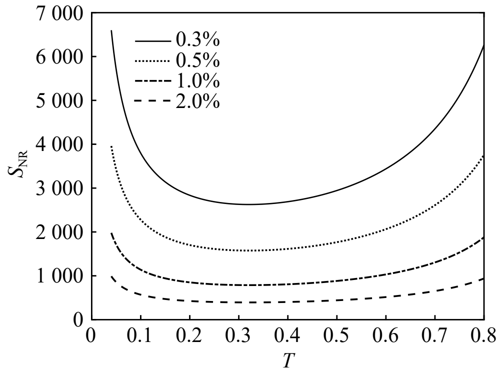

图 2　信噪比 S_{NR} 与透过率关系

Fig. 2　The relationship of S_{NR} and transmission T

3.2　透过率及干扰分析

激光掩星探测过程是复杂的物理过程,对其进行计算和评估也需要复杂的物理建模。该物理过程涉及到光电探测、分子吸收、大气散射、大气折射、卫星运动等。为此,基于 Hitran 和 GEISA 数据库、美国标准大气模型、Modtran 气溶胶衰减和背景光数据,按照大气分层计算模型,作者开发了激光掩星探测仿真系统[15]。由该仿真系统可以给出 CO_2 等分子在 1 400~1 700 nm(5 882~7 143 cm^{-1})波段、0~100 km 切点高度上的激光掩星传输光谱,并分析出 CO_2 的工作波长。首先,计算出不含 CO_2 的 Hitran 大气成分($H^{16}OH$、$H^{18}OH$、$H^{17}OH$、$H^{16}OD$、$^{16}O^{13}C^{16}O$、$^{16}O^{12}C^{18}O$、O_3、N_2O、CO、CH_4、O_2、NO、SO_2、NO_2、NH_3)的激光掩星吸收光谱作为背景干扰光谱。第二步,计算出 CO_2 的激光掩星吸收光谱。第三步,对两种光谱开展对比分析,给出既满足最优透过率条件又受较小干扰的 CO_2 工作波长。

图 3 是 CO_2 吸收光谱与背景光谱的对比图,

可以看出，两种光谱有较多的交叠区域，但也有可以区分的区域。根据第 3 节最优波长的 5 个条件分析，最终选择 6310.8834 cm^{-1} 作为工作波长，若按照双波长差分吸收方式处理，其参考波长可以选择 6310.15 cm^{-1}。

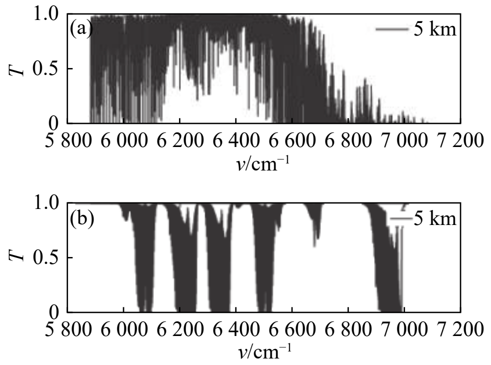

图 3　(a)背景光谱与(b)CO_2 光谱对比(波数 ν 范围 5882 cm^{-1}~7143 cm^{-1}，高度 5 km)

Fig. 3　Comparison of (a) background spectrum and (b) CO_2 spectrum (The range of wave number ν is 5882 cm^{-1}~7143 cm^{-1} and the height is 5 km.)

可以按照差分吸收原理分析干扰带来的误差。以角标 S 表示干扰波长，则其引起的相对误差可以表示为：

$$E_{DS}=\frac{D_{Son}-D_{Soff}}{D_{Con}-D_{Coff}}\quad. \tag{17}$$

考虑最优透过率条件，选择在各切点高度处吸收透过率在 0.2~0.6 内的工作波长，具体吸收工作波长可以选择 6310.915 cm^{-1} (5~10 km)、6310.893 cm^{-1} (11~18 km)、6310.890 cm^{-1} (19~26 km)、6310.8834 cm^{-1} (27~39 km)。

由仿真计算结果可以看出，背景光谱干扰主要影响区域为 5~15 km，其相对误差小于 0.04%，在 15 km 以上，背景光谱干扰相对误差迅速下降到 0.013% 以下。背景光谱干扰随高度变化的主要原因有两种：一种原因是 H_2O 分子等干扰分子主要分布在 15 km 以下[16]，其在空气中的混合比随高度迅速减小，而 CO_2 的混合比几乎不随高度变化(100 km 以下)；第二种原因是随着高度增加，气压迅速减小，由气压引起的谱线展宽也迅速减小，使波长间的相互串扰减小。

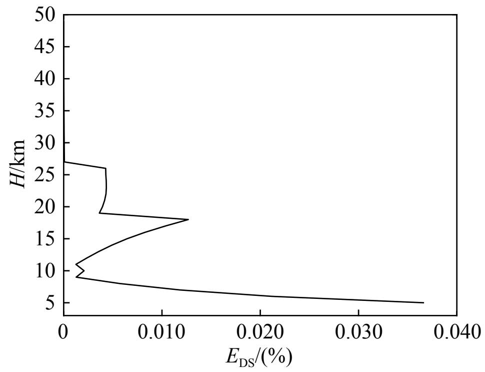

图 4　背景光谱干扰误差

Fig. 4　Error caused by background spectral interference

(λ_{on} is 6310.915 cm^{-1} @ 5~10 km, 6310.893 cm^{-1} @ 11~18 km, 6310.890 cm^{-1} @ 19~26 km, 6310.8834 cm^{-1} @ 27~39 km, and λ_{off} is 6310.15 cm^{-1})

4　探测性能分析

4.1　系统参数设计

对于激光掩星探测系统，其主要的系统参数包括轨道高度、激光发射功率、激光发散角、接收望远镜口径、接收视场、光谱带宽和电子学滤波带宽等。鉴于 ACCURATE 计划可行性论证较为充分，这些参数大部分都可以参考 ACCURATE 计划提出的方案。

这里主要讨论电子学滤波带宽和采样频率的设计采用波长扫描方式，接收端测量时将通过连续采集获取具有波谷的调制信号，此时，波谷的下降沿和上升沿决定了系统的电子学滤波带宽。设吸收光谱信号的下降沿时间为 τ，则滤波带宽为：

$$\Delta f\geqslant\frac{0.35}{\tau}\quad. \tag{18}$$

设扫描周期为 Δt，波长扫描范围为 ν_1 (6309.8834 cm^{-1})~ν_2(6311.8834 cm^{-1})，则可以仿真计算出各高度层吸收谱的下降波数宽 $\Delta\nu$，其中最短下降沿为 $\Delta\nu_\tau$。则下降沿时间为：

$$\tau=\frac{\Delta\nu_\tau}{\nu_2-\nu_1}\quad. \tag{19}$$

设扫描周期为 20 ms，根据仿真结果，$\Delta\nu_\tau\approx$ 0.0115 cm^{-1}，则带宽 $\Delta\nu\geqslant$3.04 kHz。

为了保证光谱的有效恢复，在上升沿内的采样点不低于 10 个，则采样频率不低于 87 ksps。

根据上述分析，参考 ACCURATE 设计，系统参数见表 1。

表 1　系统仿真参数

Tab. 1　System simulation parameters

System parameter	Value	Unit
Orbit altitude of laser transmitter	500	km
Orbit altitude of laser receiver	600	km
repetition rate	40	Hz
Laser power	1	W
Laser wavenumber	6309.8834~6311.8834	cm^{-1}
Absorption wavenumber	6310.915@5~10 km, 6310.893@11~18 km, 6310.890@19~26 km, 6310.8834 @27~39 km	cm^{-1}
Reference wavenumber	6310.15	cm^{-1}
Laser line width	10	MHz
Laser beam divergence	0.3	mrad
Telescope diameter	0.3	m
System optical efficiency	0.5	1
Detector responsivity (InGaAs-APD, C30662, 1584.6 nm)	10.3	A/W
Nominal gain	10	1
Noise factor	5.5	1
Dark current	45	nA
Spectral noise current	0.7	pA/rt (Hz)
Bandwidth	3000	Hz

4.2　探测信噪比

根据系统仿真参数进行仿真计算，可以得到工作波长 λ_{on} 处的吸收光谱信号，其信噪比见图 5（彩图见期刊电子版）。图中光谱吸收峰对应 6310.8834 cm^{-1}。可以看出，采用直接吸收光谱技术，不需要高精度波长稳频，只要从接收信号中找到吸收峰位置即可确定工作波长，因而可以有效节约成本、降低复杂度。

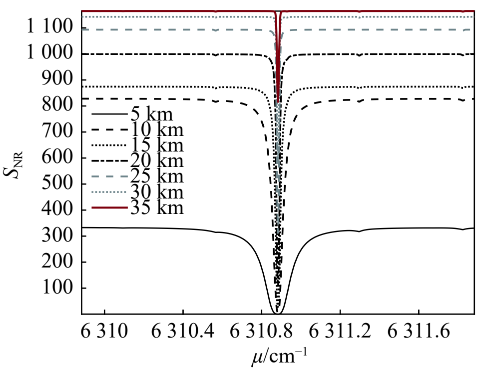

图 5　探测信噪比仿真结果

Fig. 5　Simulation results of detection S_{NR}

从仿真结果可知，系统的探测信噪比与波数 v 和切点高度 h 相关。在光谱吸收峰附近，由于大气吸收导致信噪比迅速降低，在低层大气吸收峰处甚至仅剩下噪声信号。在低层大气，由于气溶胶和分子的消光导致信噪比迅速下降，这两种因素中主要分布在 5 km 以下的气溶胶层占主导作用。在 5 km 以上，由于气溶胶的迅速减少，信噪比迅速增加，到 10 km 以上，探测信噪比增加到 800 以上。

有两种方式可以进一步提高探测信噪比，第一种是通过平滑或滤波方式对信号进行处理，第二种是通过多次采样累积来提高信噪比。这里仅讨论第二种方式。

根据信噪比模型，累积 M 次信号可以将信噪比提高$\sqrt{M}$倍。已知采样频率为 40 Hz，根据切点扫描速度变化和处理的垂直分辨率，可以得到各高度层对应的累积次数 M。仿真结果见图 6。由仿真结果可以看出，测量信号在低层大气的累积次数明显高于高层大气。30 km 以上累积次数较

为稳定。在 30 km 以下，随着切点高度降低，同等分辨率的累积次数迅速增加。其中，5 km 处累积次数约为 30 km 处累积次数 2 倍。这是因为低层大气的折射弯曲较大，使垂直扫描速度迅速降低所致。这有利于补偿低层大气由于强散射衰减带来的损失。

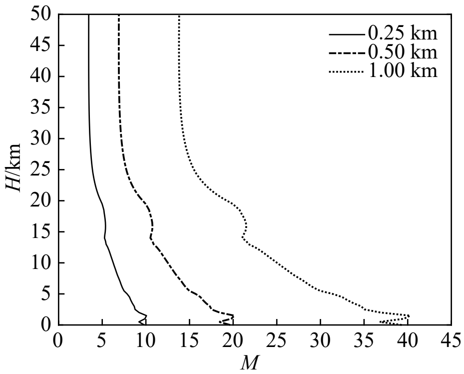

图 6　累积次数的高度分布

Fig. 6　Height distribution of cumulative times

4.3　探测误差分析

在差分吸收处理的条件下，气体分子浓度探测的相对误差与参考波长信噪比 S_{NR}、累积次数 M、工作波长差分吸收透过率 T、以及背景光干扰 $D_{Son}-D_{Soff}$ 密切相关。其综合影响公式为：

$$E_D=\sqrt{\frac{1}{M\ln^2 T}\left[\frac{g_{Abel}{}^2(1+T)}{S_{NR}{}^2T^2}+(D_{Son}-D_{Soff})^2\right]}. \tag{20}$$

公式 (20) 描述了采用差分吸收处理的激光掩星探测浓度相对误差 E_D 的综合影响公式。根据该公式，可以由表 1 参数估算系统的探测误差。其结果见图 7，垂直分辨率分别为 0.25 km、0.5 km 和 1 km。

首先，探测误差与垂直分辨率的开方成反比，高垂直分辨率对应较高的误差。0.25 km 垂直分辨率的探测误差是 1 km 垂直分辨率探测误差的 2 倍。在 0.25 km 垂直分辨率下 7~42 km 的测量误差小于 0.8%，而在 1 km 垂直分辨率下误差则小于 0.4%。在 5~35 km 的观测范围内，最大误差出现在 5 km 处，0.25 km 垂直分辨率的最大误差为 1.8%，1 km 垂直分辨率的最大误差为 0.9%。

其次，探测误差与高度密切相关。当高度下降到 5 km 时，探测误差迅速增加到 1.8%。这是因为低层大气信噪比迅速降低所致。当高度由 42 km 升高到 49 km 时，探测误差迅速增加到 1.6%。这是因为差分吸收透过率迅速提高所致。

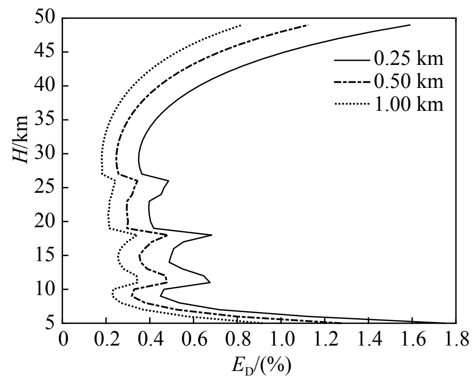

图 7　探测误差随高度分布

Fig. 7　Distribution of detection error varying with height

若可以对信号进行较好的滤波或平滑处理，或采用最优光谱法等更先进的反演手段，测量精度还有望进一步提升。

5　结　论

激光掩星探测技术具有高垂直分辨率、高精度、全球覆盖、全天时探测的优点，是解决痕量气体垂直廓线探测问题的重要手段，是当前温室气体探测技术的重要补充。通过对比分析，本文确定了可调谐激光直接吸收光谱技术路线。通过理论分析和仿真计算，得到了 UTLS 区域 CO_2 浓度探测误差的影响因素和相互关系。在此基础上，基于最优透过率和最小背景光干扰原则，选择了 6310.915 cm^{-1}@5~10 km、6310.893 cm^{-1}@11~18 km、6310.890 cm^{-1} @19~26 km、6310.8834 cm^{-1} @27~39 km 的工作波长，以及参考波长 6310.15 cm^{-1}。仿真结果表明，在 0.25 km 垂直分辨率条件下，系统探测误差优于 1.8%，且 7~42 km 探测误差优于 0.8%。在 1 km 垂直分辨率条件下，系统探测误差分别提高到 0.9% 和 0.4%。分析表明，采用可调谐激光直接吸收光谱技术开展掩星探测，可以省去高成本高复杂度的高精度波长稳频系统，有效获取 CO_2 浓度廓线分布，对全球温室气体廓线探测技术发展具有重要参考价值。

参考文献:

[1] IPCC. *Climate Change 2014*: *Impacts*, *Adaptation*, *and Vulnerability*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

[2] 熊伟. 高分五号卫星大气主要温室气体监测仪优化设计及数据分析[J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 167-172.
XIONG W. Optimum design and data analysis of greenhouse gases monitoring instrument on GF-5satellite[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 167-172. (in Chinese)

[3] FRANKENBERG C, POLLOCK R, LEE R A M, *et al*.. The Orbiting Carbon Observatory (OCO-2): spectrometer performance evaluation using pre-launch direct sun measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(1): 301-313.

[4] 谢杨易, 刘继桥, 姜佳欣, 等. 使CO_2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.
XIE Y Y, LIU J Q, JIANG J X, *et al*.. Wavelengths optimization to decrease error for a space-borne lidar measuring CO_2 concentration[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 88-93. (in Chinese)

[5] 宗雪梅. 大气红外辐射超高光谱探测仪临边探测—污染气体的反演精度和光谱通道评估[J]. 环境科学学报, 2020, 40(4): 1410-1421.
ZONG X M. Inversion accuracy and spectral channel evaluation of atmospheric polluted gases of atmospheric infrared radiation ultra-high detector under limb sounding[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(4): 1410-1421. (in Chinese)

[6] 王雅鹏, 李小英, 陈良富, 等. 红外临边探测发展现状[J]. 遥感学报, 2016, 20(4): 513-527.
WANG Y P, LI X Y, CHEN L F, *et al*.. Overview of infrared limb sounding[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(4): 513-527. (in Chinese)

[7] KIRCHENGAST G. ACCURATE-Climate benchmark profiling of greenhouse gases and thermo-dynamic variables and wind from space, ESA Earth Explorer Opportunity Mission EE8 Proposal, Scientific Report 36-2010[R]. Graz, Austria: Wegener Center Verlag, 2010.

[8] 李文冬, 刘继桥, 朱亚丹, 等. LEO-LEO红外激光掩星CO_2浓度测量技术研究[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0810001.
LI W D, LIU J Q, ZHU Y D, *et al*.. LEO-LEO infrared laser occultation technique to measure atmospheric carbon dioxide concentration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0810001. (in Chinese)

[9] MOTTINI S, LOESCHER A, AGUIRRE M. A new approach to climatology from space: laser occultation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 10565: 1056565.

[10] 苏俊宏, 尚小燕, 弥谦. 光电技术基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
SU J H, SHANG X Y, MI Q. *Fundamentals of Photoelectric Technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. (in Chinese)

[11] 王玉诏, 陶宇亮, 杨超, 等. 一种基于可调谐激光的掩星大气密度廓线测量系统及方法: 中国, 201911032531.8[P]. 2019-10-28.
WANG Y ZH, TAO Y L, YANG CH, *et al*.. Occultation atmospheric density profile measurement system and method based on tunable laser: CN, 201911032531.8[P]. 2019-10-28. (in Chinese)

[12] C30659 Series-900/1060/1550/1550E[R]. Excelitas Technologies, 2012.

[13] WERLE P. Tunable diode laser absorption spectroscopy: recent findings and novel approaches[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1996, 37(1): 59-66.

[14] 屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于波长调制光谱的多参数测量方法研究[J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(4): 470-476.
QU D SH, HONG Y J, WANG G Y, *et al*.. Measurement of multi-parameters of gas based on the wavelength modulation spectroscopy[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(4): 470-476. (in Chinese)

[15] 王玉诏. 基于matlab的激光掩星大气探测仿真系统[C]. 第三十一届全国空间探测学术研讨会. 银川: 中国空间科学学会, 2018: 47-55.
WANG Y ZH. Laser occultation detection simulation system based on matlab[C]. *The 31th National Conference on*

Space Exploration. Yinchuan: Chinese Society of Space Research, 2018. (in Chinese)
[16] 饶瑞中. 现代大气光学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
RAO R ZH. *Modern Atmospheric Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)

作者简介:

王玉诏(1984—),男,河北南宫人,博士,高级工程师,2011 年于北京理工大学获得工学博士学位,主要研究领域为激光雷达、激光遥感. E-mail: zz0525wyz@163.com

《中国光学》征稿启事

《中国光学》为双月刊,A4 开本;刊号:ISSN 2095-1531/CN 22-1400/O4;国内外公开发行,邮发代号:国内 12-140,国外 BM6782。

- ★ 荷兰 Scopus 数据库
- ★ 美国《乌利希国际期刊指南》
- ★ 美国《化学文献》
- ★ 波兰《哥白尼索引》
- ★ 俄罗斯《文摘杂志》
- ★ 美国工程索引(Ei)数据库
- ★ 美国 ESCI 数据库
- ★ 中国精品科技期刊
- ★ 中国科技核心期刊
- ★ 中国光学学会会刊
- ★ 中国科技论文与引文数据库
- ★ 中国期刊全文数据库
- ★ 万方数字化期刊全文数据库
- ★ 中国科技期刊数据库
- ★ 中国光学期刊网数据库

主要栏目:微纳光学、信息光学、集成光电子、光谱学和光谱仪器、激光技术与应用、光学功能材料、光学设计与工艺、大气与空间光学、光学仪器与测试、综述、前沿动态、产业资讯、科普教学、实验室介绍、自然科学基金项目进展、前沿热点访谈、热点论文等。

发稿类型:学术价值显著、实验数据完整的原创性论文;研究前景广阔,具有实用、推广价值的技术报告;有创新意识,能够反映当前先进水平的阶段性研究简报;对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告;以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿。

主管单位:中国科学院
主办单位:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
协办单位:激光与物质相互作用国家重点实验室
编辑出版:《中国光学》编辑部
投稿网址:http://chineseoptics. net. cn
邮件地址:chineseoptics@ ciomp. ac. cn; zggxcn@ 126. com
联系电话:0431-86176852; 0431-84627061 传 真:0431-84627061
编辑部地址:长春市东南湖大路 3888 号(130033)