

空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析

吴 军 王先华 方勇华 熊 伟 施海亮 乔延利

(中国科学院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 论述了在大气二氧化碳(CO₂)探测中使用高分辨率红外光谱的必要性,并通过模拟计算,分析了天基高精度大气 CO₂ 探测所需要的工作波段、光谱分辨率和信噪比(SNR)等参数。以此为基础,介绍了针对这些参数研制的空间外差 CO₂ 探测仪样机,并通过实验室 Mg 灯观测结果,对仪器样机的分辨率进行了验证。最后利用辐射传输软件 LBLRTM,结合准实时的美国国家环境预报中心(NCEP)再分析数据对地面观测光谱进行了精确的模拟。通过将模拟光谱与仪器实测光谱进行对比,得到了较好的匹配结果。该结果表明,空间外差 CO₂ 探测仪可以获得大气 CO₂ 的精细吸收结构,其观测数据能够满足大气 CO₂ 探测的要求。

关键词 大气光学;高分辨率光谱;空间外差光谱技术;痕量气体;CO₂

中图分类号 P407 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0101001

Ability Analysis of Spatial Heterodyne Spectrometer in Atmospheric CO₂ Detection

Wu Jun Wang Xianhua Fang Yonghua Xiong Wei Shi Hailiang Qiao Yanli

(Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract The necessity of using high-resolution near infrared spectra in space-based atmospheric CO₂ detection is discussed. According to simulation results, some key parameters such as detection band, spectral resolution and signal to noise ratio (SNR) for space-based CO₂ detection are analysed. Based on these simulated parameters, a spatial heterodyne spectroscopy (SHS) prototype instrument is introduced. Then this prototype instrument's spectral resolution and abilities in CO₂ detection are verified by laboratory and out-door experiments. Using LBLRTM software and near-real-time atmospheric parameters acquired from National Centers for Environmental Prediction (NCEP), the ground-based observation data of the instrument is simulated. The comparison between simulation results and SHS prototype instrument's measurements shows a good fit. It is proved that the SHS prototype instrument is very sensitive to atmospheric CO₂ absorption, and the instrument's measurements could be used for space-based atmospheric CO₂ detection.

Key words atmospheric optics; high-resolution spectrum; spatial heterodyne spectroscopy (SHS); trace gases; CO₂

OCIS codes 010.0010; 010.0280

1 引 言

二氧化碳(CO₂)作为重要的温室气体,对气候的影响正受到人们越来越多的重视。但是,目前人类还不能准确掌握全球范围内 CO₂ 源汇变化及其与气候的准确关系,这极大的限制了人类对全球气

候系统变化的理解和预测。因此,对大气中 CO₂ 浓度变化的有效监测,具有重要的意义。

目前,大气 CO₂ 浓度主要是通过地面监测网络获得的,但该方法成本较高且空间分辨率极为有限,尤其在广大的极区、沙漠、高山等地区,资料十分匮

收稿日期: 2010-04-04; **收到修改稿日期**: 2010-05-13

基金项目: 中国科学院重要方向创新项目(KGCX2-YW-418)资助课题。

作者简介: 吴 军(1985—),男,硕士研究生,主要从事大气辐射传输方面的研究。E-mail: junewu@163.com

导师简介: 方勇华(1966—),男,研究员,主要从事遥感光电信息技术方面的研究。E-mail: yhfang@aiofm.ac.cn

乏,导致其观测结果的应用具有很大的局限性。因此,近年来美国、日本、欧洲等发达国家和地区都在积极的发展可以全球覆盖的天基 CO₂ 探测技术。使用卫星平台进行大气 CO₂ 观测的难点主要在于探测精度上,因为大气 CO₂ 的浓度及其梯度都较低,只有达到较高的探测精度,其结果才具有应用价值。分子吸收光谱学理论表明,光谱分辨率越高,对大气中 CO₂ 的浓度变化越敏感。因此新发展起来的天基 CO₂ 探测器都具有较高的光谱分辨率,如日本 GOSAT 和美国的 OCO,其 CO₂ 波段的光谱分辨率均达到 0.2 cm⁻¹,以保证较高的探测精度。

如何有效提高 CO₂ 探测器的光谱分辨率,是发展 CO₂ 卫星探测技术的关键。探测器光谱分辨率的提高通常会对仪器设计带来一些困难,因此,如何在保证仪器其它性能的基础上提高光谱分辨率,是发展星载 CO₂ 探测器的一个难点。目前,国际上主要的星载 CO₂ 探测载荷 GOSAT 和 OCO 分别采用时间干涉和色散的方式获取高分辨率光谱数据,相比这两种方式,采用空间外差光谱技术(SHS)的仪器具有光通量大,结构简单、无运动部件的优点,尤其是该技术可以在限定的光谱范围内达到很高的光谱分辨率和信噪比^[1,2],非常适合卫星平台搭载。根据模拟计算结果,提出了探测器波段的选择依据和应有的灵敏度指标,并在完成样机的基础上,通过模拟实验检验和验证了这种技术在天基大气 CO₂ 浓度探测上能力。

2 探测波段及分辨率的选择

大气中的 CO₂ 属于痕量气体,其体积分数约为

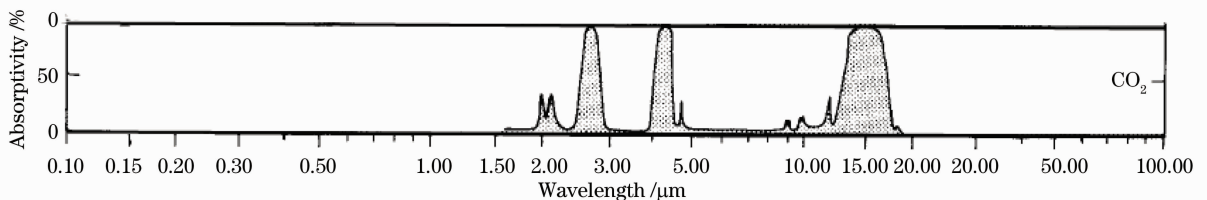


图 1 主要的 CO₂ 吸收带

Fig. 1 Main CO₂ absorption bands

为了寻找适合高精度 CO₂ 浓度探测的波段,需要准确分析各个 CO₂ 吸收带的影响因子。利用辐射传输模型 MODTRAN,选择 1976 年美国标准大气,在太阳天顶角为 0°条件下,计算各波段的透射率影响因子,如图 2 所示。从图中可以看出,4.3 μm 的 CO₂ 吸收十分强烈,几乎完全饱和;而 2.7 μm, 2.0 μm 波段受到水汽吸收的强烈影响,不利于高精

度 CO₂ 探测。3.8 × 10⁻⁴,且变化幅度较小,因陆地面积和植被量造成的季节性波动从北半球的 (12~22) × 10⁻⁶ 递减到南半球的 (1~2) × 10⁻⁶^[3]。P. J. Rayner 和 D. M. O'Brien^[4] 的研究表明,对于天基探测而言,只有达到 1% (约 4 × 10⁻⁶) 的探测精度,数据才能够有效的用于 CO₂ 源汇分析,从而服务于对全球气候的分析与预测。

大气成分的探测精度是与光谱分辨率密切相关的,研究表明,精确反演大气微量气体成分需要在超高分辨率条件下进行大气光谱观测,测量到的透射光谱分辨率越高,得到的气体吸收结构越精细,对路径上的吸收气体浓度也就越灵敏^[5]。为此我们使用辐射传输模式,对不同波段、不同分辨率的大气顶出射光谱进行了模拟,作为 SHS 探测器设计中波段和分辨率等重要参数的选择依据。

2.1 探测波段选择

大气 CO₂ 的吸收带主要有 15, 4.3, 2.7 和 2 μm 带,如图 1 所示^[6]。其中 15, 4.3 和 2 μm 带都属于强吸收带,易饱和且受水汽吸收影响较大。热红外区的 15 μm 波段接近地气系统长波辐射的峰值位置,大气 CO₂ 在该波段的吸收是造成温室效应的主要原因。虽然可以利用该波段获得不同高度上的热辐射信息,进而反演出 CO₂ 廓线,但因为边界层大气温度和地表温度比较接近,导致该波段难以准确区分地表热辐射和边界层大气热辐射,从而反演出 CO₂ 浓度廓线在边界层精度非常有限^[5]。而大气 CO₂ 及其梯度变化主要集中在边界层,因此 15 μm 带无法用于精确探测大气 CO₂ 浓度及其梯度变化。

度 CO₂ 探测。

相比较之下,由 CO₂ 分子振动-转动形成的 1.6 μm 带受其它气体影响较小,相对“干净”,并且该波段为一弱吸收带,不易饱和,如图 2(d) 所示,在精确探测 CO₂ 体积分数上具有明显的优势。1.6 μm 波段又可细分为 1.58 μm 和 1.61 μm 两个相似的子波段,OCO 采用了其中的 1.61 μm 波段进行探测,而

GOSAT 同时采用了 $1.58 \mu\text{m}$ 和 $1.61 \mu\text{m}$ 波段。选取该波段进行探测可以大大减小干扰气体带来的影响,而且,大气 CO_2 在该波段的吸收强度和浓度近似呈线性关系^[7],有利于精确获得柱浓度值。但因

为该波段是弱吸收带,要利用它探测大气 CO_2 柱浓度的微弱变化,必须保证探测仪器具有足够高的光谱分辨率。

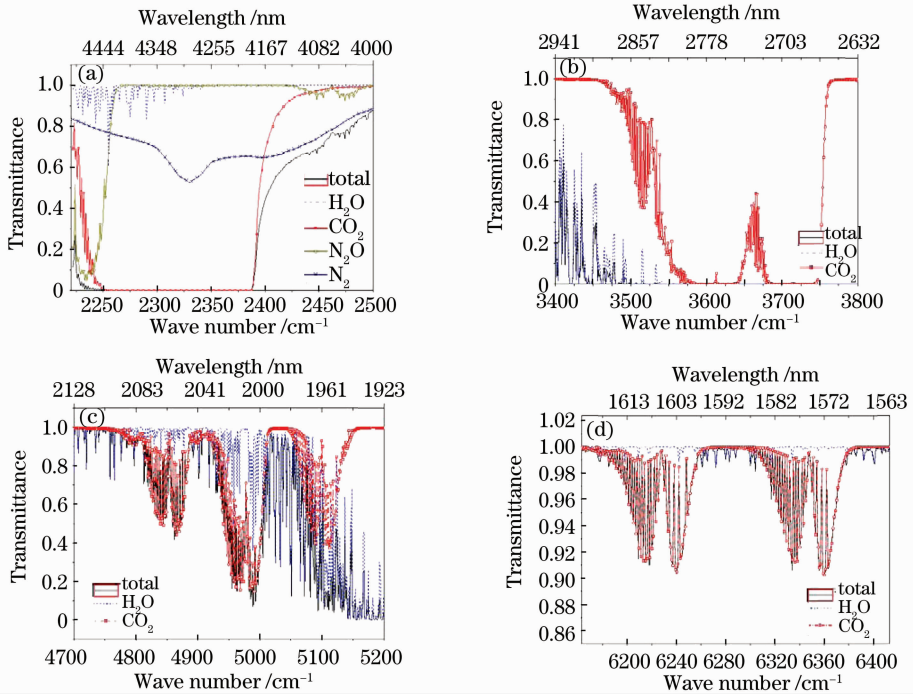


图 2 不同波段的 CO_2 吸收情况。(a) $4.3 \mu\text{m}$ 波段, (b) $2.7 \mu\text{m}$ 波段, (c) $2.0 \mu\text{m}$ 波段, (d) $1.6 \mu\text{m}$ 波段

Fig. 2 CO_2 absorption in different bands. (a) $4.3 \mu\text{m}$ band, (b) $2.7 \mu\text{m}$ band, (c) $2.0 \mu\text{m}$ band, (d) $1.6 \mu\text{m}$ band

2.2 光谱分辨率选择

从原理上来说,光谱分辨率越高,对大气中 CO_2 的浓度变化越敏感,越有利于 CO_2 反演精度的提高,然而在工程上,光谱分辨率的提高会增加仪器设计实现难度,甚至是难以满足的,因此需要探询合理的光谱分辨率。为此,进行了进一步的模拟,这里以 CO_2 的 $1.58 \mu\text{m}$ 波段为例,假设太阳天顶角 30° ,观测点海拔高度为 0,地面反射率 0.3,以 1976 年美国标准大气为模型,调整 CO_2 积分柱体积分数为 3.8×10^{-4} ,使用高分辨率的逐线积分模式 LBLRTM 模拟计算了该波段的大气顶(TOA)出射光谱 R_1 ,并将其用高斯窗函数卷积到 0.25,0.5,0.75,1.0 和 1.25 cm^{-1} 五个不同的分辨率,如图 3 所示。

可见,在同一体积分数下,光谱分辨率越高,吸收峰越明显,随着光谱分辨率的降低,吸收峰特征逐渐减弱,光谱吸收结构的细节将逐渐丢失。

在保持其它参数不变的情况下,当模式大气中的 CO_2 积分柱体积分数增加到 3.81×10^{-4} ,重新计算模拟光谱 R_2 ,将 $R_1 - R_2$,得到 $1 \times 10^{-6} \text{ CO}_2$ 柱体积分数变化造成的 TOA 出射光谱亮度变化,如图 4(a)所示, $1 \times$

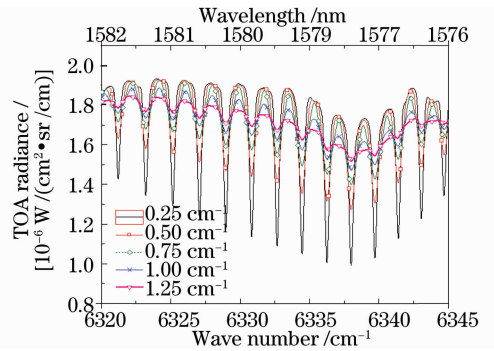


图 3 模拟的不同分辨率 $1.58 \mu\text{m}$ TOA 出射光谱
Fig. 3 Simulated TOA spectra near $1.58 \mu\text{m}$ with different resolutions

10^{-6} 体积分数差异造成的亮度变化是比较微弱的。

将图 4(a)中数据除以 3.8×10^{-4} 体积分数时的 TOA 出射光谱,即 $(R_1 - R_2)/R_1$,得到该亮度变化占原 TOA 出射光谱亮度值的比例,如图 4(b)所示。可以看出,如果大气中的 CO_2 混合比增加 1×10^{-6} ,在分辨率 0.25 cm^{-1} 时,TOA 出射光谱的亮度变化比例约为 0.08%;当分辨率降低到 1.25 cm^{-1} 时, 1×10^{-6} 体积分数变化造成的出射光谱亮度变化减小到约 0.02%。表 1 给出了不同分辨率条件下,TOA 出

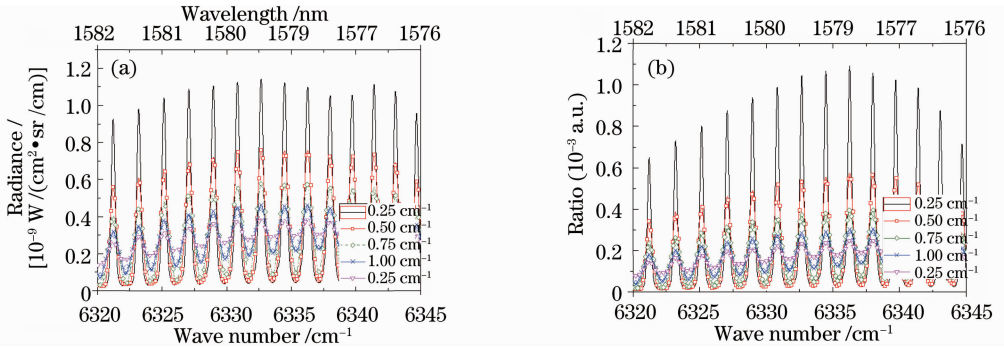


图 4 1×10^{-6} CO_2 柱体积分数变化引起的 TOA 出射光谱变化。(a)亮度变化绝对值,(b)亮度变化比例

Fig. 4 TOA radiance changes due to 1×10^{-6} CO_2 column mixing volume ratio increase. (a) radiance change in absolute value, (b) radiance change in volume ratio

表 1 不同分辨率下,探测 1%柱体积分数变化所需要的信噪比(SNR)

Table 1 SNRs for detection of 1% column mixing volume ratio change under different spectral resolutions

Resolution / cm^{-1}	Averaged TOA radiance change due to 1×10^{-6} CO_2 column mixing volume ratio change		SNRs needed to detect 1% (4×10^{-6}) CO_2 column mixing volume ratio change (10 absorption peaks available)
	Absolute / [10^{-10} W/($\text{cm}^2 \cdot \text{sr}/\text{cm}$)]	Relative / %	
0.25	9.06	0.079	100
0.50	6.41	0.045	176
0.75	4.86	0.32	247
1.00	4.11	0.026	304
1.25	3.39	0.21	376

射光谱对 CO_2 体积分数变化的灵敏度,以及探测 1% (4×10^{-6}) CO_2 柱体积分数变化所需要的信噪比。

从表 1 中列出的计算结果可以看出,TOA 出射光谱对 CO_2 体积分数变化的灵敏程度与光谱分辨率成正比。理论上,获得的 TOA 出射光谱分辨率越高,越容易探测到微弱的大气 CO_2 体积分数变化。

另外,在分辨率和灵敏度一定的条件下,观测到的吸收峰增多,也可以减小探测误差,提高信噪比。例如,当光谱分辨率 0.25 cm^{-1} 时, 1×10^{-6} 的大气 CO_2 柱体积分数变化,对单个吸收峰仅造成 0.079% 的亮度变化,那么探测 1% 柱体积分数变化 4×10^{-6} 时需要的信噪比高达约 316^[3]。但如果可用吸收峰为 10 个,则对于 1% 的柱体积分数探测目标而言,信噪比可以降低到约 100。

根据上述分析结果,在增加仪器光谱分辨率以提高探测灵敏度的同时,还应该保证波段内具有足够多的吸收峰。但是,由于 SHS 仪器的光谱范围大小受探测器采样精度的限制,过高的光谱分辨率会导致 SHS 仪器带宽变窄。而 $1.58 \mu\text{m}$ 波段的 CO_2 吸收线间隔较大,带宽变窄会使得波段内可用吸收峰数目减少,不利于高精度探测。根据 J. Harlander 等^[8] 的研究,SHS 的光谱范围与分辨率有如下关系

$$\Delta\sigma = N \cdot \delta\sigma / 2,$$

式中 $\Delta\sigma$ 为仪器光谱范围, N 为探测器像元数, $\delta\sigma$ 为 SHS 仪器的光谱分辨率。例如,当 CCD 阵列尺寸为 256×320 时,对于上述五个分辨率,可实现的带宽如表 2 所示。

表 2 不同分辨率条件下 SHS 仪器的带宽

Table2 SHS bandwidth under different spectral resolutions

Resolution / cm^{-1}	Band width / cm^{-1}
0.25	40
0.5	80
0.75	100
1.00	160
1.25	200

由(1)式和表 2 可见,对于一定的探测器采样精度,仪器带宽会随光谱分辨率的提高而缩短。另外,由于仪器滤光片的高斯响应特征,光谱范围两端的响应相对较差,有效数据为整个带宽中部响应较好的部分(约占整个光谱范围的 50%),这也进一步缩短了光谱范围。

由此可见,虽然上述不同分辨率的模拟结果表明 0.25 cm^{-1} 时仪器对 CO_2 吸收最为灵敏,但对 SHS 样机而言,该分辨率下的仪器有效带宽只有约 20 cm^{-1} ,在 $1.58 \mu\text{m}$ 波段的可用吸收峰数目仅有 10 个左右。而 $0.75, 1.00$ 和 1.25 cm^{-1} 的分辨率对

大气 CO₂ 体积分数变化的灵敏度较低,需要仪器具有较高的信噪比,这将给仪器设计带来一定困难。相比之下,选择 0.5 cm⁻¹ 的分辨率既可以保证仪器样机拥有足够高的灵敏度,也可以使可用吸收峰增加到 20 个左右,有助于进一步提高信噪比。综合考虑,选择 0.5 cm⁻¹ 的分辨率既可以获得足够的灵敏度,也兼顾了带宽,能减小设计上的难度,更易于实现。

3 SHS 原理及样机性能验证

空间外差光谱技术(SHS)的概念最早提出在 20 世纪 70 年代,它综合了衍射光栅及空间调制干涉技术于一体,采用了两块衍射光栅代替迈克耳孙干涉仪中的两个平面反射镜,通过调整衍射光栅的角度实现不同波长的零频干涉。该方法比传统的扫描傅里叶变换光谱仪(FTS)更容易实现高分辨率测量。

3.1 SHS 原理及特点

SHS 的光学系统原理如图 5 所示^[1]。系统中利用两个衍射光栅代替了传统迈克耳孙干涉仪中的两个平面反射镜。光束从光阑 A 进入,经准直镜 L₁ 后入射到分束器上分为等强度的两束相干光,并分别达到衍射光栅 G₁, G₂。经衍射光栅返回的两束光再通过分束器后发生干涉产生干涉条纹,并由光学系统 L₂, L₃ 成像于探测器上。

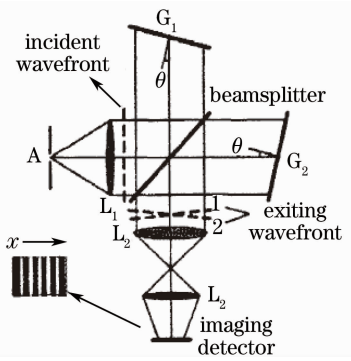


图 5 SHS 原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of basic SHS configuration

SHS 的主要特点有^[9]:

- 1) 无运动部件,可靠性强;
- 2) 比传统的 FTS 更容易获得高光谱分辨率;
- 3) 光通量大。其光通量比色散型光谱仪大几百倍,且不影响分辨率;
- 4) 可以同时采集不同位置的干涉图信息,避免了迈克耳孙干涉仪动镜移动过程中造成的信号不一致性;
- 5) 集成度高、体积小、重量轻和功耗小。

3.2 SHS 样机性能验证

依据前述模拟计算所提出的仪器指标,设计实现了空间外差 CO₂ 探测仪样机。为验证样机性能,对其进行了实验室 Mg 灯和室外太阳光谱的观测实验^[10]。

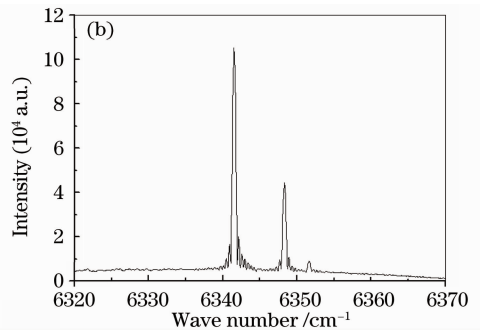
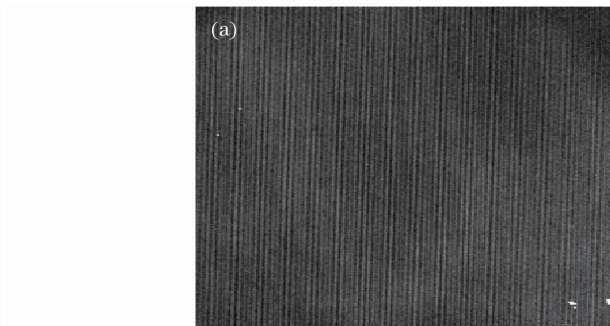


图 6 实验室镁灯观测结果。(a)干涉图,(b)变换光谱

Fig. 6 Measurements of Mg lamp in laboratory. (a) interference image, (b) spectrum

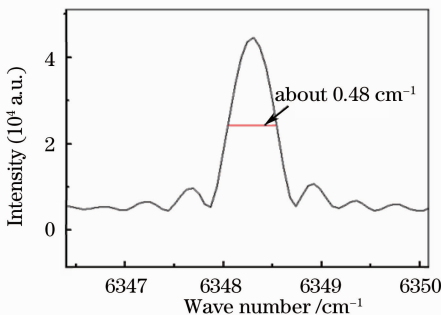


图 7 SHS 样机分辨率

Fig. 7 Resolution of SHS prototype instrument

图 6 是近红外 1.58 μm 波段的 Mg 灯观测结果。根据 NIST 分子光谱数据库提供的资料,右图变换光谱中的三个峰,分别对应了 Mg 灯在 6352.955, 6349.614 和 6342.828 cm⁻¹ 的三根发射线^[11],由此可以确定系统的光谱范围约为 63.32 个波数(6310.3245 cm⁻¹ — 6373.3443 cm⁻¹)。

对 Mg 灯单线形成的峰进行测量,获得其半峰全宽(FWHM)即为仪器分辨率,由此确定仪器的实际分辨率为 0.48 cm⁻¹ (约 0.12 nm),如图 7 所示。受加工精度的影响,该分辨率比前文提出的 0.5 cm⁻¹ 略高,这不会对前述灵敏度分析结果有太大影响。

通过晴朗天气条件下的室外观测实验,可以获得经过大气 CO_2 吸收的透射太阳光谱。使用 SHS 样机对 2010 年 1 月 29 日 14:00 的合肥地区地面太阳光谱进行了测量,其结果如图 8 所示,从右侧的变

换光谱中可以清楚的观察到由 CO_2 吸收所形成的特征吸收峰,这证明 SHS 样机对大气 CO_2 吸收非常敏感。

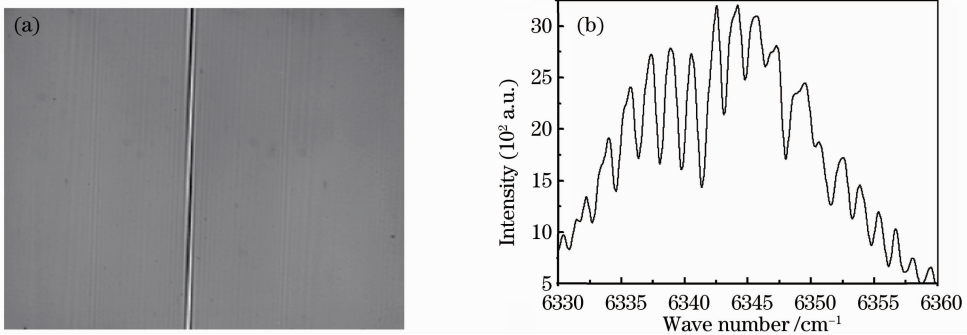


图 8 晴朗条件下的室外观测结果。(a)干涉图,(b)光谱

Fig. 8 Outdoor measurements in a clear day. (a) interference image, (b) spectrum

4 模拟光谱与实测光谱的比较分析

现有的辐射传输模式,如 FASCODE, LBLRTM 等,可以根据 HITRAN 分子吸收线数据库^[12],逐线的计算大气路径上的吸收,精确的模拟大气消光过程^[13]。一般认为利用辐射传输模式获得的模拟光谱是比较准确的,可以当做参照标准来检验实测结果的可靠性。另外,精确的模拟光谱对于定量反演也具有重要的意义。根据给定大气参数计算模拟光谱的过程,在反演问题中称为前向计算,是观测光谱和待求解未知量之间的桥梁^[14,15]。通过精确的计算模拟观测光谱,并将其与 SHS 样机的实测光谱进行对比,可以对样机的能力进行验证。

致性,可以采用自定义大气模式。具体做法是以模式大气为基础,将波段内比较重要的影响因素,如温度、相对湿度廓线等,替换为高精度、准实时的大气状态参数。美国国家环境预报中心(NCEP)再分析资料是在地面观测、无线电探空、探空气球、飞机及卫星等多种观测数据的基础上,经同化和订正得到的再分析数据。NCEP 资料具有 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间分辨率,时间间隔为 6 h,使用 NCEP 资料作为模拟计算的输入参数,可以减小 CO_2 体积分数以外其它因素的影响,从而提高模拟光谱的精度。图 9 给出了从 NCEP 资料获取的合肥地区 2010 年 1 月 29 日 14:00 的温度廓线、相对湿度廓线^[16]。

为保证模拟光谱与实测光谱在大气状态上的一

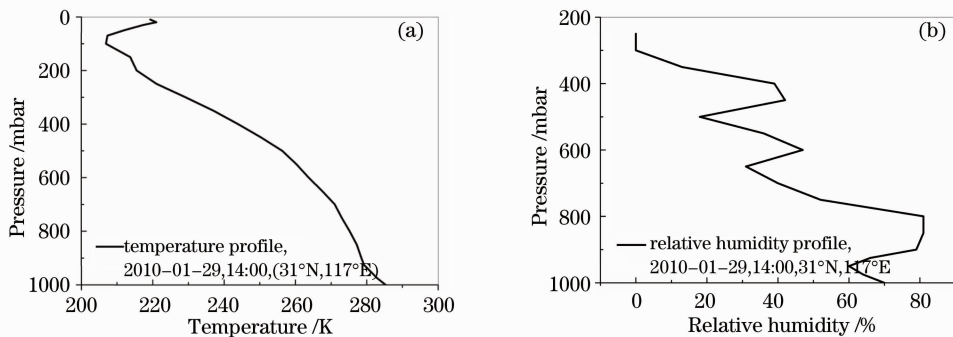


图 9 合肥地区的 NCEP(a)温度,(b)相对湿度廓线

Fig. 9 Temperature profile (a) and relative humidity profile (b) of Hefei region

将上述 NCEP 资料以及观测点高度、太阳天顶角、观测日期等参数输入 LBLRTM,计算到达地面的太阳光谱,再使用高斯窗函数卷积,将其分辨率降低到 0.48 cm^{-1} ,可以计算得到模拟光谱。将图 9(b)中

的仪器实测数据进行辐射定标、拉直后,与模拟光谱进行对比,如图 10 所示。

通过对比,可以看出实测亮度谱反映了波段范围内精细的气体吸收结构,在该分辨率下能够清楚

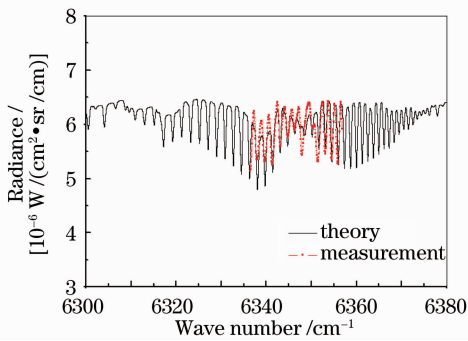


图 10 定标后的仪器 1.58 μm 波段实测结果与模拟光谱对比

Fig. 10 Spectral fit of calibrated SHS measurement and LBLRTM calculations in CO_2 1.58 μm band

区分出波段内主要吸收线形成的吸收峰,这说明 SHS 对大气 CO_2 吸收非常敏感,也体现了 SHS 的高分辨率特点。6348 cm^{-1} 处突起的峰可能是由于模拟计算采用的 HITRAN 分子数据库在该位置漏掉了一根吸收线,GOSAT 的观测结果在该位置也有同样的现象^[17]。通过该图可以看出实测光谱与模拟光谱吻合较好,证明 SHS 样机测量结果符合大气 CO_2 吸收的实际情况。

5 结 论

从天基大气温室气体探测的需求出发,对空间外差光谱技术应用于大气 CO_2 探测的可行性进行了探讨。首先论述了在大气 CO_2 探测中使用高分辨率近红外光谱的必要性;并根据辐射传输模型的模拟计算结果,分析了天基探测大气 CO_2 的可用波段,分析结果证明近红外 1.58 μm , 1.61 μm 波段在天基大气 CO_2 柱体积分数探测上,相对传统波段有明显的优势;然后根据不同光谱分辨率的模拟结果,确定采用 0.5 cm^{-1} 的光谱分辨率既能够保证探测精度,又可以减小样机研发难度。

针对模拟结果提出的技术指标,设计实现了近红外 1.58 μm 波段的空间外差 CO_2 探测仪样机,实验室 Mg 灯实验表明,样机的波段位置、光谱分辨率符合设计要求,具备探测大气 CO_2 体积分数梯度的能力。最后,利用逐线积分的辐射传输模式 LBLRTM,结合 NCEP 大气状态资料,对样机的室外观测光谱进行了精确模拟,模拟光谱与实测光谱的对比表明,样机获得的 1.58 μm 波段太阳光谱,能够体现出精细的 CO_2 吸收特征。该工作也为下一步的 CO_2 定量反演方法研究提供了理论依据和技术准备。

参 考 文 献

- Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin *et al.*. System design of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(6): 959~964
- 叶松,方勇华,洪津等.空间外差光谱仪系统设计[J].*光学精密工程*, 2006, **14**(6): 959~964
- Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin *et al.*. Development and application of spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Chinese J. Scientific Instruments*, 2006, **27**(6): 983~985
- 叶松,方勇华,洪津等.空间外差光谱技术的发展与应用[J].*仪器仪表学报*, 2006, **27**(6): 983~985
- J. Mao, S. Randlph Kawa. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight[J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(4): 914~927
- P. J. Rayner, D. M. O'Brien. The utility of remotely sensed CO_2 concentration data in surface source inversions [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 2429
- E. Dufour, F. M. Bréon. Spaceborne estimate of atmospheric CO_2 column by use of the differential absorption method: error analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(18): 3595~3609
- J. P. Peixoto, A. H. Oort. *Physics of Climate*[M]. New York: AIP Press, 1992. 520
- OCO Science Team. The Need for Atmospheric Carbon Dioxide Measurements from Space; Contributions from a Rapid Reflight of the Orbiting Carbon Observatory[R]. 2009:16, http://www.nasa.gov/pdf/363474main_OCO_Reflight.pdf
- J. Harlander, R. J. Reynolds, F. L. Roesler *et al.*. Spatial heterodyne spectroscopy: a novel interferometric technique for the FUV[C]. *SPIE*, 1990, **1344**: 120~131
- Ye Song, Fang Yonghua, Hong Jin *et al.*. Experimental study on spatial heterodyne spectroscopy [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(5): 84~88
- 叶松,方勇华,洪津等.空间外差光谱技术实验研究[J].*光工程*, 2007, **34**(5): 84~88
- Zou Mingmin, Fang Yonghua, Xiong Wei *et al.*. Line-by-line retrieval calculation of water vapor based on spatial heterodyne spectroscopy observation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1701~1705
- 邹铭敏,方勇华,熊伟等.一种基于空间外差光谱技术观测的逐线积分水汽浓度反演方法[J].*光学学报*, 2009, **29**(6): 1701~1705
- NIST Atomic Spectra Database(2010), <http://www.nist.gov/physlab/data/asd.cfm>
- L. S. Rothman, C. P. Rinsland *et al.*. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, 2005, **96**: 139~204
- Chen Xiuhong, Wei Heli. Transplantation of LBLRTM from workstation to PC [J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(2): 99~103
- 陈秀红,魏合理. LBL从工作站到PC机的移植[J].*大气环境光学学报*, 2007, **2**(2): 99~103
- Li Jun, Zeng Qingcun. Infrared remote sensing of clear atmosphere and its inversion problem. Part I: theoretical study [J]. *Chin. J. Atmospheric Sciences*, 1997, **21**(1): 1~9
- 李俊,曾庆存.晴空时大气红外遥感及其反演问题 I:理论研究[J].*大气科学*, 1997, **21**(1): 1~9
- C. D. Rodgers. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*[M]. Hackensack: N. J. World Scientific Press, 2000. 81~100
- University Corporation for Atmospheric Research, The CISL Research Data Archive, National Center for Atmospheric Research (2010), <http://dss.ucar.edu>
- GOSAT Data Product Release(2009), <http://www.gosat.nies.go.jp/eng/related/200912.htm>