

应用于高精度大气 CO₂ 遥感的空间外差技术研究

韦秋叶 王先华 叶函函 李志伟 江新华 卜婷婷

(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 针对大气二氧化碳高精度反演对卫星载荷测量技术的极高要求, 通过与传统的色散型和干涉型光谱测量技术的比较, 介绍了一种新型的超光谱测量技术即空间外差光谱技术。依据航天条件下的载荷技术需求, 较详细地介绍了探测原理和仪器结构, 展示了这种技术获取超光谱分辨率和高信噪比数据的能力, 以及小体积、轻质量和低功率等在航天环境下的重要技术优势。在此基础上, 利用本所自主研发的原理样机进行了大气二氧化碳探测实验, 结果表明其观测数据精度能够良好地应用于二氧化碳反演, 其探测结果与日本碳嗅卫星(GOSAT)观测结果相一致, 说明空间外差技术具有应用于卫星对地探测大气二氧化碳的能力。

关键词 光谱学; 傅里叶变换光谱仪; 空间外差光谱技术; 超光谱分辨率; 二氧化碳反演

中图分类号 P407 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0801006

Research of Spatial Heterodyne Spectroscopy for Atmospheric CO₂ Remote Sensing with High Precision

Wei Qiuye Wang Xianhua Ye Hanhan Li Zhiwei Jiang Xinhua Bu Tingting

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

Abstract Considered the rigorous requirement on satellite measurement technology for achieving high precision retrieval of atmospheric CO₂, compared with dispersive spectroscopy and interferometric spectroscopy, a novel technology as spatial heterodyne spectroscopy is introduced. According to the requirements on sensor aboard on satellite, measurement principle and instrument structure are introduced in detail, which exhibits the superiority of this technology as the ability of achieving ultrahigh spectral resolution and high signal to noise ratio, and the key technical advantages of small volume, light mass and low power. Based on these, atmospheric CO₂ measurement experiments are carried out using spatial heterodyne spectroscopy (SHS) prototype developed by our institute. The results show that the measurements can satisfy the atmospheric CO₂ retrieval, and the consistency of experiment results with greenhouse gases observing Satellite (GOSAT) CO₂ is verified that spatial heterodyne spectroscopy has the ability of measuring atmospheric CO₂ from space.

Key words spectroscopy; Fourier-transform spectrometer; spatial heterodyne spectroscopy; ultrahigh spectral resolution; carbon dioxide retrieval

OCIS codes 010.0280; 280.4788; 280.1120

1 引言

大气二氧化碳(CO₂)是造成气候变化的最重要的温室气体, 气候研究所需的优于1%的精度要求成为目前探测技术上的难点。地基温室气体观测站

能实现高精度 CO₂ 浓度探测要求, 但由于观测站的数目有限, 观测数据难以覆盖全球地区。卫星遥感具有全球观测的优势, 但高精度的观测是其面临的主要难点。目前美国采用的色散技术和日本采用的

收稿日期: 2014-01-06; **收到修改稿日期**: 2014-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(41175037)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106045-1)

作者简介: 韦秋叶(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事超光谱遥感探测技术方面的研究。

E-mail: weiqiuye0728@qq.com

导师简介: 王先华(1963—), 男, 研究员, 主要从事遥感信息分析与处理方面的研究。E-mail: xhwang@aiofm.ac.cn (通信联系人)

傅里叶干涉技术(FTS)都是传统的探测方式,技术上存在难以克服的不足。

美国的轨道碳观测器(OCO)采用色散探测方式^[1],为了获得高光谱分辨率及高光通量,体积必须很大;同时,对温度、湿度十分敏感,对环境要求苛刻,增大了卫星的航天环境下的技术困难和实现成本。日本碳嗅卫星(GOSAT)采用的FTS与色散型光谱仪相比,光路中不设狭缝,因此光通量很大,具有高信噪比(SNR, R_{SN})和高分辨率等优点^[2],在信号获取上体现出较大的优势;但作为时间调制型的FTS仪器,含有运动部件,体积大,对外界环境稳定性要求较高,特别是采集一幅干涉图需要1~4 s时间,不利于高速运动卫星上的运动图像采集^[2],这些因素都在不同程度上影响着观测数据的质量。

空间外差光谱技术(SHS)是一种空间调制型的FTS,它继承了FTS的高信噪比、多路传输和高分辨率等特点;同时它摒弃了传统FTS的动镜扫描部件,采用光栅衍射来获得相位差,从而使体积大大缩小,可实现对干涉谱的同时采样。这种技术具有的结构简单、重量轻、功耗小等^[3]优点也使它非常适合用于卫星环境,作为探测温室气体的卫星载荷具有巨大潜力。该技术自提出以来受到越来越多的重视,2002年美国基于该技术研制出了中层大气羟基空间外差成像仪(SHIMMER)系统用于羟基自由基(OH)探测^[3];2004年加拿大也开始了SHS在高层大气水汽遥感中的应用研究。在国内,2005年中国

科学院安徽光学精密机械研究所首次将该技术用于CO₂遥感研究,目前已研制出CO₂通道的原理样机,在国家自然科学基金和863项目的支持下相关研究还在不断深入^[4-8]。本文正是基于SHS,对大气CO₂进行探测实验,介绍了探测原理和仪器结构,实验结果展示了其具有获得超光谱分辨率和高信噪比的能力。

2 大气CO₂反演的基本特点

大气CO₂反演对遥感探测仪器参数最重要的要求体现在光谱分辨率与信噪比上,前者体现了吸收光谱随大气CO₂浓度(即指CO₂体积分数)变化的敏感性,后者体现了光谱受噪声的影响程度。

2.1 光谱分辨率

卫星观测到的谱线宽度是由CO₂吸收线宽和仪器分辨率共同决定的。CO₂的分子吸收线宽在一定条件下是稳定的,在温度为273 K,压强为101.3 kPa时,这个吸收线宽在0.07 cm⁻¹左右^[9]。CO₂分子振-转带吸收谱的精细结构与大气中CO₂的体积分数直接相关,仪器光谱分辨率越高对大气中CO₂体积分数的变化越敏感,因此探测能力也越强。

图1用逐线积分辐射传输模型(LBLRTM)计算,采用1976年美国标准大气廓线、垂直观测、太阳天顶角为30°、地表反射率为0.3、大气中CO₂体积分数为380×10⁻⁶、计算的波段为6305~6395 cm⁻¹;

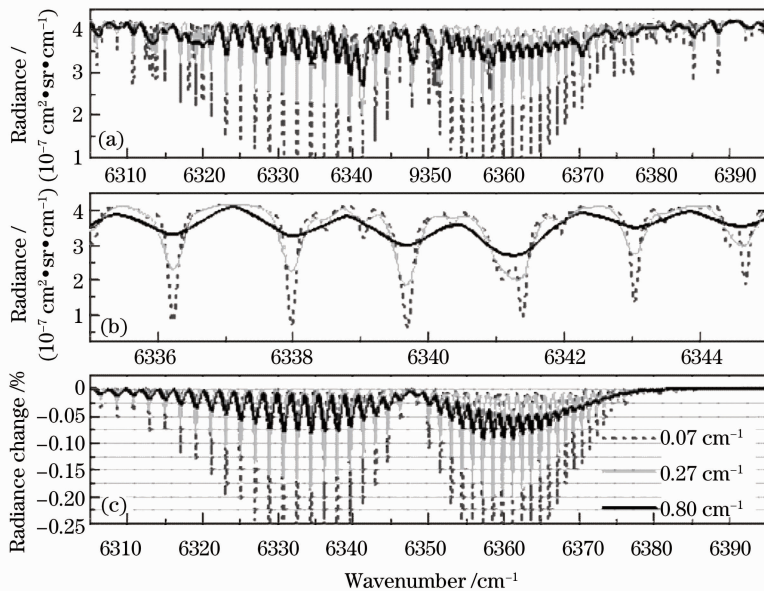


图1 三种分辨率下的CO₂仿真光谱

Fig. 1 CO₂ spectra simulations for three different spectral resolutions

(a)表示分辨率分别为 0.07、0.27、0.80 cm⁻¹时的大气顶太阳光谱；(b)是(a)图的部分放大，可以看出光谱分辨率越高吸收峰越深；(c)表示行星边界层(PBL)中 CO₂ 体积分数增加 1%后大气顶辐亮度的变化量；图中三种曲线代表了三种不同的光谱分辨率，仿真表明光谱分辨率越高同一 CO₂ 体积分数变化量引起的大气顶辐亮度的改变量越大，即分辨率越高对 CO₂ 的变化越敏感。

2.2 仪器信噪比

由于 CO₂ 体积分数变化主要集中在近地表，因此本文着重于行星边界层内(0~2 km)的 CO₂ 扰动研究，图 1(c)显示了行星边界层中的 CO₂ 体积分数增加 1%(约 3.8×10^{-6} ，这个值相当于赤道上 CO₂ 体积分数的季节波动)时大气顶辐亮度的变化量。以光谱分辨率 0.27 cm⁻¹为例，当 PBL 中的 CO₂ 体积分数增加 1%后，大气顶的辐亮度最大变化量约为 0.20%，若要探测到这个 CO₂ 体积分数扰动，则仪器的信噪比不能低于 500，否则这个信号将被噪声淹没；当光谱分辨率为 0.07 cm⁻¹时，要探测 PBL 中体积分数为 1%的 CO₂ 深度扰动，所需的信噪比则应小于 400；当分辨率降低为 0.8 cm⁻¹时，所需的信噪比则高于 500。当然，在给定光谱分辨率的情况下，信噪比越高，则能探测到的 CO₂ 体积分数扰动越小，仪器探测的 CO₂ 精度也就越高。这里的仿真单纯从仪器的角度进行分析，在实际 CO₂ 反演过程中仪器无法同时满足分辨率与信噪比的要求，在特定分辨下信噪比与反演要求稍有差距，此时为了抑制随机噪声、提高反演精度，可采取选通道、多通道联合反演等反演手段。CO₂ 反演方法是一个独立的研究领域，在这方面已有诸多研究^[10-11]，本文不作深入探讨。

3 空间外差光谱技术

SHS 是一种新型的空间调制型 FTS，尽管该概念早在 20 世纪 70 年代就被提出^[12]，然而随着相关技术的发展，近年来才刚进入实质性研究阶段。我国将要发射的高光谱卫星的大气 CO₂ 载荷将采用这一技术。作为新型技术，在具有探测优势的同时，其实用能力则是人们普遍关心的问题。本节从原理上说明 SHS 的特点，随后利用本所自主研发的 CO₂ (1.58 μm 波段)通道的原理样机进行实验验证。

3.1 空间外差光谱技术原理

SHS 的光学系统结构^[3,13]如图 2 所示，用两个衍射光栅 G₁、G₂ 代替了迈克耳孙干涉仪中的两个

平面反射镜，相干光形成的干涉条纹由光学系统 L₂、L₃ 成像于探测器 D 上。与传统时间调制型 FTS 中利用动镜移动来改变光程差的原理不同，SHS 利用衍射光栅 G₁、G₂ 就可实现光程差的改变，无需运动部件，这是 SHS 的优点之一。如图 2 所示，轴向光以 θ 角入射到光栅上，Littrow 波数^[14]的光将以 θ 角方向返回，相位差为零，形成空间零频干涉；对非 Littrow 波数的单色光，经光栅衍射后返回的两束光的波阵面存在夹角，相位差不为零，由此将产生干涉条纹。

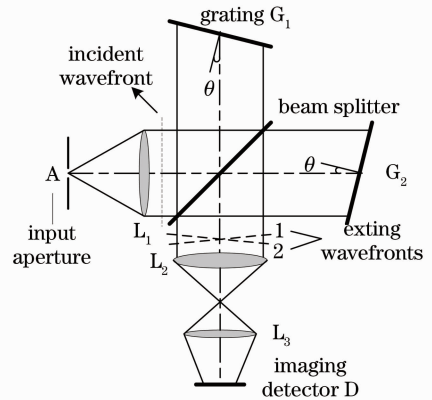


图 2 空间外差光谱仪原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the SHS configuration

若输入的光谱为 $B(\sigma)$ ，探测器在 u 方向(光栅衍射方向)上获取的干涉图信号为

$$I(u) = \int_0^{\infty} B(\sigma) \{1 + \cos\{2\pi[4(\sigma - \sigma_0)u \tan \theta]\}\} d\sigma. \quad (1)$$

通过对干涉图信号进行傅里叶变换可以得到入射光谱 $B(\sigma)$ 。而传统的傅里叶光谱仪的干涉形式如下：

$$I(u) = \int_0^{\infty} B(\sigma) [1 + \cos(2\pi\sigma u)] d\sigma. \quad (2)$$

3.2 空间外差光谱技术的特点

与色散型光谱仪和时间调制型 FTS 相比，SHS 的重要技术优势主要体现如下。

3.2.1 超光谱分辨率探测

根据瑞利判据，若一条谱线的中央极大正好与相邻的另一条谱线的极小重合，则两条谱线刚好能被分辨开。色散型仪器的分辨率取决于狭缝的宽度，狭缝越窄，分辨率越高，但随之而来的是能量急剧下降，信噪比不断降低，甚至无法从噪声中检出信号。与传统傅里叶变换光谱仪类似，SHS 的分辨率由最大光程差 Z 决定：

$$\delta_\sigma = \frac{1}{2Z}, \quad (3)$$

式中 Z 表示干涉图的最大光程差,干涉型光谱仪通过增大光程差可以获得很高的光谱分辨率,同时不会降低信噪比。传统时间调制型 FTS 为了增大最大光程差,获得较高分辨率,动镜需要移动很大的距离。SHS 是空间调制型 FTS,其最大光程差取决于光栅长度与探测器像元数目,其继承了干涉型光谱仪的高分辨率优点,并且不含运动部件。且从(1)式和(2)式可以看出,传统傅里叶光谱仪的干涉图从 0 波数开始记录,而 SHS 的干涉图从 σ_0 开始记录,因此 SHS 可以将探测器的有限采样数都用于目标波段内,大大提升了光谱分辨率。

3.2.2 高信噪比

假设噪声与频率无关,考虑入射光源为连续光,则光谱域信噪比 R_σ 与干涉域信噪比 R_u 的关系可表示为^[13]

$$R_\sigma = \sqrt{\frac{2}{N}} R_u = \sqrt{\frac{2}{N}} \times \sqrt{\frac{\epsilon A \Omega}{2N} \frac{N f \delta_\sigma}{2} T} = \sqrt{\frac{\epsilon A \Omega}{2N} f \delta_\sigma T}, \quad (4)$$

式中 R_u 为干涉图零光程差点信噪比, ϵ 为量子效应, N 为干涉图采样点数, A 为系统的有效面积, Ω 为视场角, T 为总的积分时间, δ_σ 为光谱分辨率, f 为连续光的通量密度,单位是 counts/(s * m² * sr/cm⁻¹)。

色散型仪器的信噪比 R_{SN} 也存在以下关系: $R_{SN} \propto \sqrt{T}$ 。但色散型仪器在 T 时间内对探测波段内的 m 个分辨单元进行探测,每个分辨单元所用的测量

时间为 T/m 。在其他条件相同时,干涉型仪器的信噪比是色散型仪器的 \sqrt{m} 倍,伴随而来的是干涉型光谱仪的信噪比大幅度提高。SHS 光路中不设置狭缝,除了光学器件损失的能量外,目标波段的其余能量几乎都能到达探测器,因此光通量 f 较色散型光谱仪要大。与传统的傅里叶型光谱仪相比,SHS 更容易扩展视场,这对提高仪器灵敏度具有十分重要的意义。以上因素均有利于提高仪器的信噪比,这对 CO₂ 体积分数探测是十分有利的。再者,SHS 利用面阵探测器 D 来采集干涉图,可一次性采集到一张完整的干涉图,测量速度非常快,可对目标点进行多次测量来降低随机噪声。且采用二维面阵探测器,干涉图的每一行都对应一条完整的干涉信号,对这些干涉信号复原成光谱后取均值也有利于进一步提高信噪比。

3.2.3 无扫描部件与小体积

SHS 利用光栅衍射效应来实现光程差的改变,克服了时间调制型 FTS 中由动镜扫描带来的机械控制困难、结构复杂、稳定性差、测量时间长、寿命短等一系列问题。由于其结构简单、体积小、功耗低、易于集成,因此它在星载温室气体探测中具有不可比拟的优势。表 1 是美国 OCO^[15-16]、日本 GOSAT^[17] 与 SHIMMER^[3] 的参数对比,其中 OCO 是色散型光谱仪,GOSAT 的 TANSO-FTS (Thermal and Near Infrared Sensor for Carbon Observation) 是时间调制型 FTS,而 SHIMMER 则采用了 SHS 技术。

表 1 OCO、GOSAT 和 SHS 的参数对比

Table 1 Parameter contrast of OCO, GOSAT and SHS

Specification	Mass /kg	Volume /m ³	Power /W
OCO	about 150	1.6×0.4×0.6	<125
GOSAT TANSO-FTS	250	1.2×1.1×0.7	—
SHIMMER	22	0.47×0.36×0.24	27

4 实验与结果分析

本所研制的 SHS 原理样机,经过数据处理和定标方法的研究,目前已经能初步运用于温室气体探测中,用 CO₂ 波段的 SHS 原理样机进行了外场实验,验证了 SHS 对大气 CO₂ 的探测能力。SHS 仪器参数如表 2 所示。

2013 年 7 月 11 日下午,在本所遥感中心的实验场进行了外场实验。实验地点远离建筑物,场地平坦开阔,实验当天的天气状况良好,实验中 SHS

对地观测,其测量方式类似于航天遥感方式,所不同的是实验环境不及卫星平台环境恶劣、实验中太阳光只受大气单程的吸收而非卫星入瞳处的双程吸收。

表 2 SHS 仪器参数

Table 2 SHS instrument parameters

Spectral resolution /cm ⁻¹	Spectral range /cm ⁻¹	SNR
0.27	6325~6360	300

4.1 实验数据及分析

图 3 为 SHS 测量的原始干涉图,干涉图经过扣

除暗电流、探测器非均匀校正、去除直流分量、相位校正及充零等操作后得到复原光谱,再经室内辐射定标和波长定标后还原出 1.58 μm 波段 CO₂ 的吸收光谱,其中一条实测光谱与其模拟谱如图 4 所示。



图 3 原始干涉图

Fig. 3 SHS interferogram

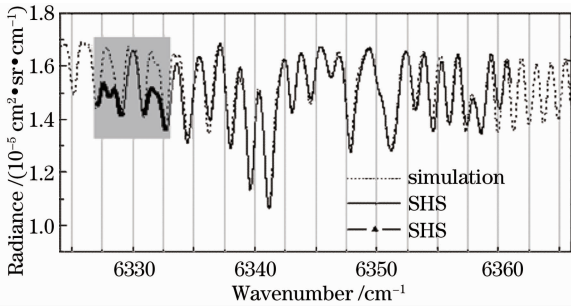


图 4 SHS 实测谱与模拟谱的比较

Fig. 4 Comparison of experiment spectrum and simulated spectrum of SHS

图 4 中实线对应 SHS 实测谱,虚线对应模拟谱。光谱中吸收峰形状与吸收峰深浅反应了大气中 CO₂ 对该波段内太阳光谱的吸收情况,包含了大气中 CO₂ 体积分数的信息。SHS 的实测光谱不仅有明显的 CO₂ 吸收峰特征,且吸收峰深度与模拟特征基本吻合,说明 SHS 仪器能够准确还原 CO₂ 的吸收光谱,具备探测 CO₂ 体积分数的能力。

SHS 的实测谱与模拟谱存在两方面差异。1) 实测谱与模拟谱之间吸收峰深浅不完全一致,可能是在进行模拟计算时输入的 CO₂ 体积分数与实际体积分数存在偏差,也可能是实测谱中存在仪器

噪声的影响。这种仪器噪声的影响和先验值的不确定性正是需反演算法予以克服和纠正的问题。2) 在 6328 cm⁻¹ 和 6333 cm⁻¹ 处(图 4 阴影框内)实测谱的两个吸收峰较模拟谱要低。研究表明,这是由于模拟软件所用的太阳光谱在这两个波段上缺少了应有的太阳夫琅禾费线,造成模拟光谱失真。对比 GOSAT 的观测结果(见图 5)也存在类似现象,这也说明了 SHS 探测大气吸收光谱精细结构的能力和准确性。

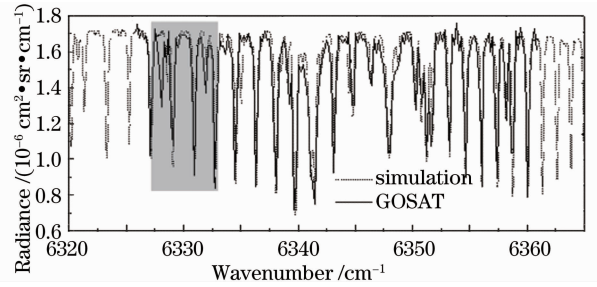


图 5 GOSAT 光谱与模拟谱:GOSAT 光谱在阴影位置受太阳夫琅禾费线影响与模拟谱存在偏差

Fig. 5 GOSAT spectrum and simulated spectrum: GOSAT spectrum in the shaded part is different for simulation due to the influence of Fraunhofer line

4.2 CO₂ 反演结果

采用优化估计法(OEM)^[18]从吸收峰深度中提取 CO₂ 体积分数信息。反演过程中,大气数据来自于 2.5°×2.5°的美国国家环境预报中心(NCEP)6 h 再分析资料,气溶胶数据来自于 CE318 的同步测量。根据优化估计方法,大气 CO₂ 信息的反演迭代公式表示为

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_a + (\mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_e^{-1} \mathbf{K}_i + \mathbf{S}_a^{-1})^{-1} \times \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_e^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x}_i) - \mathbf{K}_i (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_a)], \quad (5)$$

式中 \mathbf{x} 为状态向量即 CO₂ 体积分数构成的向量, \mathbf{x}_a 为 \mathbf{x} 的先验信息构成的向量, \mathbf{y} 为 SHS 仪器实测辐射亮度谱构成的向量, $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ 为前向模型,描述特定大气状态下的辐射传输过程,本文采用逐线积分辐射传输模型(LBLRTM)作为前向模型; \mathbf{K} 为权重函数向量, \mathbf{S}_e 表示测量误差协方差矩阵, \mathbf{S}_a 为先验误差协方差矩阵,为简化反演问题, \mathbf{S}_e 和 \mathbf{S}_a 均取对角阵。

表 3 SHS 探测 CO₂ 结果与 GOSAT-L2 数据对比

Table 3 Comparison of detection results of CO₂ by SHS and GOSAT-L2 productions

	Date (Month-day)	Longitude and latitude	Retrieval result /10 ⁻⁶	Uncertainty /10 ⁻⁶
GOSAT-L2 data	05-11~08-30	115°E~120°E 30°N~34°N	390.6~402.0	2.2
SHS data	07-11	117.26°E 31.9°N	398.4	2.0

结合辅助数据和反演算法得到的反演结果如表3所示。为了更好地验证反演结果的可靠性,将反演结果与GOSAT的L2卫星数据进行对比。由于GOSAT并没有对合肥进行直接观测的数据,所以表中采用合肥临近地区GOSAT的CO₂二级产品。

合肥地区夏季的GOSAT-L2数据显示CO₂体积分数在(390.6~402)×10⁻⁶之间,用SHS探测到7月11日当天合肥当地的平均CO₂体积分数为398.7×10⁻⁶,探测结果符合CO₂体积分数在该地区的时间及地域波动,结果合理,且不确定度较小。SHS初步探测CO₂体积分数的实验结果及分析说明样机的光学系统设计合理,能够反映了波段范围内气体吸收光谱的精细结构,对CO₂变化敏感,体现SHS的高分辨率特点,工作可靠,具有高精度大气CO₂的遥感探测的潜力。

5 结 论

对CO₂探测需求进行了仿真模拟和分析,就SHS原理探讨了其应用于高精度反演CO₂的优越性。表明SHS具有超光谱分辨率、光能量大、无运动部件、任意波段选择等优点,在卫星温室气体探测上具有很大的潜力。通过SHS原理样机进行的CO₂探测实验,证明了SHS探测的光谱能够较好地体现CO₂吸收光谱随大气CO₂体积分数的变化,且信噪比满足CO₂反演的要求;将该实验的CO₂反演结果与GOSAT数据进行了比较,结果表明SHS具有高精度探测CO₂的能力,及具有应用于卫星大气CO₂探测的重要潜力。

参 考 文 献

- 1 D Crisp, H Bösch, L Brown, *et al.*. OCO (Orbiting Carbon Observatory)-2 level 2 full physics retrieval algorithm theoretical basis [J/OL]. Internet: http://disc.Sci.Gsfc.Nasa.gov/acdisc/documentation/OCO-2_L2_FP_ATBD_v1_rev4_Nov10.PDF, 2010.
- 2 S Hiroshi, A Kuze, M Nakajima, *et al.*. Airborne SWIR FTS for GOSAT validation and calibration [C]: SPIE, 2008, 7106: 71060M.
- 3 J M Harlander, F L Roesler, J G Cardon, *et al.*. Shimmer: a spatial heterodyne spectrometer for remote sensing of earth/middle atmosphere [J]. *Appl Opt*, 2002, 41(7): 1343-1352.
- 4 Feng Yutao, Bai Qinglan, Wang Yongmei, *et al.*. Theory and method for designing field-widened prism of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1030001.
冯玉涛, 白清兰, 王咏梅, 等. 空间外差光谱仪视场展宽棱镜设计理论与方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1030001.
- 5 Shi Hailiang, Fang Yonghua, Wu Jun, *et al.*. Study on spectral

- calibration of a novel interferometric spectrometer with super-resolution capability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0528002.
- 施海亮, 方勇华, 吴 军, 等. 新型超分辨干涉型光谱仪光谱定标研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0528002.
- 6 Ye Song, Xiong Wei, Wang Xinqiang, *et al.*. Correction of spatial heterodyne interferogram based on frequency domain analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0530001.
叶 松, 熊 伟, 王新强, 等. 基于频域分析的空间外差干涉图校正方法研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0530001.
 - 7 Shi Hailiang, Xiong Wei, Li Zhiwei, *et al.*. Phase error correction of spatial heterodyne spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0330003.
施海亮, 熊 伟, 李志伟, 等. 空间外差光谱仪相位误差修正[J]. *光学学报*, 2013, (3): 0330003.
 - 8 Wu Jun, Wang Xianhua, Fang Yonghua, *et al.*. Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO₂ detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0101001.
吴 军, 王先华, 方勇华, 等. 空间外差光谱技术应用于大气二氧化碳探测的能力分析[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0101001.
 - 9 Mao Jianping, K S Randolph. Sensitivity studies for space-based measurement of atmospheric total column carbon dioxide by reflected sunlight [J]. *Appl Opt*, 2004, 43(4): 914-927.
 - 10 Zhou Mandi. Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂) Retrieval and Sensitivity Studies from Satellite Observations [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
周曼蒂. 对流层CO₂浓度卫星遥感反演及误差分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
 - 11 Wu Jun. Research on Radiative Transfer Characteristics and Retrieval Methods for Atmospheric CO₂ Monitoring [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.
吴 军. 大气CO₂辐射传输特性与反演方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
 - 12 T Dohi, T Suzuki. Attainment of high resolution holographic Fourier transform spectroscopy [J]. *Appl Opt*, 1971, 10(5): 1137-1140.
 - 13 J M Harlander. Spatial Heterodyne Spectroscopy: Interferometric Performance at Any Wavelength without Scanning [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 1991. 141-147.
 - 14 F L Roesler, J M Harlander. Spatial heterodyne spectroscopy: interferometric performance at any wavelength without scanning [C]. SPIE, 1990, 1318: 234-243.
 - 15 D Crisp, P L Decola, C E Miller. NASA orbiting carbon observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2(1): 23508-23508.
 - 16 Zheng Yuquan. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561.
郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[J]. *中国光学*, 2011, (6): 546-561.
 - 17 H Takashi, K Yutaka, A Kuze, *et al.*. Fourier transform spectrometer for greenhouse gases observing satellite (GOSAT) [C]. SPIE, 2005, 5659: 73-80.
 - 18 Y Yoshida, N Eguchi, Y Ota, *et al.*. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for CO₂ and CH₄ column amounts retrieval from GOSAT TANSO-FTS SWIR [J]. Nies, Gosat Project Document (NIES-GOSAT-PO-014) Version, 2010, 1: 1-77.