

温室气体星载被动遥感探测载荷研究进展

汪钱盛^{1,2,3}, 罗海燕^{1,2,3}, 李志伟^{1,3}, 施海亮^{1,2,3}, 丁毅^{1,2,3}, 熊伟^{1,2,3}

1. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 研究生院科学岛分院, 合肥 230026;

3. 中国科学院 通用光学定标与表征技术重点实验室, 合肥 230031

摘要: 应对CO₂和CH₄等温室气体含量增加导致的全球气候变暖问题, 促进碳减排已成为全球共识。建立完善的碳监测体系, 利用星载平台进行被动遥感探测是当前温室气体观测的主要手段之一。本文以在轨成功应用的星载被动遥感探测载荷3种技术体制为基线, 介绍了有效载荷的仪器指标, 分析比较了各种技术的优缺点, 结合未来温室气体探测计划, 总结了温室气体星载被动遥感探测的发展趋势。将高分五号卫星大气主要温室气体监测仪在轨表现与新型干涉成像光谱技术相结合, 分析其在高光谱分辨、高信噪比基础上进一步实现高空间分辨率的可行性, 为研制具有实时动态、不同细分程度区域的碳监测能力的下一代温室气体载荷提供可能。

关键词: 温室气体, 被动遥感, 碳监测, 卫星载荷, 干涉成像光谱技术

中图分类号: P2

引用格式: 汪钱盛, 罗海燕, 李志伟, 施海亮, 丁毅, 熊伟. 2023. 温室气体星载被动遥感探测载荷研究进展. 遥感学报, 27(4): 857-870

Wang Q S, Luo H Y, Li Z W, Shi H L, Ding Y and Xiong W. 2023. Research progress of spaceborne passive remote sensing detection payload of greenhouse gases. National Remote Sensing Bulletin, 27(4): 857-870 [DOI: 10.11834/jrs.20211149]

1 引言

工业革命以来, 由于人类活动增加, 特别是煤炭、石油、天然气等化石燃料大量使用, 改变了由大气、海洋和生物圈构成的自然平衡态, 导致温室气体(GHG)浓度不断上升(Bruhwiller等, 2021)。世界气象组织WMO(2020)发布的《温室气体公告》显示, CO₂和CH₄作为大气主要温室气体, 对温室效应的贡献率高达82%。从1750年到2019年, 全球CO₂的平均含量已从280 ppm上升至410.5 ppm, 接近工业化前的1.5倍, CH₄的全球平均含量上升到工业化前的2.6倍。截止到2018年, 全球近地面平均升温高于工业化前水平约1.0 °C (IPCC, 2018), 中国平均气温较1901年升温1.24 °C (中国气象局气候变化中心, 2019)。尤其是最近70年, 受工业化影响, 中国气温上升明显, 平均每十年约升温0.24°, 接近全球的两倍。温室气

体增加导致全球气候变暖、极端天气增多, 对人类社会的生存和生活方式产生显著影响(Gautam等, 2021)。

全球温室气体浓度探测, 尤其针对与人类活动密切相关的低层大气区域的高时效、高精度浓度探测, 成为研究热点(Liang等, 2017)。温室气体探测手段主要有地基观测和星载观测。温室气体地基观测站点始于20世纪50年代后期, 对大气CO₂进行了长期系统的精确测量。目前, 世界气象组织WMO已在全球建立31个全球大气本底站和400多个区域本底站, 其中中国设有1个大气本底站(青海瓦里关)和6个区域本底站(北京上甸子、浙江临安、黑龙江龙凤山、新疆阿克达拉、云南香格里拉和湖北金沙)(中国气象局气候变化中心, 2018)。

地基观测具有探测精度高、可靠性强等特点, 但受有限站点, 缺乏全球大尺度观测能力(Bréon

收稿日期: 2021-04-06; 预印本: 2021-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号:61975212, 41975033)

第一作者简介: 汪钱盛, 研究方向为温室气体探测技术和空间外差光谱技术。E-mail: wqs977@mail.ustc.edu.cn

通信作者简介: 罗海燕, 研究方向为超高光谱遥感探测技术。E-mail: luohaiyan@aiofm.ac.cn

和 Ciaïis, 2010)。星载观测手段具有空间上大尺度、观测时间连续的特点, 同时还可以对南北极、海洋、沙漠等人类难以到达的区域进行观测。因此, 发展星载遥感探测是温室气体全球变化研究的重要手段 (Palmer, 2008)。

温室气体星载遥感探测可分为主动式探测和被动式探测。2022年4月16日, 中国在太原卫星发射中心, 将全球首颗搭载二氧化碳主动激光雷达探测的大气环境综合监测卫星——“大气一号”的发射升空, 以期实现对大气二氧化碳的全天时、高精度探测 (Zhang 等, 2020)。欧州航天局的 A-SCOPE、NASA 的 ASCENDS 等温室气体主动式星载遥感探测均在计划中。温室气体星载被动遥感探测载荷可追溯到1996年, 日本发射了全球第一台综合性、超光谱分辨光谱仪 IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases) (Kobayashi 等, 1998; Tsuno 等, 1991)。遗憾的是, IMG 只工作了8个月, 1997年6月因电板故障, 停止运行。随后十多年, 为了满足全球温室气体的观测需求, 科研人员从气象卫星、环境监测卫星、科学实验卫星的综合性载荷中提取了温室气体的相关光谱特征, 并成功反演出温室气体浓度。2009年, 日本成功发射全球第一颗温室气体观测卫星 GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite), 温室气体观测迈入新阶段, 专业化载荷使温室气体探测性能显著提升。随着载荷技术的发展, 温室气体观测载荷趋于微型化, 尤其中小型国家和重点地区选用低成本、微型探测载荷满足所在区域的温室气体观测需求, 例如阿联酋在2020年9月发射一颗用于温室气体监测的3U立方体卫星 MeznSat (Issa 等, 2020), 法国计划将在2023年底发射一颗微卫星任务旨在监测和表征 CO₂ 表面通量 (<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/m/microcarb/>[2021-03-20])。

目前, 在轨成功应用的温室气体星载被动遥感探测载荷中, 主要的3种技术体制包含有迈克尔逊干涉光谱技术、光栅光谱技术和空间外差干涉光谱技术。本文将重点针对这3种典型技术体制的温室气体星载被动遥感载荷进行分析, 对比不同探测技术的优缺点; 同时介绍用于温室气体探测的综合性卫星载荷以及温室气体星载被动遥感探测计划。针对下一代温室气体星载遥感探测需求, 结合高分五号 (GF-5) 大气主要温室气体监测仪

GMI (Greenhouse gases Monitoring Instrument) 在轨表现和新型空间外差干涉成像光谱技术研究进展, 分析其在高光谱分辨、高信噪比基础上进一步实现高空间分辨率的可行性, 提出具有高时效性、不同细分程度区域碳监测能力的载荷技术方案。

2 星载被动遥感探测载荷进展

温室气体星载被动遥感探测的原理是基于大气分子吸收。太阳辐射穿过大气, 到达地面后被散射回太空到达星上载荷 (或太阳辐射穿过大气直接到达星上载荷), 在这一传输过程中, 特定波段的太阳辐射被温室气体分子吸收, 导致星上载荷接收的太阳反射、散射等辐射量在特定波段范围发生变化; 进而根据星上载荷探测的光谱信息和相应的反演算法, 定量获取温室气体浓度信息 (Chesnokova 等, 2015)。

温室气体星载被动遥感探测首先面临的问题是探测波段的选择。早期遥感探测 CO₂ 浓度主要依赖于热红外波段, 该波段对中层 CO₂ 浓度敏感, 但对底层气体浓度探测时不确定性大 (Bréon 和 Ciaïis, 2010), 可从一些配置此波段的综合性遥感载荷数据中反演出温室气体浓度信息, 满足早期温室气体探测需求。目前, 新一代在轨温室气体探测星载被动遥感载荷都选择近红外波段来实现对低层大气 (对流层、边界层) 温室气体浓度探测 (Yoshida 等, 2011), 所选取的近红外波段有 (Butz 等, 2011; Bril 等, 2017): 1.56 μm 的 CO₂ 弱吸收波段和 1.64 μm CH₄ 吸收波段分别对 CO₂ 和 CH₄ 浓度变化敏感且干扰气体少, 用于反演 CO₂ 和 CH₄; 2.06 μm CO₂ 强吸收波段, 该波段对 CO₂ 浓度依赖弱, 但对云和气溶胶敏感, 可用于校正云和气溶胶散射特征对 CO₂ 浓度的影响; 0.75 μm 的 O₂-A 吸收带, 用于校正和约束地表压力, 同时可进行云污染判别, 或与 CO₂ 强吸收波段结合约束地表辐射率和气溶胶廓线等信息。

2.1 早期温室气体综合观测载荷

早期温室气体综合观测载荷主要有 IMG、SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter for Atmospheric CHartographY)、AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)、ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer)、IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、

CrIS (Cross-track Infrared Sounder) 等。其中, IMG、ACE-FTS、IASI 和 CrIS 属于干涉型载荷, SCIAMACHY 和 AIRS 为光栅型载荷。

IMG 旨在观察地球表面和大气的红外辐射的精细光谱, 反演全球范围内的温室气体 (CO_2 , CH_4 , N_2O , H_2O 和 O_3 等) 含量; CO_2 和 CH_4 的探测精度分别是 2% 和 10% (Shimoda 和 Ogawa, 1997)。ACE-FTS 是加拿大微型科学实验卫星 SCISAT-1 (Science Satellite-1) 上的有效载荷, 主要探测目标为大气中 O_3 含量, 并了解控制 O_3 在对流层上部和平流层分布的化学和动力学过程 (Châteauneuf 等, 2006; Boone 和 Bernath, 2003)。ACE-FTS 干涉模块对光路进行折叠, 光谱分辨率可达 0.02 cm^{-1} ; 其 CO_2 探测精度约为 2 ppm (0.5%) (Foucher 等, 2011), CH_4 探测精度为 10% (Olsen 等, 2017)。

AIRS (Aumann 等, 2003)、IASI (Blumstein 等, 2004)、CrIS (Stumpf 等, 2002) 分别是美国 Aqua 卫星、欧洲 MetOp 系列卫星、美国 SuomiNPP 及 JPSS (Joint Polar Satellite System) 系列卫星的有效

载荷, 其主要任务是观测大气温湿度, 服务于天气预报。AIRS 的 CO_2 探测精度达到 2 ppm (约为 0.5%), 但水平分辨率仅为 100 km (Morse 等, 1999); IASI (Simeoni 等, 2004)、CrIS ([https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/CrIS.php/\[2021-03-20\]](https://www.star.nesdis.noaa.gov/jpss/CrIS.php/[2021-03-20])) 的 CO_2 探测精度分别为 10% 和 2%。

SCIAMACHY (Bovensmann 等, 1999) 是欧洲环境监测卫星 ENVISAT 上所搭载的十大载荷之一, 用于提升对全球大气变化以及对大气化学和物理的相关问题的认识。SCIAMACHY 采用天底、临边以及掩星 3 种观测模式进行观测, CO_2 和 CH_4 的反演精度分别为 2%—3% 和 5%—10% (Noël 等, 2016; Mager 等, 1997)。

用于探测温室气体的综合性载荷的性能指标如表 1 所示, 除 SCIAMACHY 工作在紫外到近红外波段 (240—2380 nm), 其他综合性载荷均工作在热红外波段, 通过观测 $4.2 \mu\text{m}$ 或 $15 \mu\text{m}$ 处的 CO_2 强吸收光谱来探测对流层中的 CO_2 浓度。

表 1 温室气体综合观测载荷关键性能指标

Table 1 Main performance indicators of comprehensive GHG observation payloads

载荷卫星平台	在轨状态	探测波段/ μm	光谱分辨率/ cm^{-1}	空间分辨率/km	探测精度	观测模式	运行轨道高度
IMG ADEOS	1996-08—1997-06	3.3—4.3 4.3—5.0 5.0—16.7	0.1	H. 8×8	CO_2 2% CH_4 10%	天底	SSO 800 km
SCIAMACHY ENVISAT	2002-03—2012-04	0.24—1.75 1.94—2.04 2.265—2.38	4.2	H. 30×60 V. 2.6	CO_2 3% CH_4 10%	天底 临边 掩星	SSO 800 km
AIRS Aqua	2002-05 至今	3.74—4.61 6.20—8.22 8.8—15.4	0.5—2.2	H. 100	CO_2 0.5% —	天底	SSO 705 km
ACE-FTS SCISAT-1	2003-08 至今	2.2—13.3	0.02	H. 3—4 V. 300	CO_2 0.5% CH_4 10%	掩日 掩星	LEO/74° 650 km
IASI MetOp Series	2006-10 至今	3.62—5 5—8.26 8.26—15.5	1.5 0.5 0.35	H. 12	CO_2 10% CH_4 10%	天底	SSO 840 km
CrIS SuomiNPP JPSS Series	2011-10 至今	3.92—4.64 5.71—8.26 9.14—15.38	0.625	H. 14	CO_2 2% —	天底	SSO 824 km

表 1 中, 空间分辨率中“H.”表示水平方向的空间分辨率, “V.”表示垂直方向的空间分辨率; 运行轨道中“SSO”表示太阳同步轨道, “LEO”表示近地轨道。

2.2 专用温室气体观测载荷

2.2.1 基于迈克尔逊干涉技术的有效载荷

基于迈克尔逊干涉光谱技术的专用温室气

体观测载荷有日本宇航局 2009 年发射的 GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) 卫星上的载荷 GOSAT-FTS、2019 年发射的 GOSAT-2 卫星上的载荷 GOSAT2-FTS 以及中国 2017 年发射的风云 3D 极轨气象卫星 (FY-3D) 上的有效载荷近红外高光谱温室气体监测仪 GAS (Greenhouse-gases Absorption Spectrometer)。

GOSAT 的目标是分别以 4 ppm (约为 1%) 和

34 ppb (约为2%)的精度探测CO₂和CH₄的柱浓度(Nakajima等, 2017)。GOSAT上有两个有效载荷, TANSO-CAI是用于观测并校正云和气溶胶的成像仪; TANSO-FTS是用于观测CO₂和CH₄的双摆式干涉仪, 旋转摆臂产生最大±2.5 cm的光程差, 其光学系统结构如图1所示。TANSO-FTS的工作波段

覆盖近红外和热红外波段, 共有4个光谱通道; 其中近红外波段用于探测地表反射及低层大气的温室气体浓度, 且每个光谱通道均可测量两个正交偏振方向上的信息, 热红外波段用于测量大气发射的热红外辐射。

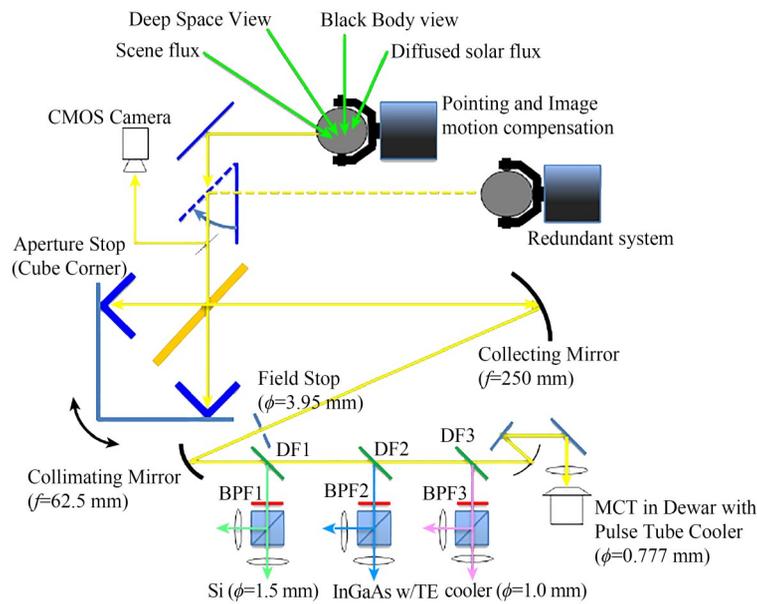


图1 TANSO-FTS光学系统结构图

Fig. 1 Schematic of TANSO-FTS optical system

GOSAT-2为GOSAT的后继任务, 旨在获取更高精度的温室气体观测数据, CO₂观测精度达到0.5 ppm (优于0.125%), CH₄达到5 ppb (优于0.3%), 是目前最高的大气主要温室气体探测精度。GOSAT-2的沿轨视场角由GOSAT的±20°增加到±40°, 增加了海洋耀斑观测模式的数据量; 其干涉仪孔径由GOSAT的68 mm增加至77 mm, 以提高探测灵敏度; GOSAT-2第3个通道由GOSAT的1.92—2.08 μm扩展到1.92—2.33 μm, 通过增加对CO的观测来监测气候变化和人类活动对碳循环的影响; 同时根据GOSAT数据的使用情况, GOSAT-2优化了其他通道和“智能指向”等功能。

GAS用于对全球大气中的CO₂、CH₄和CO进行高精度探测(<http://www.nsmc.org.cn/nsmc/en/instrument/GAS.html>[2021-03-20]), 其结构与GOSAT双摆式结构设计相同。GAS的角镜口径是GOSAT-FTS的1.5倍, 为国际上角镜口径最大的双摆式干涉仪(韩美玲和李碧岑, 2017)。GAS在近红外波段的光谱分辨率为0.27 cm⁻¹, 其CO₂探测精度与GOSAT-FTS相当, 处于国际先进水平。

基于迈克尔逊干涉技术的探测载荷关键指标如表2所示, 其中GOSAT和GOSAT-2还具备目标观测模式, 用于重点跟踪地面特殊目标, 如地面定标站点、大气主要温室气体排放区等。

2.2.2 基于光栅光谱技术的有效载荷

基于光栅光谱技术的温室气体遥感卫星载荷主要有美国的OCO-2 (Orbiting Carbon Observatory-2)和OCO-3、中国碳卫星(TanSan)上的高光谱CO₂探测仪(ACGS)。相比传统迈克尔逊干涉技术, 基于光栅光谱技术的有效载荷具有结构简单、无运动部件、光谱信号直观、数据处理简便等优点; 此外, 载荷的高空间分辨率可极大地降低受云污染影响的概率。

2009年2月美国发射第一颗大气CO₂观测卫星OCO, 但因整流罩故障, 发射失败。时隔5年, 2014年7月, 美国成功发射了OCO-2卫星, 并于同年8月加入A-Train (<https://atrain.nasa.gov/publications/OCO4-pager.pdf>[2021-03-20]), 利用其他卫星载荷同步获取的云与气溶胶信息以此提升温室气体

反演精度，其CO₂探测精度可达1—2 ppm（约0.3%—0.5%）（Eldering等，2012）。OCO-2有3个不同的光谱通道（0.76 μm的O₂吸收带、1.6 μm的CO₂弱吸收波段和2.0 μm的CO₂强吸收波段），3个通道采用同样的结构并固定成为一个整体，可有

效提高系统的刚性和热稳定性，结构如图2所示（Crisp等，2017）。OCO-2具有1.29×2.25 km²的超空间分辨率，相比上述基于干涉技术的有效载荷，可获取更多有效的晴空数据；其观测模式与GOSAT相同，具有天底、耀斑和目标模式。

表2 基于迈克尔逊干涉光谱技术的温室气体载荷关键性能指标

Table 2 Main performance indicators of GHG payloads based on Michelson interference spectroscopy

载荷卫星平台	在轨状态	探测波段/μm	光谱分辨率/cm ⁻¹	空间分辨率/km	探测精度	观测模式	运行轨道高度
GOSAT-FTS GOSAT	2009-01 至今	0.75—0.78	0.60	10.5	CO ₂ 1% CH ₄ 2%	天底 闪耀 目标	SSO 666 km
		1.56—1.72	0.27				
		1.92—2.08	0.27				
		5.5—14.3	0.27				
GOSAT2-FTS GOSAT-2	2018-10 至今	0.75—0.77	0.60	9.7	CO ₂ 0.125% CH ₄ 0.3%	天底 闪耀 目标	SSO 613 km
		1.56—1.69	0.27				
		1.92—2.33	0.27				
		5.5—8.4	0.27				
GAS FY-3D	2017-11 至今	0.75—0.77	0.60	10	CO ₂ 1% —	天底 闪耀	SSO 836 km
		1.56—1.72	0.27				
		1.92—2.08	0.27				
		2.20—2.38	0.27				

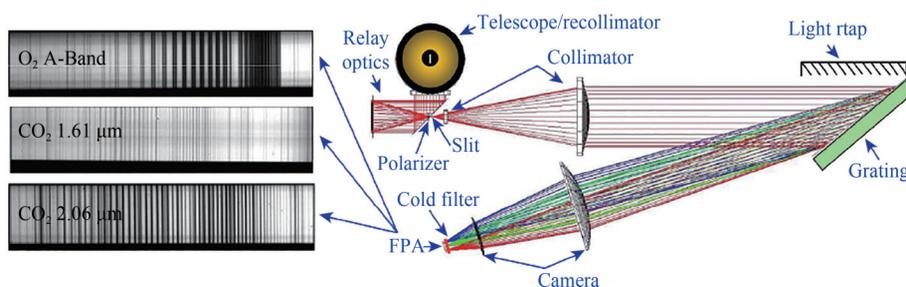


图2 OCO光学系统结构图

Fig. 2 Schematic of OCO optical system

2019年5月，美国航天局发射的碳观测载荷OCO-3，附着于ISS国际空间站之外，与OCO-2协同观测以提升全球温室气体观测水平，OCO-3的CO₂探测精度为0.3%（Basilio等，2019）；同时还将进一步扩充碳监测卫星网络的叶绿素荧光SIF（太阳诱导荧光）监控能力，从而监控植物碳吸收水平。OCO-3载荷进行了2个重大设计变更：增加了灵活的2轴指向机制和极化机制，从而能够实施更灵活的新型观测模式，即快照模式（Eldering等，2019）。快照模式类似于目标模式，但采用了二维扫描，即从一侧到另一侧和来回扫描。通过这种观测模式，当“国际空间站”直接飞过区域中心时，可覆盖范围约100×100 km²，空间分辨率为

1.6×2.2 km²。快照模式有助于从天基观测确定排放量，绘制空间中CO₂的局部差异。

2016年12月，中国首颗全球二氧化碳监测科学实验卫星（TanSat）成功发射，成为世界上第三个拥有专用CO₂监测卫星的国家（杨忠东等，2016）。TanSat搭载了高光谱与高空间分辨率CO₂探测仪ACGS（Atmospheric Carbon-dioxide Grating Spectroradiometer）和多波段云与气溶胶探测仪CAPI（Cloud Aerosol Polarization Imager）两台载荷，旨在获取全球尤其是中国及其他重点地区大气CO₂浓度分布。CAPI与GOSAT卫星上的TANSO-CAI作用相同，用于同步获取云与气溶胶信息，以此提升温室气体反演精度。ACGS与OCO-2的技术

体制、光谱通道波段和光谱分辨率，以及观测模式均一致；其空间分辨率约为 $2 \times 2 \text{ km}^2$ ， CO_2 探测

精度达到 $1\text{--}4 \text{ ppm}$ （约 $0.3\%\text{--}1\%$ ）。基于光栅光谱技术的温室气体探测载荷关键指标如表 3 所示。

表 3 基于光栅光谱技术的温室气体载荷关键性能指标

Table 3 Main performance indicators of GHG payloads based on grating spectroscopy

载荷卫星平台	在轨状态	探测波段/ μm	光谱分辨率/ nm	空间分辨率/ km	CO_2 探测精度	观测模式	运行轨道高度
OCO-2	2014-07 至今	0.7576—0.7726	≈ 0.043	1.29 \times 2.25	0.3%—0.5%	天底	SSO 705 km
		1.5906—1.6218	≈ 0.083			闪耀	
		2.0431—2.0834	≈ 0.104			目标	
OCO-3 国际空间站	2019-05 至今	0.758—0.772	≈ 0.044	1.6 \times 2.2	0.3%	天底	LEO (51.6°) $\approx 400 \text{ km}$
		1.594—1.619	≈ 0.084			闪耀	
		2.045—2.081	≈ 0.108			目标 快照	
ACGS TanSat	2016-12 至今	0.758—0.775	0.044	2.0 \times 2.0	0.3%—1%	天底	SSO 712 km
		1.594—1.624	0.125			闪耀	
		2.042—2.082	0.165			目标	

2.2.3 基于空间外差干涉技术大气主要温室气体监测仪

2018 年 5 月和 2021 年 9 月中国成功发射高分五号 (01) 星和高分五号 (02) 星 (陈良富等, 2021; 程良晓等, 2021; 王雅鹏等, 2021), 搭载的大气主要温室气体监测仪 (GMI) 由中国科学院安徽光学精密机械研究所研制。GMI 首次将空间外差干涉光谱技术应用于星载温室气体的吸收光谱定量遥感监测中, 用于获取 CO_2 、 CH_4 等大气成分浓度的全球分布, 探测精度分别为 1% 和 2% (熊伟, 2019a)。

GMI 基于空间外差干涉技术, 用两个闪耀光栅替代 Michelson 干涉仪中的反射镜, 光栅相对于

光轴倾斜布置, 如图 3 (a) 图所示。入射光经分束器分成两束等光强消偏光, 入射至两臂的光栅; 经光栅衍射后, 形成相对基频波前一定夹角的出射波前, 且在色散方向上的不同位置处其光程差不同, 产生干涉条纹, 经过傅里叶变换可复原出入射光谱, 实现对目标的光谱探测 (熊伟, 2018)。由于该载荷结合了光栅衍射和空间干涉的特点, 具有相对基频波长外差干涉、高光谱分辨率的特点; 同时具有扩视场干涉仪的高通量、高信噪比、无活动部件等优点 (施海亮等, 2013)。GMI 共 4 个光谱探测通道, 波段选择和功能与 GOSAT 类似, 通道布局如图 3 (b) 图所示, 其主要性能指标列于表 4 中。

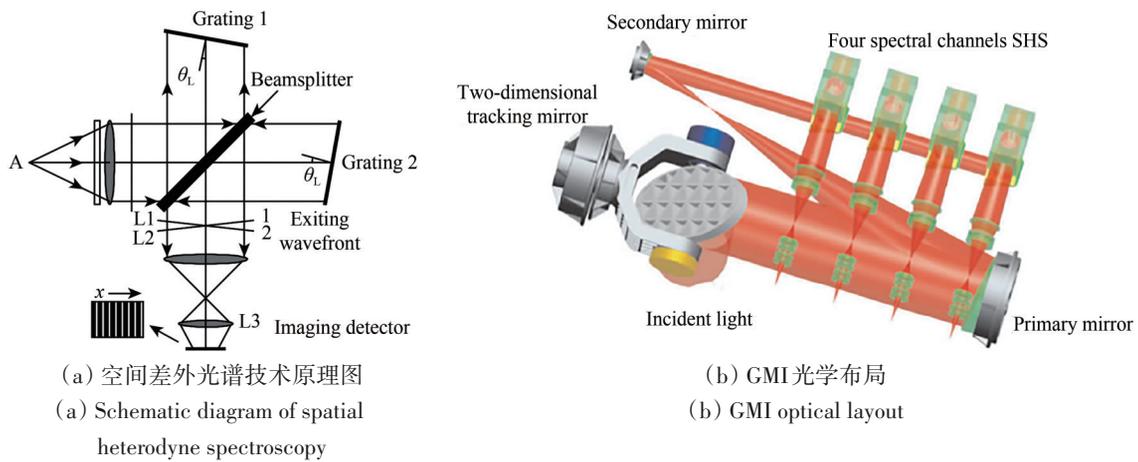


图 3 GMI 光学系统结构图
Fig. 3 Schematic of GMI optical system

表4 基于空间外差干涉技术的大气主要温室气体监测仪主要性能指标
Table 4 Main performance of GMI based on spatial heterodyne spectroscopy

载荷卫星	在轨状态	探测波段/ μm	光谱分辨率/ cm^{-1}	空间分辨率/ km	探测精度	观测模式	运行轨道高度
GMI GF-5	2018-05 至今	0.759—0.769	0.6	10.3	CO_2 1% CH_4 2%	天底 闪耀 目标	SSO 705 km
		1.568—1.583	0.27				
		1.642—1.658	0.27				
		2.043—2.058	0.27				

2.3 温室气体星载被动遥感探测计划

目前公开的温室气体遥感探测计划主要有美国的GeoCarb (Geostationary Carbon Observatory)和欧洲的哥白尼二氧化碳监测任务 (Copernicus CO_2 Monitoring Mission)。GeoCarb将会是全球第一颗在地球静止轨道 (GEO) 上观测温室气体的载荷, 填补现有载荷时间和空间上的不足。哥白尼二氧化碳监测任务是欧洲首个 CO_2 星载探测任务, 将会组成一个全球温室气体观测网络, 目标探测精度是已知的载荷或观测计划中最高的。

2.3.1 GeoCarb

目前在轨的温室气体观测载荷均位于地球近地轨道上, 能提供全球覆盖, 但它们的重访时

间长 (3—51 d), 数据覆盖缺口范围较大, 可能会错过气候变化、碳交换的关键信息。GeoCarb将是全球第一颗在地球静止轨道进行温室气体观测的卫星, 以前所未有的详细探测方式观测大气中 CO_2 、 CH_4 和 CO 的源和汇以及交换过程, 探测精度分别为 0.7% (≈ 2.7 ppm)、1% (≈ 18 ppb) 和 10% (≈ 10 ppb) (Polonsky 等, 2014), 还可以探测 SIF 的浓度信息, 将在未来几年内发射。

GeoCarb由两个光栅光谱仪组成, 每个光谱仪有两个通道, 分别是 $0.76 \mu\text{m}$ 的 O_2 吸收通道、 $1.6 \mu\text{m}$ 的 CO_2 弱吸收通道、 $2.0 \mu\text{m}$ 的 CO_2 强吸收通道, 以及 $2.3 \mu\text{m}$ 的 CH_4 吸收通道, 其光学系统结构如图4所示。GeoCarb的空间分辨率为 5—10 km, 空间视场为 4.4° 。

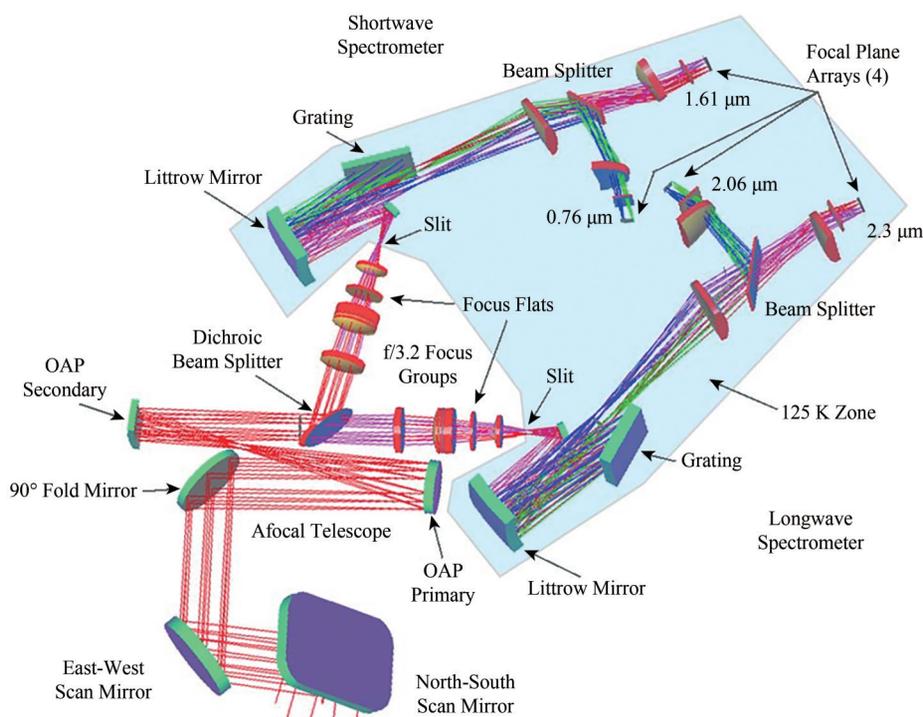


图4 GeoCarb光学系统结构图

Fig. 4 Schematic of GeoCarb optical system

2.3.2 哥白尼二氧化碳监测任务

哥白尼二氧化碳监测任务将组建一个星座，目标是提供CO₂全球观测，空间分辨率为4 km²，CO₂的柱浓度探测精度超过0.7 ppm (≈0.2%)；同时也可以探测CH₄，其探测精度约为10 ppb (≈0.8%) (https://esamultimedia.esa.int/docs/EarthObservation/CO2M_MRD_v2.0_Issued20190927.pdf/[2021-03-20])。相对于在轨载荷，哥白尼二氧化碳监测任务的星座计划将会提高空间和时间覆盖范围。哥

白尼二氧化碳监测任务将于2026年初投入使用，以便为2028年联合国气候变化会议上的盘点提供全年的CO₂观测数据。哥白尼二氧化碳监测任务的每颗卫星将携带一个推扫式成像光谱仪作为主要载荷，与GeoCarb相比，CO₂的波段选择相同，CH₄探测波段选择1.66 μm左右波段，共有3个探测通道。温室气体星载被动遥感探测计划主要性能指标列于表5。

表5 温室气体星载被动遥感探测计划主要性能指标

Table 5 Main performance indicators of GHG spaceborne passive remote sensing exploration program

项目	计划发射时间	载荷类型	探测波段/μm	光谱分辨率/nm	空间分辨率	探测目标	探测精度	观测模式 运行轨道
GeoCarb	2024年	光栅光谱仪	0.7579—0.7686	0.052	5—10 km	CO ₂ , CH ₄ SIF	CO ₂ 0.7% CH ₄ 1%	Nadir GEO
			1.600—1.6225	0.110				
			2.045—2.085	0.192				
			2.3006—2.3456	0.216				
哥白尼二氧化碳 监测任务	2026前	推扫式成像 光谱仪	0.747—0.773	0.12	4 km ²	CO ₂ , CH ₄ NO ₂ Aerosol	CO ₂ 0.2% CH ₄ 0.8%	NadirGlint SSO
			1.590—1.675	0.3				
			1.990—2.095	0.35				

3 新型高时空分辨温室气体探测载荷方案

随着温室气体猛增，对生命系统形成威胁，世界各国以全球协约的方式减排温室气体，未来温室气体监测领域的发展将进入一个高分辨率、不同轨道、多维立体等天地一体化联合观测的新时代。高分五号01星上的大气主要温室气体监测仪(GMI-I)是用于温室气体探测的专用载荷，入

轨初期顺利完成指向机构解锁及加热去污工作模式，于2018年5月28日开始观测并成功下传0级干涉数据，同时顺利完成在轨观测数据的处理工作，成功获取了I级数据产品。GMI具有高光通量、无动镜、可靠性高等特点，在轨运行期间观测数据稳定，各项指标均满足应用需求，与国际同类型载荷产品具有较高的一致性(熊伟, 2019b; Shi等, 2021)。如表6所示为大气主要温室气体监测仪的主要性能指标。

表6 大气主要温室气体监测仪主要性能指标

Table 6 Main performance indicators of GMI

参数	技术指标			
	O ₂	CO ₂	CH ₄	CO ₂
中心波长/μm	0.765	1.575	1.65	2.05
光谱范围/μm	0.759—0.769	1.568—1.583	1.642—1.658	2.043—2.058
信噪比	300	300	250	250
光谱分辨率/cm ⁻¹	0.6		0.27	
光谱定标/cm ⁻¹	0.1		0.05	
辐射定标	绝对精度: 5% 相对精度: 2%			
FOV	IFOV: 14.6 mrad (10.3 km@705 km)			

张兴赢等(2018)分析了影响温室气体反演精度的主要因素包含:(1) 遥感器的探测精度;(2) 温室气体反演算法精度;(3) 大气云散射和气溶胶等校正角度;(4) 比对站点基准数据的准

确性。通过被动遥感器的探测精度提升温室气体反演精度而言，在轨及计划中的温室气体探测精度约束指标主要体现在光谱分辨率、信噪比以及相应的定标精度等技术指标。因此，提升遥感器

的光谱分辨率、信噪比等技术指标，有望进一步提升温室气体反演精度。

依据 GMI-I 在轨运行期间的观测数据（施海亮等，2019），比对国际同类型载荷 GOSAT 在轨光谱分辨率数据表现，同时结合高分五号 02 星 GMI-II 地面测试数据（Luo 等，2023），分别如图 5、

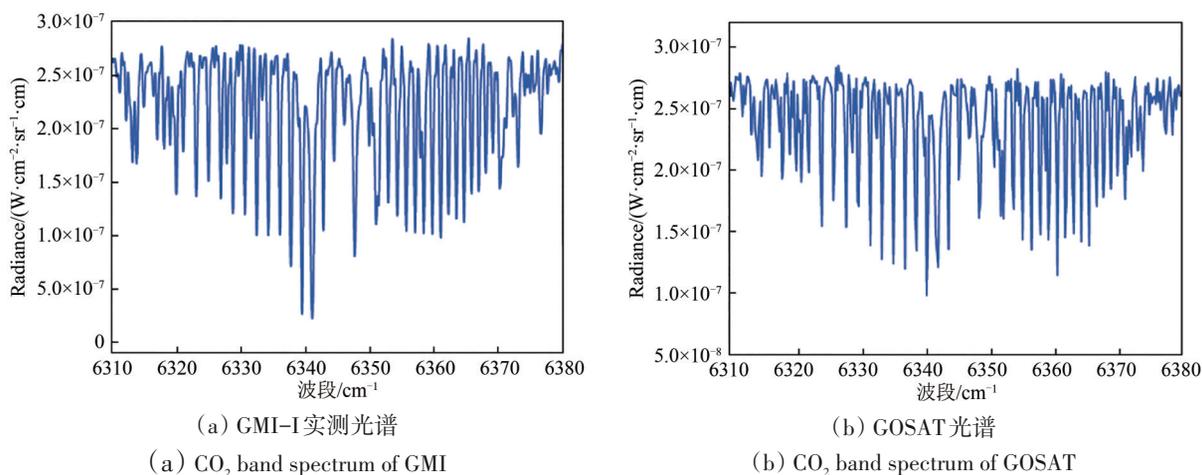


图5 GMI-I 实测光谱(左)与 GOSAT 光谱(右)比对

Fig. 5 Comparison CO₂ band spectrum of GMI (left) and GOSAT (right)

基于空间外差光谱技术的传统遥感器，测量得到的直接信号为空域干涉信号，以大气 CO₂ 探测为例，需要将干涉域信噪比进一步转化为光谱域信噪比。在可见和近红外波段可以认为光子噪声占主导，即干涉域零光程差点信噪比为

$$(S/N)_{x=0} = \sqrt{\frac{2}{N} \cdot \frac{P \cdot \eta}{hc\sigma}} \quad (1)$$

式中， P 为遥感载荷接收的功率， N 为光谱维采样点数， η 、 h 、 c 、 σ 分别为量子效率、普朗克常量、光速、工作波数。

遥感载荷接收的功率 P 可以按照如下公式计算：

$$P = A \cdot \Omega \cdot \tau \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{1}{\pi} T(\lambda) E(\lambda) \rho(\lambda) \times \cos(Z) d\lambda \quad (2)$$

式中， A 为载荷的望远系统（前置光学系统）的入瞳孔径， Ω 为立体角， τ 为光学系统光学透过率， $\rho(\lambda)$ 地表对波长 λ 辐射的反射率， $E(\lambda)$ 为太阳辐射到地球大气层外的波长 λ 的辐照度， $T(\lambda)$ 为大气的路径透过率， Z 为太阳天顶角。

根据空域与频域信噪比关系可知，频域内信噪比 $(S/N)_\sigma$ 为（罗海燕等，2017）：

$$(S/N)_\sigma = \sqrt{\frac{2}{N} \cdot \frac{B_e(\sigma)}{B_e}} \cdot (S/N)_{x=0} \quad (3)$$

图 6 所示。基于空间外差干涉光谱技术的卫星载荷，在光谱分辨率 0.263 cm^{-1} 与 GOSAT 指标 0.27 cm^{-1} 水平相当的条件，GMI-I/GMI-II 观测光谱范围内平均光谱信噪比均远优于 300 指标要求，即 GMI-I 为 825、GMI-II 为 1082。

式中， $B_e(\sigma)$ 是任意波数光谱强度， $\overline{B_e}$ 是有效波数范围内光谱强度平均值。实际干涉图受光谱仪光谱分辨率和视场角、准直系统输入波前质量、光学镜头调制传递函数、干涉组件面形精度等因素影响，干涉条纹调制度均会有一定程度的下降，且不同条纹频率对应的干涉调制度不同，该因子直接影响干涉图零光程差点的有效光子数。考虑实际干涉条纹对比度因子 M 时，其干涉图信噪比和光谱信噪比均降低为原来的 \sqrt{M} 倍。上述图 6 的实测光谱信噪比，对应复色光干涉图综合调制因子约为 0.70。

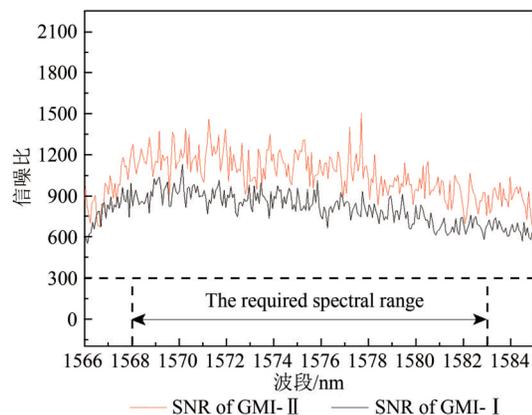


图6 GMI-II 与 GMI-I 实测光谱域信噪比曲线

Fig. 6 The measured spectral SNR curves of GMI-II and GMI-I

从上述空间外差干涉光谱仪高光通量、高光谱分辨率等技术优势,可知,在空间外差干涉光谱技术基础上,结合时空联合调制干涉成像技术,有望在高光谱分辨、高光通量(即信噪比)不变

的条件下,进一步提升其高空间分辨能力。

时空联合调制干涉成像光谱信息获取过程如图7所示。

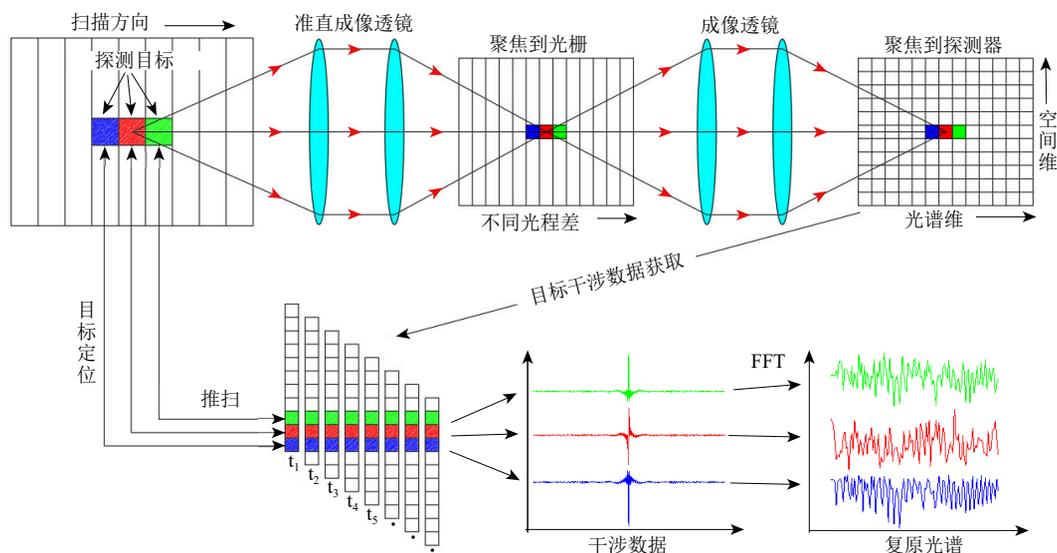


图7 时空联合调制成像光谱仪信息获取过程示意图

Fig. 7 The principle of temporally and spatially modulated imaging spectrometer

目前搭载在高分五号的大气主要温室气体探测仪,其入瞳口径 A 受限于平台工程约束要求、瞬时视场受限于空间分辨率指标;二者限制了空间外差干涉光谱技术的高光通量优势的发挥。发展新型时空联合调制空间外差干涉成像光谱技术具有以下3点技术优势:

(1) 单空间分辨单元内信息由单个像元或几个像元(取决于空间分辨率数据融合要求)探测,大大提升单像元的集光能力,减少单帧积分时间,增加探测时效性;

(2) 根据不同下垫面温室气体探测需求,可进行不同程度的像元融合,实现热源区域高分辨率探测需求;

(3) 瞬时幅宽/视场范围增加,利于空间外差干涉光谱技术高光通量技术优势的发挥。以GMI-I CO₂近红外探测通道为例,在干涉调制制度满足0.64条件下,经融石英棱镜扩视场的干涉仪组件所能接收的视场范围优于 $\pm 2.10^\circ$,然而,高分五号01星上搭载的大气主要温室气体探测仪GMI-I主要观测通道干涉仪仅使用了 $\pm 1.24^\circ$ 视场角;当更换较大折射率扩视场棱镜材料后,其干涉仪组件所能接收的视场可满足 $\pm 5.0^\circ$ 的光通量收集能力。

因此,新型的时空联合调制空间外差光谱技

术是一种具有高时效性、不同细分程度碳监测能力的载荷技术方案,其研究将为下一代温室气体探测载荷研制提供技术基础。

4 结论

本文重点介绍了专用星载温室气体被动遥感探测载荷及其主要特性,进一步地,分析了时空联合调制空间外差成像光谱技术在未来温室气体探测技术中,其高时效性、高空间分辨率以及不同细分程度的重点区域碳监测能力。

回顾温室气体星载探测技术发展过程,其发展趋势总结如下:

(1) 探测载荷专业化:早期观测温室气体的综合性载荷任务目标多,探测的温室气体信号弱,且干扰多,因此反演难度大;为了满足温室气体高精度探测需求,日本、欧美、中国等都陆续发射专门用于温室气体观测的载荷。

(2) 探测灵敏度提升:高精度温室气体探测有助于我们对碳的源和汇问题进一步了解,下一代碳卫星建设方案提出探测精度优于1 ppm的需求,因此,对探测载荷在光谱分辨率、信噪比等方面提出更高的要求,提升探测灵敏度是温室气体探测技术中的重点和难点。

(3) 大幅宽与高空间分辨率兼具: 同时满足全球普查与温室气体排放重点区域、热点区域细分监测的需求, 下一代碳卫星载荷已瞄准全球普查空间分辨率优于 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 、热点地区空间分辨率优于 $0.5\text{ km}\times 0.5\text{ km}$ 的目标展开技术方案论证。

(4) 多种观测模式融合: 观测模式从单一的天底观测发展到现在的天底观测、耀斑观测、定标模式和目标观测模式相结合, 加强海洋上方和重点区域的温室气体浓度监测能力, 推动对全球气候变换的认知。

(5) 高/中/低轨监测体系化: 国内已发射3颗卫星, 集中于低轨太阳同步轨道, 存在访问周期长的问题。高轨载荷探测可实现对重点区域高时效、高频次的观测, 且高轨载荷可以针对弱目标信号增加观测时间, 改善信噪比。利用高/中/低轨载荷进行温室气体综合观测, 可有效填补在轨观测载荷中时间和空间上的缺口, 完善温室气体监测体系。

(6) 探测载荷的微型化: 中小型国家和重点地区对低成本、周期短、覆盖区域小的星载温室气体遥感载荷提出迫切需求。

参考文献

- Aumann H H, Chahine M T, Gautier C, Goldberg M D, Kalnay E, McMillin L M, Revercomb H, Rosenkranz P W, Smith W L, Staelin D H, Strow L L and Susskind J. 2003. AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 253-264 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.808356]
- Basilio R R, Bennett M W, Eldering A, Lawson P R and Rosenberg R A. 2019. Orbiting Carbon Observatory-3 (OCO-3), remote sensing from the International Space Station (ISS)//*Proceedings of SPIE 11151, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXIII*. Strasbourg: SPIE: 1115109 [DOI: 10.1117/12.2534996]
- Blumstein D, Chalon G, Carlier T, Buil C, Hebert P, Maciaszek T, Ponce G, Phulpin T, Tournier B, Simeoni D, Astruc P, Clauss A, Kayal G and Jegou R. 2004. IASI instrument: technical overview and measured performances//*Proceedings of SPIE 5543, Infrared Spaceborne Remote Sensing XII*. Denver: SPIE: 196-207 [DOI: 10.1117/12.560907]
- Boone C D and Bernath P F. 2003. SciSat-1 mission overview and status//*Proceedings of SPIE 5151, Earth Observing Systems VIII*. San Diego: SPIE: 133-142 [DOI: 10.1117/12.504530]
- Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, Frerick J, Noël S, Rozanov V V, Chance K V and Goede A P H. 1999. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 127-150 [DOI: 10.1175/1520-0469]
- Bréon F M and Ciais P. 2010. Spaceborne remote sensing of greenhouse gas concentrations. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(4/5): 412-424 [DOI: 10.1016/j.crte.2009.09.012]
- Bril A, Maksyutov S, Belikov D, Oshchepkov S, Yoshida Y, Deutscher N M, Griffith D, Hase F, Kivi R, Morino I, Notholt J, Pollard D F, Sussmann R, Velazco V A and Warneke T. 2017. EOF-based regression algorithm for the fast retrieval of atmospheric CO₂ total column amount from the GOSAT observations. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 189: 258-266 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.12.005]
- Bruhwieler L, Basu S, Butler J H, Chatterjee A, Dlugokencky E, Kenney M A, McComiskey A, Montzka S A and Staniski D. 2021. Observations of greenhouse gases as climate indicators. *Climatic Change*, 165(1): 12 [DOI: 10.1007/s10584-021-03001-7]
- Butz A, Guerlet S, Hasekamp O, Schepers D, Galli A, Aben I, Frankenberg C, Hartmann J M, Tran H, Kuze A, Keppel-Aleks G, Toon G, Wunch D, Wennberg P, Deutscher N, Griffith D, Macatangay R, Messerschmidt J, Notholt J and Warneke T. 2011. Toward accurate CO₂ and CH₄ observations from GOSAT. *Geophysical Research Letters*, 38(14): L14812 [DOI: 10.1029/2011GL047888]
- Châteauneuf F, Soucy M A and Buijs H. 2006. ACE-FTS instrument: extending mission lifetime//*Proceedings of SPIE 6297, Infrared Spaceborne Remote Sensing XIV*. San Diego: SPIE: 62970E [DOI: 10.1117/12.680059]
- Cheng L X, Tao J H, Yu C, Zhang Y, Fan M, Wang Y P, Chen Y L, Zhu L L, Gu J B and Chen L F. 2021. Tropospheric NO₂ column density retrieval from the GF-5 EMI data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(11): 2313-2325 (程良晓, 陶金花, 余超, 张莹, 范萌, 王雅鹏, 陈元琳, 朱莉莉, 顾坚斌, 陈良富. 2021. 高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪对流层 NO₂ 柱浓度遥感反演研究. *遥感学报*, 25(11): 2313-2325) [DOI: 10.11834/jrs.20210303]
- Chen L F, Shang H Z, Fan M, Tao J H, Husi L T, Zhang Y, Wang H M, Cheng L X, Zhang X X, Wei L S, Li M Y, Zou M M and Liu D D. 2021. Mission overview of the GF-5 satellite for atmospheric parameter monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1917-1931 (陈良富, 尚华哲, 范萌, 陶金花, 胡斯勒图, 张莹, 王红梅, 程良晓, 张欣欣, 伟乐斯, 李明阳, 邹铭敏, 刘冬冬. 2021. 高分五号卫星大气参数探测综述. *遥感学报*, 25(9): 1917-1931) [DOI: 10.11834/jrs.20210582]
- Chesnokova T Y, Chentsov A V, Rokotyanyan N V and Zakharov V I. 2015. Retrieval of content of greenhouse gases from atmospheric spectra of solar radiation with the use of different spectroscopic data on absorption lines. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 28(5): 469-475 [DOI: 10.1134/S1024856015050036]
- Climate Change Center, China Meteorological Administration. 2018. China Greenhouse Gas Bulletin of 2017. Beijing: China Meteorological Administration (中国气象局气候变化中心. 2018. 2017

- 年中国温室气体公报. 北京: 中国气象局)
- Climate Change Center, China Meteorological Administration. 2019. Blue Paper of Climate Change 2019 in China. Beijing: China Meteorological Administration (中国气象局气候变化中心. 2019. 中国气候变化蓝皮书(2019). 北京: 中国气象局)
- Crisp D, Pollock H R, Rosenberg R, Chapsky L, Lee R A M, Oyafuso F A, Frankenberg C, O'Dell C W, Bruegge C J, Doran G B, Eldering A, Fisher B M, Fu D J, Gunson M R, Mandrake L, Osterman G B, Schwandner F M, Sun K, Taylor T E, Wennberg P O and Wunch D. 2017. The on-orbit performance of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) instrument and its radiometrically calibrated products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(1): 59-81 [DOI: 10.5194/amt-10-59-2017]
- Eldering A, Boland S, Solish B, Crisp D, Kahn P and Gunson M. 2012. High precision atmospheric CO₂ measurements from space: the design and implementation of OCO-2//2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE: 1-10 [DOI: 10.1109/aero.2012.6187176]
- Eldering A, Taylor T E, O'Dell C W and Pavlick R. 2019. The OCO-3 mission: measurement objectives and expected performance based on 1 year of simulated data. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(4): 2341-2370 [DOI: 10.5194/amt-12-2341-2019]
- Foucher P Y, Chédin A, Armante R, Boone C, Crevoisier C and Bernath P. 2011. Carbon dioxide atmospheric vertical profiles retrieved from space observation using ACE-FTS solar occultation instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(6): 2455-2470 [DOI: 10.5194/acp-11-2455-2011]
- Gautam Y K, Sharma K, Tyagi S, Ambedkar A K, Chaudhary M and Singh B P. 2021. Nanostructured metal oxide semiconductor-based sensors for greenhouse gas detection: progress and challenges. *Royal Society Open Science*, 8(3): 201324 [DOI: 10.1098/rsos.201324]
- Han M L and Li B C. 2017. Embarked on a journey to global greenhouse gases emission observation: China's first Fourier-transform spectrometer for GHG observation remote sensor. *Space International*, (12): 16-17 (韩美玲, 李碧岑. 2017. 我国走向“碳索”新征程实现全球温室气体排放监测——解读我国首台干涉型高光谱温室气体遥感器. *国际太空*, (12): 16-17) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2017.12.004]
- IPCC. 2018. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Geneva: IPCC
- Issa H, Marpu P, Jallad A H and Al Marar A. 2020. Data processing workflow for the greenhouse gases monitoring CubeSat mission-MeznSat//2020 Mediterranean and Middle-East Geoscience and Remote Sensing Symposium (M2GARSS). Tunis: IEEE: 192-195 [DOI: 10.1109/M2GARSS47143.2020.9105202]
- Kobayashi H, Ogawa T, Shimoda H, Shimota A, Kondo K, Kadokura S, Yoshigahara C, Uehara Y and Yoshida I. 1998. IMG: precursor of the high-resolution FTIR on the satellite//Proceedings of SPIE 3501, *Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds*. Beijing: SPIE: 23-33 [DOI: 10.1117/12.577934]
- Liang A L, Gong W, Han G and Xiang C Z. 2017. Comparison of satellite-observed XCO₂ from GOSAT, OCO-2, and ground-based TCCON. *Remote Sensing*, 9(10): 1033 [DOI: 10.3390/rs9101033]
- Luo H Y, Li Z W, Wu Y, Qiu Z W, Shi H L, Wang Q S and Xiong W. 2023. Greenhouse Gases Monitoring Instrument on GaoFen-5 Satellite-II: Optical Design and Evaluation. *Remote Sensing*, 15(4): 1105 [DOI: 10.3390/rs15041105]
- Luo H Y, Xiong W, Shi H L and Li Z W. 2017. Study for signal-to-noise ratio of spatial heterodyne spectrometer. *Acta Optica Sinica*, 37(6): 0612001 (罗海燕, 熊伟, 施海亮, 李志伟. 2017. 空间外差干涉光谱仪信噪比研究. *光学学报*, 37(6): 0612001) [DOI: 10.3788/AOS201737.0612001]
- Mager R, Fricke W, Burrows J P, Frerick J and Bovensmann H. 1997. SCIAMACHY: a new generation of hyperspectral remote sensing instrument//Proceedings of SPIE 3106, *Spectroscopic Atmospheric Monitoring Techniques*. Munich: SPIE: 84-94 [DOI: 10.1117/12.274707]
- Morse P G, Bates J C, Miller C R, Chahine M T, O'Callaghan F, Aumann H H and Karnik A R. 1999. Development and test of the atmospheric infrared sounder (AIRS) for the NASA earth observing system (EOS)//Proceedings of SPIE 3870, *Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites III*. Florence: SPIE: 281-292 [DOI: 10.1117/12.373196]
- Nakajima M, Suto H, Yotsumoto K, Shiomi K and Hirabayashi T. 2017. Fourier transform spectrometer on GOSAT and GOSAT-2//Proceedings of SPIE 10563, *International Conference on Space Optics — ICSO 2014*. Tenerife: SPIE: 1056340 [DOI: 10.1117/12.2304062]
- Noël S, Bramstedt K, Hilker M, Liebing P, Plieninger J, Reuter M, Rozanov A, Sioris C E, Bovensmann H and Burrows J P. 2016. Stratospheric CH₄ and CO₂ profiles derived from SCIAMACHY solar occultation measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9(4): 1485-1503 [DOI: 10.5194/amt-9-1485-2016]
- Olsen K S, Strong K, Walker K A, Boone C D, Raspollini P, Plieninger J, Bader W, Conway S, Grutter M, Hannigan J W, Hase F, Jones N, De Mazière M, Notholt J, Schneider M, Smale D, Sussmann R and Saitoh N. 2017. Comparison of the GOSAT TANSO-FTS TIR CH₄ volume mixing ratio vertical profiles with those measured by ACE-FTS, ESA MIPAS, IMK-IAA MIPAS, and 16 NDACC stations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 10(10): 3697-3718 [DOI: 10.5194/amt-10-3697-2017]
- Palmer P I. 2008. Quantifying sources and sinks of trace gases using space-borne measurements: current and future science. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Mathematical, Physical*

- and Engineering Sciences, 366(1885): 4509-4528 [DOI: 10.1098/rsta.2008.0176]
- Polonsky I N, O'Brien D M, Kumer J B, O'Dell C W and The geo-CARB Team. 2014. Performance of a geostationary mission, geo-CARB, to measure CO₂, CH₄ and CO column-averaged concentrations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 7(4): 959-981 [DOI: 10.5194/amt-7-959-2014]
- Shi H L, Li Z W, Ye H H, Luo H Y, Xiong W and Wang X H. 2021. First level 1 product results of the greenhouse gas monitoring instrument on the gaofen-5 satellite. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 59(2): 899-914 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.2998729]
- Shi H L, Xiong W, Li Z W and Luo H Y. 2019. Quality analysis of on-orbit observation data of greenhouse gases monitoring instrument. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 161-166 (施海亮, 熊伟, 李志伟, 罗海燕). 2019. 大气主要温室气体监测仪在轨观测数据质量分析. *上海航天*, 36(S2): 161-166 [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.024]
- Shi H L, Xiong W, Luo H Y, Li Z W and Wu J. 2013. Novel hyperspectral technology for atmospheric carbon dioxide detection. *Opto-Electronic Engineering*, 40(8): 36-41 (施海亮, 熊伟, 罗海燕, 李志伟, 吴军). 2013. 新型超光谱大气CO₂遥感探测技术. *光电工程*, 40(8): 36-41 [DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2013.08.007]
- Shimoda H and Ogawa T. 1997. Interferometric monitor for greenhouse gases (IMG)//*Proceedings of SPIE 3221, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites*. London: SPIE: 110-120 [DOI: 10.1117/12.298071]
- Simeoni D, Astruc P, Miras D, Alis C, Andreis O, Scheidel D, Degrelle C, Nicol P, Bailly B, Guiard P, Clauss A, Blumstein D, Maciaszek T, Chalon G, Carlier T and Kayal G. 2004. Design and development of IASI instrument//*Proceedings of SPIE 5543, Infrared Spaceborne Remote Sensing XII*. Denver: SPIE: 208-219 [DOI: 10.1117/12.561090]
- Stumpf K D and Overbeck J A. 2002. CrIS optical system design//*Proceedings of SPIE 4486, Infrared Spaceborne Remote Sensing IX*. San Diego: SPIE: 437-444 [DOI: 10.1117/12.455126]
- Tsuno K, Kameda Y, Kondoh K and Hirai S. 1991. Interferometric monitor for greenhouse gasses for ADEOS//*Proceedings of SPIE 1490, Future European and Japanese Remote-Sensing Sensors and Programs*. Orlando: SPIE: 222-232 [DOI: 10.1117/12.46628]
- World Meteorological Organization. 2020. WMO Greenhouse Gas Bulletin: the State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations Through 2019. WMO
- Wang Y P, Tao J H, Cheng L X, Yu C, Fan M, Zhang Y, Chen Y L, Zhu L L, Gu J B and Chen L F. 2021. Feasibility analysis and preliminary results of formaldehyde retrieval based on Environmental trace gases Monitoring Instrument onboard GF-5 satellite. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(10): 2040-2052 (王雅鹏, 陶金花, 程良晓, 余超, 范萌, 张莹, 陈元琳, 朱莉莉, 顾坚斌, 陈良富). 2021. 高分五号大气痕量气体差分吸收光谱仪甲醛反演可行性分析及初步结果. *遥感学报*, 25(10): 2040-2052, 25(10): 2040-2052 [DOI: 10.11834/jrs.20210302]
- Xiong W. 2018. Hyperspectral greenhouse gases monitor instrument (GMI) for spaceborne payload. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(3): 14-24 (熊伟). 2018. 星载超光谱大气主要温室气体监测仪载荷. *航天返回与遥感*, 39(3): 14-24 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.03.002]
- Xiong W. 2019a. Greenhouse gases Monitoring Instrument (GMI) on GF-5 satellite (invited). *Infrared and Laser Engineering*, 48(3): 0303002 (熊伟). 2019a. “高分五号”卫星大气主要温室气体监测仪(特邀). *红外与激光工程*, 48(3): 0303002 [DOI: 10.3788/IR-LA201948.0303002]
- Xiong W. 2019b. Optimum design and data analysis of greenhouse gases monitoring instrument on GF-5 satellite. *Aerospace Shanghai*, 36(S2): 167-172 (熊伟). 2019b. 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. *上海航天*, 36(S2): 167-172 [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2019.S.025]
- Yang Z D, Bi Y M, Wang Q, Zheng Y Q and Yin Z S. 2016. China's first dedicated hyperspectral satellite for detecting consistency of CO₂ set to get into orbit. *Space International*, (12): 13-17 (杨忠东, 毕研盟, 王倩, 郑玉权, 尹增山). 2016. 即将入轨的我国首颗测量大气二氧化碳的专用高光谱卫星. *国际太空*, (12): 13-17 [DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2016.12.003]
- Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, Kikuchi N, Nobuta K, Tran H, Morino I and Yokota T. 2011. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(4): 717-734 [DOI: 10.5194/amt-4-717-2011]
- Zhang X Y, Meng X Y, Zhou M Q, Bai W G, Zhou L H, Hu Y M and Yu X. 2018. Review of the validation of atmospheric CO₂ from satellite hyper spectral remote sensing. *Climate Change Research*, 14(6): 602-612 (张兴赢, 孟晓阳, 周敏强, 白文广, 周丽花, 胡玥明, 余晓). 2018. 卫星高光谱大气CO₂探测精度验证研究进展. *气候变化研究进展*, 14(6): 602-612 [DOI: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.070]
- Zhang X Y, Wang F, Wang W H, Huang F X, Chen B L, Gao L, Wang S P, Yan H H, Ye H H, Si F Q, Hong J, Li X Y, Cao Q, Che H Z and Li Z Q. 2020. The development and application of satellite remote sensing for atmospheric compositions in China. *Atmospheric Research*, 245:105056 [DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105056]

Research progress of spaceborne passive remote sensing detection payload of greenhouse gases

WANG Qiansheng^{1,2,3}, LUO Haiyan^{1,2,3}, LI Zhiwei^{1,3}, SHI Hailiang^{1,2,3}, DING Yi^{1,2,3}, XIONG Wei^{1,2,3}

1. *Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;*

2. *Science Island Branch, Graduate School of USTC, Hefei 230026, China;*

3. *Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*

Abstract: A global consensus has been made to promote carbon emission reduction in response to global warming caused by the increase of greenhouse gases, such as CO₂ and CH₄. Spaceborne observation has the characteristics of large observation space and continuous observation time, which are among the main means of observing greenhouse gases at present. The establishment of a sound carbon monitoring system and spaceborne passive remote sensing of major greenhouse gases in the atmosphere will help to evaluate the impact of the greenhouse effect and guide human greenhouse gas emission activities, which is of great significance to human society.

Active satellite-borne remote sensing of greenhouse gases become successful through proper planning. Among the spaceborne passive remote sensing payloads of greenhouse gases successfully applied in orbit, three technical systems are mainly included: Michelson interference spectroscopy represented by GOSAT (Greenhouse gases Observing SATellite) and GAS (Greenhouse gases Absorption Spectrometer); grating spectroscopy represented by OCO (Orbiting Carbon Observatory) and ACGS; and spatial heterodyne interference spectroscopy represented by GMI (Greenhouse gases Monitoring Instrument). This study focuses on the analysis of these three typical technology systems and compares the advantages and disadvantages of different detection technologies. At the same time, comprehensive satellite payloads for the detection of greenhouse gases include IMG (Interferometric Monitor for Greenhouse gases), SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption SpectroMeter CHartographY), AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), ACE-FTS (Atmospheric Chemistry Experiment Fourier Transform Spectrometer), IASI (Infrared Atmospheric Sounding Instrument), and CrIS (Cross-track Infrared Sounder). Moreover, projects for the spaceborne passive remote sensing of greenhouse gases that include GeoCarb (Geostationary Carbon Observatory) and Copernicus CO₂ Monitoring Mission are introduced.

To meet the needs of the next generation of spaceborne remote sensing of greenhouse gases, combined with the in-orbit performance of the GMI on GF-5 and the research progress of the new spatial heterodyne interference imaging spectroscopy technology, the feasibility of further achieving high spatial resolution on the basis of hyperspectral resolution and high signal-to-noise ratio is analyzed. This study proposes a payload technology scheme with high timeliness and regional carbon monitoring capability of different subdivisions, which will provide a technical basis for the development of the next generation of detection payload for greenhouse gases.

Reviewing the development process of technologies for the spaceborne detection of greenhouse gases, six development trends of spaceborne passive remote sensing payloads of greenhouse gases are summarized: (1) specialization of detection load; (2) improvement of detection sensitivity; (3) wide width and high spatial resolution; (4) integration of multiple observation modes; (5) systematization of high/medium/low orbit monitoring; (6) miniaturization of detection load.

Key words: greenhouse gases, passive remote sensing, carbon monitoring, satellite payload, interference imaging spectroscopy

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61975212, 41975033)