

文章编号 1674-2915(2011)06-0546-16

温室气体遥感探测仪器发展现状

郑玉权

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 阐述了温室气体遥感探测技术的发展历程。详细介绍了几种国外先进的高光谱分辨率温室气体遥感探测仪器的设计理念、工作方式、谱段设置和主要技术指标。综述了温室气体探测技术从综合性探测仪器到专用温室气体探测仪器的发展过程,指出了温室气体探测仪器未来发展方向,包括高光谱分辨率、高空间分辨率、宽覆盖范围、短覆盖周期以及高信噪比等。

关键词: 温室气体探测;痕量气体探测;高光谱成像仪

中图分类号: TP722.3; X87 文献标识码: A

Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases

ZHENG Yu-quan

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics*,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

Abstract: The paper presents the development process of greenhouse gas remote sensing technology. It introduces the design principles, work modes, spectral band setting and main specifications of foreign advance high spectral resolution remote sensors for greenhouse gases. Furthermore, It is also specified that greenhouse gas remote sensing technology evolves from synthetical instruments to special instruments. Based on the overview about greenhouse gas remote sensing technology, it discusses the future development trend of this kind of instrument and points out that the main emphasis of the research will be some instruments with higher spectral resolution, higher spatial resolution, wider coverages, shorter periods and higher signal to noise ratios.

Key words: greenhouse gas sensing; trace gas sensing; hyperspectral imager

收稿日期: 2011-09-17; 修订日期: 2011-11-22

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2010AA1221091001)

1 引言

20世纪50年代以来,随着生产技术的高速发展,工农业生产和人类生活排放出的废气、微尘越来越多,如二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、一氧化二氮(N_2O)、氟氯烃化合物(CFCS)等,这些气体可让太阳短波辐射自由通过,同时强烈吸收地面和空气放出的红外线长波辐射,从而造成近地层温度升高,我们称这些气体为温室气体,并称这种增温为温室效应。随着人为产生的温室气体排放量不断增加,气候变暖的趋势日益明显,人们担忧温室效应带来的全球生态系统的变化最终将破坏生态平衡,从而威胁人类的健康和生存,因此,全球变暖受到了世界各国的普遍关注。

有数据表明,当前全球平均气温比工业化革命前升高了 $0.8\text{ }^\circ\text{C}$,造成这一现象的“罪魁祸首”是 CO_2 排放量的不断增加。预计到本世纪中叶,地球环境温度将突破上升 $2\text{ }^\circ\text{C}$ 的“安全底线”,北纬 60° 的增幅可能达到 $3.2\sim 6.6\text{ }^\circ\text{C}$,全球气候变化的负面效应开始变得非常明显,物种的灭绝速度和数量急剧上升,数亿人的生存受到威胁。因此,如何降低温室气体排放量,降低全球温度上升速度已成为世界各国的重要议题。

在2009年的哥本哈根世界气候大会上,英美等国从减排承诺、减排衡量与核查标准等多方面公开非难、要求中国寻找一种方式来向世界证明自己减排的执行情况,即中国要实现减排的可测量、可报告、可核查,要拿出有说服力的数据面向社会和世界,也就是说中国必须发展自己的温室气体遥感监测系统来获取本国和世界其他国家的温室气体排放数据。

2 温室气体遥感观测发展概况

King^[2]和Kaplan等人^[3]分别于1956年和1959年提出了卫星红外大气探测原理,据此美国于上世纪70年代设计了高分辨率红外探测器(HIRS),成为卫星遥感用于大气探测业务化的标志^[4]。随着传感器技术的发展,光谱分辨率越来

越高,传感器的探测能力也逐步得到提高。大气痕量分子光谱仪(ATMOS)是首次采用临边探测方式的高分辨率傅里叶变换(FTIR)星载传感器,它使人类进入了从太空观测大气的新时代^[5]。

1996年8月发射的先进对地观测平台(ADEOS)上的温室气体干涉测量计(IMG)是首次采用天底观测方式进行痕量气体探测的星载高光谱FTIR传感器^[5]。IMG传感器由日本资源观测系统组织(JAROS)负责研制,它的任务是:精确测定表面温度、大气温度廓线、大气组分 CH_4 、 H_2O 、 N_2O 、 CO_2 和 O_3 混合比廓线^[7]。1997年6月由于太阳能电板的原因,结束了其使命。

进入21世纪以来,随着全球气候变化趋势的不断加剧,国际社会对温室气体排放的关注也越来越高,美国和欧洲等航天发达国家均开展了针对温室气体监测的星载红外高光谱技术的研究,多颗高光谱探测卫星进入运行轨道,并开始发挥重要作用。

目前在轨运行的传感器有:

1999年搭载TERRA卫星发射的对流层污染测量仪(MOPITT)^[8];

2002年搭载地球观测系统(EOS)发射的大气红外探测仪(AIRS)^[9];

2002年3月1日,欧空局成功地发射了ENVISAT-1卫星,其携带了分辨率达 0.035 cm^{-1} 的主动大气探测迈克尔逊干涉仪(MIPAS)和大气痕量气体扫描成像光谱仪(SCIAMACHY)^[10];

2003年8月13日,加拿大航天局发射了SCISAT-1微小卫星,该卫星的主载荷为一台分辨率为 0.02 cm^{-1} 的大气化学实验傅里叶变换光谱仪(ACE-FTS)^[11];

2004年7月15日,美国NASA发射了对地观测卫星系列中的AURA卫星,其中包含一台分辨率为 0.03 cm^{-1} 的傅里叶变换红外光谱仪^[12];

2006年发射了搭载METOP平台的红外大气探测干涉仪(IASI)^[13];

2009年1月21日,日本发射的GOSAT卫星搭载了一台温室气体观测探测器(Thermal and Near-infrared Sensor for Carbon Observation, TAN-SO),该卫星是一颗用来监测全球大气中 CO_2 和

CH₄含量的探测卫星^[14];

2009年2月,美国NASA第一颗天基大气CO₂观测专用卫星OCO(Orbiting Carbon Observatory)发射失败,其中经过8年研制的高光谱仪器是世界各国研究星载温室气体探测仪器的重要经验和基础,OCO-2计划于2013年再度发射^[15];

中德合作建立气候任务的CarbonSat卫星星座也在酝酿当中,星座中包括5颗星,能够实现每天无缝观测全球各地CO₂和CH₄含量一次^[16]。

在以上这些仪器中,ENVISAT-1平台上的SCAMACHY首次演示验证了卫星观测温室气体的可行性,GOSAT和OCO卫星在技术指标上高于SCAMACHY,测量温室气体的精度得到很大提

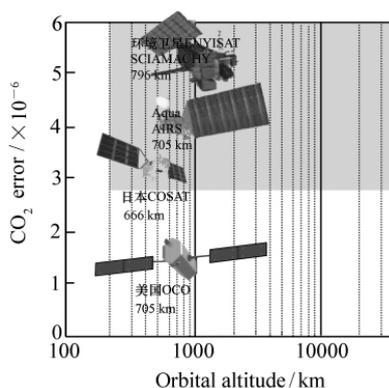


图 1 国际主要 CO₂ 探测仪状况图

Fig. 1 Status map of international main green house gases remote sensor

表 1 温室气体观测的主要遥感仪器参数对比

Tab. 1 Parameter contrast of main greenhouse gas remote sensing instruments

Specifications	OCO	GOSAT	SCIAMACHY	AIRS	IASI
Tropospheric gas observation	CO ₂ , O ₂	CO ₂ , CH ₄ , O ₂ , O ₃ , H ₂ O	O ₃ , O ₄ , N ₂ O, CH ₄ , CO, CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , HCHO	CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , CO, H ₂ O, SO ₂	CO ₂ , CH ₄ , O ₃ , CO, H ₂ O, SO ₂ , N ₂ O
CO ₂ sensitivity	Whole layer (Including near-surface)	Whole layer (Including near-surface)	Whole layer (Including near-surface)	Middle of troposphere	Middle of troposphere
Ground resolution/km	1.29 × 2.25/5.2	FTS: 10.5/80 ~ 790	30 × 60/960	15/1 650	12/2 200
CO ₂ precision	1 ~ 2	4	14	1.5	2
Instruments	3-channel grating spectrometer	CAI SWIR/TIR Fourier spectrometer	8-channel grating spectrometer	Grating spectrometer	Fourier spectrometer
Viewing modes	Nadir, Glint	Nadir, Glint	Limb, Nadir	Nadir	Nadir
Sampling/d	500 000	18 700	8 600	2 916 000	1 296 000
Spectral range/μm	0.757 ~ 0.772, 1.59 ~ 1.62, 2.04 ~ 2.08	0.758 ~ 0.775, 1.56 ~ 1.72, 1.92 ~ 2.08, 5.56 ~ 14.3	0.24 ~ 0.44, 0.4 ~ 1.0, 1.0 ~ 1.7, 1.94 ~ 2.04, 2.265 ~ 2.38	3.74 ~ 4.61, 6.20 ~ 8.22, 8.80 ~ 15.4	3.62 ~ 5.0, 5.0 ~ 8.26, 8.26 ~ 15.5
SNR (nadir, 5% albedo)	>300@1.59 ~ 1.62, >240@2.04 ~ 2.08	~120@1.56 ~ 1.72, ~120@1.92 ~ 2.08	<100@1.57	~2000@4.2, ~1400@3.7 ~ 13.6, ~800@13.6 ~ 15.4	~1000@12, ~500@4.5
Mean altitude/km	705	666	790	750	820
Descending node time	13:30 ± 00:1.5	13:00 ± 00:15	10:00	13:30	21:30
Revisit/ (d/orbit)	16/233	3/72	35	16/233	72/1 037
Launch date	Failure	January 2009	March 2002	May 2002	October 2006
Life time/a	2	5	>7	>7	5

高,表 1 列出了近几年能够用于观测温室气体的遥感仪器参数,图 1 为各卫星能够实现的 CO₂ 测量精度,由表 1 和图 1 可以看到,OCO 的 CO₂ 测量精度最高,达到 1×10^{-6} (相当于 0.3%),GOSAT 的测量精度只有 4×10^{-6} ,SCIAMACHY 作为第一台痕量气体探测仪,验证了空间轨道测量痕量气体的可行性,但 CO₂ 测量精度较低,只有 14×10^{-6} ,需要进一步提高指标,改进测量精度。为了进一步了解各仪器,这里分别简要介绍仪器的工作方式和结构。

2.1 SCIAMACHY

SCIAMACHY 是搭载在欧洲航天局 (ESA) ENVISAT 卫星上的有效载荷,于 2002 年 3 月发射。SCIAMACHY 结合色散棱镜和光栅实现高分辨率光谱大气观测,其测量的光谱从紫外到近红外 (240 ~ 1 750 nm、1 940 ~ 2 040 nm、2 265 ~ 2 380 nm),光谱分辨率为 0.2 ~ 1.5 nm,辐射率相对误差 <1%,绝对误差 <2% ~ 4%。SCIAMACHY 的主要技术指标如表 2 所示^[17]。

表 2 SCIAMACHY 的主要技术指标

Tab.2 Key technical indexes of SCIAMACHY

ENVISAT-1 orbit:	Parameter
Orbit per day/(1/d)	14 11/15
Repeat cycle/d	35
Orbit period/min	100.59
Mean local time at	10:00
Descending node	
Inclination/(°)	98.55
Orbit radius/km	7159.5
Orbit velocity/(m · s ⁻¹)	7.45
Mean altitude/km	799.8
Scanner unit	
Number of axes	2
Angle resolution/(")	2.5
Telescope	Parameter
Aperture diameter	31 mm
Spectrometer	Parameter
Entrance slit size	0.19 mm × 9.6 mm
Instantaneous field of view size	0.045° × 1.8°
Sun aperture size	0.06 mm × 3mm
Sun aperture instantaneous field of view size	0.045° × 1.8°

Table continued

Number of spectrometer channels	8
Polarisation measurement device channels:	7
In-flight calibration H/W	Parameter
On-board diffuser: Ground-blasted aluminium reflection diffuser	
In-flight calibration source: Spectral line source: Hollow cathode discharge lamp, Pt/Cr cathode with Ne filling	
White light source: Tungsten-halogen 5 W lamp with equivalent blackbody temperature of about 3 000 K	
Thermal control:	Parameter
Optical bench nominal temperature:	253 K
Optical bench orbital temperature variation:	0.25 K
Detector array orbital temperature variation:	0.02 K
Measurement data	Parameter
Data processing	Coadding
Nominal data rate/(bit/s)	400.00
High data rate/(bit/s)	1867.00
Absolute datation:	
Accuracy/ms	10
Relative datation	
Accuracy(PMD/Spectrometer detectors)	1 ms
Budgets	Parameter
Mass(Budget) /kg	198
Power(Budget) /W	122

该仪器采用天底、临边以及太阳/月亮掩星 3 种探测方式进行观测,其中由天底探测资料通过差分吸收 (DOAS, Differential Optical Absorption Spectroscopy) 方法反演大气微量气体最为引人注目。目前国际上已有大量关于 DOAS 反演大气温室气体的研究成果发表,反演的气体包括: O₃, O₂, O₂(1D), O₄, BrO, OClO, ClO, SO₂, H₂CO, NO, NO₂, NO₃, CO, CO₂, CH₄, H₂O, N₂O。其中 CH₄ 的反演精度可达到 1%,CO₂ 的反演结果受气溶胶影响,其精度有待于进一步验证。

在 Nadir 观测方式下,SCIAMACHY 只观测航天器与星下点之间的大气,见图 2。测量的瞬时视场为 0.045° × 1.8°,扫描区域关于穿轨对称 ±500 km,每次扫描穿轨 1 000 km。前向扫描耗时 4 s,紧接着是一个快速的回扫。S/C 速度保证了下一次扫描可以与本次扫描所覆盖的区域无缝衔接。根据 62.5 ms 的积分时间可以得到扫描方

向上 16 km 的空间分辨率。飞行方向的空间分辨率为 25 km,由 1.8°的瞬时视场和 800 km 的轨道高度决定。Nadir 扫描方式可以测量地球表面和大气的反射光、背向散射光,从而得到大气中微量气体、气溶胶和云的信息。

Nadir 观测方式不能提供大气层垂直分布信息,所以需要 Limb 观测方式来弥补。图 2 中瞬时

视场较宽的一侧(图中黑色区域)与地球水平线平行。此时 1.8°的视场角对应着 100 km 的观察物长度,瞬时视场较窄的一侧(0.045°)提供了对垂直方向 2.6 km 厚度空气层的观测。为了得到总计 100 km 的高度观测,需要通过俯仰扫描镜的运动实现从水平面起经过 34 步的逐层竖直扫描。

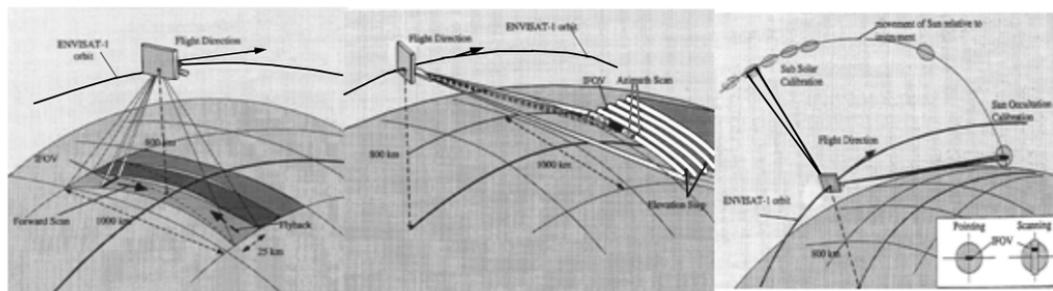


图 2 SCIAMACHY 的 3 种工作方式

Fig. 2 Three work modes of SCIAMACHY

为了在 Limb 方式中观测到用 Nadir 方式观测的同一大气层,需要水平扫描 1 000 km。考虑到地球自转以及对同一大气观测时 Limb 方式和 Nadir 方式产生的时间差,在进行 Limb 方式观测时需要方位偏置。

掩日、掩月测量是指当太阳或月亮正好在 SCIAMACHY 的视野之内时进行的测量,这时的扫描方式和 Limb 完全一样,见图 2。掩日观测是对吸收光谱观测的最理想方式,它能够在 2 s 内对太阳进行彻底扫描。较强的光通量使得探测器

在较短的积分时间内就能完成工作,所以在这种工作方式下能够得到较高的分辨率,使用相关的算法可以得到垂直方向上 1 km 的空间分辨率。掩月测量与掩日测量类似,但二者的亮度差别较大^[18]。

SCIAMACHY 仪器主要由 3 部分组成^[19]:

(1) 光学组件(Optical Assembly): SCIAMACHY 中最复杂的部分,也是尺寸最大的部分。入射的电磁波被光学系统接收,按波长分为 8 个通道,并被探测器转为电信号输出。

表 3 SCIAMACHY 的光谱波段设置

Tab. 3 Specification of spectrometer in channels and detectors

Spectrometer channel	Wavelength range/nm	Spectral resolution/nm	Number of pixels	Detector material	Detector temperature/K
1	240 ~ 314	0.21	700	Si	200
2	309 ~ 405	0.22	1 024	Si	200
3	394 ~ 620	0.47	1 024	Si	235
4	604 ~ 805	0.42	1 024	Si	235
5	785 ~ 1 050	0.55	1 024	Si	235
6	1 000 ~ 1 750	1.56	1 024	In _{0.53} Ga _{0.47} As	200
7	1 940 ~ 2 040	0.21	1 024	In _{0.71} Ga _{0.29} As	150
8	2 265 ~ 2 380	0.24	1 024	In _{0.82} Ga _{0.18} As	150

(2) 电子学组件(Electronic Assembly) : 对整个仪器进行供电、控制和数据处理。

(3) 冷却组件(Radiant Cooler Assembly) : 将探测器冷却到固定的工作温度。

2.2 AIRS

AIRS 卫星于 2002 年 5 月 4 日发射 ,用于预测天气 6 年的使用的数据表明 ,该卫星可以监测天气和气候的变化过程并且可以观测季节性变化的趋势。该仪器是超光谱红外仪器 ,有 2 378 个红外通道来测量 3.7 ~ 15.4 μm 波段并且覆盖区 (footprint) 为 13.5 km ,光谱分辨率约为 1 200。对于红外通道 ,瞬间视场为 $0.6^\circ \times 1.1^\circ$,扫描方向是 0.6° 轨道高度为 705 km , 1.1° 相当于在天

底时地面上 13.5 km^[20]。

AIRS 是一个在中远红外 (3.7 ~ 15.4 μm) 拥有 2 378 个通道 ,在可见近红外拥有 4 个通道的高分辨率光谱仪。它是一个拥有高分辨率的光栅光谱仪系统 ,采用红外剪切技术(Cutting-edge infrared technology) 产生大气和地表温度 ,水汽和云层的一些属性信息等。它于 2002 年 5 月发射 ,用于提供准确和全新的大气、地面、海洋的相关数据 ,利用大气温度和红外光谱之间的关系研究气候和大气的变化。对流层的温度精度可以达到 1 K/km ,地表温度平均精度可以达到 0.5 K/km。AIRS 的主要技术指标见表 4。

表 4 AIRS 的主要技术参数
Tab.4 Key technical indexes of AIRS

AIRS	Parameter
Spectral coverage	3.74 ~ 4.61 μm 6.20 ~ 8.22 μm 8.8 ~ 15.4 μm
Spectral resolution($\lambda / \Delta\lambda$)	1 200
Spectral samples	2 378
VIS/NIR photometer IFOV	0.185°
Detectors	17 linear arrays of HgCdTe
AIRS footprints	$1.1^\circ \times 0.6^\circ$
AIRS power	256 W
Weight	156 kg
Spatial resolution(at nadir)	45 km \times 45 km

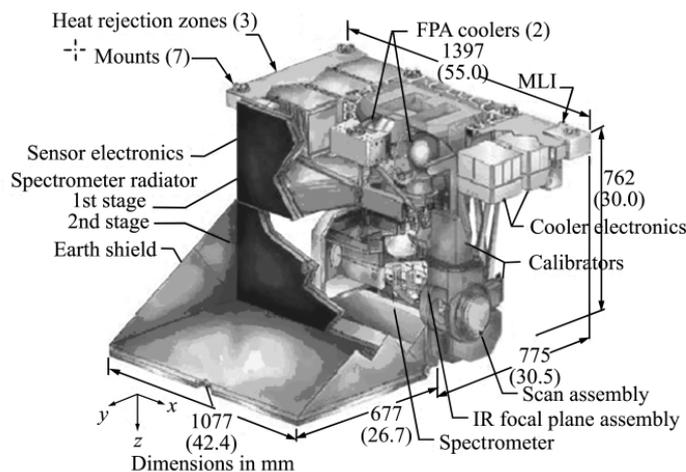


图 3 AIRS 仪器结构图

Fig.3 Instrument structure of AIRS

AIRS 仪器如图 3 所示,它覆盖的波段为 3.74 ~ 4.61 μm 、6.20 ~ 8.22 μm 和 8.8 ~ 15.4 μm ,分辨率为 $\lambda/\Delta\lambda = 1\ 200$,具有 2 378 个光谱采样。为了调节空间覆盖范围和校准水平,它包含扫描镜和校准器。

如图 4 所示,扫描镜旋转 360°,每隔 2.667 s 就可以产生一个扫描线。扫描镜有两个速度:在

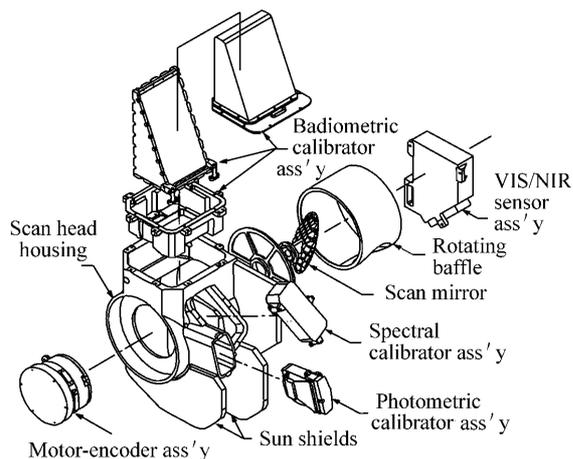
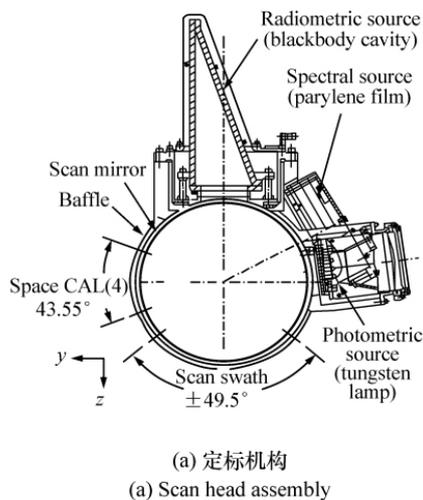


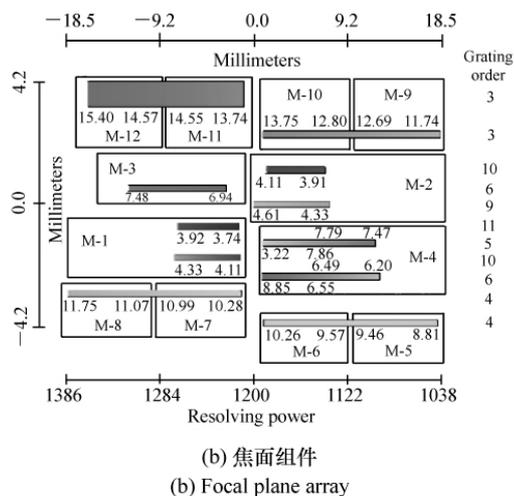
图 4 AIRS 的组件构成
Fig. 4 Structure of AIRS

前 2 s 时,旋转速度为 49.5°/s,产生一条具有 90 个地面区域的扫描线,每一个地面区域的瞬时视场为 1.1°。在剩余的 0.67 s 中,扫描镜完成具有 4 个独立视场的整体旋转,视场包括 310 K 的辐射定标器,光谱参考光源,光度定标器(photometric calibrator)。VIS/NIR 光度计的瞬视场为 0.185°,它与 IR 分光计的视轴平行,从而同时观测可见和红外场景的测量。

IR 分光计的衍射光栅将整个 IR 段的光谱分光到 17 线阵列 HgCdTe 探测器上,采用光栅的分光级次是 3 ~ 11 级之间。每一个线阵列两行由元素 ($N = 94 \sim 192$) 组成,根据需要选择应用其中一列还是两列。光谱仪在两侧采用被动的热控方式将温度控制在 150 K,IR 焦面被冷却至 60 K,扫描镜被冷却至 273 K。IR 光学元件和探测器的冷却可以实现仪器所需的灵敏度。VIS/NIR 光度计使用光学滤波器来得到 400 ~ 1 000 nm 的光谱带。VIS/NIR 光度计无需冷却,工作温度为 293 ~ 300 K。从 IR 分光计和 VIS/NIR 光度计出来的信号通过信号与数据处理电路。另外,AIRS 仪器包含指令和控制电路。



(a) 定标机构
(a) Scan head assembly



(b) 焦面组件
(b) Focal plane array

图 5 AIRS 的定标机构与焦面组件

Fig. 5 Scan head assembly and focal plane array layout of AIRS

AIRS 在 3.74 ~ 15.4 μm 之间共有 3 个通道,平均分辨率约为 1 200,实际是从 1 086 ~ 1 570,探测的 3 个波带为: 3.74 ~ 4.61 μm 、6.20 ~ 8.22 μm 和 8.8 ~ 15.4 μm 。可见光的 4 个通道中每个

都有 9 pixel 的光度计,瞬视场为 0.185°,分辨率为 2.3 km,采用滤光片作为分光元件。AIRS 仪器的光学系统结构见图 6^[21-23]。

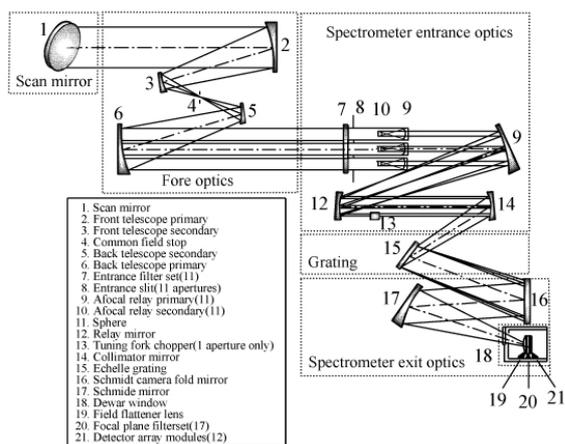


图 6 光学系统结构图

Fig. 6 Structure of optical system

2.3 IASI

红外大气探测干涉仪 IASI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) 是欧洲气象极轨卫星 METOP 的有效载荷(图 7), 于 2006 年 10 月发射。IASI 能够提供大气、陆地、海洋的精确数据, 可预报天气并对气候进行研究。IASI 提供的垂直方向 1 km 内的湿度精度为 10%、温度精度为 1 K^[24-25]。

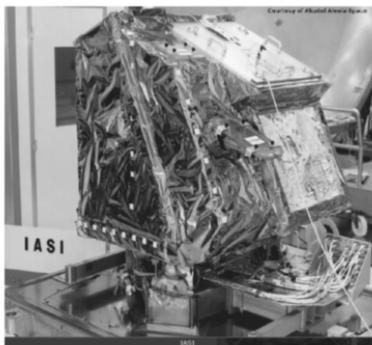


图 7 IASI 仪器照片

Fig. 7 Photo of IASI instrument

IASI 探测仪基于被动红外探测, 它由一台精确定标, 工作波段为 3.7 ~ 15.5 μm 的傅里叶变换光谱仪(TANSO-FTS) 和一台工作波段在 10.3 ~ 12.5 μm 的红外成像仪组成。光谱仪基于迈克尔逊干涉原理, 干涉图像在星上由数据处理单元完成逆傅里叶变换和辐射定标。IASI 的主要技术指标如表 5 所示。

表 5 IASI 的主要技术参数

Tab. 5 Specification of IASI

IASI	Parameter
Spectral bands	3.62 ~ 15.5 μm
	B1: 8.26 ~ 15.5 μm
	B2: 5.0 ~ 8.26 μm
	B3: 3.62 ~ 5.0 μm
Field of view	-48°20' / +48°20'
Spatial resolution	D: 12 km
Spectral resolution	8 ~ 70 nm (0.35 ~ 0.5 cm ⁻¹)
Data flow	1.5 MB/s (average)
Dimensions of sounder	1.1 m × 1.1 m × 1.2 m
Mass sounder	< 200 kg
Stiffness	> 55 Hz (during launch) ,
	> 6 Hz (in orbit)
Power consumption	< 240 W
Reliability	> 0.8
Availability	> 97.5% (5 a)

IASI 对地球的扫描观测(见图 8) 是通过一个具有两个转轴的扫描平面镜实现的。主轴 α 轴实现穿轨扫描, 次轴 β 轴补偿凝视期间卫星的速度运动补偿速度由 α 角决定。被探测区域在卫星的扫描驻留时间内保持稳定, 对干涉仪的光谱分析至关重要, 该仪器的稳像精度优于 0.15 mrad。视场角为 ±48°20', 在 8 s 内能够实现全视场扫描, 可对深空的和模拟黑体各观测一次。

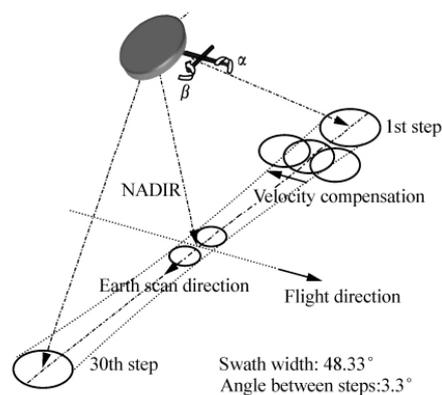


图 8 IASI 的扫描工作方式

Fig. 8 Scanning work mode of IASI

IASI 的光学系统中位于干涉仪之后的离轴反射镜将地物成像在一个具有 4 个孔的视场光阑上, 光阑是 cold optics 的第一个光学面。cold op-

tics 系统将入射光分为 3 个波段,每个波段的光有对应的孔径光阑,它们和干涉仪的分束器相对于场景和成像镜共轭,见图 9。

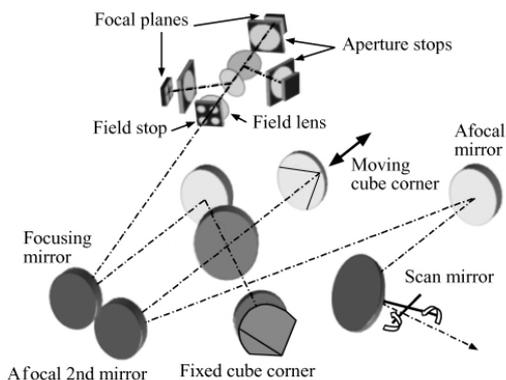


图 9 IASI 光学系统结构图

Fig. 9 Optical system structure of IASI

2.4 TANSO

GOSAT 是一颗用来监测全球大气中 CO₂ 和 CH₄ 含量的探测卫星,其中进行温室气体观测的探测器 TANSO,主要包含气溶胶成像仪 TANSO-CAI(Cloud and Aerosol Imager) 和 TANSO-FTS。TANSO-FTS 覆盖 0.75 ~ 14.3 μm 波段的大气光谱,用以精确测量温室气体 CO₂ 的浓度分布。0.76 μm 波段用来获取氧气浓度。1.6 和 2.06 μm 波段用来观测 CO₂ 浓度,1.6 μm 波段同时用来观测 CH₄ 浓度。5.5 ~ 14 μm 波段用来再次获得 CO₂、CH₄、水汽和大气温度,以及 CO₂ 与 CH₄ 垂直廓线。图 10 为 TANSO-FTS 获取全球 CO₂ 分布的过程。TANSO-FTS 仪器的主要技术指标见表 6,光谱范围较宽,光谱分辨率为 0.2 cm⁻¹。

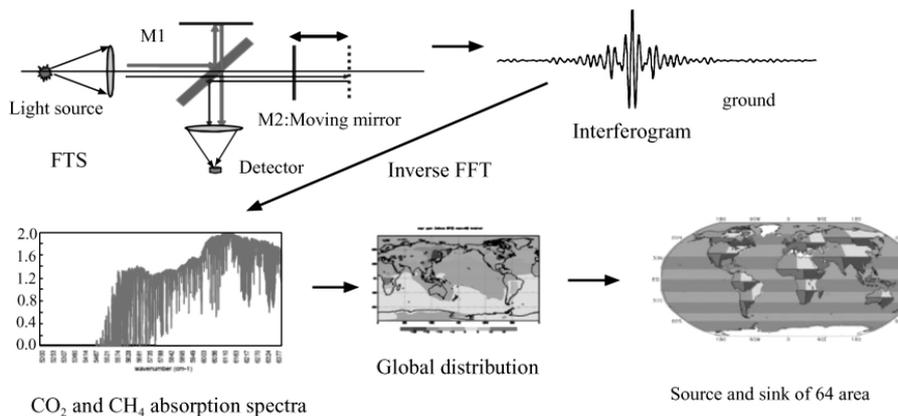


图 10 TANSO-FTS 获取全球 CO₂ 分布的过程

Fig. 10 TANSO-FTS data retrieval flow

表 6 TANSO-FTS 主要性能指标

Tab. 6 Specifications of TANSO-FTS

Technical parameter	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
Center wavelength/μm	0.76	1.64	2.0	MWIR/LWIR
Wavelength range/μm	0.758 ~ 0.775	1.56 ~ 1.72	1.92 ~ 2.08	5.56 ~ 14.3
Bandwidth/cm ⁻¹	0.2	0.2	0.2	0.2
Targeted species	O ₂	CO ₂ , CH ₄	CO ₂	CO ₂ vertical distribution
Weight/kg	250			
Dimensions/m	1.2 × 1.1 × 0.7			

TANSO-FTS 的光学系统结构如图 11 所示,由指向反射镜、FTS 变换模块、双离轴抛物面系统

和 4 台光谱仪组成,入射光经过指向反射镜后,由角锥反射器产生干涉光进入离轴抛物面反射镜,

在抛物面反射镜的焦面处放置视场光阑限制视场,再经过一个短焦离轴抛物面产生准直光,缩小准直光束的孔径,光束再经过3个分束器进入

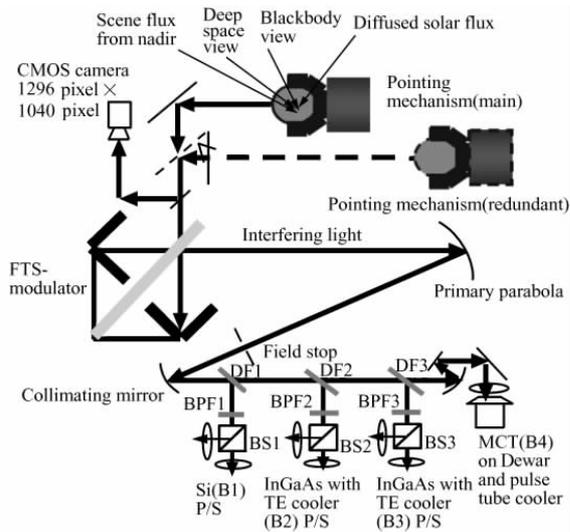


图 11 TANSO-FTS 光学系统示意图

Fig. 11 Optical schematics of TANSO-FTS

0.76、1.6 和 2.06 μm 3 个波段的 TANSO-FTS,采用迈克尔逊干涉仪获得干涉图,利用 Si 和两块 InGaAs 探测器接收干涉图,热红外波段光经过成像系统成像在 MCT 探测器上,MCT 探测器采用脉冲管制冷机制冷,两块 InGaAs 探测器采用热电制冷。FTS 的光谱采样分辨率为 0.2 cm^{-1} ,能达到的光谱分辨率 FWHM 分别为 0.6 cm^{-1} 和 0.27 cm^{-1} 。

GOSAT 卫星还安装了一台云和气溶胶成像仪,用于修正气溶胶和云对 CO_2 探测的影响。CAI(见图 12)用于探测 FTS 扫描区域云层厚度和空间悬浮物以及 CH_4 对探测造成的影响,因此通过 CAI 对探测结果进行修正或者丢弃在云层很厚的情况收集的数据。所探测的波段应该是云层和空间悬浮物吸收较小的波段,因此选用了 4 个波段 4 个波段的波长及依据见表 7。CAI 的 4 个通道主要由 3 台望远系统组成,重量为 40 kg,功率为 100 W。

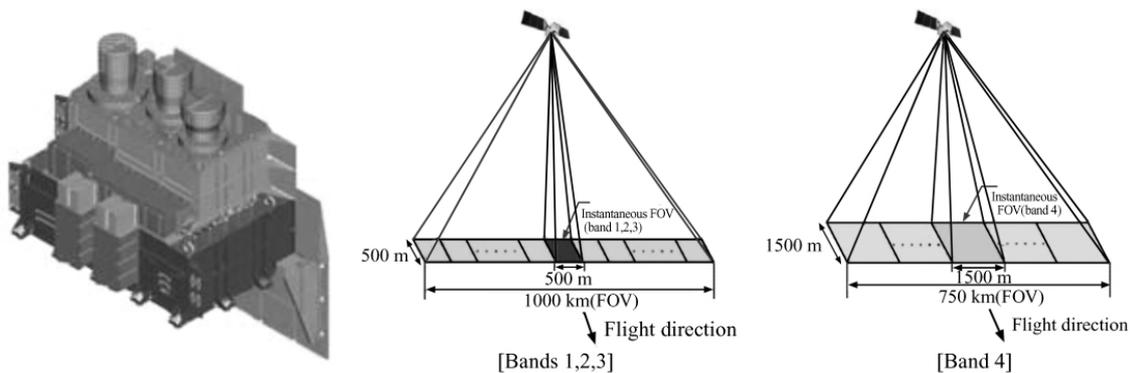


图 12 TANSO-CAI 外形图与覆盖宽度

Fig. 12 Outside view and cover width of TANSO-CAI

表 7 TANSO-CAI 4 个波段选择说明

Fig. 7 Spectral band choice illumination

Observation band/ μm	Center wavelength/nm	Spatial resolution/km	Number of pixels	Instructions
0.380	20	0.5	2 000	No O_3 absorption, low surface reflection
0.674	20	0.5	2 000	No increase in albedo of vegetation, no effects on $\text{O}_2\text{-B}$ and H_2O absorption
0.870	20	0.5	2 000	No interference of moisture absorption
1.60	90	1.5	500	Avoiding H_2O absorption, providing CO_2 and CH_4 correction, without effects of the detector cutoff wavelength

GOSAT 于 2009 年 2 月 9 日传回了第一批数据,根据权威部门计算结果显示:GOSAT 的数据反演 CO_2 浓度精度并未达到设计指标 $[(3 \sim 4) \times 10^{-6}]$ 的要求,初步分析结果显示:GOSAT 采用对外界使用要求较为严格的 TANSO-FTS,对定标技术要求非常苛刻,定标技术不够成熟^[26-28]。

OCO (Orbiting Carbon Observatory) 卫星是 2009 年 2 月美国 NASA 发射的第一个天基大气 CO_2 观测卫星,历经 8 年的研发,全部探测任务耗资 2.78 亿美元,于 2002 年 7 月列入 NASA 地球系统探索计划。卫星整体长为 2.12 m,宽为 0.94 m,重为 441 kg,电功率为 813 W,轨道为 705 km 太阳同步极地轨道,单轨 99 min,回归周期 16 d,设计寿命为 2 a,降交点时间为下午 1:15,与

EOS 的 Aqua、Aura、CloudSat、CALIPSO、PARASOL 共同工作,获取地物信息。OCO 于 2009 年 2 月发射,但是由于用于保护卫星的整流罩发生故障,导致卫星坠入南极洲附近的海域,正在进行后续星 (OCO-2) 的研制,预计 2013 年发射^[29]。

为了提高测量数据的质量和检验数据的可靠性,OCO 将采取 3 种标准的观测模式:天底、闪耀和目标模式,如图 13 所示。OCO 仪器没有指向反射镜,其侧视和俯仰观测通过卫星变姿来完成,整个仪器由 1 台望远镜和 3 台光栅光谱仪组成,望远镜是一个孔径为 11 cm 的卡塞格林系统,带有保护窗口,该望远镜的 F 数为 1.8,口径为 100 mm^[30]。

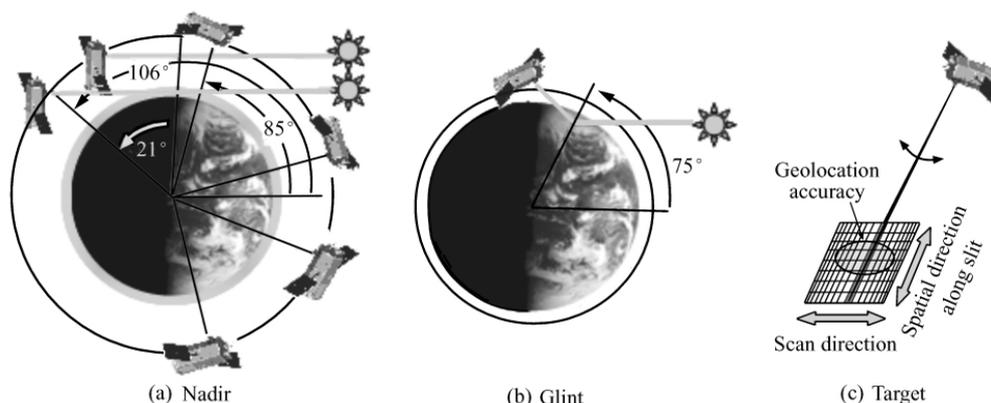


图 13 OCO 的 3 种观测模式

Fig. 13 Three observation modes of OCO

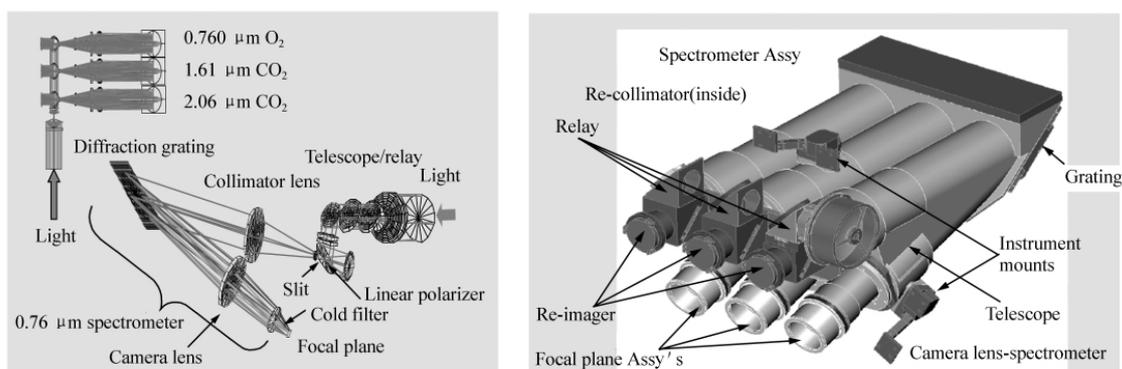


图 14 OCO 光学系统示意图与三维结构图

Fig. 14 Optical system schematics and 3D structure diagram of OCO

中继光学系统包括准直镜、折叠镜、二向色分束器、波段分离器,以及二次成像镜。OCO 的光学系统结构如图 14 所示。

每个分光计都包括一个入射狭缝,一个双透镜准直器,一个平面反射光栅和一个双透镜成像镜头。

表 8 OCO 的主要技术指标

Tab. 8 Specifications of OCO

OCO	Parameter
Tropospheric gases measured	CO ₂ , O ₂
<i>F</i> number	1.8
Instruments	3-channel grating spectrometer
Viewing modes	Nadir/Glint/Target
IFOV/Swath(km)	1.29 × 2.25/5.2
Samples/d	500 000
Spectral range/μm	0.757 ~ 0.772, 1.59 ~ 1.62, 2.04 ~ 2.08
SNR(nadir, 5% albedo)	> 300@ 1.59 ~ 1.62 μm, > 240@ 2.04 ~ 208 μm
CO ₂ precision	1 × 10 ⁻⁶ (part per million)
Orbit altitude	705 km
Local time	13:30 ± 0:1.5
Revisit time	16 d/233 Orbits
Each spectrometer slit dimension(3 in total)	~ 3mm × ~ 25 μm(0.1 inch × 0.000 98 inch)
Nominal life	2 a
OCO dimension	1.6 m × 0.4 m × 0.6 m(5.3 feet × 1.3 feet × 2 feet)
Weight	Approximately 135 kg(298 pounds)
Required power	Less than 125 W
Each focal plane array(3 in total)	1 024 pixel × 1 024 pixel array with 18 μm by 18 μm pixels
Field of view(the slits produced)	Approximately 0.01°(wide) × 0.8°(long)

3 个分光计都采用同样的结构并成为一个固定整体,这样可以提高系统的刚性和热稳定性。它们之间的微小差别表现在镀膜、透镜和光栅上,这是由每个通道具有不同的波段特性决定的。

OCO 使用 3 个 1 024 × 1 024 焦平面阵列 (FPA) 分别测量通过每一个分光计的光。测量频率为 3 Hz。在美国研制的 OCO 仪器中,所采用的探测器是 3 个 Teledyne HIRG-18 FPA,用一个 HyVi SI FPA 测量氧气波段,用两个 HgCdTe SWIR FPAs 测量 CO₂ 波段。

探测器的尺寸、最小光谱采样要求以及视场角确定了系统的焦距和分光计的狭缝尺寸。

OCO 光学系统的光传输过程如下:平行光进入望远镜后聚焦在一个视场光阑上,被准直镜准直的光进入中继光学系统,然后通过一个二向色

性的光束分束器把不同波段的光分离开来,经过一个窄带滤波器。每个滤波器对每一个波段传播的光进行选择滤波,分别透射 CO₂ 和 O₂ 所感兴趣的中心波长 ± 1% 的波段而阻挡其他不需要的波段。经过滤波器透射的光分别聚焦在各台分光计的狭缝上,每个狭缝长约 3 mm,宽约 25 μm,这些细长的狭缝产生一个约 0.000 1°宽和 0.014 6°长的视场。每台分光计的入射狭缝前面的都有一个消偏器,用以阻挡那些不需要的偏振光并将其散射回来,而那些进入分光计入射狭缝的光,被一个二组元透射镜准直,然后被平面反射光栅衍射,经过二元件的成像镜和窄带的滤波器后被聚焦在二维焦平面阵列上。焦平面阵列的温度被冷却至约为 180 K,主要用来阻挡来自仪器内部的热辐射。测量系统具体结构见图 15。

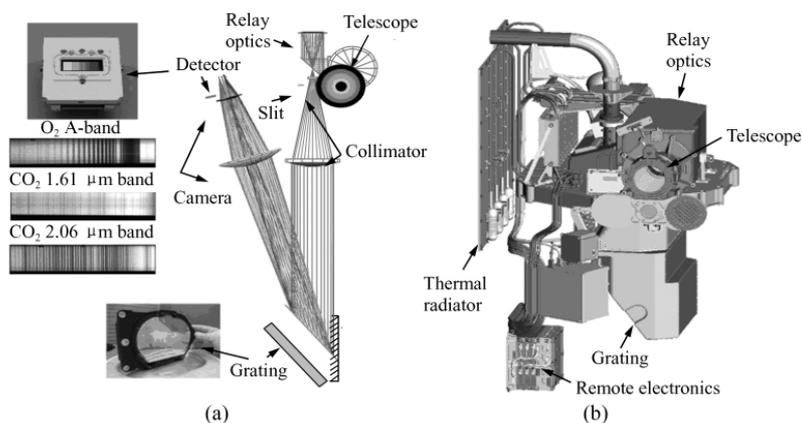


图 15 OCO 光学系统观测结构图

Fig. 15 Structure diagram of OCO optical system

在每个通道中,被分散开的光谱在每个探测器阵列(FPA)的光谱维方向(spectral dimension)投射在所有的 1 024 pixel 上。而由于狭缝长度的限制,光在 FPA 的空间维方向上只投射在大约 190 pixel 上。OCO 探测器使用一个 190 pixel 中的 160 pixel 来定义沿着狭缝的视场。在一般的科学操作中,FPA 以 3 Hz 频率连续不断地读出数据。为了降低下传数据速率并提高信噪比,在 FPA 平行于狭缝维方向相邻的 20 pixel 产生 8 个空间平均光谱。沿着每一个空间平均光谱合并像元的狭缝角视场约为 1.8 mrad(0.1°,705 km 轨

道天底分辨率约为 1.3 km)。狭缝窄带方向的角宽度只有 0.14 mrad 将望远成像系统垂直于狭缝方向的角视场放松到 0.6 mrad,可以简化 3 个分光计的视轴配准。

除了在空间维上扩展出 8 个 1 024 pixel 空间平均光谱,每个分光计也返回 4~20 个光谱采样来提供沿着狭缝方向完整的空间分辨率。每一个完整的分辨率覆盖了 FPA 上的 220 pixel 宽。使用这些完整的空间分辨率颜色条纹来探测空间可变性并监测热辐射和仪器的杂散光,见图 16 和图 17^[31-33]。

- Requirements:
 - ≥ 10 km swath
 - ≥ 5 cross-track samples
 - ≥ 24 samples/s
 - ≤ 3 km²/sample
- Implementation
 - Swath: (10.3 ± 0.3) km
 - X-track samples: 8
 - Samples/s: 24
 - Sample area: 2.92 km²
- Comments
 - Swath was set at (10.3 ± 0.3) km
 - 10.0 km is minimum
 - 10.6 km hits the 3 km² limit

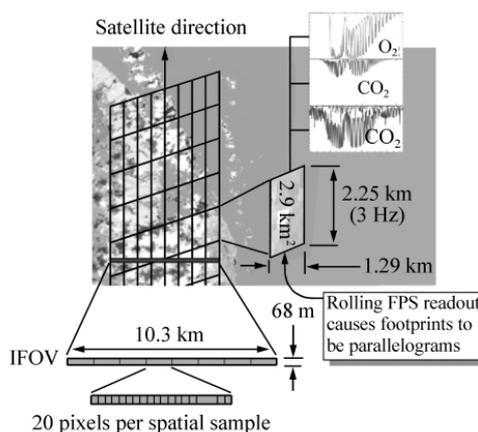


图 16 OCO 的分辨率和覆盖宽度实现方法

Fig. 16 Resolution and swath realizing method of OCO

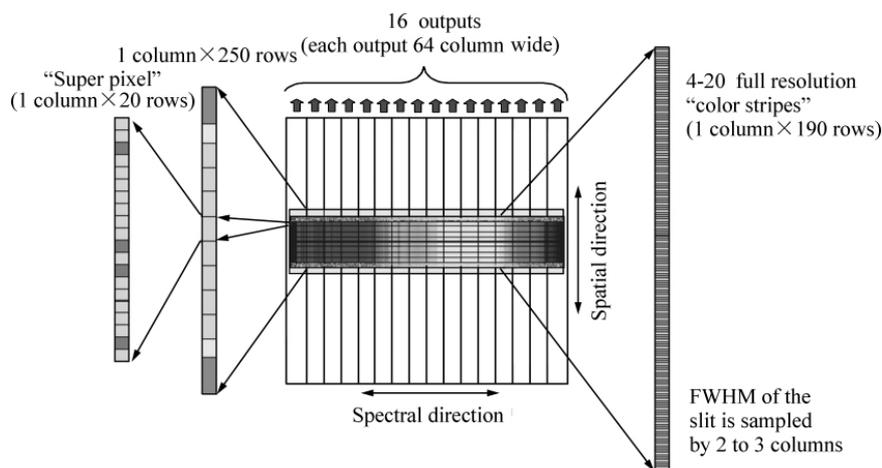


图 17 OCO 的光谱像元合并方法

Fig. 17 Spectral pixel admixture method of OCO

3 温室气体遥感探测仪器的发展趋势

温室气体探测是一个长期的观测过程,当前拟议的中德合作 CarbonSat 卫星星座观测大气 CO₂的工作即针对在短期内实现 CO₂探测的全球覆盖,从空间分辨率和时间周期两个方面提出了较高的要求,其能够在 24 h 内以 2 km × 2 km 的地面分辨率实现全球覆盖观测,5 颗星的星座协同工作,一次覆盖地面达 2 500 km。

此外,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的动态微镜阵列高光谱仪器也是温室气体遥感探测仪器发展的一个重要方向,这种新型高光谱成像仪可以快速大面积地获取大气成分的高信噪比光谱信息^[34]。

从当前的应用需求和技术发展来看,未来 CO₂及其他温室气体探测技术的发展主要向以下几个方面发展:

- (1) 高光谱分辨率,提高观测精度;
- (2) 高空间分辨率,地面分辨率达到 1 km × 1 km;
- (3) 宽覆盖范围,覆盖宽度在 1 000 km 以上;
- (4) 高信噪比,便于后期反演工作;
- (5) 短覆盖周期,监视温室气体短期内的

变化。

4 结束语

温室气体遥感观测技术可以快速、经济、可重复地获取宏观尺度上大气痕量气体的信息,相对于传统的监测站方式具有无可比拟的优势,欧美发达国家都相继开展了温室气体遥感探测仪器的研究,以期掌握碳排放量的第一手资料,在国际碳减排谈判中占据主动地位。

国内主要有中科院安徽光机所、长春光机所及上海技物所从事该领域的研究工作。其中安徽光机所在中科院重点创新项目的支持下,研究了大气 CO₂探测中使用高分辨率红外光谱的必要性,并且分析了地基高精度大气 CO₂探测所需要的工作波段、光谱分辨率和信噪比(SNR)等参数,以此为基础研制了空间外差 CO₂探测仪样机^[35]。

在国家 863 计划支持下,中科院长春光机所立足现有研究基础,充分借鉴世界先进温室气体遥感探测技术的成功经验,瞄准技术前沿开展工程研究。相信在相关科技人员的共同努力下,该项研究将缩短我国在温室气体遥感探测仪器方面与世界先进水平的差距。

参考文献:

- [1] 刘毅,吕达仁,陈洪斌,等. 卫星遥感大气 CO₂ 的技术与方法进展综述[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 247-254.
- LIU Y, LÜ D R, CHEN H B, *et al.*. Advances in technologies and methods for satellite remote sensing of atmospheric CO₂ [J]. *Remote Sensing Technology and Appl.* 2011, 26(2): 247-254. (in Chinese).
- [2] KING J I F. *Scientific Use of Earth Satellites* [M]. Ann Arbor Michigam: Ann Arbor University of Michigan Press, 1956: 133-136.
- [3] GKAPLAN L D. Inference of atmospheric structure from remote radiation measurement [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49(10): 1004-1007.
- [4] SMITH W L, WOLF H M, HAYDEN C M, *et al.*. The TIROS-N operational vertical sounder [J]. *Bull. American Meteorological Society*, 1979, 60: 1177-1187.
- [5] PERSKY M J. A review of spaceborne infrared Fourier transform spectrometers for remote sensing [J]. *Rev. Sci., Instrum.*, 1995(66): 4763-4797.
- [6] KOBAYASHI H, SHIMOTA A, YOSHIGAHARA C, *et al.*. Satellite-borne high-resolution FTIR for lower atmosphere sounding and its evaluation [J]. *IEEE T. Geosci. Remote*, 1999, 37(3): 1496-1507.
- [7] KOBAYASHI H, SHIMOTA A, KONDO K, *et al.*. Development and evaluation of the interferometric monitor for greenhouse gases: a high-throughput Fourier-transform infrared radiometer for nadir Earth observation [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(33): 6801-68047.
- [8] GILE J C, PAN L, SMITH M W, *et al.*. Retrieval of carbon monoxide profiles and total methane from MOPITT measurements [J]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994, 2: 684-686.
- [9] AUMANN H H, MILLER C R. The Atmospheric Infrared Sounder(AIRS) on the earth observing system [J]. *SPIE*, 1995, 2583: 332-343.
- [10] BOVENSMANN H, BURROWS J P, BUCHWITZ M, *et al.*. SCIAMACHY-Mission objectives and measurement modes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 1999, 56(2): 127-150.
- [11] SOUCY M-A A, CHATEAUNEUF F, DEUTSCH C. ACE-FTS instrument detailed design [J]. *SPIE* 2002, 4814: 70-81.
- [12] BEER R. TES on the aura mission: scientific objectives, measurements and analysis overview [J]. *SPIE* 2000, 4004: 600-611.
- [13] BLUMSTEIN D, CHALON G, CARLIER T. IASI instrument: technical overview and measured performances [J]. *SPIE*, 2004, 5543: 196-207.
- [14] SHIMODA H. Overview of Japanese earth observation programs [J]. *SPIE* 2009, 7474: 74740G-1.
- [15] NEECK S P, VOLZ S M. NASA's earth science missions overview [J]. *SPIE* 2009, 7474: 74740B-1.
- [16] MICHAEL B, HEINRICH B, MAXIMILIAN R, *et al.*. Passive satellite remote sensing of carbon dioxide and methane: SCIAMACHY, GOSAT, CarbonSat [J]. *Geophys Res Abstracts* 2011, 13: 6556.
- [17] MAGER R, FRICKE W, BURROWS J P. SCIAMACHY a new-generation of hyperspectral remote sensing instrument [J]. *SPIE*, 1997, 3106: 84-94.
- [18] ZOUTMAN E, OLIJ C. Calibration approach for sciamachy [J]. *SPIE*, 1997, 3117: 306-316.
- [19] WERIJ H, OLIJ C, ZOUTMAN A E, *et al.*. SCIAMACHY the completion of a new-generation instrument for studying the atmosphere [J]. *SPIE*, 1997, 2957: 20-30.
- [20] AUMANN H H, CHAHINE M T, CAUTIER, *et al.*. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems [J]. *IEEE T. Geosci. Remote* 2003, 41(2): 253-264.
- [21] MORSE P, BATES J, MILLER C. Development and test of the atmospheric infrared sounder(AIRS) . infrared spaceborne remote sensing [J]. *SPIE*, 1999, 3759: 236-253.
- [22] MILLER C R. Status of the Atmospheric Infrared Sounder(AIRS) [J]. *SPIE*, 1996, 2961: 73-90.
- [23] BROBERG S E, PROBERG T S, AUMANN H H. Atmospheric sounding at JPL: current and future technologies. infrared

- technology and application[J]. *SPIE* 2003 5074: 600-611.
- [24] BLUMSTEIN D ,BLUMSTEIN B ,CAYLA F R. In-flight performance of the infrared atmospheric sounding interferometer (IASI) on METOP-A[J]. *SPIE* 2007 6684: 66840H-1.
- [25] SIMEONI D ,ASTRUC P ,MIRAS D *et al.* . Design and development of IASI instrument[J]. *SPIE* 2004 5543: 208-219.
- [26] KUZE A ,URABE T ,SUTO H *et al.* . The instrument and the BBM test results of thermal and near infrared sensor for carbon observation(TANSO) on GOSAT. Infrared Spaceborne Remote Sensing[J]. *SPIE* 2006 6297: 62970K-1.
- [27] HAMAZAKI T. Greenhouse gases observation from space-overview of TANSO and GOSAT[C]//Proc. of the 7th ICSO (Interenational Conference on Space Optics) ,Oct 14-17 2008 ,Toulouse ,France 2008.
- [28] Thermal and near infrared sensor for carbon observation(TANSO) on board the greenhouse gases observing SATellite (GOSAT) research announcement appendix A ,outlines of GOSAT and TANSO sensor[EB/OL]. (2010-08-09) [2011-09-17]http://www.gosat.nies.go.jp/eng/proposal/download/GOSAT_RA_A_en.pdf.
- [29] THOMAS R L ,DAVID C. The NASA orbiting carbon observatory(OCO) mission: objectives , approach and status[G]//Pasadena ,CA: Jet Propultion Laboratory ,National Aeronautic and Space Administration 2008: 1-5.
- [30] CRISP D ,MILLER C E ,DECOLA P L. NASA orbiting carbon observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space[J]. *J. Appl. Remote Sensing* 2008 2(1) : 1-14.
- [31] HARING R ,POLLOCK R ,SUTIN B. Current development status of the orbiting carbon observatory instrument optical design. Infrared Spaceborne Remote Sensing[J]. *SPIE* 2005: 5883: 58830C-1.
- [32] POLLOCK R ,HARING R E ,HOLDEN J R. The orbiting carbon observatory instrument: performance of the OCO instrument and plans for the OCO-2 instrument: sensors , systems and next-generation satellites XIV [J]. *SPIE* 2010 7826: 78260W-1.
- [33] CRISP D. The orbiting carbon observatory: NASA's first dedicated carbon dioxide mission: sensors , systems , and next-generation satellites XII [J]. *SPIE* 2008 7106: 710604-1.
- [34] LOVE S P. Programmable matched filter and Hadamard transform hyperspectral imagers based on micro-mirror arrays [J]. *SPIE* 2009 7210: 721007-1.
- [35] 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) : 1-7.
- WU J ,WANG X H ,FANG Y H *et al.* . Ability analysis of spatial heterodyne spectrometer in atmospheric CO₂ detection [J]. *Acta Optica Sinica* 2011 31(1) : 1-7. (in Chinese)

作者简介: 郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: zhengyq@sklao.ac.cn