

风云三号卫星红外高光谱探测技术及潜在应用

漆成莉¹ 顾明剑² 胡秀清¹ 吴春强¹

(1 中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 国家卫星气象中心, 北京 100081;

2 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 高光谱大气探测仪具有高光谱分辨率、高灵敏度和高精度光谱辐射定标等特点, 在大气湿度廓线反演、数值天气预报同化、气候变化研究以及大气痕量气体探测等应用上有显著的优势。我国风云三号极轨气象卫星的FY-3A/B/C三颗卫星上成功装载了自主研制的通道式红外探测仪器—红外分光计 (IRAS), 获取了从可见光到红外波长范围内26个通道的辐射观测, 并应用于资料同化、全球大气温度和水汽廓线反演等。从FY-3D星开始将装载红外高光谱大气探测仪以替代IRAS, 标志着红外高光谱大气垂直探测系统新纪元的开始。以风云三号卫星红外高光谱大气探测仪为例, 介绍了卫星红外高光谱探测技术的进展和地面应用系统预处理过程的关键技术环节, 给出了红外高光谱资料的潜在应用, 并对在数值天气预报同化和大气探测应用方面的难点问题进行了分析和探讨。

关键词: 风云三号, 高光谱干涉仪, 资料同化

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.013

FY-3 Satellite Infrared High Spectral Sounding Technique and Potential Application

Qi Chengli¹, Gu Mingjian², Hu Xiuqing¹, Wu Chunqiang¹

(1 Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081 2 Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

Abstract: High spectral infrared sounders possess distinct advantages in application of atmospheric temperature and humidity profiles retrieval, numerical weather prediction (NWP), climate change study and trace gas measurement due to high spectral resolution, low radiometric noise and high spectral and radiometric accuracy. Infrared Atmospheric Sounder (IRAS) was successfully launched onboard FY-3A/B/C satellites. It measures 26 channels of radiance from visible to infrared spectral range and was used in data assimilation, global atmospheric temperature and humidity profile retrieval, et al. A high spectral infrared atmospheric sounder (HIRAS) designed and manufactured completely by China will be carried onboard FY-3D, marking a new epoch of infrared high spectral vertical sounding system in China. FY-3D /HIRAS was taken as an example, and satellite infrared high spectral sounding technique and key preprocessing issues of high spectral infrared sounders were summarized as well as analysis and discussion of difficult problems that exist in high spectral infrared data application of NWP and climate study.

Keywords: FengYun 3, high spectral sounder, data assimilation

0 引言

红外探测仪器是利用热红外波段对地球大气垂直分布、地表等参数遥感的一类仪器, 其共有特点是根据地球大气中不同波长发射辐射的平均自由程不同, 其辐射贡献的峰值高度层也不同, 即权重函数位于不同高度大气层, 在大气窗区及气体吸收带翼区和中心

设置不同的通道来探测大气垂直结构, 采用的分光技术主要有滤光片分光、光栅分光和干涉分光等。主要遥感参数包括三维大气温度、湿度廓线, 大气状态和云、气溶胶、臭氧等大气成分的三维垂直结构, 以及地气系统的辐射收支等。这类仪器观测资料和产品主要应用在数值天气预报、空气质量监测、气候变化监测、全球辐射能量收支、大气微量气体变化等领域。

分光技术是红外大气探测仪器研制过程的关键技术, 可以采用滤光片轮、光栅或干涉技术来实现, 并衍生出不同技术方案的探测仪器。滤光片分光仪器光谱分辨能力 (通道响应函数中心波长 λ 和通道响应函

收稿日期: 2015年9月17日; 修回日期: 2015年12月28日

第一作者: 漆成莉 (1979—), E-mail: qiel@cma.gov.cn

资助信息: 国家高技术研究发展计划 (2015AA123701); 国家自然科学基金 (41275104); 中国科学院红外探测与成像技术重点实验室开放课题

数半峰全宽 $\Delta\lambda$ 的比值 R)仅为50~100左右,光栅和干涉分光仪器的光谱分辨能力要高于1000。

世界上第一个探测类仪器—光栅分光仪,也称红外辐射分光仪(SIRS-A),于1969年4月载于美国雨云3号试验天气卫星(NIMBUS-3)^[1]。SIRS-A在15 μm CO₂吸收带选择8个红外谱段,星下点水平分辨率259km,用于探测大气温度廓线。虽然SIRS-A资料的垂直分辨率低,瞬时观测视域很大,大约90%以上的测值受到云的干扰,但仍然给当时的天气分析/预报业务带来了改进效果。HIRS(高分辨红外辐射探测仪)为跨轨扫描,且具有较高分辨率的红外辐射探测器,由20个通道组成,即19个红外通道和1个可见光通道^[2]。其中位于15 μm CO₂吸收带的7个通道和位于4.3 μm CO₂吸收带的5个通道,主要用于探测大气温度的垂直分布;位于6.3 μm H₂O吸收带的3个通道,主要用于探测大气湿度的垂直分布;位于11~12和3.7~4.1 μm 的6个窗区通道,主要用于探测地表温度和云检测。HIRS的星下点水平分辨率为17.4km。美国静止气象卫星(GOES)上携带的大气红外探测仪是GOES-Sounder,其通道设置类似于NOAA卫星上的HIRS^[3]。

我国2008年及之后成功发射的FY3A/B/C星上均装载了滤光片式红外大气探测仪器—红外分光计(IRAS)。IRAS在0.69~15 μm 的光谱范围内设置了26个通道,前20个通道设置类似于NOAA/HIRS仪器,另外增加了6个可见近红外通道,用于大气温湿度廓线的探测^[4]。

1987年,世界气象组织(WMO)曾指出,只有当全球大气温度、湿度探测的精度达到无线电探空的水平后,才能对数值天气预报做出重大的改进。无线电探空的精度相当于在对流层大气温度的均方根误差(RMS)精度达到1K,大气湿度的精度达到10%,大气廓线的垂直分辨率达到1km。与需求相比,通道式探测仪器由于受滤光片式分光技术的限制,光谱和辐射测量精度不足,约2.0K和20%的反演精度和几千米的探测垂直分辨率已经基本上达到了滤光片式大气垂直探测仪的能力的上限,无法满足发展中的数值天气预报的需要,因此人们把发展红外高光谱技术放到了首位。

1 红外高光谱仪器的发展

实现高光谱分辨率红外大气探测的技术途径主要有两种:光栅技术和干涉技术。实践表明,在星上实现光栅技术成本高,技术难度更大,这是因为光栅分光降低了入射到仪器探测器部分的光通量,要求红外探测器具有极高的探测灵敏度。光栅的不均匀性,使得探测得到的上千个光谱通道需要逐一进行星上光

谱和辐射定标,极大地增加了仪器设计和资料预处理的难度。星上环境对光栅造成的热变形效应,更给探测资料的处理引入了大量的随机误差,降低了资料反演的精度。干涉分光的优势之一是高光通量,它通过Fourier变换空间或时间序列调制的干涉图,恢复得到高光谱分辨率的大气准连续吸收光谱。同时,光路设计上不会对入射光束过多地分束,也不会降低仪器探测的光通量。

目前有三个高光谱大气探测仪器在轨运行,AIRS是首个在卫星上实现真正意义上的高光谱分辨率红外大气探测的仪器,于2002年5月4日载于美国NASA EOS-Aqua卫星,红外3.7~15.4 μm 范围内有2378个通道,光谱分辨能力大于1200,绝对辐射测量精度优于0.2K,跨轨扫描幅宽2650km,星下点分辨率13km,用于探测大气温、湿廓线、臭氧总量等。2006年10月19日,欧洲气象卫星应用组织(EUMETSAT)的第一颗极轨气象卫星Metop-A把法国研制的迈克尔逊干涉分光技术的高光谱红外大气探测器IASI带入太空。IASI除了分光技术不同于AIRS外,最大特点是实现了对地球大气在3.62~15.5 μm 范围的连续光谱观测,光谱分辨率0.5 cm^{-1} ,光谱采样0.25 cm^{-1} ,共8461个通道,星下点分辨率12km,跨轨扫描幅宽2052km。利用IASI高分辨率连续光谱观测,还可提取大气其他成分,如CO、N₂O、CH₄、SO₂。2011年10月28日,美国新一代极轨气象卫星系列JPSS的准备星NPP(后更名为Suomi NPP)把高光谱红外探测器CrIS带入太空,采用干涉分光技术,三段式光谱覆盖探测(0.92~15 μm)共1305个通道,在长、中、短波段的光谱分辨率分别为0.625 cm^{-1} 、1.25 cm^{-1} 、2.5 cm^{-1} ,跨轨扫描幅宽2200km,星下点分辨率14km^[5]。欧洲的高光谱分辨率红外大气探测仪(IRS)是为装载到EUMETSAT新一代三轴姿态稳定的静止气象卫星MTG(计划于2017年左右发射)系列而研制的,以实现同一地域的高频次、高垂直分辨率的大气温、湿廓线等探测。

中国正在研制并将装载到计划于2016年发射的FY-3D和新一代静止气象卫星FY-4的高光谱红外大气探测器,分别称HIRAS、GIIRS,这两个仪器均采用干涉分光技术。为了让用户深入了解红外高光谱仪器,推动卫星数据的应用,本文重点以风云三号红外高光谱大气探测仪为例,介绍红外高光谱仪器的组成及观测原理,以及数据处理关键技术和难点,探讨红外高光谱仪器的潜在应用和在应用中需要进一步攻关的技术难题。

2 FY-3D红外高光谱大气探测仪

2.1 仪器简介

FY-3D红外高光谱大气探测仪（HIRAS）将是FY-3极轨气象卫星系列上的首个高光谱红外探测仪器，由中国科学院上海技术物理研究所研制，这是我国自主研发、制造的红外高光谱精密光机遥感仪器。仪器采用二维指向补偿、干涉仪前置、冷光学、大冷量辐射制冷、小面阵红外探测器技术路线，实现与国际同类仪器相当的光谱分辨能力和系统灵敏度等高性能探测能力^[6]。表1和2给出了该仪器的主要技术性能设计指标。

表1 FY-3D/HIRAS红外高光谱大气探测仪技术指标
Table 1 FY-3D/HIRAS instrument characteristics

参数	特征
扫描周期	10s
视场角	1.1°
像素/扫描线	58
最大扫描角度	±50.4°
辐射定标精度	0.7K
光谱定标精度	7ppm
光轴星下点指向偏差	<±0.25°

表2 FY-3D/HIRAS红外高光谱大气探测仪通道光谱特征参数
Table 2 FY-3D/HIRAS spectral characteristics

波段	光谱范围 (cm ⁻¹)	光谱分辨率 (cm ⁻¹)	灵敏度 (用户) (NEAT@250K)	通道数目
长波IR	650~1136 (15.38~8.8μm)	0.625	0.15~0.4K	778
中波1 IR	1210~1750 (8.26~5.71μm)	1.25	0.1~0.7K	433
中波2 IR	2155~2550 (4.64~3.92μm)	2.5	0.3~1.2K	159

红外高光谱大气探测仪在轨期间有三种工作模式，即发射入轨初期模式、对地扫描模式和定标模式。发射入轨初期，仪器需要进行干涉仪动镜解锁，防污罩加热去污，在辐射制冷温度达到工作温度后，进行干涉仪星上光校。对地扫描模式是红外高光谱大气探测仪的常规观测模式，此模式下扫描镜跨轨扫描工作，共观测29个驻留视场，每个视场包括4个像素。红外高光谱大气探测仪仪器设计采用多元小面阵并行观测，可以同时延长干涉图的形成时间，并且尽可能多的形成对地观测瞬时视场。三个小面阵同时观察地面的同一目标视场，各波段的小面阵探测器同时观测4块不同目标区域，每一个探测元对地观测张角为1.1°，对应星下点地面瞬时视场大小约为16km，像元之间地面距离26.17km（图1）。探测器将干涉光学产生的干涉信号转换为电信号，经过信号处理与放大，并数字化后传输给卫星数据传输系统。定标模式指每条扫描线均扫描两次冷空间和两次内黑体定标源进行辐射定标。地面大气辐射经45°扫描镜

扫描后，反射进入干涉仪子系统，由分束器分成两路相干光，一路由分束器反射的光线经过定镜反射后，再次透射分束器；另一路分束器透射的光线经过动镜反射后，回到分束器，并被分束器表面反射，动镜在往复运动控制下，两路光线的光程差随动镜的运动位置不同而不同，从而使得干涉光光强信号随光程差而发生变化，动镜一次平稳运动可以得到一幅目标的双边干涉图。入射能量经过干涉子系统后形成干涉光进入望远镜系统，望远镜系统收集光束后进入分色片将入射能量按光谱分开，分别使用长波分色片和中波分色片分离长波通道（8.8~15.38μm）、中波1通道（5.71~8.26μm）和中波2通道（3.92~4.64μm）的辐射信号，并经透镜汇聚到探测器上。

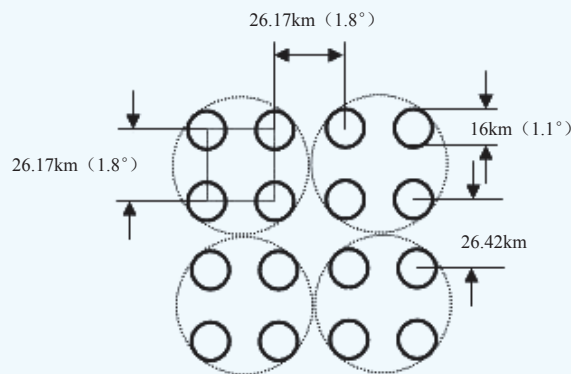


图1 探测器对应地面视场图

Fig. 1 HIRAS detector ground projection of field of view size

在干涉系统中使用标准参考光谱为干涉光谱信号提供光谱谱线基准和电子学采样信号的时间基准。标准参考光谱使用的是长寿命的高稳频激光器作为信号源，激光信号与目标信号共用干涉光路，在动镜运动时，同时对激光信号和地气系统的目标信号进行调制，使用硅光探测器检测激光的干涉信号，该干涉信号的变化严格对应干涉系统的光程差变化，由于共用动镜运动系统，由此得到的激光干涉信号就提供了对目标干涉图进行等光程差采样基准，为目标光谱图的准确反演提供了技术保障。

2.2 仪器技术方案

红外高光谱大气探测仪系统主要由光学系统、干涉仪子系统、探测器子系统组成。光学系统作为收集和分析地球和大气辐射的部件，负责将观测目标的红外辐射信号接收并汇聚到探测器上，包括扫描、干涉分光、汇聚、分色、再汇聚等一系列过程。望远镜系统位于干涉仪子系统之后，主要功能是将干涉调制信号收集汇聚。中继光学系统功能是将望远镜系统汇聚的光按系统要求的波段进行分色并使各波段的光进入

对应通道,包括转折反射镜、红外窗口,分色片、视场光阑等。HIRAS的探测扫描是通过二维扫描机构带动扫描镜进行工作,扫描镜在力矩电机的驱动下做跨轨扫描运动,在扫描镜驻留观测时,直线电机驱动扫描镜完成沿轨补偿运动。干涉仪的主要功能是使输入的红外辐射产生自调制,接收遥控指令,向外输出红外干涉信号、采样控制信号以及干涉仪状态遥测信息等。干涉仪包括红外干涉和激光干涉两个组成部分。

红外高光谱探测仪要求在地面模拟真空低温环境进行光学性能的装校和测试,其分色片及各通道组件需置于低温工作环境,探测器组件工作于85K。长波探测器采用HgCdTe探测器,中波1采用HgCdTe探测器,中波2采用Insb探测器。3个红外波段的探测器分别封装成3个组件,每个探测器组件包含4元探测器。制冷系统对红外探测器和中后继光路制冷,以提高整机灵敏度和减少仪器背景辐射影响。

3 地面预处理关键技术

红外高光谱大气的探测仪采用复杂的光机结构,具备较强的星上处理功能,同时需要地面和卫星系统密切配合,实现多环节预处理和光谱辐射定标处理,才能生成高精度的L1产品。针对地面数据处理过程,核心处理技术包括星上和定标前处理技术、精准辐射定标,精准光谱订正、预处理产品精度验证和质量控制等(图2)。针对红外高光谱大气探测仪获取的地球场景和定标目标原始干涉图数据,进行星上模拟信号采样、噪音检测、压缩、滤波抽样、脉冲计数等处理技术研究。干涉仪精准辐射定标是针对黑体、冷空等定标源的周期观测,深入研究定标源可能受到的太阳和月亮污染并进行精确订正;精确引入仪器背景辐射模型和黑体发射模型;并基于二次谐波能量分析从干涉信号中识别出非线性特征;基于干涉图的非对称性研究相位误差导致的复数定标方法。由于干涉仪辐射与光谱的紧密耦合问题,需要开展干涉仪精准光谱订正,在轨光谱订正处理包括仪器线型函数ILS的确定和波长位置的确定,激光器频率稳定和影响ILS函数的探元离轴问题,离线光谱订正需要采用辐射传输模拟地球目标光谱来订正仪器的固定光谱偏差。

一个新型仪器的观测数据必须在对其观测误差、仪器噪声等特征有了足够的了解和评估后才能给用户使用,尤其是气候监测和数值预报同化用户。因此经过辐射定标和光谱定标等一系列预处理转换后的卫星观测结果还需要借助可靠的评估方法进行精度验证,基于偏差分析结果实现对定标参数优化以及数据质量的控制。仪器观测系统的偏差来源于多个方面,如定标过程的不确定性(如太阳污染、探测器非线性

等),对在轨光谱响应函数变化的未知性,偏差特性还会随时间和扫描角度的变化,随轨道和季节变化等,只有突破了红外高光谱干涉仪高精度定标的一系列关键技术,才能加深气象卫星用户和仪器研制方对干涉仪器的工作原理、数据特征、精准定标等方面的技术理解,生成高光谱干涉仪高精度一级产品,提升我国在高光谱仪器研制和资料处理及同化应用方面的能力,确立我国在相关技术上的国际地位。

4 红外高光谱资料的应用展望

十多年来,国内外学者在星载红外高光谱大气探测资料应用方面开展了大量研究工作,取得了许多有益的进展^[7]。这里基于已有研究,探讨我国风云三号卫星红外高光谱大气探测仪器资料的潜在应用能力和需要攻破的技术难点。

4.1 数值天气预报应用

我国红外高光谱探测仪器的首要应用目标是数值天气预报(NWP)同化应用,即通过观测的大气发射/吸收光谱来得到高垂直分辨率、高精度的大气温湿度廓线信息作为NWP的初始场。为了建立初始场的最优估计,利用同化技术把观测与预报模式结合起

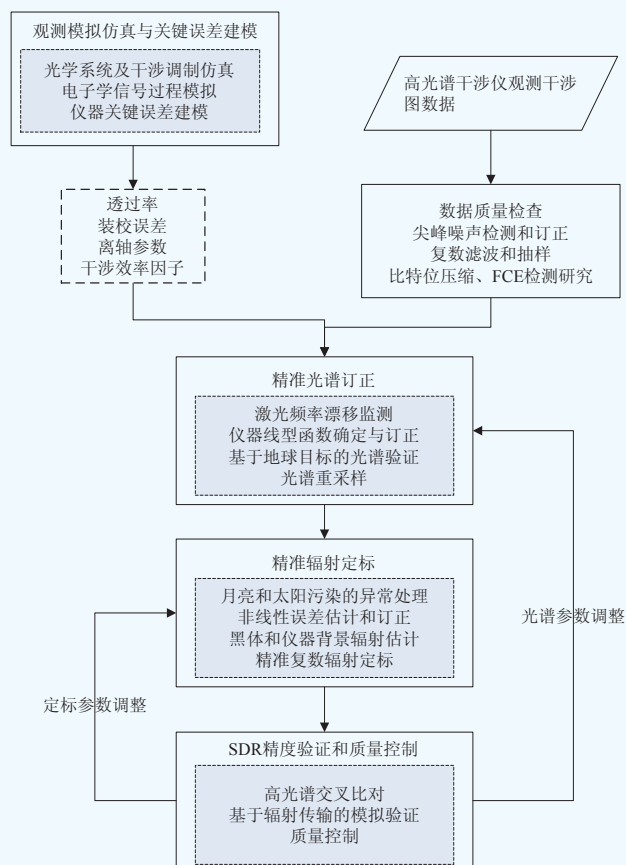


图2 HIRAS地面预处理关键技术路线图

Fig. 2 HIRAS ground processing key technology route chart

来,如今最常用的是四维变分同化技术(4DVAR)。卫星探测类仪器如微波仪器、红外高光谱仪器成为支持数值预报的全球观测系统的重要部分,在过去二十年里迅速成为对NWP影响最大的观测资料,超过当前同化的任何其他观测资料^[8]。全球多个数值天气预报中心报告显示,目前的业务同化预报系统中,就单个仪器资料对模式的贡献率,高光谱红外探测仪对同化预报效果的影响最大。对NWP应用而言,位于 $645\sim 800\text{cm}^{-1}$ ($15.5\sim 12.5\mu\text{m}$) 光谱区域范围内的 CO_2 吸收线主要提供的是大气温度廓线信息;位于 $800\sim 1200\text{cm}^{-1}$ ($12.5\sim 8.3\mu\text{m}$) 光谱区域是大气窗区,包含了地表温度和近地面的水汽信息; $1200\sim 1600\text{cm}^{-1}$ ($8.3\sim 6.3\mu\text{m}$), 提供了水汽的垂直分布信息。

此外,由于高光谱仪器的光谱分辨率高(超过1000个通道),即大气垂直分辨率高,以及低噪声水平,因此包含了比以前的通道式业务垂直探测仪器多一个量级以上的大气结构信息。目前制约红外高光谱仪器观测同化应用的难点之一是有云资料的同化,大部分NWP中心可以同化使用简单云模式模拟计算的有云视场观测,如薄云、完全有云、高云视场,而对复杂的多层云的情况还未找到可行的解决方案,仍然是一个活跃的研究方向^[9]。同化卫星观测的难点之二是水汽观测的同化效果很不显著,原因是有仪器对水汽含量的非线性响应,以及水汽含量的高时空变化性。要开发出更先进的可以同化有云和水汽观测的方案,需要数据同化方案、辐射传输模式以及NWP模式本身均取得重要进展^[10-11]。最近有研究直接利用干涉图观测数据进行产品反演,例如直接用干涉图来代替选取的部分独立通道辐射进行水汽反演,则能得到更好的垂直分辨率和精度^[12-13]。

4.2 天气预警应用

在大气的红外窗口区存在很多较弱的水汽和 CO_2 吸收线,这些吸收线光谱区的辐射能够提供检测对流层低层热力结构变化的关键信息,红外高光谱仪器的光谱分辨率提高后,不仅可以获取更高精度的大气参数,更重要的是提高了大气探测在垂直方向上的分辨率,这给卫星资料应用提供了很大优势。AIRS仪器在轨工作后,CIMSS开发了可表征大气不稳定状态的几种大气不稳定度指数产品,分析其在中尺度大气环流场和突发性强对流天气中的应用个例。在强风暴发生前,卫星高光谱大气探测器观测的大气湿度和温度的水平和垂直分布信息能够提供更丰富的中尺度环流信息,如大气不稳定度和边界层结构等与风暴触发相关的指标,这些指标对于强风暴的邻近预报和短期预报都非常重要^[14]。大气不稳定指数可以使用台站资

料、数值预报输出、再分析资料以及卫星反演的温湿度廓线,与云参数、大气可降水量等卫星产品结合使用,可为强对流事件提供更丰富的预警信息。Li等^[14]用WRF模式模拟低光谱ABI和高光谱仪器HES红外辐射,在垂直方向上,HES的垂直分辨率远高于ABI,在红外区有超过1000个光谱通道,能准确体现湿空气向上抬升并与干空气混合的过程,大大提高了对水平和垂直方向上大气温度和湿度信息时间演变的刻画精度,对强对流天气的邻近预报十分有利。

目前国际上在轨的红外高光谱仪器具有相似的分辨率和探测精度,综合使用这些资料可以提高卫星资料的时间和空间覆盖。我国风云三号和风云四号气象卫星上的红外高光谱大气探测仪器(GIIRS)将会协同观测,提供更高频次的大气温湿度廓线和不稳定度指数产品,为改进天气预警服务提供重要信息。

4.3 大气成分反演应用

红外高光谱数据的第三个重要应用目标是大气成分反演和监测,可以反演痕量气体和气溶胶的垂直分布廓线,如臭氧、一氧化碳、甲烷等,在空气质量监测中显示了极大的潜力,而且可以提供长期连续的大气成分记录用于研究其年际变化^[15]。红外 $15.3\mu\text{m}$ 、 $4.3\mu\text{m}$ 波段是很强的 CO_2 吸收带,加之高光谱仪器的信噪比表现和光谱分辨率都比过去通道式红外观测跨越了一个量级以上,基于红外高光谱观测可以得到高层大气中 CO_2 信息。AIRS、IASI观测光谱覆盖了 CH_4 红外 $7.6\mu\text{m}$ 、 $3.7\mu\text{m}$ 波段,能用于大气中 CH_4 浓度时空分布变化监测^[16], $4.6\mu\text{m}$ 波段观测也可以用于CO时空分布变化的遥感监测。

红外高光谱观测还可以用于测量一些过去认为从太空不能探测到的活性气体种类的浓度,如氨气^[17],以及用于一些近实时突发事件的探测,如火灾和火山爆发等。大气成分的反演方法有基于目标成分的敏感性波段观测数据,通过对目标成分廓线的非线性迭代,最终实现模式模拟光谱与观测光谱拟合,得到最可能的大气成分的廓线信息;也可以基于神经网络方法,通过构造合适的网络结构,快速提取卫星大气参数。但实现上述诸多应用的先决条件是仪器光谱辐射的精准定标,对仪器辐射精度要求十分苛刻。大气成分的监测应用有可能成为风云三号卫星红外高光谱大气探测仪器的又一潜在应用目标。

4.4 在气候研究上的应用

目前在轨的红外高光谱观测仪器(AIRS, IASI, CrIS)的性能和定标评估结果显示它们完全有能力用于气候研究。如AIRS资料可以帮助理解和模拟水汽和云等气候分量在大气水文循环过程中的作用,证实

了水汽对气候变暖的响应。2002年以来, AIRS观测数据显示海面温度与250hPa高度的水汽含量呈正相关; AIRS数据也被用来分析2007年异常的北极冰层融化, 分析深对流云(DCC)的发生频率与热带纬向平均表面温度的相关性等。IASI观测已经用于多个重要气候变量(ECVs)的研究及其他重要气候数据库的建立, 这些气候变量包括温度和水汽廓线、云和气溶胶、人为温室气体以及臭氧、地面温度和比发射率等。当数据记录累积超过5年以上, 即可用于研究一些气候变量事件, 如ENSO、赤道辐合带(ITCZ)振荡、热带大气季节内振荡(MJO)事件等。对于全球气候观测系统(GCOS)计划最重要的是构建均匀的、稳健的、长期的气候变量数据记录。红外高光谱仪器的绝对辐射定标精度可达0.2K, 辐射稳定性在 10^{-3} K/a量级, 频率稳定性优于5ppm, 具有很好的探测灵敏度。只要红外高光谱仪器提供的长时间序列的辐射定标数据记录令人满意, 一定能为全球气候变化和模式预测研究做出重要贡献。无疑风云三号卫星的红外高光谱大气探测仪器将为气候研究提供新的重要数据源。

4.5 卫星红外辐射基准的应用

当初建立全球天基交叉定标系统(GSICS)的首要目标之一是为静止轨道成像仪器的红外通道开发出交叉定标产品, 满足其全球统一辐射基准的应用^[18]。由于红外高光谱探测仪器光谱覆盖范围宽, 光谱分辨率高, 辐射一致性和光谱定标精度能达到0.1K和5ppm以下, 因此一直被GSICS列为全球在轨统一的红外辐射交叉定标源。GSICS最初基于Aqua/AIRS作为参考源开发GEO-LEO红外交叉定标算法, 当Metop/IASI发射上天, 其在连续光谱覆盖上更有优势, 从而被采纳为新的红外交叉定标基准源。除了作为GSICS静止卫星红外辐射基准源, 高光谱探测仪还能用于同一平台上的极轨卫星红外通道的辐射基准, 由于同一平台的观测时间同步、空间配准更准确, 因此能获得更多种类的样本用于订正其他仪器红外通道的观测偏差, 包括随角度变化和随轨道变化的误差。即将在轨运行的风云三号红外高光谱大气探测仪器, 有可能成为国际GSICS的一员新兵。

5 总结

简要综述了卫星红外探测仪器的发展。详细介绍了我国FY-3D星将要装载的红外高光谱大气探测仪HIRAS, 包括仪器的结构、观测原理和系统组成以及仪器观测数据预处理中所涉及的核心关键技术。基于国内外已有研究结果, 探讨和分析了风云三号卫星高光谱仪器在天气、气候和环境监测等多领域中的潜在应用。由于风云卫星高光谱探测仪器完全由国内自行

设计和研制, 设计方案和数据特征均和国外同类仪器有很大区别, 尤其在星上数据压缩和处理方面, 因此后端数据应用均需要参考实际卫星在轨测试评估的数据误差特征以及性能指标, 进行相应的开发应用, 这样才能更好地在我国自主的NWP和气候模式应用中发挥最大应用价值。

参考文献

- [1] Wark D Q, Hilleary D T, Anderson S P, et al. Nimbus satellite infrared spectrometer experiment. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*, 1970, 8(4): 264-270.
- [2] Ellingson R G, Yanuk D J, Lee H T, et al. A technique for estimating outgoing longwave radiation from HIRS radiance observations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1989, 6(4): 706-711.
- [3] Smith W L, Revercomb H E, Woolf H M, et al. Improved geostationary satellite soundings for the mesoscale weather analysis/forecast operation. *ESA, Mesoscale Analysis and Forecasting* p 79-83(SEE N 88-11239 02-47), 1987.
- [4] Qi C, Xu H, Yin D. FY3C IRAS on-orbit performance and measurements validation//SPIE Asia Pacific Remote Sensing. *International Society for Optics and Photonics*, 2014: 926409-926409-11.
- [5] Han Y, Revercomb H, Cromp M, et al. Suomi NPP CrIS measurements, sensor data record algorithm, calibration and validation activities, and record data quality. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(22): 12,734-12,748.
- [6] 顾明剑. FY-3(04)星红外高光谱大气探测仪初样设计报告. 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [7] 董超华, 李俊, 张鹏, 等. 卫星高光谱红外大气遥感原理和应用. 北京: 科学出版社, 2013.
- [8] Hilton F, Armante R, August T, et al. Hyperspectral Earth observation from IASI: Five years of accomplishments. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(3): 347-370.
- [9] Lavanant L, Fourrié N, Gambacorta A, et al. Comparison of cloud products within IASI footprints for the assimilation of cloudy radiances. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137: 1988-2003.
- [10] Stengel M, Lindskog M, Undén P, et al. An extended observation operator in HIRLAM 4D-VAR for the assimilation of cloud-affected satellite radiances. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2010, 136: 1064-1074.
- [11] Guidard V, Fourrié N, Brousseau P, et al. Impact of IASI assimilation at global and convective scales and challenges for the assimilation of cloudy scenes. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2011, 137: 975-1987.
- [12] Grieco G, Masiello G, Serio C. Interferometric vs spectral IASI radiances: Effective data-reduction approaches for the satellite sounding of atmospheric thermodynamical parameters. *Remote Sens*, 2010, 2: 2323-2346.
- [13] Grieco G, Masiello G, Serio C, et al. Infra-red atmospheric sounding interferometer correlation interferometry for the retrieval of atmospheric gases: The case of H₂O and CO₂. *Appl Opt*, 2011, 50: 4516-4528.
- [14] Li J, Li J L, Otkin J, et al. Warning information in a preconvection environment from the geostationary advanced infrared sounding system - A simulation study using the IHOP Case. *J Appl Meteor Clim*, 2011, 50: 776-783.
- [15] Clerbaux C, Boynard A, Clarisse L, et al. Monitoring of atmospheric composition using the thermal infrared IASI/METOP sounder. *Atmos Chem Phys*, 2009, 9: 6041-6054.
- [16] Zhang X Y, Bai W G, Zhang P, et al. Spatiotemporal variations in mid-upper tropospheric methane over China from satellite observations. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 3321-3327.
- [17] Clarisse L, Clerbaux C, Dentener F, et al. Global ammonia distribution derived from infrared satellite observations. *Nat Geosci*, 2009, 2: 479-483.
- [18] Hewison T J, Wu X Q, Yu F F, et al. GSICS inter-calibration of infrared channels of geostationary imagers using Metop/IASI. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 2013, 1160-1170.