

引用格式: GUO Yuhang, LI Xiaoying, CHENG Tianhai, *et al.* Hyperspectral infrared atmospheric vertical Sounder-II atmospheric product inversion system design[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2024, 39(4): 850-858. [郭宇航, 李小英, 程天海, 等. 红外高光谱大气垂直探测仪II型大气产品反演系统设计[J]. 遥感技术与应用, 2024, 39(4): 850-858.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2024.4.0850

红外高光谱大气垂直探测仪II型大气产品反演系统设计

郭宇航^{1,2,3}, 李小英^{1,4}, 程天海¹, 李莘莘¹, 张新苑^{1,2,3}, 卢文静^{1,2,3}, 方卫芳^{1,2,3}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 资源与环境学院 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 许健民气象卫星创新中心, 北京 100081)

摘要: 随着全球气候变化的加剧, 大气痕量气体的监测日益受到重视。痕量气体柱浓度和廓线分布成为大气环境监测和全球气候变化研究的数据基础。风云三号E星和风云三号F星搭载的红外高光谱大气垂直探测仪II型(HIRAS-II)提供地气系统的高光谱分辨率红外辐射观测, 可以用来反演高精度的大气成分廓线和柱浓度。基于风云三号E星HIRAS-II, 采用模块化设计和并行计算框架, 集成大气廓线背景库和地表发射率数据库, 使用最优化算法和RFM正向模型, 设计研发了CH₄、O₃廓线及柱浓度产品和CO₂柱浓度产品生产的业务化反演系统。对该反演系统进行测试, 并对反演得到的12景产品精度进行验证, 结果表明: 此反演系统运行稳定, 产品具有较高的精度, 能够为中国进行大气环境监测和全球气候变化研究提供算法和技术支持。

关键词: 风云三号; HIRAS-II; 最优化算法; 大气廓线; 柱浓度

中图分类号: P407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2024)04-0850-09

1 引言

大气成分在地球生态系统中起着重要的作用, 它影响到大气圈层与其他圈层之间的相互作用。随着现代化发展, 人类活动造成的化石燃料燃烧、工业排放、土地类型变化使全球大气成分及其浓度发生了巨大的变化。人类排放的二氧化碳、甲烷等温室气体含量急剧升高, 导致全球变暖、冰川融化、海平面升高等一系列气候—环境问题^[1]。卤素化合物的大量排放并参与光解反应破坏臭氧, 导致极地臭氧洞的形成^[2]。大气中的痕量气体浓度虽低, 但对地气系统的能量收支及生物圈与大气的相互作用

过程却有着不容忽视的作用, 同时痕量气体还间接对全球的生态环境以及气候变化造成严重影响。因此大气痕量气体的研究日益受到重视, 其总量和垂直分布的变化成为了国际上大力发展的研究方向^[3]。大气痕量气体的分析依赖于长期、稳定、高覆盖、精确的观测数据。采用卫星遥感监测的方法, 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。红外光谱区是大气痕量气体的“指纹区”, 富含痕量气体丰富的诊断性光谱特征。因此利用星载高光谱红外探测仪研究大气痕量气体具有不可比拟的优势^[4]。

我国自主研发的第二代极轨气象卫星系列的

收稿日期: 2023-09-18; 修订日期: 2024-06-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0606400), 基础加强计划技术领域基金(2023KJCY0193), 单位委托项目(2023KJCY0032)。

作者简介: 郭宇航, 硕士研究生, 主要从事大气定量遥感研究。E-mail: guoyuhang21@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 李小英, 博士, 副研究员, 主要从事大气成分反演算法研究。E-mail: Lixy01@radi.ac.cn

风云三号E星和风云三号F星分别于2021年7月5日和2023年8月3日在酒泉卫星发射中心成功发射,两颗卫星搭载的红外高光谱大气垂直探测仪(II型)(Hyperspectral Infrared Atmospheric Vertical Sounder-II, HIRAS-II)观测光谱覆盖 $650\sim 2\,550\text{ cm}^{-1}$ 范围,共计3 041个光谱通道,可提供地气系统的高光谱分辨率红外辐射观测,主要用于探测大气温度、大气湿度、臭氧及其他大气成分廓线,以及通过在数值天气预报模式中同化该资料改进数值天气预报的精度。因此,开展基于HIRAS-II仪器的大气成分反演算法研究,获得地球大气中 CH_4 、 O_3 、 CO_2 以及其他痕量气体的浓度变化情况,对大气环境监测和全球气候变化研究具有重大意义。

实验基于风云三号E星HIRAS-II L1数据,设计开发了 CH_4 、 O_3 廓线及柱浓度产品和 CO_2 柱浓度产品生产反演系统,进行系统稳定性测试并利用jungfraujoch地面站点的 CH_4 、 O_3 廓线和柱浓度数据以及轨道碳观测卫星-2(OCO-2) CO_2 柱浓度产品验证了系统反演的产品精度。结果表明,该系统运行稳定,通过该系统反演得到的 CH_4 、 O_3 廓线产品及柱浓度产品和 CO_2 柱浓度产品都具有较高的精度,为后续开展大气成分廓线和柱浓度研究提供了系统支持,对我国卫星大气成分反演系统的开发提供了支持。

2 系统总体设计

2.1 HIRAS-II探测原理

HIRAS-II是一台干涉分光的傅里叶变换光谱仪,仪器工作谱段分为3个红外光谱带:长波(LW)、中波(MW)和短波(SW),光谱通道数目共3 041个。HIRAS-II的观测模式为天底探测,对星下点附近大气区域进行探测,对接收到的目标的后向散射及辐射信息进行分析,进而获取大气温度、湿度及各气体浓度信息。HIRAS-II在天底探测模式下扫描镜跨轨扫描工作,每45个扫描行观测32个驻留视场,包括28个连续对地目标、2个冷空和2个星上黑体观测目标。HIRAS-II仪器观测模式见图1。每个驻留视场(Field of Regard, FOR)包含 3×3 排列的9个探元(Field of View)。HIRAS-II的主要性能指标见表1,光谱特征见表2。

2.2 系统设计

HIRAS-II大气廓线及柱浓度产品反演系统按照功能划分为三大模块,分别是输入参量处理模

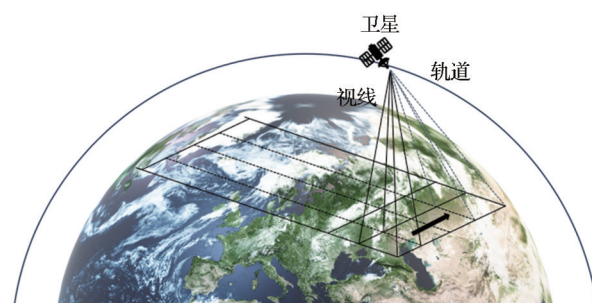


图1 HIRAS-II观测模式

Fig.1 HIRAS-II Observation Mode

表1 HIRAS-II主要性能指标

Table 1 Main performance index of HIRAS-II

仪器参数	指标
最大扫描张角	$\pm(60.4\pm 0.1)^\circ$
像素/扫描线	252(28 \times 9)
视场角	1°
扫描周期	$8\pm 0.1\text{ s}$
焦平面探测器配置(元)	3×3
仪器扫描指向精度	0.06°
指向稳定度	0.45毫弧(mrad)

表2 HIRAS-II光谱特征

Table 2 Spectral characteristics of HIRAS-II

波段	光谱范围(cm^{-1})	通道数	光谱分辨率(cm^{-1})
长波IR	648.75~1 169.375	834	0.625
中波IR	1 167.5~1 921.25	1 207	0.625
短波IR	1 919.375~2 551.25	1 012	0.625

块、数据反演模块和产品存储管理模块。输入参量处理模块的主要功能是根据生产任务获取对应的HIRAS-II L1数据和反演需要的辅助数据,经过数据处理得到反演模块的输入参数;数据反演模块的主要功能是构建正向模型,使用最优化算法反演获得 CH_4 、 O_3 廓线及柱浓度和 CO_2 柱浓度;产品存储管理模块的主要功能是将反演得到的数据输出为HDF5数据格式的L2级大气廓线及柱浓度产品并进行归档处理。HIRAS-II大气廓线及柱浓度产品反演系统框架如图2所示。

3 系统算法原理与实现

HIRAS-II大气廓线及柱浓度产品反演系统基于CentOS 7操作系统,利用Python编程语言,采用分层设计框架和并行计算框架设计开发。系统集成大气廓线背景库、地表发射率数据库,实现了实时外部参量获取处理、大气廓线及柱浓度产品反演、产品归档存储等功能。反演以HIRAS-II L1数据的

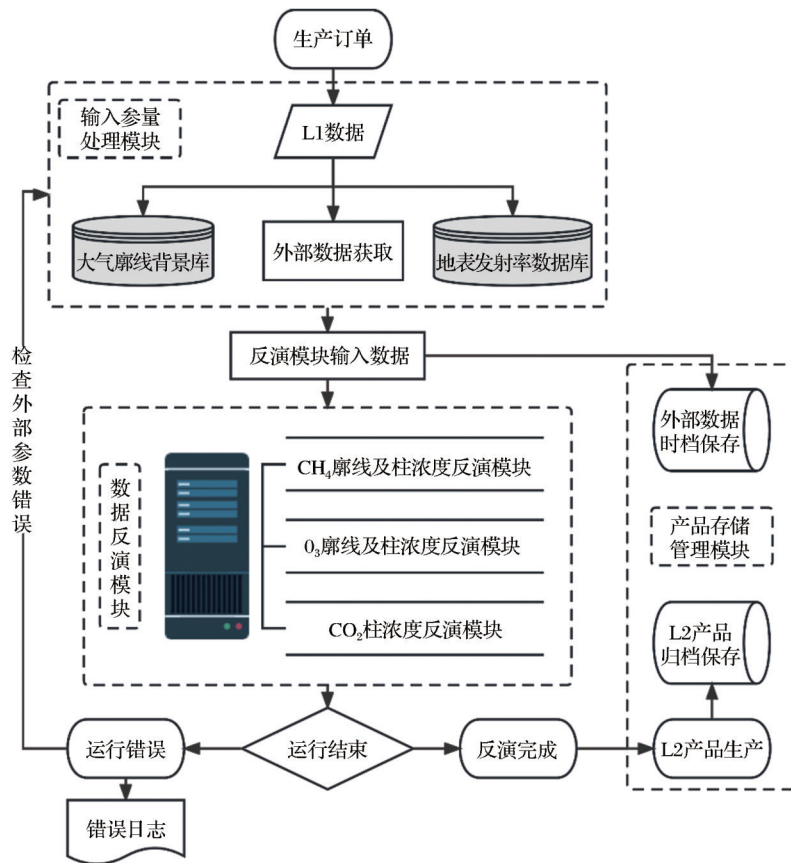


图 2 红外高光谱大气垂直探测仪 II 型 L2 产品反演系统框架

Fig.2 Inversion System Framework of Hyperspectral Infrared Atmospheric Vertical Sounder-II L2 product

卫星观测辐射作为输入数据,结合外部辅助参量数据,利用RFM辐射传输模型和最优化算法,将L1光谱辐亮度数据反演输出为L2级大气廓线及柱浓度产品。HIRAS-II L1数据主要属性说明见表3。

表 3 HIRAS-II L1 数据主要属性

Table 3 Main attributes of HIRAS-II L1 data

属性类型	属性内容	数据维度
卫星载荷名	FY3E HIRAS-II	—
文件命名格式	FY3E_HIRAS_GRAN_L1_YYYYMMDD_HHmm_014KM_Vn.HDF	—
光谱响应函数	Sinc	—
长波实部辐射	ES_RealLW	(37,28,9,834)
中波实部辐射	ES_RealMW1	(37,28,9,1207)
短波实部辐射	ES_RealMW2	(37,28,9,1012)

3.1 算法原理

反演系统采用最优化算法(Optimal Estimation Method, OEM),反演思路是利用正向辐射传输模型计算先验大气状态参数下卫星观测的模拟辐射值,将其与实际卫星观测数据联合建立目标函数,在一定先验知识的约束下,通过迭代的方式计算出真实大气参数的最优估计及误差协方差^[5]。

最优化算法已经被广泛应用于多种大气成分反演系统中,MIPAS和MLS的业务反演算法都采

用的最优估计的算法,ATMOS后期、HALOE、ACE-FTS以及AIUS均使用最优化算法反演大气成分的垂直廓线^[6-9]。采用RFM(Reference Forward Model)辐射传输模型作为正向模型,RFM是逐行积分辐射传输模型,由文本驱动文件控制,输入参数主要包括:大气背景库数据、观测几何、大气成分吸收谱线数据及光谱的范围和分辨率等。RFM是一个具备健壮性、灵活性和易用性等特点的辐射传输计算模型。它可用于处理均匀路径、平面平行大

气、球面辐射传输问题,模拟卫星、气球、飞机、地基等不同探测平台、探测仪器的辐射传输过程,可以计算辐射率、透射率、吸收率、冷却率、光学深度、亮温、瑞利-金斯温度等^[10]。

最优化算法是基于大气状态的贝叶斯估计来解决反演问题,它包含了大气参数的先验信息,并考虑了仪器的噪声特性^[11]。在反演过程中,通过最小化代价函数来获得大气廓线的估计^[12]。根据辐射传输方程,卫星观测辐亮度值可简单表示为式(1):

$$Y=FX \tag{1}$$

其中:Y为包含若干通道的卫星观测辐亮度值,F为正向模型函数;X为大气状态参数。

由于方程的不适定性,求解过程中往往需要引入辅助信息才能得到稳定的解。引入Lagrange因子 γ ,定义目标函数为式(2):

$$JX=\min\{Y-FX+\gamma X-Xa\} \tag{2}$$

其中:X为迭代计算的廓线值,Xa为廓线的初值估计,*代表范数,卫星反演时多采用Mahalanobis距离,即马氏距离如式(3)和(4)。它表示数据的协方差距离,是一种有效的计算两个未知样本集的相似度的方法。

$$Y-FX=Y-FXTSe-1Y-FX \tag{3}$$

$$X-Xa=X-XaTSa-1X-Xa \tag{4}$$

将式(3)和(4)代入式(2),则目标函数进一步转化为式(5)。

$$JX=\min\{Y-FXTSe-1Y-FX+\gamma X-XaTSa-1X-Xa\} \tag{5}$$

其中:Se-1为观测误差协方差矩阵;Sa-1为背景误差协方差矩阵,一般情况下,Se-1简化为对角阵,它包含仪器噪声,系统误差以及正向模型的误差。

因此,廓线的反演即转变为目标函数的求解。当大气先验知识不能精确的代表被测大气状态时,Levenberg-Marquardt^[13-14]算法反演精度较高。因此本反演系统采用的寻优策略为Levenberg-Marquardt迭代算法。Levenberg-Marquardt迭代法公式如式(6)所示。

$$Xi+1=Xi+1+\gamma Sa-1+KiTSe-1Ki-1KiTSe-1Y-FXi-Sa-1Xi-Xa \tag{6}$$

3.2 输入参量处理模块

输入参量处理模块根据生产任务获取L1数据,读取L1数据的外部参量数据并处理成符合数据反演模块格式的输入数据。输入参量处理流程如图3

所示。输入参量数据包括:L1光谱辐射数据、大气背景廓线数据、地表发射率数据、地表温度压强数据、大气温度压强廓线数据。

输入参量处理模块集成了大气廓线背景库和地表发射率数据库。在反演所用的最优化算法中,先验知识非常重要,反演的初始值对反演算法的收敛速度以及反演精度影响较大。因此需要嵌入反演成分和干扰成分背景的背景初始数据库。系统中使用的大气廓线背景库是根据全球近两年的ACE-FTS、AIRS、ERA5大气廓线产品建立的全球大气廓线参考库(GRAP)^[15],其时间分辨率为1个月,并将全球按照5°×30°(纬度×经度)划分为38条纬度带、14条经度带,共532个网格,GRAP中包括两种大气状态参数以及59种大气成分参数,具有良好的区域和时间代表性,更加符合当前的实际大气状态。地表发射率数据库可以提供正向模型中需要的反演区域近实时的地表发射率数据。精确的温度压强数据对于大气成分廓线和柱浓度反演具有十分重要的作用。本系统集成ERA5温度压强数据的下载模块,根据L1数据的经纬度范围、探测时间下载相对L1数据实时的ERA5地表温度压强数据、ERA5温度压强廓线数据,并根据每个FOV的精确经纬度位置匹配最近的ERA5作为单个FOV的温度压强数据。

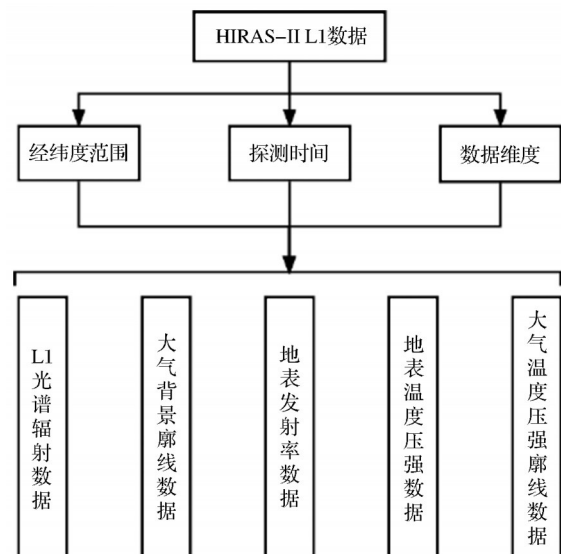


图3 输入参量处理流程

Fig.3 Input parameter processing flow

3.3 数据反演模块

数据反演模块分为3个子模块,分别为CH₄廓线及柱浓度反演模块、O₃廓线及柱浓度反演模块和

CO₂柱浓度反演模块。

在构建数据反演模块之前,首先获取HIRAS-II仪器的参数,如:波段范围,光谱分辨率,仪器线性函数,仪器视场角(FOV)响应函数等。然后根据不同反演成分的吸收特性,进行目标及干扰成分探测敏感性分析,并结合信息熵理论进行通道选择实验,获取不同成分的反演波长。基于信息熵的通道选择方法是在通道最少的情况下尽可能还原原始数据的信息,通过逐次迭代的方式,依次将包含信息量最大的通道引入最后通道选择集合,并作为下一次迭代的基础。首先利用已经计算得到的背景场误差协方差矩阵、观测协方差矩阵和权重函数,遍历所有的通道,计算每个通道的信息量,选择出信息量最大的通道,之后进行多次迭代,每次迭代以信息量最大为标准,最终获得通道选择结果。

基于HIRAS-II仪器参数以及不同大气成分反演波长等参数构建CO₂、CH₄、O₃反演的正向模型。采用上述的最优化算法构建代价函数,使用Levenberg-Marquardt迭代算法得到反演廓线,通过不同气压层积分得到柱浓度。为了减少反演用时,提高反演效率,反演系统采用并行计算框架,同时对HIRAS-II的整个扫描行数据进行反演,可以同时反演32个FOR,每个FOR中9个FOV的数据。极大缩短了生产单景L2产品的时间。三个反演子模块的反演步骤相同,但是要考虑到不同成分的特性,需要在正演过程和反演过程中修改参数设置,每一个模块可以单独运行,互不影响,形成了可以自动迭代计算的反演系统。数据反演流程如图4所示。

3.4 产品存储管理模块

产品存储管理模块包括产品输出、产品保存归档功能。反演生成的廓线和柱浓度数据通过该模块输出为HDF5格式的L2级产品文件,L2级产品保留了从L1数据中继承的数据属性,增加了垂直压力层、廓线数据、柱浓度数据。产品输出后根据要求,将外部参量数据、L1数据、L2产品归档存储到指定的数据库中。HIRAS-II L2产品主要属性介绍见表4。

L2级产品的命名格式为:

FY3E_HIRAS-II_GRAN_L2_XX_YYYY-MMDD_HHmm_014KM_Vn.h5

其中,FY3E代表卫星名称,HIRAS-II代表仪器名称,GRAN代表数据区域类型,L2代表数据级别,XX代表产品成分,YYYYMMDD为观测起始

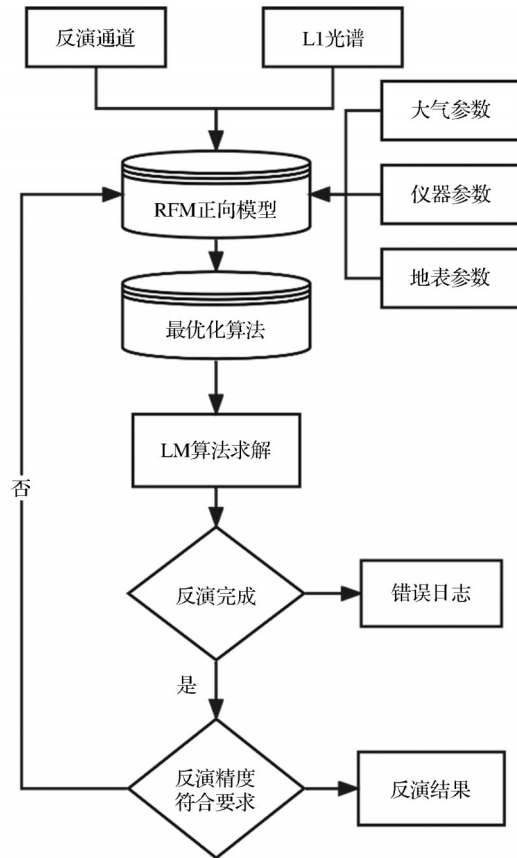


图4 系统数据反演流程

Fig.4 Flowchart of the system data inversion

表4 L2产品主要属性

Table 4 Key attributes of L2 products

属性分组	属性名称	属性内容
DATA	Pressure	垂直压力层
	CH4_Profiles	廓线值
	CH4_Prior_profile	先验廓线
	CH4_Column	柱浓度值
	XCH4	干柱浓度值
	Observation_error	观测误差
	Prior_uncertainty	先验不确定性
Geolocation	Latitude	纬度
	Longitude	经度
	Sensor_Azimuth	仪器方位角
	Sensor_Zenith	仪器天顶角
	Solar_Azimuth	太阳方位角
	Solar_Zenith	太阳天顶角

日期,HHmm为观测起始时间,014KM代表空间分辨率,Vn为数据版本号。

4 结果与分析

实验选取了2022年9月经过jungfraujoch地面站点的12轨HIRAS-II L1数据进行系统运行时间

和稳定性测试,反演系统运行的服务器系统是CentOS Linux 7,硬件环境为:CPU:Inter Xeon® Gold 5218 CPU @ 2.10GHz × 40; GPU: Quadro RTX 4000;内存:32G×2。在上述运行环境下,系统稳定运行超100 h。HIRAS-II反演系统单次反演28×9个FOV数据,一景产品需要37组反演。HIRAS-II系统反演产品平均用时见表5。

表5 HIRAS-II系统反演平均用时

Table 5 Average time of HIRAS-II system inversion

产品	单组反演平均用时	产品反演平均用时
CH ₄ 廓线和柱浓度	9分41秒	6小时08分48秒
O ₃ 廓线和柱浓度	7分01秒	4小时32分33秒
CO ₂ 柱浓度	8分19秒	5小时11分14秒

选取的验证数据为jungfraujoch地面站点的O₃、CH₄廓线和柱浓度数据以及对应时间和经纬度的OCO-2的CO₂柱浓度产品。jungfraujoch地面站点是国际大气成分变化探测网络(NDACC)的地面遥感研究站之一,纬度为46.55° N,经度为7.98° E,海拔高度3 680 m。OCO-2是继GOSAT之后全球第二颗专用碳卫星,发布的L2数据产品是从2014年9月6日开始,空间分辨率为2.25 km×1.29 km,选取的数据版本为OCO2_L2_Lite_FP11r。Wunch等^[16]利用TCCON站点数据验证OCO-2 L2 XCO₂产品的偏差小于0.5×10⁻⁶,标准差低于1.5×10⁻⁶。Wang

等^[17]利用合肥站FTS观测结果验证OCO-2的L2 XCO₂产品,结果的偏差和标准差分别为0.81×10⁻⁶和1.73×10⁻⁶。经验证OCO-2精度较高,适合用来作为验证数据。

研究分析了系统反演12轨测试产品的精度,分别提取12轨L2产品中距离jungfraujoch地面站点最近的9个FOV计算平均廓线和平均柱浓度,利用jungfraujoch地面站点的O₃、CH₄廓线和柱浓度数据以及对应时间和经纬度的OCO-2的CO₂柱浓度产品来验证反演结果。研究所采用的测试数据信息见表6。

表6 HIRAS-II测试数据信息

Table 6 Information on HIRAS-II test data

探测时间	轨道号	经纬度范围
20220911_0540	6148	30° N~51° N; 8° W~24° E
20220911_1705	6155	37° N~58° N; 22° W~14° E
20220912_0520	6162	33° N~54° N; 3° W~31° E
20220912_1645	6169	34° N~55° N; 15° W~19° E
20220913_0500	6176	35° N~57° N; 2° E~38° E
20220920_0610	6276	30° N~51° N; 16° W~16° E
20220920_1555	6282	42° N~63° N; 10° W~31° E
20220921_0550	6290	33° N~54° N; 10° W~23° E
20220921_1535	6296	39° N~60° N; 2° W~37° E
20220921_1535	6297	34° N~55° N; 23° W~12° E
20220922_0530	6304	35° N~57° N; 5° W~30° E
20220922_1655	6311	31° N~52° N; 16° W~17° E

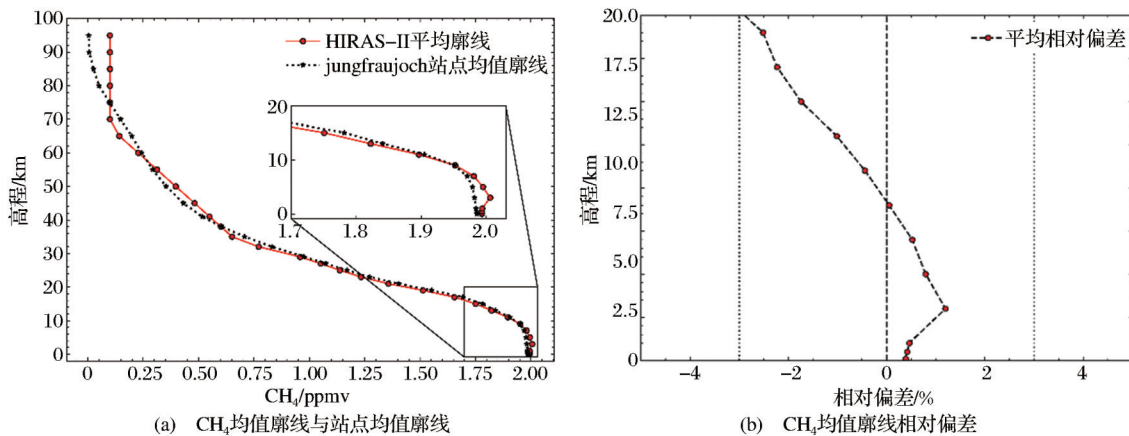


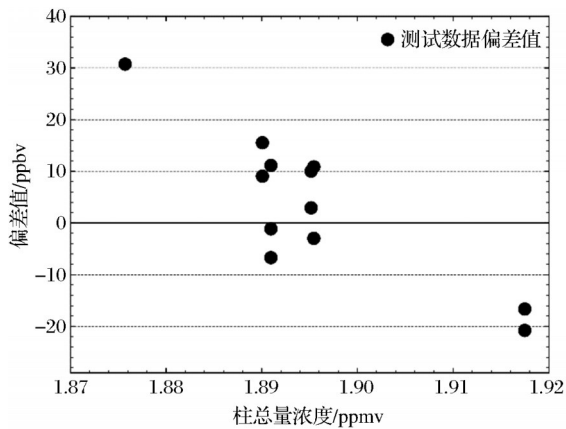
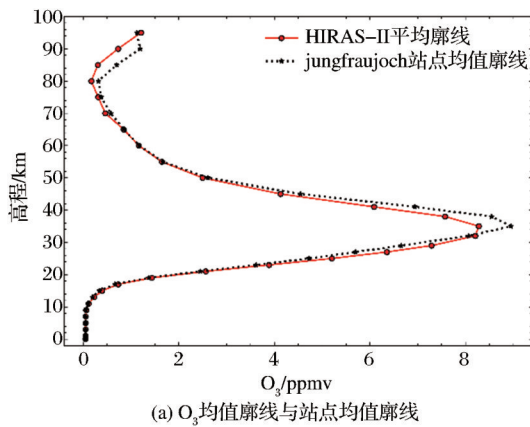
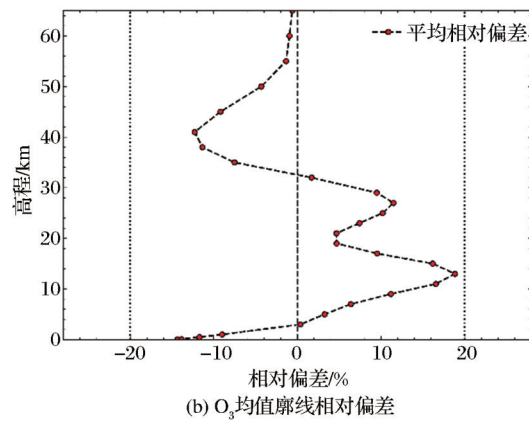
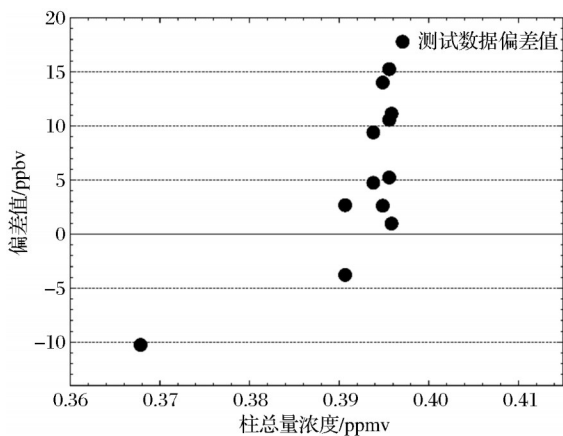
图5 CH₄廓线反演结果验证
Fig.5 Validation of CH₄ profile inversion results

4.1 CH₄廓线及柱浓度产品精度验证

图5(a)展示了反演的CH₄平均廓线与jungfraujoch站点数据的CH₄均值廓线,两者在0~30 km范围内具有很好的一致性,反演的CH₄平均廓线与站点均值廓线的偏差值范围在±30 ppbv以内。图5(b)展示了反演的CH₄平均廓线与jungfraujoch站点均

值廓线在0~20 km高度层的体积混合比相对偏差,在中高对流层(约5~12 km)的相对偏差均小于3%。

图6展示了反演的CH₄平均柱浓度与jungfraujoch站点柱浓度的相对偏差,反演结果相对于站点CH₄柱浓度的差异约在-21~31 ppbv范围内,最大相对偏差约为2%。

图6 CH₄柱浓度偏差Fig.6 CH₄ column concentration deviations(a) O₃均值廓线与站点均值廓线(b) O₃均值廓线相对偏差图7 O₃廓线反演结果验证Fig.7 Validation of CH₄ profile inversion results图8 O₃柱浓度相对误差Fig.8 O₃ column concentration deviations

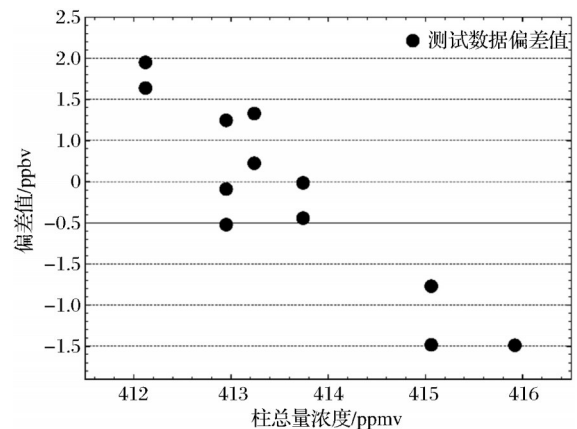
4.3 CO₂柱浓度产品精度验证

图9展示了反演的CO₂平均柱浓度与OCO-2的CO₂产品柱浓度的相对偏差,反演结果相对于站点CO₂柱浓度的差异约在-1.5~2 ppmv范围内,最大相对偏差约为0.6%。

4.2 O₃廓线及柱浓度产品精度验证

图7(a)展示了反演的O₃平均廓线与jungfraujoch站点数据的O₃均值廓线,两者在0~25 km范围内具有很好的一致性,在0~65 km范围内偏差值均小于1 ppmv。图7(b)展示了反演的O₃平均廓线与jungfraujoch站点均值廓线在0~65 km高度层的体积混合比相对偏差,各高度层的体混合比偏差均小于20%。

图8展示了反演的O₃平均柱浓度与jungfraujoch站点柱浓度的相对偏差,反演结果相对于站点O₃柱浓度的差异约在-10~16 ppbv范围内,最大相对偏差约为4%。

图9 CO₂柱浓度相对误差Fig.9 CO₂ column concentration deviations

5 结论

研究基于CentOS 7系统,使用python语言进行风云三号E星红外高光谱大气垂直探测仪(II型)大气产品反演系统的设计与实现,建立了CH₄、O₃廓线和柱浓度产品以及CO₂柱浓度产品反演系统。该反

演系统采用模块化设计思路,将反演系统分为输入参量处理模块、数据反演模块和产品存储管理模块,模块化设计方便数据接口传输和存储,其功能单独运行互不影响。使用分层设计框架和并行计算框架,大大提高了系统反演效率。使用最优化算法和RFM正向模型作为反演算法,保证了反演精度。通过对系统反演结果与jungfraujoch地面站点的CH₄、O₃廓线和柱浓度数据以及OCO-2的CO₂官方产品进行比较分析,结果表明反演结果具有较高的精度,说明系统具有良好的精确性。

本反演系统通过测试,效果良好,各项功能集成化、模块化,具有一定的通用性,为我国后续发射的风云三号F星上搭载的红外高光谱大气垂直探测仪(II型)反演系统的设计提供了参考。并且,该系统为风云三号卫星定量反演全球大气痕量气体总量和垂直分布变化提供了新的方法和手段,能够为中国进行大气环境监测和全球气候变化研究提供算法和技术支持。

参考文献(References):

- [1] ZHANG Xingying, Zhou MinQiang, Wang Weihe, *et al.* Progress and outlook of remote sensing application of atmospheric composition detection by global satellites[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(17): 13-22.[张兴赢,周敏强,王维和,等.全球卫星大气成分遥感探测应用进展及其展望[J].科技导报,2015,33(17):13-22.]
- [2] NEWMAN P A, GLEASON J F, MCPETERS R D, *et al.* Nomalously low ozone over the Arctic[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 24(22): 2689-2692.
- [3] JIANG Cheng, TAO Dongxing, HE Hongyan. Digital modeling and simulation of infrared very high spectral resolution sounder for atmospheric environment[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3):94-103.[江澄,陶东兴,何红艳.大气环境红外甚高光谱分辨率探测仪数字建模与仿真[J].航天返回与遥感,2018,39(3):94-103.]
- [4] CHENG Jie, LIU Qinhuo, LI Xiaowen. Review of atmospheric trace gas inversion by satellite-borne hyperspectral infrared sensors[J]. Remote Sensing Information, 2007(2): 90-97.[程洁,柳钦火,李小文.星载高光谱红外传感器反演大气痕量气体综述[J].遥感信息,2007(2):90-97.]
- [5] LUO Qi, LI Xiaoying, CHENG Tianhai, *et al.* Design and implementation of atmospheric retrieval system for AIUS[J]. Space Return and Remote Sensing, 2019, 40(6): 67-76.[罗琪,李小英,程天海,等.红外甚高光谱分辨率探测仪反演系统的设计与实现[J].航天返回与遥感,2019,40(6):67-76.]
- [6] CARLOTTI M. Global-fit approach to the analysis of limb-scanning atmospheric measurements[J]. Applied Optics, 1988, 27(15): 3250-3254.
- [7] SUZUKI M, MATSUZAKI A, ISHIGAKI T, *et al.* ILAS, the Improved Limb Atmospheric Spectrometer, on the Advanced Earth Observing Satellite[J]. IEICE Transactions on Communications, 1995, 78(12): 1560-1570.
- [8] IRION F W, GUNSON M R, TOON G C, *et al.* Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy (ATMOS) experiment version 3 data retrievals[J]. Applied Optics, 2002, 41(33): 6968-6979.
- [9] LI X Y, XU J, CHENG T H, *et al.* Monitoring trace gases over the antarctic using atmosphere infrared ultraspectral sounder onboard GaoFen-5: Algorithm description and first retrieval results of O₃, H₂O, and HCl[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 1991. DOI: 10.3390/rs11171991
- [10] DUDHIA A. The Reference Forward Model (RFM)[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 186: 243-253. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.06.018
- [11] ZADVORNYKH I V, GRIBANOV K G, ZAKHAROV V I, *et al.* The joint methane profiles retrieval approach from GOSAT TIR and SWIR spectra[M]. Proc. SPIE 10466, 104664G, 2017. DOI: 10.1117/12.2288700
- [12] SNELL H E, MONCET J L, LYNCH R, *et al.* Atmospheric temperature, moisture and trace gas retrieval algorithm for the NPOESS/NPP Cross-track Infrared Microwave Sounder Suite (CrIMSS)[J]. The International Society for Optical Engineering, 2004: 375-383. DOI: 10.1117/12.541931
- [13] LEVENBERG K. A method for the solution of certain problems in least squares[J]. Quarterly of Applied Mathematics, 1944: 164-168.
- [14] MARQUARD D W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters[J]. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1963, 11(2): 431-441.
- [15] GUO Y H, LI X Y, CHENG T H, *et al.* Construction of the Global Reference Atmospheric Profile Database[J]. Remote Sensing, 2023, 15(12): 3006. DOI: 10.3390/rs15123006
- [16] WUNCH D, WENNERBERG P O, OSTERMAN G, *et al.* Comparisons of the Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) XCO₂ measurements with TCCON[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(6): 1-45.
- [17] WANG W, TIAN Y, LIU C, *et al.* Investigating the performance of a greenhouse gas observatory in Hefei, China[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2017, 10(7): 2627-2643.

Hyperspectral Infrared Atmospheric Vertical Sounder-II Atmospheric Product Inversion System Design

GUO Yuhang^{1,2,3}, LI Xiaoying^{1,4}, CHENG Tianhai¹, LI Shenshen¹,
ZHANG Xinyuan^{1,2,3}, LU Wenjing^{1,2,3}, FANG Weifang^{1,2,3}

(1. *Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *Innovation Center for FengYun Meteorological Satellite (FYSIC), Beijing 100081, China)*

Abstract: With the intensification of global climate change, the monitoring of atmospheric trace gases has received increasing attention. The column concentrations and profiles distributions of trace gases become the data basis for atmospheric environmental monitoring and global climate change research. The Hyperspectral Infrared Atmospheric Vertical Sounder II (HIRAS-II) on board the Fengyun-3E and Fengyun-3F satellites provides high spectral resolution infrared radiometric observations of the Earth-gas system, which can be used to invert high-precision atmospheric compositional profiles and column concentrations. In this study, we have developed an operational inversion system based on HIRAS-II. This system incorporates a modular design and parallel computing framework, integrating a global reference atmospheric profile database and surface emissivity database. Leveraging the optimal estimation methods and the RFM forward model, this system inverts the CH₄, O₃ profiles and column concentrations products as well as CO₂ column concentrations products. The inversion system was tested and the accuracy of the 12 products obtained by the inversion system is verified. The results show that the inversion system operated stably and the products had high accuracy. The inversion system can provide algorithmic and technical support for atmospheric environment monitoring in China and global climate change research.

Key words: Fengyun-3; HIRAS-II; Optimal estimation methods; Atmospheric Profiles; Column concentration