

# 风云卫星：从观测到定量应用

陈林<sup>1,3</sup>, 徐娜<sup>1,3</sup>, 王劲松<sup>2,3</sup>, 商建<sup>1,3</sup>, 寿亦萱<sup>1,3</sup>, 李博<sup>1,3</sup>,  
徐榕焱<sup>1,3</sup>, 武胜利<sup>1,3</sup>, 王新<sup>1,3</sup>, 郑伟<sup>1,3</sup>, 贾树泽<sup>1,3</sup>

1. 中国气象局 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(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;
2. 中国气象局 空间天气重点开放实验室/国家卫星气象中心(国家空间天气监测预警中心), 北京 100081;
3. 许健民气象卫星创新中心, 北京 1000811

**摘要:** 目前中国已成功发射2代4型共21颗风云气象卫星, 成为全球唯一同时业务运行上午、下午、晨昏、倾斜四条近地轨道民用气象卫星的国家, 并实现了静止轨道多星在轨、统筹运行、互为备份、适时加密的业务模式。风云卫星在气象防灾减灾、应对气候变化、生态文明建设等领域以及政府决策服务方面作出了积极贡献, 同时在服务“一带一路”建设、构建人类命运共同体中贡献了重要力量。本文围绕风云卫星从观测到定量应用需要解决的科学问题和发展态势, 针对导航定位与配准、高精度定标、地球物理参数反演、型谱化应用四个方面阐述了风云卫星量化应用关键技术的若干创新。

**关键词:** 风云卫星, 观测, 定位, 定标, 反演, 定量应用, 地面系统

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 陈林, 徐娜, 王劲松, 商建, 寿亦萱, 李博, 徐榕焱, 武胜利, 王新, 郑伟, 贾树泽. 2025. 风云卫星: 从观测到定量应用. 遥感学报, 29(6): 1462-1479

Chen L, Xu N, Wang J S, Shang J, Shou Y X, Li B, Xu R H, Wu S L, Wang X, Zheng W and Jia S Z. 2025. FengYun satellites: From observations to quantitative applications. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 1462-1479 [DOI: 10.11834/jrs.20254459]

## 1 引言

自1960年首颗气象卫星TIROS (Television Infrared Observation Satellite) 发射后, 人类开始了60余年从空间探测地球大气的遥感历程。气象卫星发展为科学家了解和认知地球系统的物理、化学、生物过程提供了前所未有的技术手段。中国早在20世纪70年代就开始发展中国的气象卫星, 1988年中国成功发射风云一号A星, 开创了气象卫星遥感的新纪元。经过起步、发展、突破三个阶段, 中国已成功发射了风云一号、三号(FY-1、FY-3)和风云二号、四号(FY-2、FY-4)的极轨、静止两个系列的2代4型共21颗风云气象卫星, 成为世界气象卫星领域大国。目前中国共有8颗气象卫星在轨运行(表1), 已成为全球唯一同时业务运行上午、下午、晨昏、倾斜四条近

地轨道民用气象卫星的国家, 并实现了静止轨道多星在轨、东西布局、在轨备份、适时加密的业务模式。风云卫星目前具备在空间上全球覆盖、最高250 m空间分辨率观测, 时间上超20年历史累计、最高1 min时间分辨率观测, 在光谱上形成了从X射线、紫外、可见光、红外及微波全谱段结合的超光谱观测, 在观测能力上实现了从被动到主被动结合探测、二维成像到三维探测、热力场到动力场的突破。

针对世界气象组织全球气候观测系统GCOS (Global Climate Observing System) 的主要需求, 中国利用风云卫星自主研发和业务化生产的气象卫星云和水汽等图像产品以及大气、陆地、海洋定量反演产品已达数十种, 覆盖了28个基本气候变量ECV (Essential Climate Variables)。基于风云卫星星座优势及其地球物理参数产品实现了多尺度

收稿日期: 2024-12-31; 预印本: 2025-04-14

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2023YFB3907500)

第一作者简介: 陈林, 研究方向为风云卫星定标与定量应用。E-mail: chenlin@cma.gov.cn

通信作者简介: 王劲松, 研究方向为空间天气监测预警理论和技术、大气探测研究。E-mail: wangjs@cma.gov.cn

天气系统、多要素大气成分、多圈层地球系统、全链条空间天气监测，以及多灾种、高时效、全球灾害监测 (Yang 等, 2012, 2017; Zhang 等, 2021, 2022a, 2023a; Xian 等 2021a, 2021b)，并

通过中国气象局卫星广播系统、风云卫星遥感数据服务网 (<https://data.nsmc.org.cn>[2025-04-14]) 等方式提供气象卫星数据和产品共享服务。

表 1 现役风云卫星运行状态

Table 1 Status of operational FengYun satellites

类型	卫星名称	定点经度/过赤道时间
静止卫星	FY-2G	99.5°E(2015年6月1日之前)、105°E(2015年6月1日至2018年4月9日)、99.2°E(2018年4月9日之后)
	FY-2H	79°E
	FY-4A	104.7°E(2024年3月5日之前)、86.5°E(2024年5月1日至2025年1月21日)、123.5°E(2025年之后)
	FY-4B	133°E(2024年2月1日之前)、105°E(2024年3月5日之后)
极轨卫星	FY-3D	14:00升交点
	FY-3E	05:30降交点
	FY-3G	倾斜轨道
	FY-3F	10:15降交点

风云卫星作为中国民用遥感卫星领域重要空间基础设施，在灾害性天气监测预报预警、极端天气气候事件影响评估分析、农业与环境监测、空间天气监测预警等方面发挥了重要作用，为气象防灾减灾、应对气候变化、生态文明建设、国家太空安全等领域以及政府决策服务方面作出了积极贡献。同时，依托风云卫星应急保障机制 FY-ESM (Emergency Support Mechanism of FengYun Satellite)、空间与重大灾害国际宪章机制 CHARTER (International Charter Space and Major Disasters)、国际民用航空组织 ICAO (International Civil Aviation Organization) 全球空间天气中心等

服务“一带一路”建设、构建人类命运共同体中贡献了重要力量。

风云卫星遥感仪器从太空观测来自地球表面和大气不同波段的遥感资料，通过导航定位与配准、定标模型与算法获取精准的卫星遥感辐射能量，基于辐射传输理论与人工智能实现地球物理参数反演，结合理论认知、模型分析和机理研究实现针对目标场景的定量应用，根据应用需求、机制规则开展新一代风云卫星的体系论证与设计，形成了风云卫星从观测至应用的完整核心技术链，如图 1 所示。

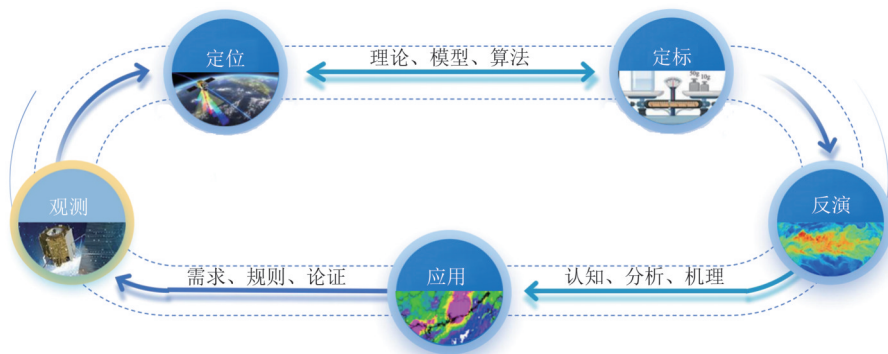


图 1 风云卫星从观测到应用的核心技术链

Fig. 1 Core technology chain of FengYun satellites from observations to applications

风云卫星的定量化应用是以上成果和技术链条的集中体现，本文将围绕风云卫星从观测到定量应用中需要解决的科学问题和发展态势，简述四项关键技术：(1) 导航定位与配准技术，即卫

星所遥感的观测目标物在什么地方；(2) 高精度定标技术，即卫星上的遥感仪器所感应到的辐射量是多少；(3) 地球物理参数反演技术，即从卫星遥感数据中，如何提取出能代表大气、云、陆地、

海洋等地球物理状态和运动的参数；(4) 型谱化应用技术，即针对某一监测目标或应用场景，如何快速集成多卫星平台、多遥感仪器、多地球物理参数的综合应用以及卫星与其他资料的融合应用。

## 2 风云卫星定量应用的关键技术

### 2.1 导航定位与配准技术

导航定位与配准技术是风云气象卫星影像定量应用的基础，它解决了观测目标看得准的问题。基于风云卫星不同仪器的设计和成像原理，利用卫星位置和姿态等参数构建几何定位模型，采用地标和海陆边界来修正几何模型，进而获取影像中任意像素点 $(x, y)$ 在大地坐标系中的地理坐标 $(Lat, lon, H)$ ，实现卫星观测目标物的高精度定位（图2）。卫星轨道和姿态测量误差，仪器安装误差、时间误差、扫描角测量误差是造成影像导航定位偏差的主要因素（唐世浩等，2016）。

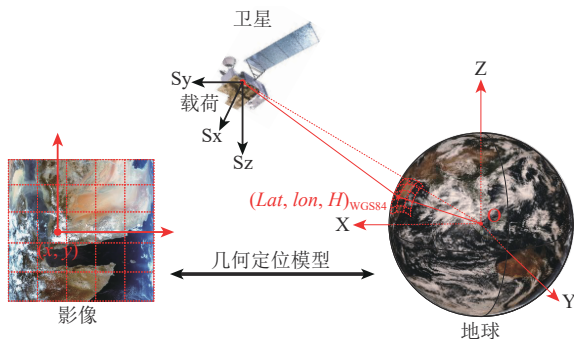


图2 风云卫星导航定位基本原理图

Fig. 2 Diagram of FengYun satellite navigation and positioning principle

第一代极轨气象卫星风云一号系列由于技术限制，使用地平穿越式的红外地平仪测量卫星姿态，其较低的精度无法直接用于遥感数据定位计算。通过研制影像与地标点的匹配方法估计卫星姿态，引入卫星轨道数值积分计算模型，采用参数化方法实现遥感图像的定位计算（杨忠东和关敏，2008）。第二代极轨气象卫星风云三号系列搭载了全球导航卫星系统GNSS（Global Navigation Satellite System）接收机，可以实时提供卫星的空间位置信息（关敏和杨忠东，2007）。同时卫星搭载了先进的星敏感器和陀螺等器件，卫星姿态测量精度得到了较大提升，这为每一帧的指向确定提供了精确的信息（图3）。风云三号C星微波成像仪

MWRI（Micro-Wave Radiation Imager）经过与海岸线对比，定位精度达到垂轨方向0.1581像素和沿轨方向0.1110像素（Zhang等，2022b）。通过风云三号E星搭载的红外高光谱大气探测仪II型HIRAS-II（Hyperspectral Infrared Atmospheric Sounder-II）和中分辨率光谱成像仪微光型MERSI-LL（Medium Resolution Spectral Imager-Low Light）同卫星平台的亚像元匹配技术，实现HIRAS-II地理定位在沿轨方向仅偏离3.53 km，在垂轨方向偏离2.01 km（左丰华等，2022）。

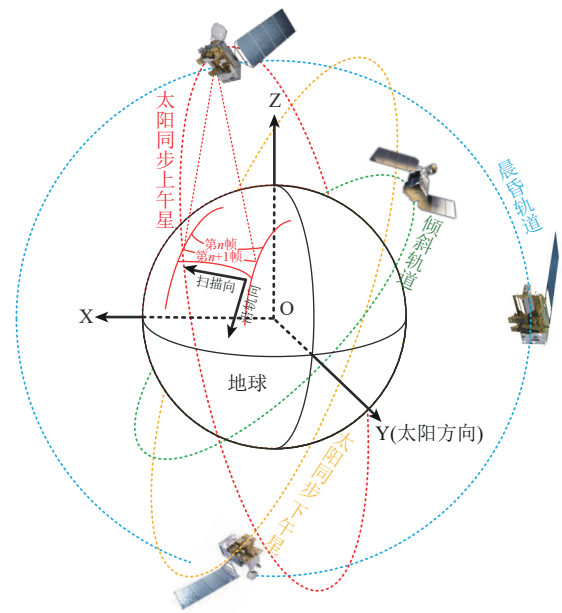


图3 FY-3D/E/F/G卫星几何定位技术原理图

(FY-3D: 太阳同步下午卫星, FY-3E: 晨昏轨道卫星, FY-3F: 太阳同步上午卫星, FY-3G: 倾斜轨道卫星)

Fig. 3 Schematic diagram of geolocation technology for FY-3D/E/F/G satellites (FY-3D: sun-synchronous afternoon satellite, FY-3E: early morning orbit satellite, FY-3F: sun-synchronous morning satellite, FY-3G: inclined orbit satellite)

第一代静止气象卫星风云二号系列是自旋稳定卫星，通过研制地球圆盘中心所在扫描线指向，以及卫星所见太阳与地球的夹角，可以精确地推算出卫星的姿态，在此基础上实现了像元级精度的图像定位（陆风等，2001；许健民等，2001；许健民等，2014；许健民，2020）。由于在静止轨道上，卫星自旋过程中地球的视场张角约 $18^\circ$ ，这造成了只有5%的时间为有效观测。因此，自旋稳定工作体制的卫星无法开展高光谱大气垂直探测、闪电观测以及对太阳与空间环境的定向观测（张

志清等, 2017)。中国第二代静止气象卫星风云四号系列, 采用三轴稳定姿态控制体制, 使得卫星可以装载多种观测仪器。风云四号A星和B星搭载的先进静止轨道辐射成像仪AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) 的扫描机构按照一定步长, 采用两面扫描镜以“先东西后南北”的方式调整视线矢量, 实现地球圆盘的遍历(图4)。然而, 受到姿轨误差和热形变的影响, 仪器的实际指向会显著偏离标称网格点。对于姿轨补偿, 可根据预报的轨道和拟合的姿态结果, 通过在同一基准坐标系下逐标称网格点计算扫描镜转角补偿角度并上注来实现。对于较为复杂的热形变补偿, 则基于地球同步轨道周期性的热环境变化特性, 利用恒星等外部自然天体作为基准来识别这种变化(Zhang等, 2018)。风云四号系列卫星的核心仪器均设计了专用的恒星观测策略, 实现了自动化和智能化的恒星预报与优选, 并定时规划在轨恒星观测任务, 据此信息拟合热形变的变化规律并把拟合系数上注给卫星, 引导仪器实现在轨指向校正(Shang等, 2019)。此外, 由于每年春、秋分卫星调头后热环境规律被破坏, 仪器需要重新捕获恒星以建立新的热形变模型。上述补偿技术对于成像仪和探测器是实时在星上完成的, 但是对于使用长线阵探测器的快速成像仪, 由于上述补偿技术只能补偿探测器视场中心, 长线阵探测器视场边缘仍存在偏差, 因此快速成像仪的轨道补偿需要在地面完成(吕旺等, 2019; 王嘉琛等, 2024)。当前风云四号系列卫星主要采用地基多站测定轨手段, 根据卫星布局变化, 当能够同时观测卫星的国内测距站不足5个时, 需要选择天地基联合技术, 即星载GNSS与地基联合的测定轨技术, 以保证静止气象卫星的定轨精度(鲁文强等, 2021), 从而保证其图像定位精度。风云四号静止轨道微波星装载的微波探测仪将是国际上第一个工作在微波波段的静止轨道仪器, 其获取的全天时、全天候、高时空分辨率的微波观测资料具有极其重要的应用价值。从仪器设计、观测几何、工作模式、产品形式等方面来说, 静止轨道微波探测仪与极轨微波成像仪、微波湿度计和微波温度计, 以及静止轨道光学星搭载的光学仪器完全不同, 因此, 静止轨道微波星图像定位与配准系统需要全新设计。

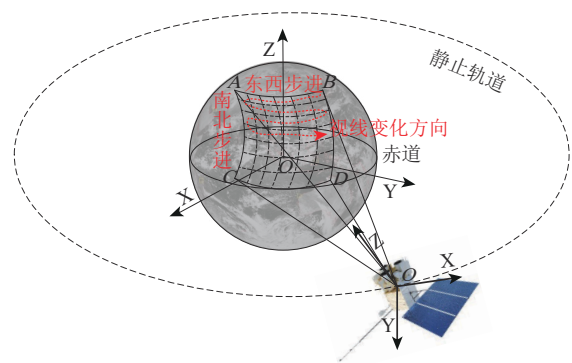


图4 FY-4B快速成像仪几何定位示意图

Fig. 4 Schematic diagram of geolocation of FY-4B Geo High-speed Imager

定量应用需要联合多通道的探测数据, 这对图像配准提出了严格的要求。这主要包含帧间配准、波段配准、异源配准等技术。其中, 帧间配准解决影像内扫描行之间的错位, 波段配准实现同一仪器不同谱段影像的对齐, 异源配准解决不同源的成像仪器之间影像的对齐。在利用风云卫星各项测量参数实现导航定位和配准的基础上, 采用标准的地球椭球参数和全球高程数据, 将影像投影到地球表面, 从而得到每个像素的地理坐标, 对于某些遥感仪器还需将像元重投影到特定的标称网格中, 最终实现不同影像数据地理坐标的统一和标准化使用(王静等, 2018)。生产稳定的卫星云图动画产品对行间配准、帧间配准提出了很高的要求, 风云四号采用基于最小二乘匹配方法的帧内配准、帧间配准技术, 配准精度均优于1/4像元。其中帧内配准中的扫描镜机械行间偏差是客观存在的固定量, 通过对相邻扫描行的观测图像进行灰度匹配的方法可得到准确的行间配准参数(李凯, 2021)。卫星的遥感仪器通道涵盖了窗区和非窗区通道, 但这两类通道的遥感图像难以实现多特征匹配。而月球具有很好的辐射稳定性和平滑的反射光谱, 且不受云、大气等因素的影响, 因此研发了基于月球图像的风云卫星通道间配准参数计算技术, 该技术采用相关匹配方法和月球圆心定位方法, 选择月球作为配准源进行多通道间配准参数计算(程思行等, 2021)。

定位精度检验能力对于定量评估气象卫星数据定位的准确性至关重要。静止和极轨气象卫星均通过对地观测仪器的基准窗区通道获取地标观测数据, 并利用图像匹配的技术实现地理定位精

度检验。具体来说,对光学和微波仪器分别采用尺度不变特征变换匹配技术和刃边法海岸线检验技术实现亚像元匹配(Chen等,2023b;Zhang等,2022b),并且通过对大量匹配点的偏差均值和中值进行统计来表征定位精度。然而,上述地标检验方法无法实现可见光波段的夜间检测,因此针对风云四号系列卫星研制了三点地基激光站,以补充夜间定位精度的评估能力。

## 2.2 高精度定标技术

卫星遥感仪器的定标,是验证和调整遥感仪器观测数据,使其更加准确、更加稳定的过程。狭义上的定标,需要构建仪器观测过程中的输入

辐射能量与仪器响应电压之间的精确定量关系,进而通过卫星对地观测过程中的仪器响应变化来获取准确的观测目标辐射能量(Skou和Le Vine,2006),主要包括实验室定标、星上定标和有源外定标。但狭义上的定标在实际应用中面临一些难以解决的问题,如遥感仪器状态变化带来的实验室定标系数不适用,以及部分器件地面实验室定标测量不够准确等。因此,增加替代定标作为补充的定标方式,形成广义上的定标概念(图5)。相比于国外同类型的遥感仪器,由于风云卫星遥感仪器有其独特的设计和观测特征,部分定标方法也有特别之处。

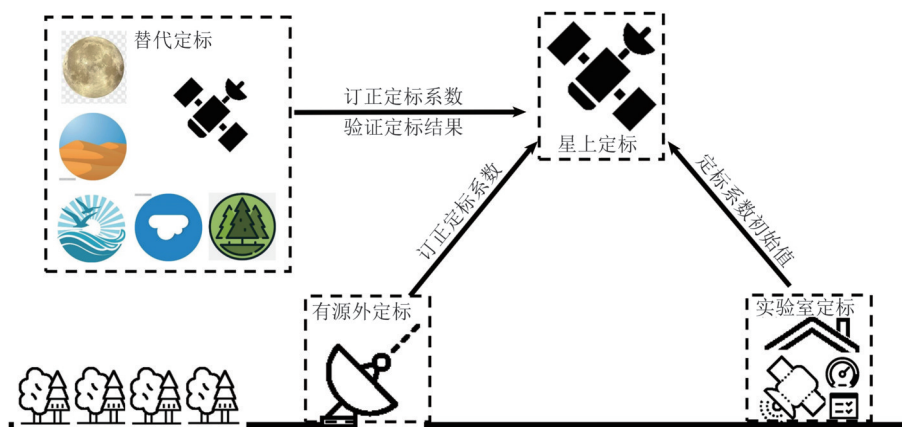


图5 卫星遥感仪器定标概念图

Fig. 5 Conceptual diagram for the calibration of satellite remote sensing instruments

(1) 实验室定标。实验室定标是航天遥感器发射前的一项重要工作,也是定标的重要手段之一(Xu等,2018)。通过在实验室模拟太空环境,利用人工源或自然源进行光谱和辐射特征检测定标,对遥感仪器的辐射特性进行精确测量(郑逢杰,2011),确定遥感仪器的响应并评估其不确定度(Datla等,2011),同时获得定标方程中的各个待定系数用于星上定标。被动仪器对实验室定标尤其依赖。多光谱类仪器的测量内容包括灵敏度(Kim等,2020)、线性度(Chen等,2013;Hu等,2023)、辐射定标和几何特性(Yang等,2018)等。风云三号微波辐射计(如微波温度计、湿度计和微波成像仪)在真空实验室通过对内置黑体、外部冷源和变温源的观测(图6),实现灵敏度和线性度等仪器性能的评估以及星上定标使用的非线性系数的解算(肖志辉等,2000)。中分辨率光谱成像仪MERSI(Medium Resolution

Spectral Imager)在真空实验室测试仪器动态范围、信噪比、线性度和响应均一性等,同时分析仪器的响应特点。高光谱仪器实验室定标还有重要的一项工作是光谱定标(Rosenberg等,2017),即得出光谱维的像元序数与波长之间的函数关系式。红外高光谱大气垂直探测仪发射前进行全面的真空定标试验,除了测试仪器性能如辐射定标精度和光谱定标精度,测试数据还用于非线性订正方法的研究,以支撑在轨数据预处理和提高资料应用质量(赵敏杰等,2013;王阳等,2024)。

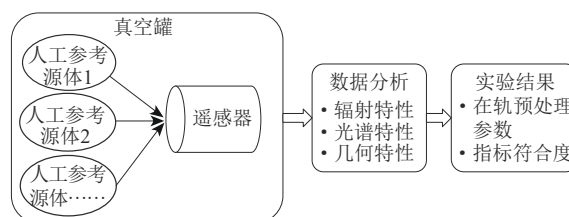


图6 实验室定标原理图

Fig. 6 Schematic diagram of laboratory calibration technique

(2) 星上定标。星上定标是指通过遥感仪器在轨运行期间对定标部件的周期性观测, 获取准确的仪器响应与观测目标辐射量的线性响应关系, 再配合实验室定标获取到的仪器先验知识 (Wentz 等, 2001), 计算得到非线性响应部分能量, 综合计算得到观测目标辐射量的过程 (Xie 等, 2019; Hollinger 等, 1990)。风云卫星的新型可见、红外、微波仪器均具备在轨星上定标的功能。从扫描方式上划分, 风云卫星遥感仪器可分为跨轨扫描和圆锥扫描两类, 其在轨星上定标原理示意图 7。

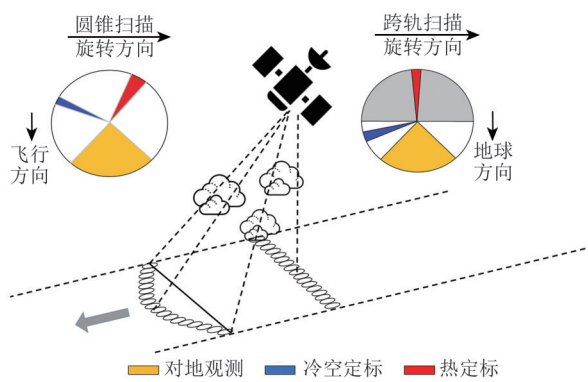


图 7 星上定标原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the on-board calibration technique

星上定标部件包括黑体、冷源、积分球、定标板等, 覆盖仪器观测的不同动态范围, 准确获取定标部件的入瞳辐射量, 以及准确获取非线性辐射量, 是星上定标成功的关键 (Wentz 和 Draper, 2016)。光学仪器的星上辐射定标器通常以太阳或标准灯作为星上定标光源, 积分球和太阳漫射板作为辐射基准传递媒介, 将星上定标源的辐射基准参考传递到光学遥感仪器上。风云三号卫星上的重要光学仪器 MERSI, 其星上定标器经历了从标准灯/太阳+积分球, 到太阳漫射板的改进。漫射板的双向反射分布函数 BRDF (Bidirectional Reflectance Distribution Function) 是星上定标的辐射基准参考。通常, 在仪器发射前会通过实验室或外场实验的方法进行漫射板 BRDF 特性的测定。但是, 漫射板在太空环境中受紫外线照射等影响, 其 BRDF 随时间会发生衰减, 所以, 漫射板 BRDF 衰减量值的在轨监测和修正, 是确保星上定标精度长期稳定的关键。漫射板 BRDF 衰减特性通常使用比辐射计或备份漫射板的方式进行在轨监测,

由于发射前的漫射板测试环境与仪器在轨的太空环境存在差异, 所以导致漫射板监测的时间序列会存在较大的波动性, 影响漫射板 BRDF 衰减跟踪的精度 (Xie 等, 2005; Sun 和 Wang, 2015)。

微波仪器的星上定标需要考虑定标源自身辐射、定标源反射辐射、定标源环境泄露等内容 (年丰等, 2007; Xie 等, 2019)。风云三号系列卫星所搭载的微波成像仪, 其实时星上定标系统并非国际常见的馈源口面定标方式, 而是一种独立设计的天线口面定标方式 (刘高峰等, 2014)。这种定标方式使用同样的辐射传递路线对热源、冷空和地球目标开展观测, 可大幅消减由于主天线等核心部件地面实验室测量误差以及在轨特征变化所带来的在轨实时定标误差。然而, 由于这种定标方式增加了一部热反射镜, 因此需要将热反射镜背瓣辐射、热反射镜自身辐射、热反射镜对热源的截获效率等因子统一纳入星上定标技术方案进行考虑 (Yang 等, 2011), 从而保证微波成像仪亮温定标结果的准确性和稳定性。针对微波成像仪复杂的定标体制, 针对热镜背瓣辐射、热镜自身辐射、热源效率、接收机非线性等四项核心定标参数开展了精细化再定标工作, 并在此基础上构建了高精度、高稳定度的长时间序列国产卫星数据集 (Wu 等, 2023)。目前, 上述再定标数据集经过验证 (Xia 等, 2023, He 等, 2023), 已广泛应用于土壤水分 (Wei 等, 2022, Yao 等, 2023)、海冰 (Chen 等, 2023a)、陆表发射率 (Li 等, 2022; Xu 等, 2023)、土壤冻融 (Wang 等, 2022) 等一系列气候敏感要素的反演研究。

(3) 有源外定标。有源定标器是现有星载雷达后向散射系数绝对定标的主要实现途径。卫星飞过有源定标器上空时, 有源定标器接收并记录星上仪器的发射信号, 亦可发射信号或转发已知信号给星上仪器。主动雷达定标器 ARC (Active Radar Calibrator) 可以对原始雷达信号进行时延、频移等处理, 具有结构紧凑、天线波束宽、雷达散射截面大、稳定、精度高等优点。由于有源定标器本身就是高精度的测量仪器, 其研制成本高, 绝对定标的精度严重依赖于有源定标器自身的稳定性, 因此有源定标器需具有内定标以及温度补偿等功能来提高其稳定性。

风云卫星主动微波遥感仪器采用放置在地面上的 ARC 开展绝对定标 (Shang 等, 2025)。以风

云三号卫星风场测量雷达为例,有源定标器的控制终端根据任务计划表和轨道预报数据控制定标器按照预定的时间准确指向风场测量雷达,定标器完成自检、自校准后,接收来自风场测量雷达的信号;也可将接收的信号进行频移或延时、放大,再经过定标器天线转发出去,风场测量雷达在轨接收该信号。经过对定标器数据及风场测量雷达观测数据的处理,获得仪器的在轨天线方向图与定标系数等重要参数。

(4) 替代定标。仪器在轨运行以后,常用的替代定标方法包括基于地球目标的替代定标、交叉定标、月球定标等。基于辐射校正场星地同步测量的场地替代定标是典型的基于地球目标的替代定标方式(Hu等, 2001; Chen等, 2017)。通过测量卫星过境时刻的地表和大气特性参数,包括地表反射波谱、大气廓线、气溶胶参数等,然后结合传感器的波段、性能参数,再辅以大气辐射传输模型,获取准确的卫星入瞳辐射量,作为替代定标基准,对传感器开展定标(Sun等, 2012; 吕佳彦等, 2017a, 2017b)。

传统的辐射校正场地辐射定标方法由于定标样本少,难以覆盖遥感器动态范围,且不能发现仪器辐射响应是否存在非线性特性,因此发展了基于多种亮暗等级的地球稳定目标(如深对流云、冰雪、盐湖、沙漠和洁净海洋)的卫星传感器宽动态辐射定标方法(Chen等, 2013; Sun等, 2013; 陈林等, 2016; 王玲等, 2018)。多场地替代定标方法为风云三号MERSI可见光波段在轨辐射响应的非线性特征描述提供了更加精确的定标系数,并延续应用到后续光学遥感仪器可见光波段的在轨非线性特征评价中(Chen等, 2014; 徐娜等, 2012, 2015; 王玲等, 2015, 2017),实现了风云三号系列卫星太阳反射波段长时间序列的一致性辐射定标,定标频次由基于敦煌辐射校正场地的一年一次提升到一月一次,且使不同卫星平台上太阳反射波段辐射差异由5%—10%降低到3%以内(Wang等, 2018)。

星下点交叉过境SNO(Simultaneous Nadir Observation)定标方法是指以国际公认高精度卫星传感器为基准,如MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、IASI(Infrared Atmospheric Sounding Interferometer)、GMI(Global Precipitation Measurement Microwave Imager),选择卫星参考传

感器与待定标传感器同时或近似同时经过相同区域的观测数据,建立参考传感器的入瞳辐射与待定标传感器响应数值之间的关系,来实现对待定标传感器的定标工作(Berg等, 2016; He等, 2022; Chen等, 2013)。其本质是通过参考传感器数据,模拟待定标传感器的大气层顶辐射值,技术关键主要是消除两种传感器时、空、角、谱响应差异的影响及不确定度分析(Gu等, 2023)。参照国际全球天基交叉定标系统GSICS(Global Space-based Inter-Calibration System)的算法规范,SNO定标方法已经应用到风云卫星AGRI、MERSI等多种仪器的辐射定标精度的在轨监测和定标订正(徐娜等, 2012; Hu等, 2013)。

不管是场地定标还是交叉定标,都要求观测目标及其上空大气具备较强的稳定性以保证辐射传输模拟结果的有效性。但是由于人类影响等其他因素,全球地表和大气变化愈发剧烈,难以保证观测目标的稳定性。月球表面大气十分稀薄洁净可以忽略,且月球表面反射非常稳定,符合定标要求的稳定光源观测目标的条件。风云二号与风云三号光学仪器具有对月观测能力,以月亮辐照度为辐射参考基准,开展可见光近红外波段的辐射定标工作(吴荣华等, 2016; 陈林等, 2018)。

### 2.3 地球物理参数反演技术

地球物理参数反演就是研究利用遥感传感器获取的地表地物、云、大气的电磁波信号,转换得到易理解、可应用的地球物理参数的理论和方法(李小文, 2005; 梁顺林等, 2019)。其实质是一个对观测信号的逆向求解过程,即从遥感观测出发,借助数学或物理模型,将遥感信息与物理状态参数联系起来,定量提取或推算出地表、云、大气的物理状态和运动的参数过程(图8)。遥感信息与物理状态参数的关系用离散的逆向模型函数形式来描述如(1)式所示:

$$|X| = f^{-1}(|Y|_{\lambda, t, \theta, h, \dots}) + \varepsilon \quad (1)$$

式中,  $|Y|$ 表示不同观测状态得到的卫星辐射量;  $\lambda, t, \theta, h, \dots$ 代表观测状态条件,例如波长、观测时间、观测角度、轨道高度、太阳位置和极化方向等;  $|X|$ 表示待估计的地球物理参数,  $f$ 是关联观测空间和状态空间的算子,通常是连续非线性

的。若基于辐射传输理论构建两者之间的关系， $f$  即为物理模型，若基于经验方法对两个空间信息进行关联， $f$  为统计模型。 $\varepsilon$  是状态参数与反演算子作用于卫星观测后的残差。

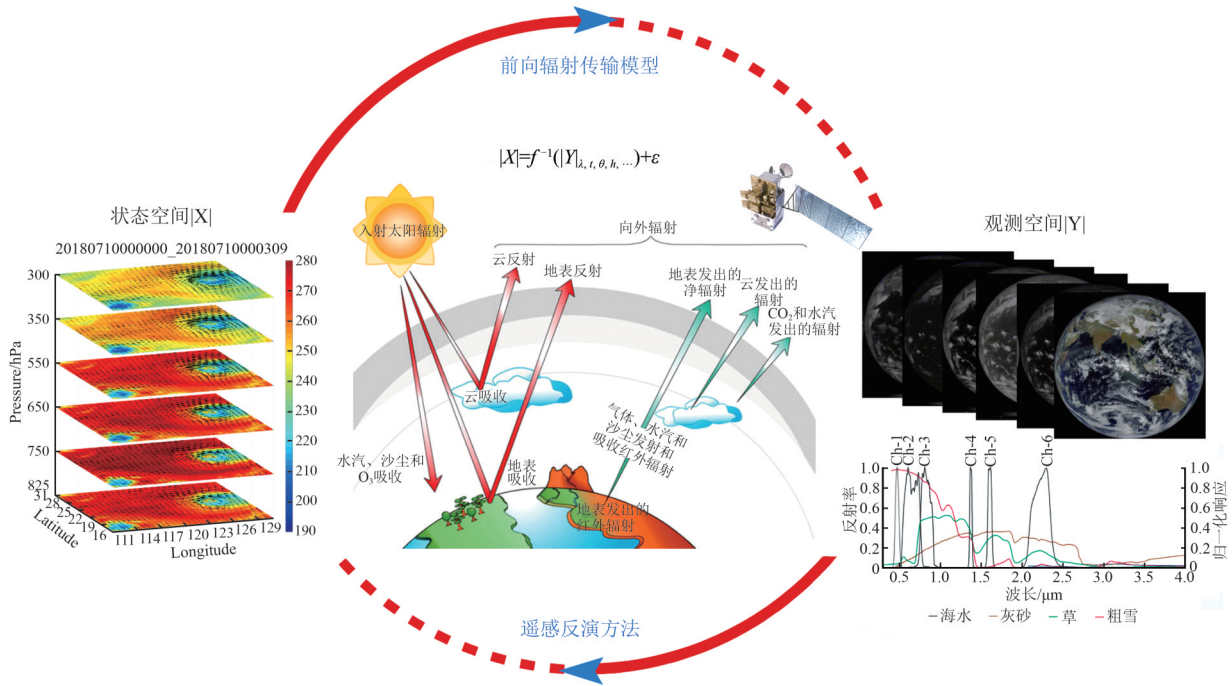


图8 地球物理参数反演理论示意图

Fig. 8 Theoretical framework of geophysical parameter retrieval

由于真实的地球系统是一个耦合了多圈层信息的高度复杂系统，实际很难用完备的参数构建出这么一个系统，因此绝大部分模型都是一种欠定系统。基于辐射传输理论，通过各种假设和近似简化，采用多种正则化方法的制约（如先验知识、空间约束、时间约束、多源数据等），利用有限个参数来逼近，从而实现遥感定量反演（陈良富等，2015；梁顺林，2021）。前向辐射传输模型是遥感定量最核心的研究内容之一，它基于辐射传输理论，根据已知的地表参数、大气状况和传感器参数模拟电磁辐射在大气和地表等介质传播路径上的变化并最终到达传感器的物理过程。前向辐射传输模型基于求解方法可分为解析模型、数值模型，基于波长范围可分为可见光近红外模型、热红外模型、微波模型，基于应用场景可分为大气辐射传输模型、植被冠层辐射传输模型等，目前遥感反演中迫切需要适合复杂场景且便于计算的辐射传输模型（梁顺林等，2020）。

针对遥感反演方法而言，目前主要包括物理反演和统计反演两类方法。其中，物理反演即是从物理规律出发，在对遥感协同机理、辐射传输理论、待反演参量的光学和几何等特征的理解基

础上，构建从观测数据到目标参量之间的表达式。物理反演模型建立过程是透明、可释的。最优化估计方法是早期估算地表参量、云和大气廓线参量的主要物理反演方法（Li和Wang，1999；Li等，2000）。该方法是基于物理模型，通过多次迭代的方法不断调整模型参数(x)，使得基于多个辐射传输模型的模型计算值  $H(x)$  与卫星观测值  $y$  之间的差异不断减少，其在数值上的差异通常用代价函数  $J(x)$  来表达。迭代过程的目的是使得代价函数取得最小值。

$$J(x) = [H(x) - y]^T R^{-1} [H(x) - y] + J_0 \quad (2)$$

式中， $R$  是观测误差的协方差矩阵， $J_0$  是限制项，使得估计值尽可能接近初估值，这些初估值通常由现有卫星数据和地基观测数据来获取先验知识。

随着卫星观测信息的迅速增加，最优估计法在海量遥感数据的反演过程中计算速度较慢，因此高效的查找表 LUT (Look-up Table) 算法在风云卫星遥感业务化算法中得到了广泛应用（Si等，2024a，2024b）。LUT算法在反演算法进行之前，预先在模型中输入参数的所有可能组合来获取各种条件组合下的模拟数据从而建立详尽的 LUT，在后续的反演中搜索 LUT，找到与待反演参数最

为接近的模型值。为了使估算的参数精度尽可能高,就需要LUT考虑的参数组合尽可能复杂。近年来,一些研究采用经验函数拟合(Gastellu-Etchegorry等, 2015)、自适应方法(Hedley等, 2009)、神经网络方法(Shi等, 2021; Zhang等, 2023b)来提高LUT的搜索效率。目前,LUT方法在风云卫星的云检测、云相态、积雪覆盖、植被指数、大气温湿度廓线、气溶胶参数等地球物理参数反演中得到了广泛应用。

由于物理建模的方式难以准确地描述复杂多变的现实情况,一个精确、逼真的物理模型往往又十分复杂,计算成本高昂。同时物理模型包含大量变量,这些变量通常难以逐一获取和计算,也会给物理反演带来巨大的不确定性。近年来,随着人工智能技术的发展和大数据时代的到来,数据驱动的定量反演方法开始飞速发展。这类方法从初始的数据或观测值出发,利用机器学习等工具寻找和建立内部特征之间的关系,从而实现时空预测或发现物理规律。得益于计算能力和人工智能算法的飞速发展,基于数据驱动的定量遥感反演方法在效率、精度等多方面都取得了卓越的成就,越来越广泛地被应用于植被、水文、冰冻圈、大气、地质等多个领域(Yuan等, 2020b; 张兵, 2018; Sun等, 2021; Xu等, 2025)。

最初的数据驱动方法是回归算法。回归算法是假定目标值与特征之间的关系,通过构建损失函数,来求解损失函数最小时的参数。最简单的回归算法是线性回归,其适用于简单参数的求解,该方法简单,高效,稳定,是许多强大的非线性模型的基础;易于理解,结果具有较好的可解释性;对于数据量小、关系简单的数据很有效;但难以很好地表达复杂数据及非线性关系,目前常用于复杂算法的某个步骤求解。后续发展的多项式回归比线性回归更灵活,可模拟一些复杂的关系。风云卫星上目前基于成像仪反演的长波辐射(吴晓, 2014)、海表温度(王素娟等, 2020),以及基于微波成像仪反演的海面风速、海面温度(张森等, 2018)等业务产品均采用统计回归方法。最新的风云三号F星MERSI-III的海表温度算法中构建了5套回归模型,包括分裂窗多通道回归算法、分裂窗带二次项的多通道算法、分裂窗非线性算法、三窗多通道算法以及双窗非线性算法。其中三窗多通道算法和双窗非线性算法主要

针对夜间海表温度反演。从目前精度评估结果看,与浮标观测海温相比,风云卫星海表温度白天的均方根误差约为 $0.5^{\circ}\text{C}$ ,夜间约为 $0.37^{\circ}\text{C}$ ,该精度的海表温度产品可以进一步用于ENSO事件的监测。

近年来人工智能技术被不断应用于遥感反演中(图9)。其中,机器学习算法是回归算法的进一步发展,机器学习模型能够更好地刻画非线性函数关系,能够适应各种复杂多变的遥感数据和地球物理参数之间的关系,学习到数据中的深层次规律和模式,并据此构建出高精度的反演模型。在模型构建过程中,机器学习算法还能够通过迭代和优化过程,调整模型的参数和结构,以实现最佳的反演效果(Han等, 2023)。这种自适应性的优化过程使得机器学习模型能够针对不同地区的遥感数据和环境条件进行个性化调整,从而提高了反演结果的准确性和可靠性。

机器学习方法主要分为神经网络和决策树两类,其中,神经网络是一种复杂的数学模型,决策树是一种基于树状结构的算法。两者都可以用于分类和回归问题。目前风云卫星的红外高光谱联合微波探测仪反演的大气温湿度廓线产品采用的就是基于分段定义的神经网络算法,通过不同网络层复杂激活函数的设定最终建立由卫星观测辐射量到大气温湿度廓线的关系(Bai等, 2023)。决策树算法种类很多,其中代表性算法为随机森林RF(Random Forest)和XGBoost(eXtreme Gradient Boosting)。RF通过构建多个决策树来进行预测,并取所有树的平均值作为最终结果。XGBoost是一种基于梯度提升决策树的集成学习算法,它在处理大规模数据集和复杂模型时展现出了高效、准确和防止过拟合等优势。在大气物理参数反演中,随机森林和XGBoost都可以用于处理复杂的数据集,并提供精确的参数估计。近年来这两种决策树算法在风云卫星产品反演中获得了比较深入的应用,并取得了一些进展。例如,风云三号E星风场测量雷达WindRAD(Wind Radar)海冰产品中使用RF进行海冰类型分类(Zhai等, 2024),风云四号A星AGRI对流层顶折叠检测产品中使用RF反演对流层顶温度和高度信息(Shou等, 2020),以及利用风云卫星多光谱卫星图像采用XGBoost算法预测大气中的近地面颗粒物浓度(Tian等, 2023)。

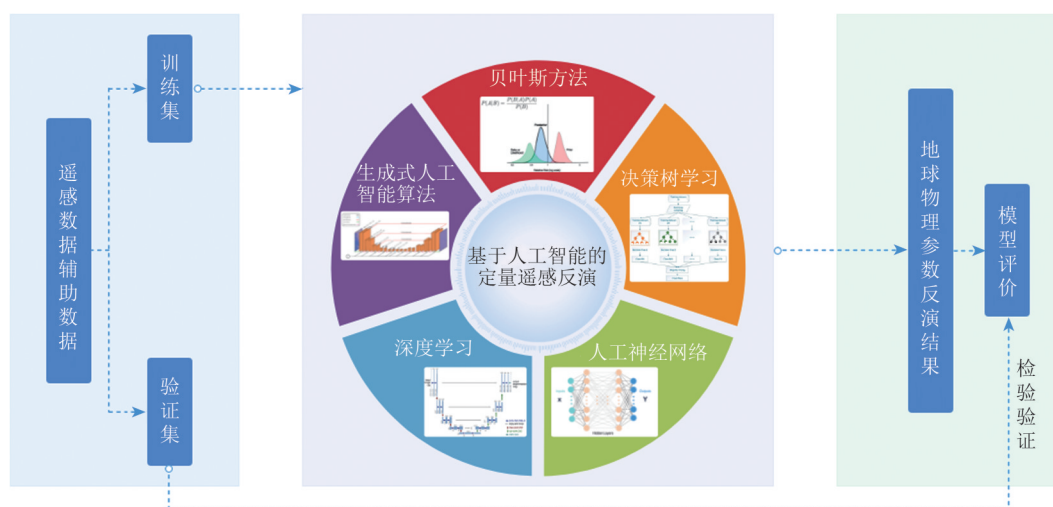


图9 基于人工智能的定量遥感反演框架图

Fig. 9 Framework of AI-based quantitative geophysical parameter retrieval from remote sensing

深度学习是近年来发展迅速的一种新的人工智能方法，是在传统机器学习的神经网络算法上的升级。它通过多层神经网络自动提取特征，能够提取数据内部高维的人类无法认识的特征 (LeCun等, 2015)，从而达到更好地分类或回归效果。目前深度学习已在遥感领域广泛应用，主要包括：土地利用识别、物理参数反演、数据融合和降尺度、信息重建和预测 (Yuan等, 2020a)。针对物理参数的反演，深度学习可建立观测变量及一系列辅助数据与反演参数的关系从而直接进行反演 (Malmgren-Hansen等, 2019; Yuan等, 2020b)。近年来，深度学习技术快速更新换代，特别是生成式人工智能技术能够在学习数据分布后生成新的样本，这些技术对于解决遥感数据不足的问题尤为重要。将新技术引入遥感定量反演永远是极具吸引力的研究方向。

#### 2.4 型谱化应用技术

基于风云卫星定位定标的一级数据及定量反演地球物理参数产品，为实现风云卫星资料业务应用的“最后一公里”，针对不同的用户需求，研发了卫星监测分析与遥感应用系统 SMART (Satellite Monitoring Analyzing and Remote sensing Tools)、卫星天气分析平台 SWAP (Satellite Weather Application Platform)、“风云地球”轻量化应用平台。

SMART主要是针对极轨气象卫星在自然灾害、生态环境和农业气象等领域研制的专业应用软件

工具。平台实现了卫星遥感数据大气校正、投影转换、图像裁剪、重采样、图像增强、几何校正、交互分析、产品制图等卫星遥感处理功能。构建了可扩展的开放式的云+端插件架构，所有的业务应用模块都是插件形态，提供插件的统一注册管理、版本控制、升级安装等服务；实现了多源卫星数据处理及一体化管理，支持国内外多种卫星数据预处理和监测分析，支持台风、暴雨、雾霾、沙尘、蓝藻水化、洪涝、森林草原火灾、干旱、城市热岛、海冰、积雪等卫星遥感监测业务场景的应用 (咸迪等, 2020)。

SWAP主要针对静止气象卫星应用，面向有卫星遥感应应用基础的气象业务和科研人员进行开发设计。平台实现了静止气象卫星数据和产品的动态显示，集成了台风、暴雨、沙尘暴等灾害性天气监测算法，以台风监测为例，可以实现台风大风监测、台风降水分级和强降水落区分析、相似台风分析、台风路径和强度外推、台风综合分析等功能。平台采用多源异构数据应用支撑、“云+端”架构设计、智能影像分析、多终端二三维可视化等多项关键技术 (杨军和董超华, 2011; 高浩等, 2021)。

“风云地球”业务平台主要是面向国省市县的天气预报员提供好用、易用、爱用、管用的轻量级卫星遥感应应用平台，实现了卫星应用服务时效性、算法科学性、产品融合性三方面关键技术创新。在服务时效性方面，风云四号B星快速扫描成像仪云图产品的获取，经过优化视频流等技术，

已将滞后 10 min 提升到小于 3.5 min。在算法科学性方面, 基于需求分析, 严格进行多类数据产品的精度评估、时空匹配, 形成系列应用产品, 比如生产基于风云卫星的温度—对数压力图产品, 时间间隔 2 h, 极大弥补了地基探空观测时空覆盖不足问题。在产品融合性方面, 实现了多仪器融合、多资料融合、多要素融合等 3 方面的融合, 形成了卫星云图与自动站、模式预报、雷达回波融合, 达到综合表征天气系统特点的目标。面向监测目标, 实现多种产品、要素特征融合, 达到侧重表征关注目标特点的目标。多颗卫星同类产品, 匹配处理、优势互补融合, 达到协同表征天气演变特征的目标。

“风云地球”业务平台(图 10)为中国气象局国省市县四级气象业务部门服务, 发布 2 年以来仅

气象部门访问超 30 亿次。针对不同领域用户拓展“风云地球”平台应用产品支撑的侧重点, 以点式、定制化的设计理念积极响应不同需求, 先后研发了“风云地球—慧眼版”、“风云地球—大运会版”、“风云地球—亚运会版”等“行业版”, 以助力乡村全面振兴国家战略和国家重大活动气象服务保障等应用。同时, 在“风云地球”平台基础上, 专门面向国际用户研发的“风云地球—国际版”也在 2023 年正式发布, 已经成功为在所罗门群岛举办的第十七届太平洋运动会提供赛事保障服务, 在当地实时观测资料十分有限的情况下, 风云四号 B 星以所罗门群岛为中心的分钟级快速观测图像产品以及十余种卫星定量产品, 为运动会顺利举办提供了重要的预报决策支撑。

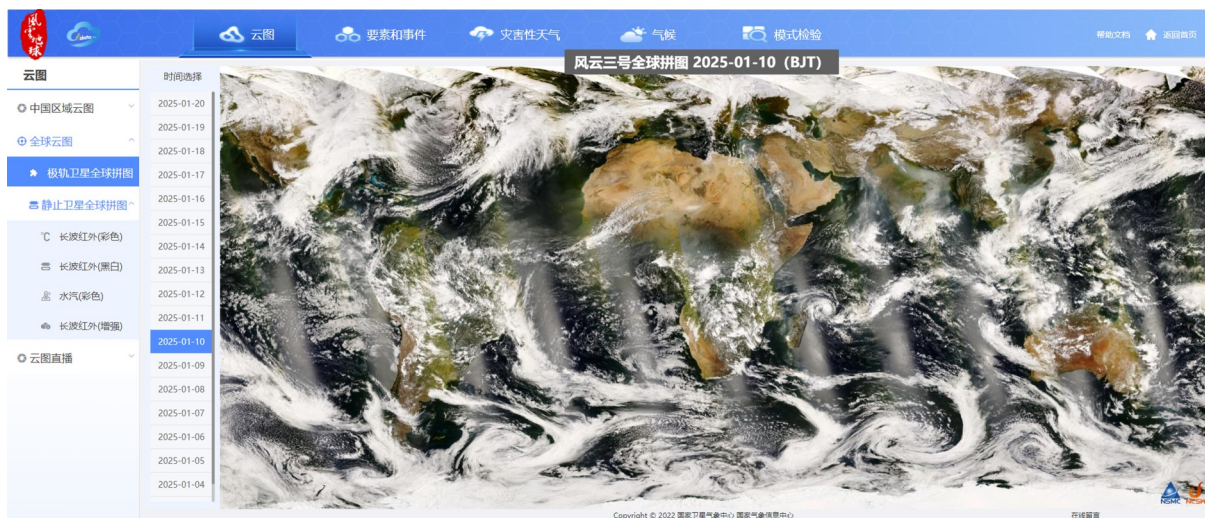


图 10 轻量型风云卫星天气气候应用业务平台——“风云地球”平台的主界面

Fig. 10 Main interface of the FengYun Earth platform, a lightweight operational platform for weather and climate applications of FengYun satellites

### 3 结 语

本文详细介绍了风云卫星定量遥感中的系列关键技术, 从导航定位与配准技术、定标模型与算法获取精准的卫星遥感辐射能量, 到基于辐射传输理论与人工智能技术实现地球物理参数反演, 再到开展针对目标场景的型谱化应用, 最终实现风云卫星从观测到定量应用的业务化发展, 显著提升了我国气象观测领域定量遥感能力。

风云卫星具有大平台、综合观测、业务服务、高精度的优势特点。世界气象组织最新公布的《Vision for the WMO Integrated Global Observing

System in 2040》提供了指导全球综合观测系统未来几十年发展的高层次目标, 针对天基观测系统组成部分提出了更高要求。对标这一愿景, 围绕定量遥感, 未来将从以下几方面强化发展:

(1) 全面提升面向目标场景的定量应用能力。提高数据质量, 降低不确定性; 实现多传感器、多遥感平台、多光谱波段的多源异构数据融合;

(2) 解决星间一致性问题, 构建长序列卫星气候数据集;

(3) 针对风云卫星数据种类多、数据量快速增长、应用时效要求高等特点, 谱系化发展“风云地球”专业版、行业版、公众版、国际版;

未来的风云卫星将会更精、更快、更稳,能够实现全球天气和全球气候的精密监测,实现对新一代地球系统数值模式的观测支撑、空间天气预报业务的观测支撑,深化与生态文明和“双碳”国家战略深度对接,助力联合国2030年可持续发展议程目标实现。

## 参考文献(References)

- Bai W G, Zhang P, Liu H, Zhang W J, Qi C L, Ma G and Li G N. 2023. A fast piecewise-defined neural network method to retrieve temperature and humidity profile for the vertical atmospheric sounding system of FengYun-3E satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 4100910 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3247776]
- Berg W, Bilanow S, Chen R Y, Datta S, Draper D, Ebrahimi H, Farrar S, Jones W L, Kroodsma R, McKague D, Payne V, Wang J, Wilhelm T and Yang J X. 2016. Intercalibration of the GPM microwave radiometer constellation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(12): 2639-2654 [DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0100.1]
- Chen L, Hu X Q, Xu N and Zhang P. 2013. The application of deep convective clouds in the calibration and response monitoring of the reflective solar bands of FY-3A/MERSI (Medium Resolution Spectral Imager). *Remote Sensing*, 5(12): 6958-6975 [DOI: 10.3390/rs5126958]
- Chen L, Xu N, Hu X Q, Lu F and Zhang P. 2016. Study on orbit radiometric calibration for FY-2 visible band based on deep convective cloud. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 36(8): 2639-2645 (陈林, 徐娜, 胡秀清, 陆风, 张鹏). 2016. 基于深对流云目标的风云二号可见光通道辐射定标. *光谱学与光谱分析*, 36(8): 2639-2645 [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)08-2639-07]
- Chen L, Xu N, Li Y, Wu R H, Hu X Q and Zhang P. 2014. FY-3C/MERSI pre-launch calibration for reflective solar bands//Proceedings Volume 9264, Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization III. Beijing: SPIE: 221-229 [DOI: 10.1117/12.2070397]
- Chen L, Zhang P, Lv J Y, Xu N and Hu X Q. 2017. Radiometric calibration evaluation for RSBs of Suomi-NPP/VIIRS and Aqua/MODIS based on the 2015 Dunhuang Chinese Radiometric Calibration Site *in situ* measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38(20): 5640-5656 [DOI: 10.1080/01431161.2017.1343514]
- Chen L, Zhang P, Wu R H, Hu X Q and Zhang L. 2018. Monitoring radiometric response change of visible band for FY-2 geostationary meteorological satellite by lunar target. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 22(2): 211-219 (陈林, 张鹏, 吴荣华, 胡秀清, 张璐). 2018. 利用月球目标监测风云二号静止气象卫星可见光辐射响应变化. *遥感学报*, 22(2): 211-219 [DOI: 10.11834/jrs.20186464]
- Chen L F, Zhang Y, Zou M M, Xu Q, Li L J, Li X Y and Tao J H. 2015. Overview of atmospheric CO<sub>2</sub> remote sensing from space. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 19(1): 1-11 (陈良富, 张莹, 邹铭敏, 徐谦, 李令军, 李小英, 陶金花). 2015. 大气CO<sub>2</sub>浓度卫星遥感进展. *遥感学报*, 19(1): 1-11 [DOI: 10.11834/jrs.20153331]
- Chen Y, Lei R B, Zhao X, Wu S L, Liu Y, Fan P, Ji Q, Zhang P and Pang X P. 2023a. A new sea ice concentration product in the polar regions derived from the FengYun-3 MWRI sensors. *Earth System Science Data*, 15(7): 3223-3242 [DOI: 10.5194/essd-15-3223-2023]
- Chen Z Q, Xie J, Heygster G, Chi Z H, Yang L, Wu S L, Hui F M and Cheng X. 2023b. A simplified coastline inflection method for correcting geolocation errors in FengYun-3D microwave radiation imager images. *Remote Sensing*, 15(3): 813 [DOI: 10.3390/rs15030813]
- Cheng S X, Xu N, Wu R H, Hu X Q, He Y Q, Xiao D and Wang Z Y. 2021. On-orbit subpixel registration of FY-3D MERSI-II based on Lunar observations. *Remote Sensing Technology and Application*, 36(5): 1072-1082 (程思行, 徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 何玉青, 肖达, 汪子意). 2021. 基于月球观测的FY-3D MERSI-II在轨道亚像元配准. *遥感技术与应用*, 36(5): 1072-1082 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.5.1072]
- Datla R U, Rice J P, Lykke K R, Johnson B C, Butler J J and Xiong X. 2011. Best practice guidelines for pre-launch characterization and calibration of instruments for passive optical remote sensing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 116(2): 621-646 [DOI: 10.6028/jres.116.009]
- Gao H, Tang S H and Han X Z. 2021. China's Fengyun (FY) meteorological satellites, development and applications. *Science Technology Review*, 39(15): 9-22 (高浩, 唐世浩, 韩秀珍). 2021. 风云气象卫星发展及其应用. *科技导报*, 39(15): 9-22 [DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.15.001]
- Gastellu-Etchegorry J P, Yin T G, Lauret N, Cajgfinger T, Gregoire T, Grau E, Feret J B, Lopes M, Guilleux J, Dedieu G, Malenovsky Z, Cook B D, Morton D, Rubio J, Durrieu S, Cazanave G, Martin E and Ristorcelli T. 2015. Discrete anisotropic radiative transfer (DART 5) for modeling airborne and satellite spectroradiometer and LIDAR acquisitions of natural and urban landscapes. *Remote Sensing*, 7(2): 1667-1701 [DOI: 10.3390/rs70201667]
- Gu Z, Chen L, Dai H X, Tian L, Hu X Q and Zhang P. 2023. The uncertainty of SNO cross-calibration for satellite infrared channels. *Remote Sensing*, 15(13): 3313 [DOI: 10.3390/rs15133313]
- Guan M and Yang Z D. 2007. Application of on-board GPS data and high-precision orbit model to polar satellites orbits calculation. *Journal of Applied Meteorological Science*, 18(6): 748-753 (关敏, 杨忠东). 2007. 星载GPS数据及高精度轨道模型在极轨卫星轨道计算中的应用. *应用气象学报*, 18(6): 748-753 [DOI: 10.11898/1001-7313.20070602]
- Han W, Zhang X H, Wang Y, Wang L Z, Huang X H, Li J, Wang S,

- Chen W T, Li X J, Feng R Y, Fan R Y, Zhang X Y and Wang Y W. 2023. A survey of machine learning and deep learning in remote sensing of geological environment: challenges, advances, and opportunities. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 202: 87-113 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.05.032]
- He W Y, Chen H B, Xia X A, Wu S L and Zhang P. 2023. Evaluation of the long-term performance of microwave radiation imager On-board Chinese Fengyun satellites. *Advances in Atmospheric Sciences*, 40(7): 1257-1268 [DOI: 10.1007/s00376-023-2199-2]
- He X W, Xu N, Feng X H, Hu X Q, Xu H L and Peng Y. 2022. Assessing radiometric calibration of FY-4A/AGRI thermal infrared channels using CrIS and IASI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 5514512 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3111975]
- Hedley J, Roelfsema C and Phinn S R. 2009. Efficient radiative transfer model inversion for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment*, 113(11): 2527-2532 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.07.008]
- Hollinger J P, Peirce J L and Poe G A. 1990. SSM/I instrument evaluation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5): 781-790 [DOI: 10.1109/36.58964]
- Hu J Y, Chen W X, Chi J D, Sun L, Hu X Q, Wu S L and Qi C L. 2023. Prelaunch performance evaluation of MWTS-III onboard FengYun-3F using thermal vacuum test data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61: 5302710 [DOI: 10.1109/TGRS.2023.3334251]
- Hu X Q, Xu N, Weng F Z, Zhang Y, Chen L and Zhang P. 2013. Long-term monitoring and correction of FY-2 infrared channel calibration using AIRS and IASI. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(10): 5008-5018 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2275871]
- Hu X Q, Zhang Y X, Liu Z Q, Zhang G S, Huang Y B, Qiu K M, Wang Y K, Zhang L J, Zhu X B and Rong Z G. 2001. Optical characteristics of China Radiometric Calibration Site for Remote Sensing Satellite Sensors (CRCSRSSS)//Proceedings Volume 4151, *Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere*. Sendai: SPIE: 77-86 [DOI: 10.1117/12.416994]
- Kim E, Leslie V, Lyu J, Smith C, Osaretin I, Abraham S, Sammons M, Anderson K, Amato J, Fuentes J, Hernquist M, Landrum M, Rodriguez-Gutierrez F, Kam J, Cho P, Yang H, Liu Q H and Sun N H. 2020. Pre-Launch performance of the Advanced Technology Microwave Sounder (ATMS) on the Joint Polar Satellite System-2 Satellite (JPSS-2)//IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE: 6353-6356 [DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324605]
- LeCun Y, Bengio Y and Hinton G. 2015. Deep learning. *Nature*, 521(7553): 436-444 [DOI: 10.1038/nature14539]
- Li J and Huang H L. 1999. Retrieval of atmospheric profiles from satellite sounder measurements by use of the discrepancy principle. *Applied Optics*, 38(6): 916-923 [DOI: 10.1364/AO.38.000916]
- Li J, Wolf W W, Menzel W P, Zhang W J, Huang H L and Achtor T H. 2000. Global soundings of the atmosphere from ATOVS measurements: the algorithm and validation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 39(8): 1248-1268 [DOI: 10.1175/1520-0450(2000)039<1248:GSOTAF>2.0.CO;2]
- Li K. 2021. Research on Key Technologies of Geostationary Orbit High-Resolution Meteorological Satellite Image Processing. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences) (李凯. 2021. 静止轨道高分辨率气象遥感卫星图像处理的若干关键技术研究. 上海: 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所) [DOI: 10.27581/d.cnki.gksjw.2021.000033]
- Li R, Hu J H, Wu S L, Zhang P, Letu H, Wang Y, Wang X W, Fu Y Y, Zhou R J and Sun L. 2022. Spatiotemporal variations of Microwave Land Surface Emissivity (MLSE) over China derived from four-year recalibrated Fengyun 3B MWRI data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(9): 1536-1560 [DOI: 10.1007/s00376-022-1314-0]
- Li X W. 2005. Retrospect, prospect and innovation in quantitative remote sensing. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 35(4): 49-56 (李小文. 2005. 定量遥感的发展与创新. 河南大学学报(自然科学版), 35(4): 49-56) [DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2005.04.012]
- Liang S L. 2021. Some thoughts on the development of quantitative remote sensing in China. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(9): 1889-1895 (梁顺林. 2021. 中国定量遥感发展的一些思考. 遥感学报, 25(9): 1889-1895) [DOI: 10.11834/jrs.20211516]
- Liang S L, Bai R, Chen X N, Cheng J, Fan W J, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L M, Jiao Z T, Liu Y B, Ni Y J, Qiu F, Song L L, Sun L, Tang B H, Wen J G, Wu G P, Xie D H, Yao Y J, Yuan W P, Zhang Y G, Zhang Y Z, Zhang Y T, Zhang X T, Zhao T J and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(6): 618-671 (梁顺林, 白瑞, 陈晓娜, 程洁, 范闻捷, 何涛, 贾坤, 江波, 蒋玲梅, 焦子锦, 刘元波, 倪文俭, 邱凤, 宋柳霖, 孙林, 唐伯惠, 闻建光, 吴桂平, 谢东辉, 姚云军, 袁文平, 张永光, 张玉珍, 张云腾, 张晓通, 赵天杰, 赵祥. 2020. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. 遥感学报, 24(6): 618-671) [DOI: 10.11834/jrs.20209476]
- Liang S L, Li X W and Wang J D. 2019. *Quantitative Remote Sensing: Concepts and Algorithms*. 2nd ed. Beijing: Science Press (梁顺林, 李小文, 王锦地. 2019. 定量遥感: 理念与算法. 2版. 北京: 科学出版社)
- Liu G F, Wu S L, Chen W Y, Pan L and He J K. 2014. Calibration system and achievement of microwave radiation imager of FY-3 satellite. *Journal of Microwaves*, (6): 576-579 (刘高峰, 武胜利, 陈卫英, 潘莉, 何嘉恺. 2014. FY-3卫星微波成像仪定标系统及实现. 微波学报, 30(S1): 576-579) [DOI: 10.14183/j.cnki.1005-6122.2014.s1.164]
- Lu F, Xu J M and Zhang Q S. 2001. Impact study of attitude and pitch misalignment parameters on FY-2 image navigation with simula-

- tion method. *Journal of Applied Meteorological Science*, 12(4): 393-399 (陆风, 许健民, 张其松. 2001. 风云二号气象卫星姿态和沿步进方向失配角参数对图像影响的模拟研究. *应用气象学报*, 12(4): 393-399) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2001.04.002]
- Lü W Q, Mao W N, Huang Y and Qiu Y. 2021. Summary of the development of geostationary meteorological satellite orbit determination technology. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 40(4): 47-52 (鲁文强, 毛维娜, 黄勇, 裘奕. 2021. 静止气象卫星测定轨技术发展综述. *国外电子测量技术*, 40(4): 47-52) [DOI: 10.19652/j.cnki.femt.2102532]
- Lü J Y, Chen L, He M Y and Hu X Q. 2017b. Degradation analysis for FY3B/VIRR reflective solar bands based on the Dunhuang radiometric calibration site. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 37(8): 2397-2401 (吕佳彦, 陈林, 何明元, 胡秀清. 2017b. 基于敦煌辐射校正场的FY3B/VIRR反射太阳波段衰减分析. *光谱学与光谱分析*, 37(8): 2397-2401) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)08-2397-05]
- Lü J Y, He M Y, Chen L, Hu X Q and Li X. 2017a. Automated radiation calibration method based on Dunhuang radiometric calibration site. *Acta Optica Sinica*, 37(8): 0801003 (吕佳彦, 何明元, 陈林, 胡秀清, 李新. 2017a. 基于敦煌辐射校正场的自动化辐射定标方法. *光学学报*, 37(8): 0801003) [DOI: 10.3788/AOS201737.0801003]
- Lü W, Dong Y H, Shen Y L, Zhang Z Q and Chen W Q. 2019. Imaging compensation of orbital motion for geostationary meteorological satellite. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(2): 185-195 (吕旺, 董瑶海, 沈毅力, 张志清, 陈文强. 2019. 静止气象卫星轨道运动的成像补偿研究. *遥感学报*, 23(2): 185-195) [DOI: 10.11834/jrs.20198061]
- Malmgren-Hansen D, Laparra V, Nielsen A A and Camps-Valls G. 2019. Statistical retrieval of atmospheric profiles with deep convolutional neural networks. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 158: 231-240 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.002]
- Nian F, Yang Y J, Chen Y M, Xu D Z and Wang W. 2007. Recent progress on space-borne microwave radiometer pre-launch calibration technologies in China. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 27(Z1): 27-33 (年丰, 杨于杰, 陈云梅, 徐德忠, 王伟. 2007. 中国星载微波辐射计地面定标技术的研究进展. *宇航计测技术*, 27(Z1): 27-33) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-7202.2007.z1.005]
- Rosenberg R, Maxwell S, Johnson B C, Chapsky L, Lee R A M and Pollock R. 2017. Preflight radiometric calibration of orbiting carbon observatory 2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(4): 1994-2006 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2634023]
- Shang J, Yang L, Huang P, Yang H Z, Liu C B, Wang J, Zhao L, Zhou S X, Chen X D and Zhang Z Q. 2019. Instrument observation strategy for a new generation of three-axis-stabilized geostationary meteorological satellites from China. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 8(2): 161-175 [DOI: 10.5194/gi-8-161-2019]
- Shang J, Shi H Q, Yuan M, Wu Q, Lv A L, Dou F L, Yin H G, Liu L X and Hu X Q. 2025. Satellite-ground integrated external calibration of the WindRAD scatterometer onboard FY-3E satellite. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63: 1-10 [DOI: 10.1109/TGRS.2025.3526834]
- Shi C, Hashimoto M, Shiomi K and Nakajima T. 2021. Development of an algorithm to retrieve aerosol optical properties over water using an artificial neural network radiative transfer scheme: first result from GOSAT-2/CAI-2. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(12): 9861-9872 [DOI: 10.1109/TGRS.2020.3038892]
- Shou Y X, Lu F and Shou S W. 2020. High-resolution Fengyun-4 satellite measurements of dynamical tropopause structure and variability. *Remote Sensing*, 12(10): 1600 [DOI: 10.3390/rs12101600]
- Si Y D, Chen L, Wang Y Y, Xu N, Zhang X Y, Yang L K, Hu X Q and Shi S Y. 2024a. An improved aerosol retrieval algorithm based on nonlinear surface model from FY-3D/MERSI-II remote sensing data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62: 4103017 [DOI: 10.1109/TGRS.2024.3367883]
- Si Y D, Gao L, Chen L, Tan Q X, Zhang X Y, Li B, Yan H H, Zhang X H, Lu F and Zhang X H. 2024b. An adaptive dark-target algorithm for retrieving land AOD applied to FY-4B/AGRI data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 14035-14049 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3408251]
- Skou N and Le Vine D. 2006. *Microwave Radiometer Systems, Design and Analysis*. 2nd ed. Boston: Artech House
- Sun F L, Li B, Min M and Qin D Y. 2021. Deep learning-based radar composite reflectivity factor estimations from Fengyun-4A geostationary satellite observations. *Remote Sensing*, 13(11): 2229 [DOI: 10.3390/rs13112229]
- Sun J Q and Wang M H. 2015. On-orbit characterization of the VIIRS solar diffuser and solar diffuser screen. *Applied Optics*, 54(2): 236-252 [DOI: 10.1364/AO.54.000236]
- Sun L, Hu X Q, Guo M H and Xu N. 2012. Multisite calibration tracking for FY-3A MERSI solar bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(12): 4929-4942 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2215613]
- Sun L, Hu X Q, Xu N, Liu J J, Zhang L J and Rong Z G. 2013. Post-launch calibration of FengYun-3B MERSI reflective solar bands. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(3): 1383-1392 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2217345]
- Tang S H, Qiu H and Ma G. 2016. Review on progress of the Fengyun meteorological satellite. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 842-849 (唐世浩, 邱红, 马刚. 2016. 风云气象卫星主要技术进展. *遥感学报*, 20(5): 842-849) [DOI: 10.11834/jrs.20166232]
- Tian L, Chen L, Zhang P, Hu B, Gao Y and Si Y D. 2023. The ground-level particulate matter concentration estimation based on the new generation of FengYun geostationary meteorological satellite. *Remote Sensing*, 15(5): 1459 [DOI: 10.3390/rs15051459]

- Wang J C, Wang J, Liu C B, Yang L, Shang J, Zhang Z Q and Cao Y. 2024. Orbit motion compensation modeling and simulation analysis for FY-4 geostationary meteorological satellite. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(10): 1879-1890 (王嘉琛, 王静, 刘成保, 杨磊, 商建, 张志清, 曹赞. 2024. 风云四号卫星轨道运动补偿算法建模与仿真分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 49(10): 1879-1890) [DOI: 10.13203/j.whugis20220314]
- Wang J, Jiang L M, Wu S L, Zhang C, Chen Y Y, Li H, Yang J W, Pan F B and Cui H Z. 2022. Land surface freeze/thaw detection over the Qinghai - Tibet plateau using FY-3/MWRI data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4305017 [DOI: 10.1109/TGRS.2022.3182359]
- Wang J, Liu C B, Yang L, Shang J and Zhang Z Q. 2018. Calculation of geostationary satellites' nominal fixed grid and its application in FY-4A advanced geosynchronous radiation imager. *Acta Optica Sinica*, 38(12): 1211001 (王静, 刘成保, 杨磊, 商建, 张志清. 2018. 静止气象卫星标称网格的计算方法及其在风云四号中的应用. *光学学报*, 38(12): 1211001) [DOI: 10.3788/AOS201838.1211001]
- Wang L, Hu X Q and Chen L. 2015. FY-3C/MERSI calibration for solar band using multi-reflectance stable targets. *Optics and Precision Engineering*, 23(7): 1911-1920 (王玲, 胡秀清, 陈林. 2015. 基于多种亮度稳定目标的FY-3C/中分辨率光谱成像仪的反射太阳波段辐射定标. *光学精密工程*, 23(7): 1911-1920) [DOI: 10.3788/OPE.20152307.1911]
- Wang L, Hu X Q and Chen L. 2017. Wide dynamic nonlinear radiometric calibration of optical satellite sensors using multiple stable earth targets. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 21(6): 892-906 (王玲, 胡秀清, 陈林. 2017. 多目标的卫星仪器宽动态非线性定标. *遥感学报*, 21(6): 892-906) [DOI: 10.11834/jrs.20176351]
- Wang L, Hu X Q, Chen L and He L L. 2018. Consistent calibration of VIRR reflective solar channels onboard FY-3A, FY-3B, and FY-3C using a multisite calibration method. *Remote Sensing*, 10(9): 1336 [DOI: 10.3390/rs10091336]
- Wang L, Hu X Q, Zheng Z J and Chen L. 2018. Radiometric calibration tracking detection for FY-3A/MERSI by joint use of snow targets in South and North Poles. *Acta Optica Sinica*, 38(2): 0212003 (王玲, 胡秀清, 郑照军, 陈林. 2018. 联合南北极冰雪目标的FY-3A/MERSI辐射定标跟踪监测. *光学学报*, 38(2): 0212003) [DOI: 10.3788/AOS201838.0212003]
- Wang S J, Cui P, Zhang P, Yang Z D, Hu X Q, Ran M N, Liu J, Lin M J and Qiu H. 2020. FY-3C/VIRR sea surface temperature products and quality validation. *Journal of Applied Meteorological Science*, 31(6): 729-739 (王素娟, 崔鹏, 张鹏, 杨忠东, 胡秀清, 冉茂农, 刘健, 林曼筠, 邱红. 2020. FY-3C/VIRR海表温度产品及质量检验. *应用气象学报*, 31(6): 729-739) [DOI: 10.11898/1001-7313.20200608]
- Wang Y, Zhang D D, Zhang E, Xiong Q Q, Niu X H and Chen S S. 2024. Pre-launch calibration technology of DQ-1 Wide-Field Imaging Spectrometer. *Aerospace Shanghai*, 41(1): 137-145 (王阳, 张冬冬, 张镠, 熊千千, 钮新华, 陈帅帅. 2024. DQ-1宽幅成像光谱仪发射前载荷定标技术. *上海航天*, 41(1): 137-145) [DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2024.01.018]
- Wei C W, Weng F Z, Wu S L, Wu D L and Zhang P. 2022. Retrieval of soil moisture from FengYun-3D Microwave Radiation Imager operational and recalibrated data using random forest regression. *Atmosphere*, 13(4): 637 [DOI: 10.3390/atmos13040637]
- Wentz F J, Ashcroft P and Gentemann C. 2001. Post-launch calibration of the TRMM microwave imager. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(2): 415-422 [DOI: 10.1109/36.905249]
- Wentz F J and Draper D. 2016. On-Orbit absolute calibration of the global precipitation measurement microwave imager. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(7): 1393-1412 [DOI: 10.1175/JTECH-D-15-0212.1]
- Wu R H, Zhang P, Yang Z D, Hu X Q, Ding L and Chen L. 2016. Monitor radiance calibration of the remote sensing instrument with reflected lunar irradiance. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(2): 278-289 (吴荣华, 张鹏, 杨忠东, 胡秀清, 丁雷, 陈林. 2016. 基于月球反射的遥感器定标跟踪监测. *遥感学报*, 20(2): 278-289) [DOI: 10.11834/jrs.20165155]
- Wu S L, Sun F L, Gu S Y and Zhang P. 2023. RE-calibration of MWRI Onboard FY series satellites//IGARSS 2023 - 2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE: 4384-4387 [DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10282857]
- Wu X. 2014. Retrieval model for estimating clear-sky downward long-wave radiation at the surface from the FY-4 geostationary satellite. *Climatic and Environmental Research*, 19(3): 362-370 (吴晓. 2014. 从FY-4静止气象卫星估算晴空地表下行长波辐射通量的反演模式. *气候与环境研究*, 19(3): 362-370) [DOI: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13032]
- Xia X R, He W Y, Wu S L, Fu D S, Shao W, Zhang P and Xia X G. 2023. A thorough evaluation of the passive microwave radiometer measurements onboard three Fengyun-3 satellites. *Journal of Meteorological Research*, 37(4): 573-588 [DOI: 10.1007/s13351-023-2198-3]
- Xian D, Fang X, Jia X and Ying C. 2020. Fengyun-4 meteorological satellite weather application platform and its applications. *Satellite Application*, (2): 20-24 (咸迪, 方翔, 贾煦, 迎春. 2020. 风云四号气象卫星天气应用平台及其应用. *卫星应用*, (2): 20-24) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2020.02.008]
- Xian D, Zhang P, Fang M, Liu C and Jia X. 2021a. The first Fengyun satellite international user conference. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(8): 1429-1432 [DOI: 10.1007/s00376-020-2011-5]
- Xian D, Zhang P, Gao L, Sun R J, Zhang H Z and Jia X. 2021b. Fengyun meteorological satellite products for earth system science applications. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(8): 1267-1284 [DOI: 10.1007/s00376-021-0425-3]
- Xiao Z H, Zhang Z Y and Guo W. 2000. A review: the calibration of ground-based, airborne and satellite-borne microwave radiome-

- ters. *Remote Sensing Technology and Application*, 15(2): 113-120 (肖志辉, 张祖荫, 郭伟. 2000. 地基、空基、星基微波辐射计定标技术概览. *遥感技术与应用*, 15(2): 113-120) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2000.2.113]
- Xie X, Xiong X X, Moyer D, Sun J Q, Liu X and Barnes W. 2005. Analysis of MODIS solar diffuser screen vignetting function//*Proceedings Volume 5882, Earth Observing Systems X*. San Diego: SPIE: 271-281 [DOI: 10.1117/12.615394]
- Xie X X, Wu S L, Xu H X, Yu W M, He J K and Gu S Y. 2019. Ascending-Descending bias correction of microwave radiation imager on board FengYun-3C. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(6): 3126-3134 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2881094]
- Xu J M. 2020. Pathways on solving problems at algorithm improvements for FY-2 meteorological satellite at image navigation and wind vector derivation. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology*, 12(1): 1-6 (许健民. 2020. 风云二号气象卫星图像定位和卫星风精度的改善中解决问题的途径. *南京信息工程大学学报*, 12(1): 1-6) [DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2020.01.002]
- Xu J M, Guo Q, Lu Q F, Lu F and Zhang X H. 2014. Innovations in the data processing algorithm for Chinese FY meteorological satellites. *Acta Meteorologica Sinica*, 72(5): 1023-1038 (许健民, 郭强, 陆其峰, 陆风, 张晓虎. 2014. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新. *气象学报*, 72(5): 1023-1038) [DOI: 10.11676/qxxb2014.086]
- Xu J M, Lu F and Zhang Q S. 2001. Real-time, fully automated, high-precision positioning of the Fengyun-2 meteorological satellite//*The Thirteenth National Academic Conference on Remote Sensing Technology*. Fuzhou: [s.n.] (许健民, 陆风, 张其松. 2001. 风云二号气象卫星的实时、全自动、高精度定位//第十三届全国遥感技术学术交流会. 福州: [s.n.]
- Xu N, Hu X Q, Chen L and Min M. 2012. Inter-calibration of infrared channels of FY-2/VISSR using high-spectral resolution sensors IASI and AIRS. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 16(5): 939-952 (徐娜, 胡秀清, 陈林, 闵敏. 2012. FY-2 静止卫星红外通道的高光谱交叉定标. *遥感学报*, 16(5): 939-952) [DOI: 10.11834/jrs.20121273]
- Xu N, Niu X H, Hu X Q, Wang X H, Wu R H, Chen S S, Chen L, Sun L, Ding L, Yang Z D and Zhang P. 2018. Pre-launch calibration and radiometric performance of the advanced MERSI II on FengYun-3D. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(8): 4866-4875 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2841827]
- Xu N, Wu R H, Hu X Q, Chen L, Wang L and Sun L. 2015. Integrated method for on-orbit wide dynamic vicarious calibration of FY-3C MERSI reflective solar bands. *Acta Optica Sinica*, 35(12): 1228001 (徐娜, 吴荣华, 胡秀清, 陈林, 王玲, 孙凌. 2015. FY-3C MERSI 反射波段在轨宽动态综合辐射定标方法. *光学学报*, 35(12): 1228001) [DOI: 10.3788/AOS201535.1228001]
- Xu R H, Pan Z R, Han Y, Zheng W and Wu S L. 2023. Surface properties of global land surface microwave emissivity derived from FY-3D/MWRI measurements. *Sensors*, 23(12): 5534 [DOI: 10.3390/s23125534]
- Xu R H, Wang X, Hu Y H, Chen L, Ren S L, Cao G Z, Xian D and Mogha E R. 2025. Estimation of all-sky gridded diurnal near-surface air temperatures at regional scale from FY-4B measurements. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 1288-1301 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3506857]
- Yang H, Weng F Z, Lv L Q, Lu N M, Liu G F, Bai M, Qian Q Y, He J K and Xu H X. 2011. The FengYun-3 Microwave Radiation Imager on-orbit verification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(11): 4552-4560 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2148200]
- Yang J and Dong C H. 2011. *New-Generation Fengyun Polar-Orbiting Meteorological Satellite Operational Products and Applications*. Beijing: Science Press (杨军, 董超华. 2011. 新一代风云极轨气象卫星业务产品及应用. 北京: 科学出版社)
- Yang J, Zhang P, Lu N M, Yang Z D, Shi J M and Dong C H. 2012. Improvements on global meteorological observations from the current Fengyun 3 satellites and beyond. *International Journal of Digital Earth*, 5(3): 251-265 [DOI: 10.1080/17538947.2012.658666]
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, Lu F and Guo Q. 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(8): 1637-1658 [DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0065.1]
- Yang Z D and Guan M. 2008. Research on precise geolocation model and method using satellite remote sensing. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 12(2): 312-321 (杨忠东, 关敏. 2008. 风云卫星遥感数据高精度地理定位软件系统开发研究. *遥感学报*, 12(2): 312-321) [DOI: 10.11834/jrs.20080241]
- Yang Z D, Zhen Y Q, Yin Z S, Lin C, Bi Y M, Liu W, Wang Q, Wang L, Gu S Y and Tian L F. 2018. Pre-launch radiometric calibration of the TanSat atmospheric carbon dioxide grating spectrometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(7): 4225-4233 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2829224]
- Yao P P, Lu H, Zhao T J, Wu S L, Peng Z Q, Cosh M H, Jia L, Yang K, Zhang P and Shi J C. 2023. A global daily soil moisture dataset derived from Chinese Fengyun Microwave Radiation Imager (MWRI) (2010-2019). *Scientific Data*, 10(1): 133 [DOI: 10.1038/s41597-023-02007-3]
- Yuan Q Q, Shen H F, Li T W, Li Z W, Li S W, Jiang Y, Xu H Z, Tan W W, Yang Q Q, Wang J W, Gao J H and Zhang L P. 2020a. Deep learning in environmental remote sensing: achievements and challenges. *Remote Sensing of Environment*, 241: 111716 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111716]
- Yuan Q Q, Xu H Z, Li T W, Shen H F and Zhang L P. 2020b. Estimating surface soil moisture from satellite observations using a generalized regression neural network trained on sparse ground-based measurements in the continental U.S. *Journal of Hydrology*, 580:

- 124351 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124351]
- Zhai X C, Tian S R, Ye Y F, Cao G Z, Chen L, Xu N and Zheng Z J. 2024. First results of Antarctic sea ice classification using space-borne dual-frequency scatterometer FY-3E WindRAD. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 21: 2000105 [DOI: 10.1109/LGRS.2023.3339720]
- Zhang B. 2018. Remotely sensed big data era and intelligent information extraction. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 1861-1871 (张兵. 2018. 遥感大数据时代与智能信息提取. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(12): 1861-1871) [DOI: 10.13203/j.whugis20180172]
- Zhang H P, Su Y, Shang J, Yang L, Cai B W, Liu C B, Wang J, Zhou S X and Zhang Z Q. 2018. Accurate star centroid detection for the advanced geosynchronous radiation imager of Fengyun-4A. *IEEE Access*, 6: 7987-7999 [DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2798625]
- Zhang M, Wang S J, Qin D Y, Qiu H and Tang S H. 2018. The inversion and quality validation of FY-3C MWRI sea surface temperature. *Journal of Remote Sensing*, 22(5): 713-722 (张森, 王素娟, 覃丹宇, 邱红, 唐世浩. 2018. FY-3C 微波成像仪海面温度产品算法及精度检验. *遥感学报*, 22(5): 713-722) [DOI: 10.11834/jrs.20187217]
- Zhang P, Gu S Y, Chen L, Shang J, Lin M Y, Zhu A J, Yin H G, Wu Q, Shou Y X, Sun F L, Xu H L, Yang G L, Wang H F, Li L, Zhang H W, Chen S J and Lu N M. 2023a. FY-3G satellite instruments and precipitation products: first report of China's Fengyun rainfall mission in-orbit. *Journal of Remote Sensing*, 3: 0097 [DOI: 10.34133/remotesensing.0097]
- Zhang P, Hu X Q, Lu Q F, Zhu A J, Lin M Y, Sun L, Chen L and Xu N. 2022a. FY-3E: the first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(1): 1-8 [DOI: 10.1007/s00376-021-1304-7]
- Zhang P, Yang J, Wang J S and Yu X W. 2021. Preface to the special issue on Fengyun meteorological satellites: data, application and assessment. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(8): 1265-1266 [DOI: 10.1007/s00376-021-1002-5]
- Zhang X H, Shi C, Si Y D, Letu H, Wang L, Tang C Q, Xu N, He X Q, Yin S, Zhang Z H and Chen L. 2023b. Remote sensing of aerosols and water-leaving radiance from Chinese FY-3/MERSI based on a simultaneous method. *Remote Sensing*, 15(24): 5650 [DOI: 10.3390/rs15245650]
- Zhang Z, Wang Z Z, He W M and Tong X L. 2022b. An improved coastline inflection method for geolocation correction of Microwave Radiation Imager data. *International Journal of Remote Sensing*, 43(12): 4410-4435 [DOI: 10.1080/01431161.2022.2112109]
- Zhang Z Q, Lu F, Fang X, Tang S H, Zhang X H, Xu Y L, Han W, Nie S P, Shen Y B and Zhou Y Q. 2017. Application and development of FY-4 meteorological satellite. *Aerospace Shanghai*, 34(4): 8-19 (张志清, 陆风, 方翔, 唐世浩, 张晓晓, 许映龙, 韩威, 聂肃平, 申彦波, 周毓荃. 2017. FY-4 卫星应用和发展. *上海航天*, 34(4): 8-19) [DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2017.04.002]
- Zhao M J, Si F Q, Jiang Y, Zhou H J, Wang S M and Liu W Q. 2013. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer. *Optics and Precision Engineering*, 21(3): 567-574 (赵敏杰, 司福祺, 江宇, 周海金, 汪世美, 刘文清. 2013. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标. *光学精密工程*, 21(3): 567-574) [DOI: 10.3788/OPE.20132103.0567]
- Zheng F J. 2011. Research on radiometric and geometric laboratory calibration methods of aerial remote sensing camera. *Jiaozuo: Henan Polytechnic University* (郑逢杰. 2011. 航空遥感相机辐射与几何实验室定标方法的研究. 焦作: 河南理工大学)
- Zuo F H, Hu X Q, Wang X, Qi C L, Xu H L and Li L. 2022. Positioning and calibration accuracy evaluation of HIRAS-II by FY-3E imager on same platform. *Acta Optica Sinica*, 42(24): 2430002 (左丰华, 胡秀清, 王霞, 漆成莉, 徐寒列, 李路. 2022. FY-3E 同平台成像仪对 HIRAS-II 定位与定标精度评估. *光学学报*, 42(24): 2430002) [DOI: 10.3788/AOS202242.2430002]

## FengYun satellites: From observations to quantitative applications

CHEN Lin<sup>1,3</sup>, XU Na<sup>1,3</sup>, WANG Jinsong<sup>2,3</sup>, SHANG Jian<sup>1,3</sup>, SHOU Yixuan<sup>1,3</sup>, LI Bo<sup>1,3</sup>, XU Ronghan<sup>1,3</sup>,  
WU Shengli<sup>1,3</sup>, WANG Xin<sup>1,3</sup>, ZHENG Wei<sup>1,3</sup>, JIA Shuze<sup>1,3</sup>

1. Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Space Weather, National Satellite Meteorological Center (National Center for Space Weather), China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

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

**Abstract:** Presently, China has successfully launched a total of 21 FengYun meteorological satellites of two generations and four types, thereby becoming the only country in the world to operate four civil meteorological satellites in near-Earth orbit concurrently in the morning, afternoon, early morning, and inclined orbits. Furthermore, China has achieved the mode of having multiple satellites in orbit in

geostationary orbit, operating in a coordinated manner, backing up each other, and enhanced observations as necessary. The impact of the FengYun satellites has been far-reaching, extending to various fields such as meteorological disaster prevention and mitigation, climate change response, ecological civilization construction, and governmental decision-making services. Notably, they have played a pivotal role in supporting the construction of the ‘One Belt, One Road’ initiative and the establishment of a community of shared destiny. This paper focuses on the scientific problems and development trends that need to be solved from observations to quantitative applications of FengYun satellite, and describes some innovations of key technologies for quantitative applications of FengYun satellite in four aspects, namely, navigation and positioning, high-precision calibration, geophysical parameter retrieval, and spectralized applications.

Navigation and positioning technology forms the basis for the quantitative application of FengYun meteorological satellite images, thereby resolving the issue of accurately identifying the observation target. The geometric positioning model is constructed using parameters such as satellite position and attitude, and the geometric model is corrected by using landmarks and sea-land boundary alignment to obtain the geographic coordinates of any pixel in the image in the geoidal coordinate system. This enables the high-precision positioning of the target of satellite observation. The analysis identified satellite orbit and attitude measurement errors, instrument installation errors, time errors, and scanning angle measurement errors as the primary factors contributing to deviations in image navigation and positioning.

High-precision calibration of satellite remote sensing instruments is defined as the process of verifying and adjusting the observation data of remote sensing instruments to ensure optimal accuracy and stability. In the narrow sense, calibration entails the establishment of an accurate quantitative relationship between the input radiant energy and the instrument response voltage during the observation process. This enables the precise measurement of the radiant energy of the observation target through the variation of the instrument response during satellite observation to Earth. The calibration process encompasses various methods, including laboratory calibration, on-board calibration, active external calibration, and alternative calibration.

Geophysical parameter retrieval is the study of the theory and method of using electromagnetic wave signals of surface features, clouds and atmosphere, acquired by remote sensing sensors, to convert them into geophysical parameters that are easy to understand and apply. In essence, it is an inverse solving process of the observed signals, i.e. starting from remote sensing observation, with the help of mathematical or physical models, linking the remote sensing information with the physical state parameters, and quantitatively extracting or extrapolating the parameter process of the physical state and movement of the ground surface, clouds, and the atmosphere. At present, the inversion methods mainly include physical inversion based on radiation transmission mechanism and data-driven statistical inversion based on two types of methods.

Spectralized applications technology have been researched and applied to meet the needs of different users by development of SMART (Satellite Monitoring, Analysis and Remote sensing Tools), SWAP (Satellite Weather Application Platform), and ‘FengYun Earth’ lightweight application platform to realise the ‘last kilometre’ of business application of FengYun satellite data.

**Key words:** FengYun satellites, observation, positioning, calibration, retrieval, quantitative applications, ground segment

**Supported by** National Key Research and Development Program of China (No.2023YFB3907500)