

基于遥感云计算平台的卫星影像大气校正应用系统的设计

李 绅¹, 王丽娜², 诸葛瑞龙¹, 史云飞¹, 吕春光¹

(1. 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276000; 2. 山东建筑大学测绘地理信息学院, 山东 济南 250101)

摘要: 针对传统大气校正处理模式在数据共享以及业务流程等方面的不足, 依托 PIE-Engine 遥感云计算平台, 采用 FastAPI Web 框架的前后端分离技术, 设计了支持 PSG 等高性能大气辐射传输模型的卫星影像大气校正在线应用系统。在此基础上, 开发了一种可指定传感器、目标点位和观测时间等输入条件, 运用自适应查找表快速处理业务的大气校正原型系统。该系统的设计和研究, 有效拓展了遥感云计算平台的应用领域, 也为日后实现功能完备的遥感影像处理分析在线应用系统提供了技术支持。

关键词: 大气校正, 遥感云计算平台, 前后端分离, 自适应查找表, 行星光谱生成器

中图分类号: TP79

文献标识码: A

DOI: 10.19769/j.zdhy.2024.05.072

Design of Satellite Image Application System for Atmospheric Correction Based on Remote Sensing Cloud Computing Platform

LI Shen¹, WANG Lina², ZHUGE Ruilong¹, SHI Yunfei¹, LV Chunguang¹

(1. College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276000, China;

2. School of Surveying and Geo-Informatics, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: To address the shortcomings of the traditional atmospheric correction processing model in terms of data sharing and business processes, an online application system for atmospheric correction of satellite images is designed relying on the PIE-Engine, a remote sensing cloud computing platform, the FastAPI Web framework to hold separation of frontend and backend, as well as a high-performance atmospheric radiation transmission models such as Planetary Spectrum Generator. Based on all above, this research has developed a prototype system of atmospheric correction that can fast response the presupposed input criteria such as sensor type, target location and observation time with the support of the adaptive lookup table. The design and research of this system can give the extension of remote sensing cloud computing platform effectively, and also provide technical support to realize a fully functional online application system for remote sensing image processing and analysis in the future.

Key words: atmospheric correction, remote sensing cloud computing platform, separation of frontend and backend, adaptive lookup tables, planetary spectrum generator

0 引言

大气校正通过消除卫星遥感影像中大气效应造成的辐射误差, 以获得地物表面的反射率(以下简称地表面反射率)^[1-2]。地表反射率反映了地物的真实光谱特征, 可用于估算植被覆盖度和土壤含水量等各类地表理化参数, 在环境监测、资源管理、农业评估等领域具有重要意义, 是

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202210452007)

作者简介: 李绅, 男, 2001 年生, 研究方向为 GIS 设计、开发与应用。

通信作者: 吕春光, 男, 1985 年生, 博士, 副教授, 研究方向为 GIS 设计、开发与应用以及遥感技术应用, E-mail: lvchunguang@lyu.edu.cn。

定量遥感的基础^[3]。近年来, 遥感过程机理的日趋完善、大数据和云计算的技术更新深刻地影响了遥感数据预处理的应用方式^[4]。遥感过程机理与模型的日渐丰富完善使大气散射等辐射传输过程更明确, 为大气校正的精准实施提供了保证^[5]。云技术和大数据技术的快速发展改变了传统遥感先下载后处理的操作方式, 使大规模遥感数据的存储、处理和分析变得更高效率和便捷, 为大气校正的实施和应用提供了更好的支持^[6]。以上技术方法为应对大规模遥感数据处理, 设计高效、自动化的大气校正流程奠定了一定基础。

大气校正流程主要考虑了大气成分、气溶胶特性、观测几何等因素, 以估算大气散射和透过率。代表性的大气校正模式包括 FLAASH(Fast Line-of-Sight Atmospheric Analy-

sis of Spectral Hypercubes)^[7-8]和 6S(Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum)大气校正模型等^[9]。近年来,遥感云平台如谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)和 PIE-Engine 在大气校正领域取得了重要进展。GEE 是由 Moore 和 Hansen 开发的云端计算平台,该平台集成了 Landsat 和 MODIS 等历史数据以及云端算法,并将国际合作、数据密集分析、巨大的计算资源和高端可视化科学范式予以落实^[10-13]。值得注意的是,除 GEE 外,以 PIE-Engine 为代表的国产遥感云计算平台发展迅速,其在提供强大计算和存储能力的同时,还支持高分和风云等国产卫星数据的处理^[14-15]。此外,大气辐射传输模型的完善也为大气校正提供了支持,如 MODTRAN 和行星光谱生成器(Planetary Spectrum Generator, PSG)等模型能更准确地模拟大气散射和辐射传输过程^[16-17]。通过这些技术,可以优化和完善大气校正,提高校正结果的准确性和可靠性。本文尝试基于我国自主研发的 PIE-Engine 提供卫星遥感云平台数据资源,通过 FastAPI 框架设计前后端分离的 B/S 系统应用,实现一种可根据指定输入参数并能够灵活运用查找表和大气辐射传输模型快速处理业务的大气校正系统,为建立高效便捷的大气校正流程提供技术支持。

1 系统设计

1.1 需求分析

(1)FLAASH 和 6S 等经典大气校正模型通常以本地应用程序的方式提供功能,缺乏数据的发布和共享机制。采用 FastAPI Web 框架,可在有效整合 Python 开发环境科学计算功能的基础上,运用前后端分离技术,实现大气校正等遥感影像预处理的 B/S 应用,提供差异化的增值服务。

(2)目前,以 PIE-Engine 为代表的国产遥感云计算平台凭借海量的数据资源及丰富的遥感算子等优势,已成为遥感影像处理的新型解决方案。以 PIE-Engine 作为卫星影像数据依托,可有效解决海量影像需求与本地服务器端存储方面的矛盾,实现高效能、低成本的遥感影像大气校正应用系统。

(3)PSG 是一种先进的大气辐射传输模型,能提供从紫外至远红外的超高光谱辐射模拟观测结果。系统平台将 PSG 作为前向模型,可为多源遥感影像大气校正标准化平台的设计提供重要保证,有助于丰富现有卫星遥感影像的大气校正产品,实现其横向比对和精度提升。

1.2 总体架构

按照逻辑关系,卫星影像大气校正应用系统设计了 5 层体系架构,各分系统分别从属于平台层、数据层、技术支撑层、功能层、应用层,如图 1 所示。

(1)平台层。系统采用 PIE-Engine 作为遥感影像存储和检索的云平台。同时,在本地服务器端部署 PSG 大气辐射传输模拟应用,并构建基于 Anaconda 的 Python 运行环

境,为遥感影像数据的大气校正提供云端-本地交互处理集成平台。此外,系统可通过目前流行的 Nginx 反向代理软件构建 Web 服务器。(2)数据层。为了便于系统运行过程中的数据交换和共享,应将位于 PIE-Engine 云端的卫星遥感影像,本地服务器端存储的各类卫星传感器参数、常见大气状态数据、以及大气参数查找表等数据资源分别建立专题数据库。(3)技术支撑层。该层为实现大气校正应用的关键技术层,包括遥感云平台存储和检索技术、基于 FastAPI 的前后端分离技术、PSG 辐射传输模拟及分量解耦技术、自适应查找表技术以及大气校正参数求解模型等。(4)功能层。该层为实现满足系统运行应具备的通用功能,包括用户权限管理、前端界面交互、辐射传输模拟、6 参数反射率求解、构建和更新查找表、结果和中间变量制图等单元模块。(5)应用层。该层反映了通过平台层、数据层、技术层和功能层相关服务的调度,可实现影像检索、大气校正、结果评价、共享发布和信息可视化等特定应用服务。

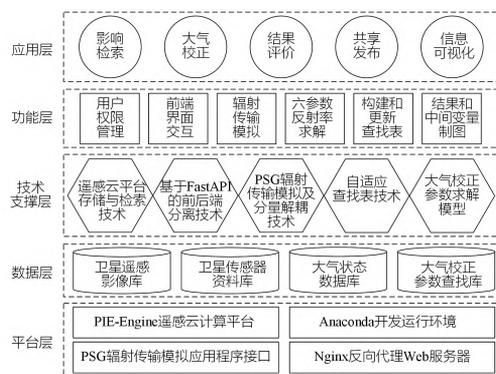


图 1 系统总体架构图

1.3 业务流程

如图 2 所示,系统业务流程包括以下 3 个方面。(1)用户通过浏览器提交传感器类型、目标海拔高度、数据获取日期、过境时间、大气模型等请求以及相关参数至本地服务器;服务器端响应用户的请求并调用 PIE-Engine 的访问资源,在卫星遥感影像库中检索原始影像;通过查询查找表里针对影像、观测时间、地点等字段是否有相匹配的参数,判断是否运用查找表计算。(2)若判断结果为是,则依据输入参数检索查找表返回大气校正 6 参数,即沿太阳直射方向传输到地表时大气的整层透过率、太阳光线方向至半球漫射透过率、半球至传感器观测方向漫射透过率、地表至传感器观测方向直射透过率、大气层处的大气球面反照率、地表处大气双向反射率;通过多维插值的方法估计真值,对待处理影像采用逐像元法进行大气校正,获得每个像元的大气校正值。若判断结果为否,则准备传感器和大气状态参数数据,将其输入 PSG 模型,执行输出辐射值,并进行大气程辐射、地表反射辐射、地表直射辐射等分量的解耦。针对得到的辐射分量,运用四流近似解析模型计算 6 参数并更新查找表。(3)将上述大气校正流程得到

各遥感影像像元 6 参数存储入库,并提交数据链接。依托过程参数计算得到大气校正影像图的精度并提供评价结果,以图表等形式将处理结果返回客户界面。

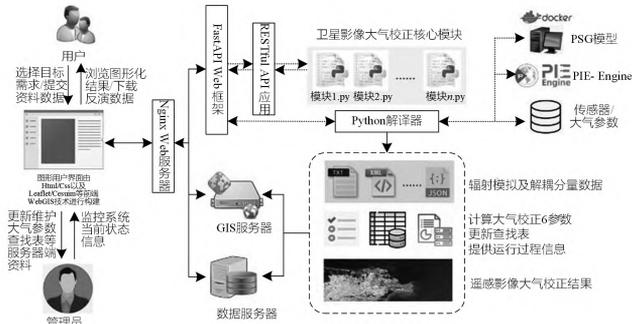


图 2 系统业务流程

2 关键技术

2.1 遥感云平台存储与检索技术

利用 PIE-Engine 提供的 Python 模块,可通过一系列检索和访问操作指令,将云端内置或用户上传的原始遥感影像数据源有效嵌入本地服务器端系统平台运行环境,为大气校正流程提供必要的输入数据,为输出结果提供云端存储介质。

2.2 基于 FastAPI 的前后端分离技术

FastAPI 是 Python 开发环境的高性能 Web 框架,其不仅能调用 NumPy、Pandas 等常用 Python 科学计算库,也能与 PIE-Engine 提供的 Python 模块无缝兼容。同时, FastAPI 基于 OpenAPI 开放标准,可快速生成直接调用和测试的交互式 API 文档。采用 FastAPI 构建具有 RESTful 风格的 API,实现系统开发的前后端分离,能够满足网站前端因交互需求而频繁变更时服务器端业务处理的稳定性,增强跨设备访问系统资源的兼容性。

2.3 大气校正参数求解模型

根据四流近似理论,表观反射率可表示为大气顶层单次散射、大气上行漫射、大气下行漫射以及地表反射的太阳直射在传感器入瞳处的总辐射贡献^[18-19]。令地表反射率为 α_λ ,则有:

$$\alpha_\lambda = \frac{1}{\tau/\rho + \rho_{dl,\lambda}}$$

式中: $\rho = r_{p,\lambda} - \rho_{so,\lambda}$; $\tau = (\tau_{ss,\lambda} + \tau_{sd,\lambda})(\tau_{db,\lambda} + \tau_{oo,\lambda})$; $\rho_{dl,\lambda}$ 为大气底层的大气球面反照率。其中, $r_{p,\lambda}$ 为表观反射率, $\rho_{so,\lambda}$ 为大气顶层的大气双向反射率, $\tau_{db,\lambda}$ 为半球到传感器观测方向的漫射透过率, $\tau_{oo,\lambda}$ 为地表到传感器观测方向的直射透过率, $\tau_{ss,\lambda}$ 为沿太阳直射方向传输到地表时大气的整层透过率, $\tau_{sd,\lambda}$ 为太阳光线方向到半球漫射透过率。对 α_λ 分别取值 0、0.5、1.0,并利用 PSG 模型进行 3 组重复模拟,求解上述 6 参数 ($\tau_{ss,\lambda}$ 、 $\tau_{sd,\lambda}$ 、 $\tau_{db,\lambda}$ 、 $\tau_{oo,\lambda}$ 、 $\rho_{dl,\lambda}$ 、 $\rho_{so,\lambda}$),即可实现卫星遥感数据的大气校正。

2.4 PSG 辐射传输模拟及分了解耦技术

作为一种较为先进的辐射传输模型,PSG 可通过设定任意的观测几何条件、丰富的大气模式组合以及线对线的高光谱分辨率,模拟传感器端的辐射结果^[20]。但对于输出的表观辐射亮度结果,PSG 并不具备直接解析辐射分量的能力。为实现大气校正过程,本文通过调控大气散射流数和观测几何,将原始 1 次模拟过程所得总辐射转化为 4 次模拟过程结果的贡献,以实现模拟辐射结果的分了解耦。通过比对分量估计结果与现有 MODTRAN4 等商用模型输出结果,证明采用该方法所得的解耦分量完全能够满足业务化应用的要求。

2.5 自适应查找表技术

大气校正查找表主要用于记录各类卫星传感器在特定观测时间和位置上大气校正 6 参数的表结构,其自适应技术主要体现在启用查找表计算的判定规则。对于相同的传感器,若待校正像元所处时空范围与查找表中对应字段参数设定阈值相匹配,则可启用查找表进行插值运算,得到对应的大气校正 6 参数,并输出地表反射率结果。若二者存在较大差异,则调用大气校正参数求解模型计算 6 参数,并更新查找表。

3 系统实现

如图 3 所示,基于以上技术流程体系,本文设计并初步构建了一种大气校正原型系统。用户可通过设定日期范围、确定纬度、确定精度、选择卫星影像、选择传感器、大气模式以及气溶胶模式等一系列参数,得到指定原始影像特定坐标位置的地表反射率结果。在后端 API 开始运算前,可点击查询数据按钮。此时,查询数据按钮不可用,开始执行按钮可用,系统界面会输出在 PIE-Engine 云平台中查询到的影像数据集和编号。随后,可点击开始执行按钮,若在系统数据库中没有查询到与该时间地点和传感器类型相匹配的历史处理结果,则需要启动服务器端 Python 运行环境,执行 PSG 模型辐射值计算并解耦分量,以进一步得到该点位大气校正运算结果,完成数据库点位信息状态的更新。此时,开始执行按钮不可用,中断操作按钮可用。全部运算完成后,系统前端在信息输出区域会显示最新的处理结果信息,包括所得影像数据集、影像编号、云量、运行状态、当前位置大气校正样本数和系统总样本数。

在系统界面右侧上方可查看利用 ArcGIS 地图服务及 Javascript API 渲染的地图信息。地图中,各点位符号表示系统数据库中已存在的历史大气校正结果对应的空间坐标信息。在地图中选中特定点位符号,地图下方统计图会显示该点位在数据库中每年的样本数,生成对应的信息表格,并向用户提供大气校正所得的地表反射率文本。图 4 展示了图 3 页面表格首条记录,即 2022 年 11 月 15 日坐标位置为 118.917E、34.439N 的地表反射率曲线及相应的遥

感影像。

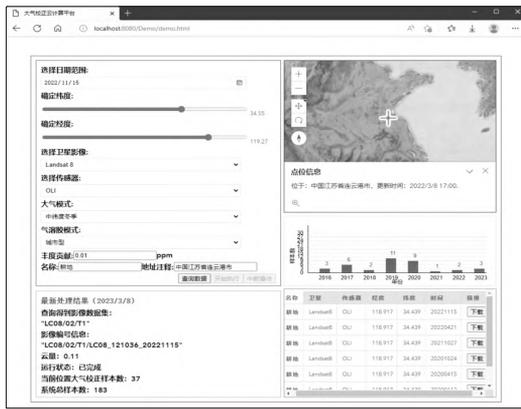


图 3 原型系统操作界面

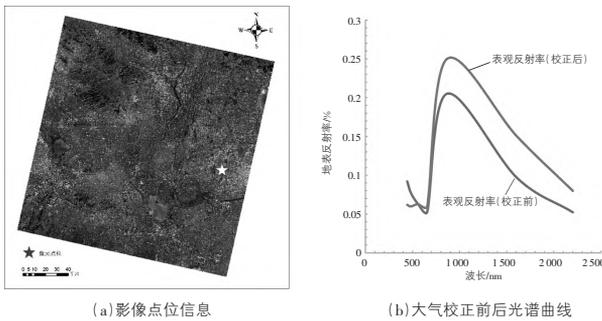


图 4 系统输出结果展示

4 结语

本文基于 PIE-Engine 遥感云计算平台和 FastAPI Web 框架的前后端分离技术,设计了一种可支持高性能大气辐射传输模型和自适应查找表的卫星影像大气校正在线应用系统,并实现了一种可根据指定传感器、目标点位、观测时间有效完成业务处理的系统原型。该系统的设计和研发拓展了遥感云计算平台的应用领域,改善了传统卫星影像预处理系统在数据集成和共享方面的不足。未来,围绕该框架体系,可设计支持更多卫星传感器和大气校正算法的 B/S 应用系统,为满足卫星遥感技术在资源、环境和生态等相关领域的监测需求提供重要技术支撑。

参考文献

[1] Vanhellemont Q, Ruddick K. Atmospheric correction of Sentinel-3/OLCI data for mapping of suspended particulate matter and chlorophyll-a concentration in Belgian turbid coastal waters [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 256 (29): 112284-112284.

[2] 余婧,杨文涛,李正强,等.高分多模卫星大气校正总体设计与在轨验证[J].遥感学报,2022,26(5):1039-1050.

[3] 张晓月,李琳琳,王莹,等.采用 Landsat8 产品算法流程的高分一号数据大气校正[J].农业工程学报,2020,36(1):182-192.

[4] 孙显,孟瑜,刁文辉,等.智能遥感:AI 赋能遥感技术[J].中国图象图形学报,2022,27(6):1799-1822.

[5] 肖青,黄华国,卞尊健,等.关于遥感实验场数字孪生体构建的思考[J].遥感学报,2023,27(3):584-598.

[6] 王小娜,田金炎,李小娟,等.GoogleEarthEngine 云平台对遥感发展的改变[J].遥感学报,2022,26(2):299-309.

[7] 袁金国,牛铮,王锡平.基于 FLAASH 的 Hyperion 高光谱影像大气校正[J].光谱学与光谱分析,2009,29(5):1181-1185.

[8] 陈玲,陈理,李伟,等.基于 FLAASH 模型的 Worldview3 大气校正[J].国土资源遥感,2019,31(4):26-31.

[9] 许华燕.利用 6S 模拟大气效应[J].地理空间信息,2006(6):59-61.

[10] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google earth engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.

[11] 郝斌飞,韩旭军,马明国,等.GoogleEarthEngine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J].遥感技术与应用,2018,33(4):600-611.

[12] Phan T N, Kuch V, Lehnert L W. Land cover classification using google earth engine and random forest classifier—the role of image composition [J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2411-2411.

[13] 付东杰,肖寒,苏奋振,等.遥感云计算平台发展及地球科学应用[J].遥感学报,2021,25(1):220-230.

[14] 曹欢,和栋材,李小飞.基于 PIE 的大气污染遥感监测系统的设计与实现[J].地理空间信息,2018,16(5):75-79+9.

[15] 周磊,林志树,玉林海,等.基于 PIE 平台的棉花种植面积动态监测研究[J].航天返回与遥感,2023,44(3):108-118.

[16] Berk A, Hawes F. Validation of MODTRAN6 and its line-by-line algorithm [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2017, 203: 542-556.

[17] Villanueva G L, Smith M D, Protopapa S, et al. Planetary spectrum generator: An accurate online radiative transfer suite for atmospheres, comets, small bodies and exoplanets [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2018, 217: 86-104.

[18] Verhoef W, Bach H. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(1): 23-41.

[19] 杨贵军,黄文江,刘三超,等.环境减灾卫星高光谱数据大气校正模型及验证[J].北京大学学报(自然科学版),2010,46(5):821-828.

[20] Cooke G J, Marsh D R, Walsh C, et al. Variability due to climate and chemistry in observations of oxygenated earth-analogue exoplanets [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2022, 518(1): 206-219.

(责任编辑:周贵兰)