

基于星载同步大气参数的多光谱卫星影像校正方法

徐玲玲^{1,2}, 熊伟², 易维宁², 裘桢炜², 刘晓², 崔文煜^{2*}

1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

2. 中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230031

摘要 大气状态随时空变化具有显著差异, 因此遥感卫星影像大气校正一直受限于难以动态获取与图像时空匹配大气参数的现实问题。高分辨率多模综合成像(高分多模)卫星作为我国目前空间分辨率最高的民用光学遥感卫星, 搭载了首颗民用同步大气校正仪(SMAC)。SMAC 是一台偏振多波段大气探测装置, 采用时间同步和空间覆盖的探测方式, 获取与同平台的主相机时空同步的大气信息。基于 SMAC 探测反演的大气参数, 提出了一种利用星上同步大气参数校正高分辨率卫星遥感影像的方法 Syn-AC。首先, 基于时间同步的原则, 结合主相机辅助数据, 对 SMAC 原始数据进行预处理, 形成 SMAC-Level1 产品; 然后根据 SMAC-Level1 数据, 进行 SMAC 云像元的判别, 接着对无云覆盖的像元进行气溶胶和水汽参数的反演, 形成 Level2 产品; 最后采用同步反演大气参数, 基于 6SV 辐射传输模型, 对高分多模卫星 Level1A 级遥感影像进行大气辐射校正和邻近效应校正, 得到主相机 Level2 地表反射率产品。在实验部分, 利用 Syn-AC 对高分多模卫星多光谱影像进行大气同步校正试验, 对大气校正前后的图像质量进行了定量评价。进一步地, 结合地面实测反射率数据分析校正后的地表反射率, 讨论同步大气校正方法的校正精度。同时, 应用经典大气校正方法-FLAASH 对多光谱影像进行大气校正, 并与 Syn-AC 校正结果进行了性能比较。结果表明, 同步大气校正得到的地表反射率与地面实测值比较一致, 人工靶标校正后的平均反射率与地面实测值的平均绝对误差为 0.012 2(FLAASH 为 0.027 4)。基于 SMAC 同步大气参数的大气校正方法在提高卫星图像质量和遥感定量化应用中具有很大的潜力。

关键词 高分多模; 同步大气校正仪; 同步大气校正; 反射率

中图分类号: TP75 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2024)03-0843-10

引言

对地遥感观测中, 由于大气的吸收、反射和散射作用, 使得卫星传感器接收的能量除了地物目标的反射辐射, 还包括程辐射和交叉辐射^[1]。其中, 程辐射项主要指大气分子和气溶胶粒子散射的太阳辐射, 这一部分不包含任何地物信息^[2]; 交叉辐射是由于大气散射作用, 导致背景地物产生的辐射进入了传感器视场, 产生邻近干扰贡献, 使得遥感图像的对比如降低、地物边缘模糊^[3]。大气校正是遥感定量化的前提和基础, 对于高分辨率遥感影像而言, 大气校正的主要目的是消除或减少大气辐射影响以及邻近背景像元的干扰贡献, 反演得到真实地物反射率^[2]。

对于基于辐射传输计算的大气校正而言, 气溶胶大小和水

汽柱含量对估算大气对太阳辐射的影响占有主要作用。大气状态随时间和空间变化明显^[4], 获取与卫星影像时空同步的大气参数至关重要。地基设备, 如 Aerosol Robotic Network (AERONET)^[5], 作为获取同步大气参数的常用手段, 可以获取需要时刻的大气参数, 但是仅能代表观测点附近一定区域的大气状态, 难以用于大范围的空间分析^[6]。进一步地, 利用天基设备获取的卫星图像反演大气参数, 如 Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS)^[7]。MODIS 的 10 km 大气产品已经得到了广泛应用, 其精度有所保证。为了解决大气参数和卫星图像时空匹配的问题, 可利用搭载在卫星平台的专用设备来探测大气信息, 获取与同平台其他传感器同步的大气参数。

2014 年 8 月, 美国“数字地球”(DigitalGlobe)公司发射了 WorldView-3 卫星, 该卫星配置了一台专门用于大气探测

收稿日期: 2022-11-16, 修订日期: 2023-05-06

基金项目: 航天科技创新应用研究项目(62502510201)资助

作者简介: 徐玲玲, 女, 1989 年生, 中国科学技术大学博士研究生

* 通讯作者 e-mail: cuiwenyu@aiofm.ac.cn

e-mail: xll0507@mail.ustc.edu.cn

的设备 CAVIS (Clouds, Aerosols, water Vapor, Ice and Snow)^[8]。CAVIS 覆盖了紫外到短波红外的波段,分辨率接近 30 m。基于 CAVIS 得到的同步大气参数,可以实现对 WorldView-3 高分辨率遥感影像的同步大气校正。

2020 年 7 月 3 日,我国的高分辨率多模综合成像卫星(简称高分多模卫星,GFDM)成功发射^[9]。卫星配置了我国首个民用同步大气校正仪(synchronization monitoring atmospheric corrector, SMAC),SMAC 能获取与卫星主相机同一视场且时间同步的大气参数,实现主相机光学遥感影像的同步大气校正,反演得到接近地表真实值的反射率产品。

基于 SMAC 探测的同步大气参数,本文提出了同步大气校正方法(synchronization atmospheric correction, Syn-AC):首先,对 SMAC 原始数据进行处理得到 SMAC 的 Level1 产品,再进行同步大气参数的反演,最后,基于 6SV 辐射传输模型和同步大气参数,对 GFDM 卫星主相机的多光谱影像进行大气辐射影响的消除和邻近效应校正,得到地表反射率。为了验证 Syn-AC 的性能,文章选取了包头和嵩山 2 个辐射定标场的多光谱影像进行同步大气校正试验,然后对校正前后的图像质量进行分析和定量评价。进一步地,结合地面实测光谱数据,对 Syn-AC 地表反射率图像中选定目标的平均地表反射率进行分析,讨论同步大气校正方法的校正精度。同时,文章还讨论了 Syn-Ac 和 FLAASH 两种校正方法的性能。

1 卫星和传感器

1.1 高分多模卫星

高分多模卫星是 2020 年发射的我国第一颗亚米级分辨率的民用光学多光谱遥感科研卫星,如图 1(a)所示。卫星搭载了 4 类有效载荷:1 台高分辨率光学相机、1 台 20 通道的大气同步校正仪、1 套数据传输设备和 1 套星间激光通信终端^[10]。表 1 为高分多模卫星及主相机参数。卫星配置的高分辨率相机,覆盖了从可见光到近红外几乎全部波长,包含 1 个

表 1 高分多模卫星参数

Table 1 Parameters of GFDM satellite

轨道	类型	太阳同步圆轨道
	高度	643.8 km
	星下点幅宽	≥15 km
相机	空间分辨率	全色: 优于 0.5 m; 多光谱: 优于 2 m
	全色	0.45~0.9
	多光谱 B1	0.45~0.52
	多光谱 B2	0.52~0.59
	多光谱 B3	0.63~0.69
波段/μm	多光谱 B4	0.77~0.89
	多光谱 B5	0.40~0.45
	多光谱 B6	0.59~0.625
	多光谱 B7	0.705~0.745
	多光谱 B8	0.86~1.04

全色波段和 8 个多光谱波段。

1.2 同步大气校正仪

为了获取高精度的遥感影像数据,高分多模卫星配置了同步大气校正仪,如图 1(b),用于获取与主相机时空同步的大气信息。同步大气校正仪是中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密仪器研究所自主研制,仪器采用多光谱和偏振通道相结合的设计方案^[10],表 2 为同步大气校正仪主要参数信息。SMAC 覆盖了从可见光到短波红外(490~2 250 nm)太阳反射光谱的 8 个波段,其中 5 个波段(490、670、870、1 610 和 2 250 nm)具备偏振探测能力,用于实现高精度的气溶胶反演^[11]。非偏通道中,910 nm 波段可用于反演水汽柱含量,1 380 nm 波段可用于卷云识别^[11]。

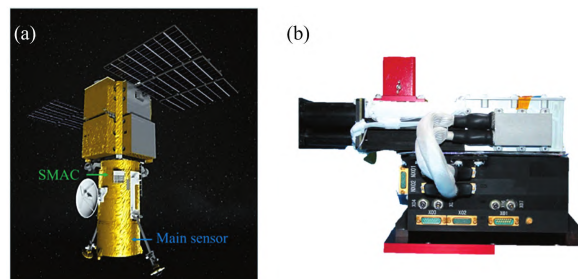


图 1 (a) 高分多模卫星; (b) SMAC^[11]

Fig. 1 (a) High-resolution multimode imaging satellite GFDM satellite; (b) SMAC^[11]

表 2 同步大气校正仪参数

Table 2 The settings of SMAC

属性	值
空间分辨率	6.7 km
视场角	1.48°
幅宽	2 个像元
是否成像	否
波段	490 ^P , 550, 670 ^P , 870 ^P , 910, 1 380, 1 610 ^P , 2 250 ^P nm
波段宽度	20, 20, 20, 40, 20, 40, 60, 80 nm
线偏振度	0°, 60°, 120° (490, 670, 870, 1 610 nm) 0°, 60°, 120°, 145° (2 250 nm)

P 表示偏振波段

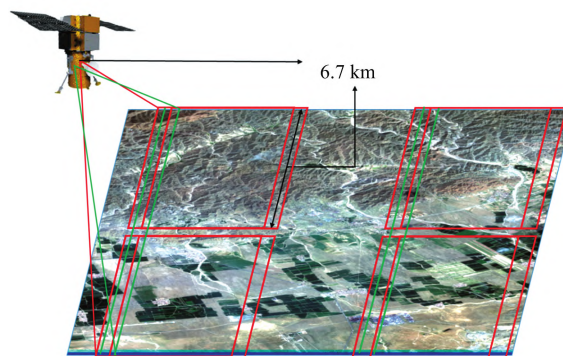


图 2 高分多模卫星主相机和 SMAC 的对地观测模式

Fig. 2 The observation mode of the SMAC and the main CCD camera onboard GFDM satellite

为了实现各偏振通道的同步测量，SMAC 采用分孔径探测方法^[10]。SMAC 各个通道均采用了双像元探测模式，单个像元的空间分辨率约为 6.7 km。如图 2 所示，红色方框表示 SMAC 单个像元，SMAC 每隔 0.1 s 探测一次，沿着卫星飞行方向，形成了 2 条探测轨迹。

2 同步大气校正方法

基于 SMAC 反演的同步大气参数，文章提出了同步大气校正方法 Syn-AC，图 3 为方法流程示意图。基于同步大气参数的大气校正方法主要分为三个部分：SMAC 数据处理、

同步大气参数反演和高分辨率卫星遥感影像的大气校正。第一步，对 SMAC 的 Level0 原始数据进行处理，将传感器的响应值转化为具有物理意义的表征量，生成 SMAC 的 Level1 产品；第二步，基于 SMAC-Level1 数据，对 SMAC 进行逐像元的云识别，然后结合地表反射率先验知识，进行气溶胶和水汽参数的反演，生成 SMAC 的 Level2 产品；第三步，基于 6SV 辐射传输模型和同步大气参数 (AOD 和 CWV)，对 GFDM 卫星主相机的 Level1A 多光谱影像进行大气辐射影响的消除和邻近效应校正，生成主相机的 Level2 地表反射率产品。

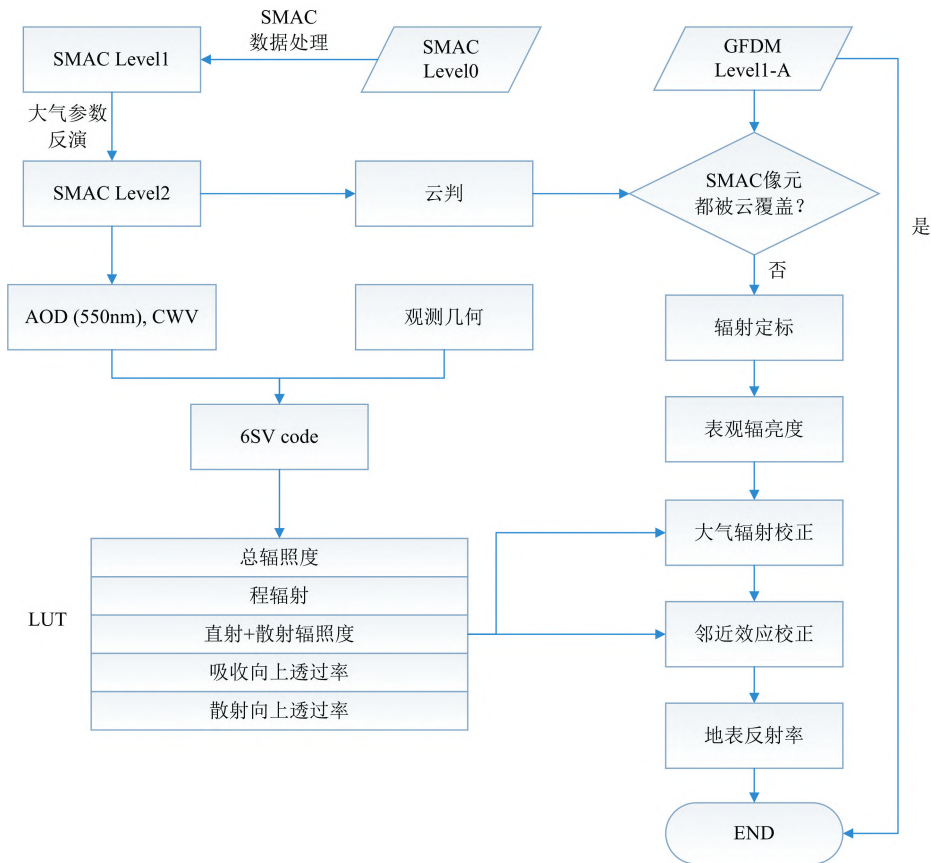


图 3 同步大气校正方法流程
Fig. 3 Procedures for Syn-AC

2.1 SMAC 数据处理

SMAC 原始数据为探测器响应的灰度值 (digital number, DN)，以帧格式按时间顺序存储，每帧大小为 930 字节。在进行大气参数反演之前，有必要将灰度值转换为具有物理意义的特征量。SMAC 数据处理需要经过数据校验、扣除本底、偏振信息计算、辐射信息计算、几何信息解算和产品打包六个步骤。

首先，对原始数据进行校验，确保有效信息的保留，然后根据定标配置文件从原始 DN 值中扣除本底得到有效信号。接下来，解算非偏通道的辐射信息，将有效信号除以绝对响应度 A_λ 和增益系数 Z_λ 得出辐亮度 $L(\lambda)$ ，计算方法如

式(1)

$$L(\lambda) = \frac{DN_\lambda}{A_\lambda \times Z_\lambda} \tag{1}$$

式(1)中， λ 为波段，辐亮度 $L(\lambda)$ 单位为 $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}/\text{sr}$ 。

偏振信息的解算，结合偏振方位角、绝对响应度和相对透过率定标数据，对偏振通道 (490、670、870、1 610 和 2 250 nm)，通过式(2)计算出目标斯托克斯参量 $[I, Q, U]$ ^[12]

$$\begin{bmatrix} I_\lambda \\ Q_\lambda \\ U_\lambda \end{bmatrix} = \frac{1}{A_\lambda^2 \times Z_\lambda^2} \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 & \cos[2(\alpha_1 + \alpha_1^1)] & -\sin[2(\alpha_1 + \alpha_1^1)] \\ 1 & \cos[2(\alpha_1 + \alpha_1^2)] & -\sin[2(\alpha_1 + \alpha_1^2)] \\ 1 & \cos[2(\alpha_1 + \alpha_1^3)] & -\sin[2(\alpha_1 + \alpha_1^3)] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} DN_\lambda^1/T_\lambda^1 \\ DN_\lambda^2 \\ DN_\lambda^3/T_\lambda^3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中, $\alpha_i^j (i=1, 2, 3)$ 为偏振方位角。

进一步可计算出偏振度 P_λ , 计算方法如式(3)

$$P_\lambda = \frac{\sqrt{(Q_\lambda)^2 + (U_\lambda)^2}}{I_\lambda} \quad (3)$$

SMAC 几何信息的解算, 结合卫星业务化平台提供的相机辅助数据包, 解算得到传感器观测几何、经纬度、太阳观测天顶角、方位角以及海陆标识和海拔高度。

最后, 产品打包形成与 SMAC 有效数据一一对应的 Level1 产品, 产品格式如表 3 所示。

表 3 SMAC Level-1 产品

Table 3 Level-1 product of SMAC

属性	说明
数据标识	1 列, 默认 0×62
包序号	1 列
经纬度	每个像元 2 列, 共 4 列
太阳天顶角、方位角	2 列
观测天顶角、方位角	每个像元 2 列, 共 4 列
海陆标识	每个像元 1 列, 共 2 列
海拔高度	1 列
时间戳	1 列
偏振通道 I、Q、U 和 P	每个通道 8 列, 共 40 列
非偏通道辐射亮度	每个通道 2 列, 共 6 列

2.2 同步大气参数反演

2.2.1 云识别

云对于大气参数的精确反演具有重要影响, 在从 SMAC-Level1 数据中反演气溶胶和水汽参数之前, 有必要识别并剔除云覆盖的像元^[11]。文章基于阈值判断的方法对 SMAC 进行逐像元云识别^[11]。首先, 利用 SMAC 的 490 nm 波段表观反射率 (TOA) 实现厚云判断^[13]。接着, 利用 SMAC 的 1380 nm 波段 TOA 值来进行卷云识别^[13]。在厚云和卷云识别的基础上, 引入归一化沙尘沙漠指数 (normalized difference dust index, NDDI)^[14] 和归一化雪被指数 (normalized difference snow index, NDSI)^[15] 分别进行沙漠亮地表和雪地亮地表上空的云识别。因此, 满足式(4)~式(7)中的任意一种条件的像元都视为云像元^[13-15]

$$\rho_{190}^{\text{TOA}} > 0.4 \quad (4)$$

$$\rho_{1380}^{\text{TOA}} > 0.0025 \quad (5)$$

$$\text{NDDI} = \frac{\rho_{2250}^{\text{TOA}} - \rho_{190}^{\text{TOA}}}{\rho_{2250}^{\text{TOA}} + \rho_{190}^{\text{TOA}}} < 0 \quad (6)$$

$$\text{NDSI} = \frac{\rho_{550}^{\text{TOA}} - \rho_{610}^{\text{TOA}}}{\rho_{550}^{\text{TOA}} + \rho_{610}^{\text{TOA}}} > 0.13 \quad (7)$$

2.2.2 气溶胶反演

对于大气校正仪遥感观测的表观偏振反射率, 地表和大气多次交互引起的偏振贡献非常小, 在经过大气的衰减作用后, 对传感器的偏振贡献基本可以忽略, 因此表观偏振反射

率可以表示为^[16]

$$\rho_{p,\lambda}^{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = \rho_{p,\lambda}^{\text{Atm}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + T_{p,\lambda}^{\downarrow}(\theta_s)\rho_p^{\text{Surf}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)T_{p,\lambda}^{\uparrow}(\theta_v) \quad (8)$$

式(8)中, λ 为波段, θ_s , θ_v 和 $\Delta\phi$ 为太阳观测角、卫星观测角和相对方位角; $\rho_{p,\lambda}^{\text{Atm}}$ 为大气程辐射的偏振贡献, 与气溶胶的类型和大小有关, 可依据查找表计算得到; ρ_p^{Surf} 为地表偏振反射率, 一般情况下与波长无关, 主要与地表类型有关; $T_{p,\lambda}^{\downarrow}$ 和 $T_{p,\lambda}^{\uparrow}$ 分别为上行和下行方向的透射率。

基于最优化估计^[17], 构建一个代价函数 J_p

$$J_p(\text{AOD}, C, \text{FMF}_V) =$$

$$\sum_{m=1}^d \left[\frac{L_p^{\text{meas}} - L_p^{\text{simu}}(\text{AOD}, C, \text{FMF}_V)}{L_p^{\text{meas}}} \right]^2 / d \quad (9)$$

式(9)中, m 为偏振通道, d 为偏振通道总数 ($d=5$), L_p^{simu} 为模拟的归一化偏振辐亮度, L_p^{meas} 为实际观测的偏振辐亮度, C 为 BPDF 模型中的参数, FMF_V 为选用的体积柱浓度和体积柱浓度细模态的占比。

因此, 在模拟 5 个偏振通道表观归一化偏振辐亮度过程中, 有三个未知参数 (AOD, C , FMF_V)。理论上, 应该存在一组值 (AOD, C , FMF_V) 使得根据式(9)计算得到的表观归一化偏振辐亮度 L_p^{simu} 均与实际观测结果 L_p^{meas} 相同。但是, 由于观测误差、模型误差等的存在, 我们取使价值函数 J_p (AOD, C , FMF_V) 值最小的一组 (AOD, C , FMF_V) 为最优参数, 对应的 AOD 即为反演结果。

2.2.3 水汽反演

基于经典的双通道比值法^[18], 文章利用同步大气校正仪 870 和 910 nm 两个通道的探测数据进行水汽柱含量的反演。

假设地表为朗伯均匀类型, 则大气层顶表观反射率和地表反射率之间的关系可以定义为^[19]

$$\rho_\lambda^{\text{TOA}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = T_g(\text{OG}) \left[\rho_\lambda^{\text{Atm}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) + \frac{T_\lambda^{\downarrow}(\theta_s)\rho_\lambda^{\text{Surf}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)T_\lambda^{\uparrow}(\theta_v)}{1 - S_\lambda\rho_\lambda^{\text{Surf}}(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)} T_g(\text{H}_2\text{O}) \right] \quad (10)$$

式(10)中, $\rho_\lambda^{\text{Surf}}$ 为地表反射率; $\rho_\lambda^{\text{Atm}}$ 为大气程辐射; $T_g(\text{H}_2\text{O})$ 和 $T_g(\text{OG})$ 表示大气中水汽和其他气体 (如臭氧和二氧化碳) 对太阳辐射的吸收作用; $T_\lambda(\theta_s)^{\downarrow}$ $T_\lambda(\theta_v)^{\uparrow}$ 为大气在观测方向上的总透射率; S_λ 为半球辐照度。

在 910 nm 近红外波段附近, 大气校正仪接收的辐射主要是地表反射的直接辐射, 大气程辐射的贡献可以近似忽略^[11], 同时忽略地表反射率在该通道和邻近 870 nm 通道的变化, 则太阳-地表-传感器路径上的水汽吸收透过率 T 可以定义为^[11]

$$\frac{\rho_{910}^{\text{TOA}} - \rho_{910}^{\text{Atm}}}{\rho_{870}^{\text{TOA}} - \rho_{870}^{\text{Atm}}} \approx \frac{T_{910}^{\downarrow}(\theta_s)T_{910}^{\uparrow}(\theta_v)}{T_{870}^{\downarrow}(\theta_s)T_{870}^{\uparrow}(\theta_v)} \equiv T \quad (11)$$

进一步地, 通过经验公式计算得出水汽柱含量^[20]

$$U_{\text{cww}} = \frac{A + B \ln(T) + C [\ln(T)]^2}{m} \quad (12)$$

式(12)中, $m=1/(\cos\theta_s)+1/(\cos\theta_v)$ 。A、B 和 C 为经验公式的拟合系数, $A=0.1946$, $B=0.5202$, $C=28.11$ ^[11]。

最后, 对云识别、气溶胶和水汽反演结果进行整合, 形成同步大气校正仪 Level2 产品。

2.3 高分辨率卫星遥感影像的大气校正

由于大气的散射作用，卫星传感器接受的能量，除了目标沿地面-传感器方向直接反射的辐射，还包括两个部分：大气散射(不与地面相互作用)的辐射，以及周围背景地物散射进入传感器的辐射^[2]。高分辨率卫星遥感影像大气校正的主要目的就是减少大气和邻近效应的影响，得到接近于真实值的地表反射率。

首先对遥感影像进行辐射校正，将卫星高分辨率相机响应的灰度转化为大气层顶辐射亮度，计算方法如式(13)

$$L(\lambda) = \text{Gain} \cdot \text{DN}(\lambda) + \text{Offset} \quad (13)$$

式(13)中，λ为波段，Gain和Offset分别为定标斜率和截距，本文采用的定标系数均来源于中国资源卫星应用中心。

对于高分辨率卫星遥感影像，传感器接收的辐射包括目标周围背景像元的干扰贡献，因此考虑邻近效应的影响，入瞳处辐射亮度可以用式(14)表示

$$L(\lambda) = L_{\text{path}}(\lambda) + T(\theta_v) \frac{\rho^* E_g(0)}{\pi(1 - \rho^* S)} \quad (14)$$

式(14)中，L_{path}(λ)为大气程辐射项，T(θ_v)为大气在观测方向上的总透射率，E_g(0)为当前位置的太阳辐照度，S为大气半球反照率。

因此，地表反射率(包含背景像元的辐射贡献)可以用式(15)表示

$$\rho^* = \frac{L(\lambda) - L_{\text{path}}(\lambda)}{\frac{T(\theta_v) E_g}{\pi} + (L(\lambda) - L_{\text{path}}(\lambda)) S} \quad (15)$$

背景反射率 ρ_{Background} 可以通过式(16)计算得到

$$\rho_{\text{Background}} = \sum_m \sum_n \rho'(\gamma, \eta) \text{Weight}(\gamma, \eta, \theta_v) \quad (16)$$

式(16)中，ρ'(γ, η)为在(γ, η)位置的像元的反射率，Weight(γ, η, θ_v)为当前像元对目标像元的辐射贡献程度。辐射贡献权重与大气状态(主要是气溶胶光学厚度)、周围像元与目标像元的空间距离以及背景像元与目标像元的反射率差值等因素有关^[21]。

最后，文章采用漫射与直射透射率的比值作为邻近效应校正系数 q^[21]，得到去除背景像元干扰贡献的地表反射率 ρ_t

$$\rho_t = \rho^* + q(\rho^* - \rho_{\text{Background}}) \quad (17)$$

3 实验部分

3.1 实验研究区域与数据

基于 SMAC 反演的同步大气参数，实验选取了高分多模卫星主相机多光谱影像进行同步大气校正正试验。实验研究区域为包头和嵩山辐射定标场，每个研究区域分别选取了一幅多光谱影像，影像参数见表4，气溶胶模型为大陆型。

表4 卫星影像参数

Table 4 Parameters of the satellite images

地点	成像时间(UTC)	中心经纬度	太阳天顶角	太阳方位角	观测天顶角	观测方位角
包头	2020-8-27 3:45:21	109.661°E, 40.927°N	33.498°	153.723°	16.744°	277.272°
嵩山	2020-9-3 3:17:18	113.116°E, 34.558°N	31.508°	145.467°	1.103°	58.605°

为了验证同步大气校正方法的性能，试验结合人工靶标地面实测光谱进行验证。地面光谱测量采用了地物光谱仪 ASD，仪器光谱范围为 400~1 600 nm，采样间隔为 1 nm。测量实验中，对每个目标连续采样 3 次，取平均值作为目标光谱。图4为包头和嵩山辐射定标场以及实验研究目标(红色数字标记)示意图，包头辐射定标场选取白色、灰色和黑色靶标为研究目标，嵩山辐射定标场选取了白色和黑色靶标为研究目标。

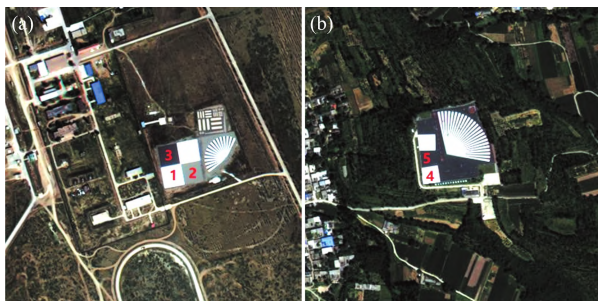


图4 研究区域示意图

(a): 包头辐射定标场; (b): 嵩山辐射定标场

Fig. 4 Diagram of the study areas

(a): Radiometric calibration site in Baotou;

(b): Radiometric calibration site in Songshan

图5为高分多模卫星光谱响应函数，利用卫星多光谱数据的光谱响应函数与地面实测光谱数据积分可得到波段反射率，计算方法如式(18)

$$\rho_{\text{average}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) \rho_{\text{field}}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda} \quad (18)$$

式(18)中，λ为波段，λ₁=400 nm，λ₂=1 040 nm。L(λ)为对应波段的光谱响应，ρ_{field}为地面实测光谱，ρ_{average}为平均地面反射率。

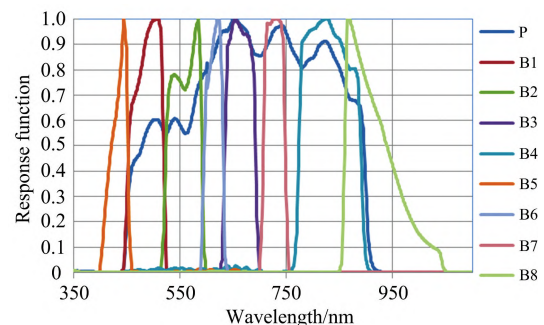


图5 高分多模卫星光谱响应函数

Fig. 5 Spectral response function of GFDM satellite

大气参数作为辐射传输计算的重要输入,其精度对于估算大气对太阳辐射的影响至关重要,直接影响大气校正的精度。因此,在利用同步大气参数进行大气校正之前,有必要对同步大气参数的精度进行验证,将 SMAC 反演结果与地基

站点数据进行对比。表 5 所示为试验选用地基站点信息以及对比结果,结果显示同步大气参数 AOD 的相对误差分别为 1.82% 和 6.59%,CWV 的相对误差分别为 5.80% 和 3.78%,同步大气参数可用于高分多模卫星影像的同步大气校正。

表 5 同步大气参数与地基站点数据对比

Table 5 Comparison between the retrieved parameters and the data from the field-based sites

地点	日期	来源	经纬度	AOD			CWV/(g·cm ⁻²)		
				地基	SMAC	RE/%	地基	SMAC	RE/%
包头	2020/8/27	AERONET	109.629°E, 40.852°N	0.378 1	0.385	1.82	1.921 4	1.81	5.80
嵩山	2020/9/3	SONET	113.114°E, 34.511°N	0.147 3	0.157	6.59	1.621 3	1.56	3.78

3.2 方法

3.2.1 同步大气校正前后图像质量

大气对太阳辐射的吸收和散射导致遥感卫星影像的亮度和对比度降低,使得图像视觉效果变模糊。卫星传感器空间分辨率越高、大气能见度越低,大气散射效应引起的图像模糊效应更明显^[22]。大气校正能有效地去除大气辐射影响,改善图像质量。尤其在近邻效应校正后,图像清晰度和对比度会得到有效提升^[23-24]。文章对同步大气校正前后影像的视觉效果进行对比,并采用 Robert 平均清晰度(CLAR)、平均对比度(CONT)和信息熵(ENTR)作为评价校正前后图像质量的指标。CLAR 用于评价图像的清晰度,反映图像细节的变化,可通过式(19)进行计算^[23-24]。清晰度越高,图像质量和清晰度越高。CONT 是指图像轮廓与其他内容的灰度对比度,图像越清晰,对比度越高^[22]。CONT 可以用式(20)计算。ENTR 用于测量图像信息,纹理越丰富,图像中包含的信息越多,熵值越大。可以用式(21)计算 ENTR,其中 $P(t)$ 为图像中不同灰度等级的概率。

$$CLAR = \sum_i \sum_j \{ [f(i+1, j+1) - f(i, j)]^2 + [f(i+1, j) - f(i, j+1)]^2 \} \quad (19)$$

$$CONT = \frac{\max(i, j) - \min(i, j)}{\max(i, j) + \min(i, j)} \quad (20)$$

$$ENTR = - \sum_t P(t) \log[P(t)] \quad (21)$$

3.2.2 同步大气校正方法的校正精度

同步大气校正方法可实现大气影响的消除和邻近效应的校正,得到接近真实值的目标地表反射率。为了讨论同步大气校正方法的校正精度,文章结合地面实测反射率,对同步大气校正后研究目标的平均地表反射率进行分析。同时,计算了校正后平均地表反射率与地面实测反射率值之间的绝对误差(absolute error, AE)和相对误差(relative error, RE),计算方法如式(22)和式(23)

$$AE = | \text{校正后反射率} - \text{地面实测值} | \quad (22)$$

$$RE = \frac{| \text{校正后反射率} - \text{地面实测值} |}{\text{地面实测值}} \times 100\% \quad (23)$$

4 结果与讨论

4.1 图像质量

图 6 为大气校正前后卫星真彩色图像(R、G、B 分别对应波段 3、2、1)视觉效果对比结果。图 6(a)和(b)为校正前原图像,可以看出校正前地物细节不明显,图像较模糊。而同步大气校正后的图像[图 6(c)和(d)],纹理更丰富,图像质量明显提升。

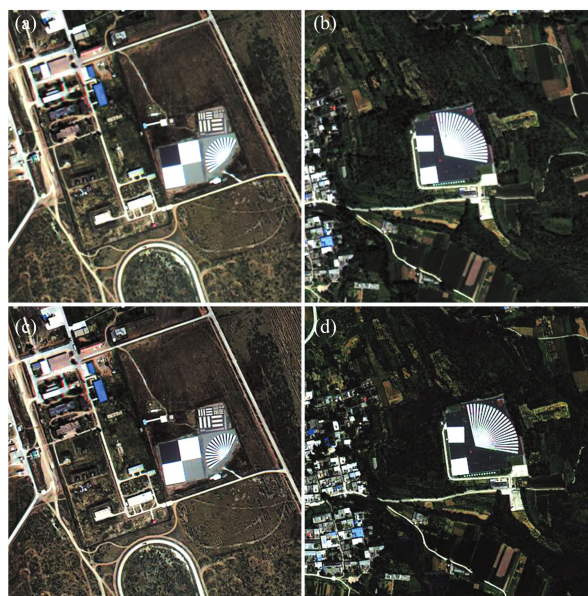


图 6 卫星真彩色图像大气校正前和校正后视觉效果

(a): 包头 2020-8-27 原图像; (b): 嵩山 2020-9-3 原图像;
(c): 包头 2020-8-27 同步大气校正后图像;
(d): 嵩山 2020-9-3 同步大气校正后图像

Fig. 6 The visual effects of the true color images before and after atmospheric correction

(a): Original image of Baotou on August 27, 2020;
(b): Original image of Songshan on Sep. 3, 2020;
(c): Corrected image of Baotou on August 27, 2020;
(d): Corrected image of Songshan on Sep. 3, 2020

进一步地,对同步大气校正前后的图像,分别计算各波段图像的清晰度、对比度和信息熵,结果如表 6 所示。从表 6 可以看出,经过同步大气校正后,各波段图像的 CLAR、CONT 和 ENTR 值都有明显提升。

表6 同步大气校正前后图像质量指标

Table 6 The image quality indicators before and after synchronous atmospheric correction

波段	指标	包头 2020-8-27		嵩山 2020-9-3	
		校正前	校正后	校正前	校正后
R	CLAR	30.38	69.14	54.07	166.90
	CONT	82.56	165.62	68.92	96.01
	ENTR	6.54	7.25	6.11	6.47
G	CLAR	19.40	58.81	36.21	144.87
	CONT	53.11	128.62	49.87	78.53
	ENTR	5.91	6.92	5.88	6.16
B	CLAR	16.75	76.07	22.80	163.52
	CONT	47.89	149.51	37.12	65.48
	ENTR	5.98	6.77	5.63	5.89

4.2 校正精度

针对包头辐射定标场多光谱影像，选取了白色、灰色和黑色三种人工靶标进行校正精度分析。如图7，三种地物校正后的平均地表反射率和地面实测反射率对比结果。可以看出，经过同步大气校正后，三个研究目标的平均地表反射率与地面实测值较吻合。

根据式(20)和式(21)求出三种地物大气校正后地表反射率和地面实测反射率之间的绝对误差和相对误差，见表7。Syn-AC白色靶标校正后的平均地表反射率与实测反射率之间的绝对误差最大值为0.0315，相对误差不大于8%。FLAASH白色靶标校正后的平均地表反射率与实测反射率

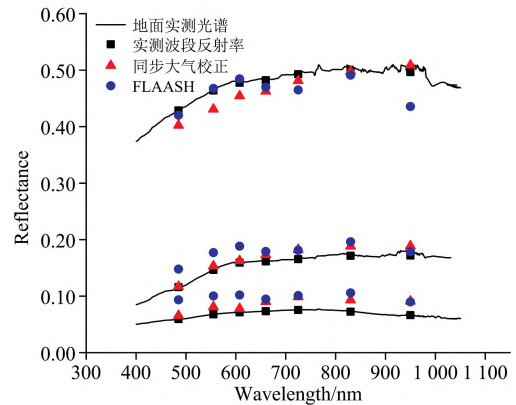


图7 包头辐射定标场人工靶标同步大气校正后地表反射率
Fig.7 The surface reflectance of the artificial targets in the corrected image of Baotou

之间的绝对误差最大值为0.0398，相对误差不大于9%。对于灰色靶标，Syn-AC校正得到的平均反射率与实测反射率之间的绝对误差最大值为0.0171，最大相对误差在10%左右。FLAASH白色靶标校正后的平均地表反射率与实测反射率之间的绝对误差最大值为0.0318，相对误差在30%左右。对于黑色靶标，Syn-AC校正后的平均反射率与实测反射率之间的绝对误差最大值为0.0247，FLAASH方法的绝对误差最大值为0.0342(黑色靶标的地面实测反射率较低(接近零值)，很小的绝对误差会引起较大的相对误差)。

表7 包头辐射定标场人工靶标校正后反射率与地面实测反射率之间的绝对误差和相对误差

Table 7 Absolute and relative errors between measured reflectance and corrected reflectance of the artificial targets in the corrected image of Baotou

波段/nm	包头 2020-8-27											
	白靶标				灰靶标				黑靶标			
	Syn-AC		FLAASH		Syn-AC		FLAASH		Syn-AC		FLAASH	
	AE	RE/%	AE	RE/%	AE	RE/%	AE	RE/%	AE	RE/%	AE	RE/%
485	0.0248	6.17	0.0173	4.30	0.0011	0.93	0.0318	27.43	0.0062	10.48	0.0342	57.49
555	0.0315	7.12	0.0252	5.70	0.0068	4.67	0.0305	20.80	0.0133	19.58	0.0326	48.21
607.5	0.0224	4.89	0.0261	5.69	0.0033	2.08	0.0291	18.27	0.0066	9.18	0.0307	42.96
660	0.0188	4.06	0.0056	1.21	0.0118	7.31	0.0177	10.96	0.0171	23.35	0.0215	29.33
725	0.0113	2.36	0.0144	3.00	0.0169	10.20	0.0156	9.42	0.0233	30.86	0.0256	33.90
830	0.0001	0.02	0.0088	1.82	0.0167	9.75	0.0248	14.46	0.0207	28.64	0.0333	46.01
950	0.0118	2.48	0.0398	8.37	0.0171	9.96	0.0070	4.06	0.0247	37.19	0.0234	35.23

嵩山辐射定标场实验选取白色和黑色两种标称值的人工靶标进行分析，图8为两种地物校正后的平均地表反射率和地面实测反射率。图8中，黑色曲线代表地物实测光谱，白色和黑色靶标经过同步大气校正后，平均地表反射率与地面实测值较接近。FLAASH方法校正后的白色靶标平均反射率与地面实测值误差稍大，而黑色靶标的校正后平均反射率与地面实测值较吻合。

同样地，根据式(20)和式(21)求出白色和黑色靶标大气校正后的地表反射率和地面实测反射率之间的绝对误差和相

对误差，见表8。对于标称值为60%的白色靶标，Syn-AC校正后的平均地表反射率与实测反射率之间的绝对误差最大值为0.0235，最大相对误差为4.93%。FLAASH方法校正得到的反射率图像中，白色靶标的平均地表反射率与地面实测值之间的绝对误差最大值为0.0913，最大相对误差为18.64%。对于标称值为5%的黑靶标，Syn-AC和FLAASH校正得到的平均地表反射率与实测反射率之间的绝对误差均小于0.03，校正效果较好。

高精度大气参数对于基于辐射传输模型的大气校正和高

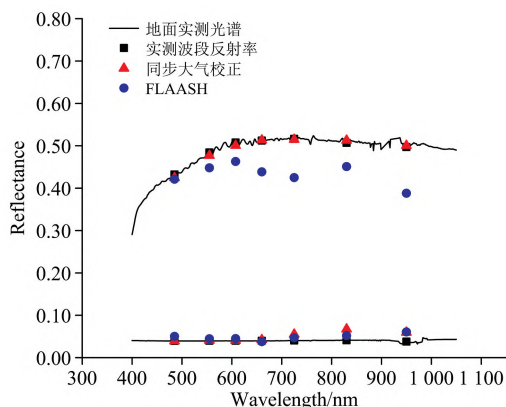


图 8 嵩山辐射定标场人工靶标同步大气校正后地表反射率
Fig. 8 The surface reflectance of the artificial targets in the corrected image of Songshan

空间分辨率光学遥感影像的量化应用至关重要。然而，由于大气参数的时空变化，传统的基于地面站点或其他卫星产品获取大气参数的方法难以保证大气参数与图像的时空匹配，导致大气校正存在误差。本文证明了利用卫星平台上的

设备同步获取大气参数的解决方案是有效的。

为了验证 Syn-AC 方法的校正精度，文章将同步大气校正后得到的目标平均反射率与地面实测值进行了对比，并对 FLAASH 进行了同样的分析。本文提出的 Syn-AC 方法和 FLAASH 均是基于辐射传输模型实现的。在模型输入参数中，除了大气参数的来源不同，其他输入参数，包括卫星成像参数、大气模式和气溶胶模式都采用了同样的输入。实验结果表明，两种方法在校正精度上都有较好的性能。但是，Syn-AC 方法的校正结果更稳定。这个结果的原因被认为是，FLAASH 是基于图像光谱信息进行大气参数的估计，而 GFDM 卫星主传感器的波段设置可能无法满足 FLAASH 反演大气参数的要求。Syn-AC 方法采用的大气参数是从 SMAC 数据中反演得到的，SMAC 是专门用于探测大气信息的装置。因此，Syn-AC 的大部分反演值更接近于现场实测值，表现更稳定。

由于研究区域卫星图像的获取需要提交成像计划表，因此实验部分目标区域的图像数据是有限的。对于目前的实验结果，还需要更多的图像数据进行验证，分析不同大气状态和下垫面的校正性能，这将在我们以后的研究工作中逐步开展。

表 8 嵩山辐射定标场人工靶标校正后反射率与地面实测反射率之间的绝对误差和相对误差
Table 8 Absolute and relative errors between measured reflectance and corrected reflectance of the artificial targets in the corrected image of Songshan

波段/nm	嵩山 2020-9-3							
	白靶标				靶标			
	Syn-AC		FLAASH		Syn-AC		FLAASH	
	AE	RE/%	AE	RE/%	AE	RE/%	AE	RE/%
485	0.007 7	1.79	0.011 5	2.65	0.000 6	1.39	0.010 5	26.45
555	0.007 3	1.51	0.036 1	7.46	0.001 1	2.67	0.004 8	12.14
607.5	0.007 2	1.43	0.045 0	8.85	0.000 8	1.93	0.005 3	13.20
660	0.000 9	0.18	0.073 7	14.40	0.002 2	5.59	0.002 1	5.22
725	0.001 5	0.30	0.091 3	17.69	0.014 4	35.69	0.006 4	15.92
830	0.005 8	1.14	0.056 0	11.04	0.026 4	64.47	0.011 1	27.08
950	0.023 5	4.93	0.088 9	18.64	0.021 9	58.01	0.023 0	60.92

5 结 论

大气参数的精确获取对基于辐射传输模型的大气校正而言至关重要，基于同步大气参数的同步大气校正方法可有效地提升校正的效果和精度。基于 SMAC 数据反演的大气参数，实验选取了 2 个辐射定标场的多光谱影像进行同步大气校正试验，然后对校正前后的图像质量对比分析，并结合地面实测光谱数据分析同步大气校正方法的性能。结果表明，

高分多模卫星多光谱影像经同步大气校正后，图像质量得到明显提升，尤其是邻近效应校正后，地物边缘更清晰，纹理更丰富。同步大气校正反演得到的地物反射率与地面实测反射率较吻合，白色和灰色人工靶标校正结果的绝对误差最大为 0.031 5 (FLAASH 为 0.091 3)。初步研究结果显示，基于同步大气校正参数的大气校正方法有助于提升图像质量，同步大气校正仪对进一步满足遥感应用高精度数据需求方面具有很大的潜力。

References

- [1] XU Xi-ru(徐希孺). Physics for Remote Sensing(遥感物理). Beijing: Peking University Press(北京: 北京大学出版社), 2006. 328.
- [2] Wang Tao, Du Lili, Yi Weining, et al. Remote Sens. Environment, 2021, 259: 112412.
- [3] Kaufman Y J, Karnieli A, Tanré D. IEEE Transactions on, Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(1): 525.
- [4] LI Zheng-qiang, CHEN Xing-feng, MA Yan, et al(李正强, 陈兴峰, 马 葵, 等). Journal of Nanjing University of Information Science & Technology: Natural Science Edition(南京信息工程大学学报: 自然科学版), 2018, 10(1): 6.
- [5] Smirnov A, Holben B N, Eck T F, et al. Geophysical Research Letters, 2002, 29(23): 30-1.
- [6] ZHA Yong, HE Jun-liang, CHENG Feng, et al(查 勇, 贺军亮, 程 峰, 等). Atmospheric Aerosol Inversion and Remote Sensing for Pollution Environment Monitoring(大气气溶胶反演及其污染环境监测遥感). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2019.
- [7] Kaufman Y J, Sendra C. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9: 1357.
- [8] Barazzetti L, Roncoroni F, Brumana R, et al. In Proceedings of the XXIII ISPRS Congress, Prague, Czech Republic, 12-19 July, 2016. 429.
- [9] XIA Tian, ZHANG Wen-hui(夏 天, 张文慧). Satellite Applications(卫星应用), 2020, (8): 70.
- [10] HU Ya-dong, HU Qiao-yun, SUN Bin, et al(胡亚东, 胡巧云, 孙 斌, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2015, 23(3): 652.
- [11] Li Zhengqiang, Hou Weizhen, Qiu Zhenwei, et al. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60: 1.
- [12] KANG Qing, YUAN Yin-lin, LI Jian-jun, et al(康 晴, 袁银麟, 李健军, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2017, 37(3): 0312003.
- [13] Jethva H, Satheesh S K, Srinivasan J, et al. Atmos. Chem. Phys., 2010, 10(21): 10399.
- [14] Ciren P, Kondragunta S. J. Geophys. Res., Atmos., 2014, 119(8): 4770.
- [15] Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V. Remote Sens. Environment, 1995, 54(2): 127.
- [16] Zheng F X, Li Z Q, Hou W Z, et al. J. Appl. Remote Sens., 2020, 14(1): 014516.
- [17] Dubovik O, Herman M, Holdak A, et al. Atmospheric Meas. Techn., 2011, 4(5): 975.
- [18] ZHAI Mo, YUAN Shuai(翟 墨, 原 帅). Heilongjiang Meteorology(黑龙江气象), 2016, 33(3): 20.
- [19] Vermote E F, Kotchenova S. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D23): D23S90.
- [20] Ralf Bennartz, Jürgen Fischer. Remote Sensing of Environment, 2001, 78(3): 274.
- [21] WANG Tao, ZHOU Nan, YI Wei-ning, et al(王 涛, 周 楠, 易维宁, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2021, 70(13): 139101.
- [22] WANG Qian, CHEN Xue, MA Jian-wen, et al(王 倩, 陈 雪, 马建文, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2010, 30(11): 3342.
- [23] WANG Tao, ZHOU Chuan-jie, YI Wei-ning, et al(王 涛, 周川杰, 易维宁, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2021, 41(11): 1101002.
- [24] TANG Xing, YI Wei-ning, DU Li-li, et al(汤 兴, 易维宁, 杜丽丽, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2016, 36(2): 0228003.

Correction Method of Multispectral Satellite Images Based on Spaceborne Synchronous Atmospheric Parameters

XU Ling-ling^{1, 2}, XIONG Wei², YI Wei-ning², QIU Zhen-wei², LIU Xiao², CUI Wen-yu^{2*}

1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract The atmospheric state varies significantly in terms of the temporal and spatial scales. The atmospheric correction of remote sensing satellite images is limited because it is difficult to dynamically obtain atmospheric parameters matching with the images to be corrected. As the civil optical remote sensing satellite with the highest spatial resolution in China, the Gao Fen Duo Mo satellite is equipped with the first civilian Synchronization Monitoring Atmospheric Corrector (SMAC). The SMAC onboard the GFDM satellite platform is capable of multispectral and polarization detection and can offer time-synchronized, and field-of-view overlapped atmospheric measurements to obtain atmospheric parameters synchronized with the main sensor. This study proposed a synchronous atmospheric correction method for high-spatial resolution image based on the atmospheric parameters retrieved from SMAC. Firstly, based on the principle of time synchronization, the original data of SMAC was processed to form the SMAC-Level1 product, combining with the auxiliary data of the main camera. Then, according to the SMAC-Level1 data, the SMAC pixels covered with cloud were discriminated, and the aerosol and water vapor parameters of the pixels without cloud coverage were retrieved to form the SMAC-L2 product. Finally, based on the 6SV radiative transfer model, the atmospheric

radiometric correction and proximity effect correction were carried out on the remote sensing image from the GFDM satellite (Level1), and the surface reflectance product of the main camera (Level2) was obtained. In the experimental part, Syn-AC was applied to the remote sensing image from the GFDM satellite, and the image quality before and after the atmospheric correction was evaluated. Furthermore, the surface reflectance after the correction was compared with the ground-measured value to discuss the accuracy of the synchronous atmospheric correction method. In addition, the classical correction method FLAASH, was applied in the experiments to compare its performance with that of the Syn-AC method. The results show that the reflectance obtained from the corrected image of Syn-AC is in good agreement with the ground-measured value, and the mean absolute error is 0.012 2 (the mean absolute error of FLAASH is 0.027 4). The atmospheric correction method based on synchronous atmospheric parameters retrieved from SMAC has great potential in improving satellite image quality and remote sensing quantitative applications.

Keywords Gao Fen Duo Mo (GFDM); Synchronization monitoring atmospheric corrector (SMAC); Synchronization atmospheric correction; Reflectance

(Received Nov. 16, 2022; accepted May 6, 2023)

* Corresponding author

本 刊 声 明

近期以来,一些不法分子假冒《光谱学与光谱分析》期刊社名义,以虚假网站等形式欺骗广大作者、读者。这些虚假网站公然假冒《光谱学与光谱分析》期刊名义进行大肆的征稿并骗取作者的审稿费和版面费。经部分作者及读者举报,现有关部门已就此介入调查。本刊将通过法律途径向假冒者追究相应的责任,维护本刊权益。

本刊官方网站已正式开通,网址为

<https://www.gpxygpfx.com/>

在此郑重声明,本网址为《光谱学与光谱分析》期刊唯一开通运行的官方网站。本刊从未授权任何单位或个人以任何形式(包括网上网下)代理本刊征稿、审稿等项业务。

希望广大读者和作者切实维护好自身的合法权益,防止受骗上当。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2019年3月15日