

高分多模卫星大气校正总体设计与在轨验证

余婧¹, 杨文涛¹, 李正强², 侯伟真², 裘桢炜³, 李雨廷¹, 葛邦宇²

1. 中国空间技术研究院遥感卫星总体部, 北京 100094;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感卫星应用国家工程实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031

摘要: 高分多模卫星搭载中国首台民用大气同步校正仪, 可以对同平台的高分辨率相机观测区域进行时间同步、视场覆盖的大气参数测量, 实现对高分辨率图像的大气校正。文章论述了高分多模卫星大气同步校正的总体设计思路, 并给出了时空同步、多谱段、多偏振通道探测体制的设计方案和地面验证结果。高分多模卫星入轨以后, 对大气同步校正仪的大气参数反演效果和高分辨率图像的校正效果进行了分析, 结果表明利用大气同步校正仪测量数据对大气气溶胶光学厚度 (AOD) 和大气水汽含量 (CWV) 的反演结果可信, 对高分辨率图像有较好的大气校正效果。

关键词: 遥感, 大气校正, 总体设计, 在轨验证, 偏振, 气溶胶光学厚度, 大气水汽含量

引用格式: 余婧, 杨文涛, 李正强, 侯伟真, 裘桢炜, 李雨廷, 葛邦宇. 2022. 高分多模卫星大气校正总体设计与在轨验证. 遥感学报, 26(5): 1039-1050

Yu J, Yang W T, Li Z Q, Hou W Z, Qiu Z W, Li Y T and Ge B Y. 2022. Overall design and on-orbit verification of synchronization monitoring atmosphere corrector on high-resolution multi-mode satellite (GFDM). National Remote Sensing Bulletin, 26(5): 1039-1050 [DOI: 10.11834/jrs.20221371]

1 引言

近年来, 随着遥感卫星应用多年的发展, 卫星遥感正逐步从定性探测走向定量反演, 从服务于国土资源调查和军事侦察等业务拓展到各行各业的定量化应用 (Shaw 和 Burke, 2003; 梁顺林等, 2013)。遥感卫星的对地观测过程会受到大气的影响, 大气对太阳辐射光和地面反射光的散射和吸收, 会造成原始卫星影像清晰度和对比度下降, 地表反射率等定量化指标出现偏差, 必须进行大气校正来还原观测地物的真实地物反射率。大气校正是卫星遥感定量化应用的前提与基础。关于大气校正, 相关学者主要采用了以下4种方法 (郭红等, 2014; 李正强等, 2018): 基于图像和图形处理方法的大气校正、基于辐射传输计算的大气校正 (Griffin 和 Burke, 2003; Gao等, 2009; Minu 和 Shetty, 2015)、基于图像自身信息反演大气参数的大气校正以及基于大气同步校正仪的大

气校正。实际大气状况随着时间和空间变化往往非常剧烈, 利用其他渠道获得的大气气溶胶信息时空匹配吻合度随机性较大, 而基于大气同步校正仪的大气校正通过搭载小型专用大气探测仪, 同步测量大气参数信息, 获取与同平台载荷时空匹配的大气参数, 用于同平台其他载荷遥感数据的大气校正 (Dubovik等, 2019, 2021)。

国外已经对遥感图像的同步大气校正进行了一系列的探索。美国 NASA 于 2000 年发射的 EO-1 (Earth Observing-1) 卫星, 为了提高图像质量, 专门搭载了 LAC 大气校正仪 (Linear Etalon Imaging Spectrometer Array Atmospheric Corrector) 用于大气同步校正 (Reuter 等, 2001)。2014 年发射的 WorldView-3 卫星搭载了全新大气探测器 CAVIS (Clouds, Aerosols, water Vapor, Ice and Snow) (Longbotham 等, 2015), 为高分辨率载荷开展气溶胶、水汽、云等校正功能, 并开发了专用的大气同步补偿算法 DG-AComp (DigitalGlobe Atmospheric

收稿日期: 2021-06-01; 预印本: 2022-02-24

基金项目: 国家重大航天项目; 国家自然科学基金 (编号: 41871269)

第一作者简介: 余婧, 研究方向为遥感卫星及其应用。E-mail: yuj421@sina.com

Compensation) 用于地面的大气校正处理。

2020-07-03, 高分辨率多模综合成像卫星 GFDM (简称高分多模卫星) 在太原卫星发射中心成功发射, 中国空间技术研究院遥感卫星总体部作为高分多模卫星的总体单位, 负责了高分多模卫星从预研、设计、研制, 测试试验全过程。高分多模卫星搭载了国内民用首台大气同步校正仪 SMAC (Synchronization Monitoring Atmospheric Corrector), 开展同平台高分辨率相机的时间同步、视场覆盖的大气探测, 大气探测数据与高分辨率遥感图像同步下传到地面, 地面进行大气参数反演和图像的大气校正, 提升图像数据产品质量。

本文从高分辨率敏捷卫星大气校正需求出发, 给出高分多模卫星配置 SMAC 的总体设计思路, 继而给出了 SMAC 载荷的方案设计、主要技术指标和关键性能的地面测试结果。地面还开展了 SMAC 与地基太阳/天空辐射计的辐射对比试验, 获得了很好的实验结果。最后给出了 SMAC 在轨测试期间的大气参数反演方法和结果, 并与地基全球自动观测网络 AERONET (AErosol RObotic NETwork) 站点测量数据进行了对比, 结果表明基于 SMAC 载荷探测数据反演的大气参数真实可信。采用同步测量的大气参数对高分辨率图像能实现很好的大气校正效果, 显著恢复图像的细节信息和地物反射率信息, 有效支撑高分多模卫星数据的后续量化应用。

2 GFDM 卫星大气校正总体设计思路

高分多模卫星配置高分辨率相机, 地面像元分辨率全色优于 0.5 m, 多光谱优于 2 m, 幅宽大于 15 km, 包含一个全色波段 (0.45—0.90 μm) 和 8 个多光谱波段, 覆盖了从可见光到近红外几乎全部波长范围, 不仅具有 4 个标准波段: 红 (0.63—0.69 μm)、绿 (0.52—0.59 μm)、蓝 (0.45—0.52 μm)、近红外 (0.77—0.89 μm), 还包含 4 个额外波段: 海岸蓝 (0.40—0.45 μm)、黄 (0.59—0.625 μm)、近红外 2 (0.705—0.745 μm) 和红边 (0.86—1.04 μm), 多样化的波段能够为用户提供更精准的地物信息和制图能力。为实现高辐射精度、高商业价值的遥感图像数据的提供, 需要时空严格匹配的精准大气参数。

高分多模卫星配置大气同步校正仪主要考虑

以下 3 个原因: (1) 利用辐射传输模型, 大气对遥感图像影响的机理已较为清楚, 大气校正应用结果也表明其可以有效提升遥感图像的清晰度。但是由于大气条件在时空分布上存在着较大的差异性, 需要对成像时刻的高精度大气参数进行准确把握, 否则大气校正效果可能无法保证; (2) 大气交叉辐射 (邻近像元效应) 会在遥感器获得的目标像元辐射亮度中混入非目标像元信息。这种效应会模糊目标和背景的差别, 很大程度上影响并制约着定量遥感的精度。随着卫星空间分辨率的提升, 尤其是高分多模卫星分辨率已经优于 0.5 m, 大气交叉辐射效应更加明显。需获取实时大气参数信息, 进行邻近像元效应校正, 减轻大气交叉辐射效应的影响; (3) 高分多模卫星为敏捷卫星, 一般都在一定姿态角下进行成像, 随着卫星姿态角度的增加, 地面目标信息需要经过更长的大气路径到达遥感器, 对遥感图像的影响更大, 且不同姿态角下光线经过的大气路径不同。这种情况下, 更需要大气参数的实时探测来实现图像的高精度同步大气校正。

为满足高分多模卫星的高精度大气探测需求, 卫星总体设计思路如下:

(1) 通过搭载大气同步校正仪来获取与高分辨率相机图像时空同步的大气探测数据。大气校正仪在卫星平台上的安装方式确保大气同步校正仪光轴方向与高分辨率相机保持严格一致, 同时覆盖高分相机的幅宽范围, 保证敏捷卫星在各种机动角度下均可以实现大气参数的实时获取 (图 1)。

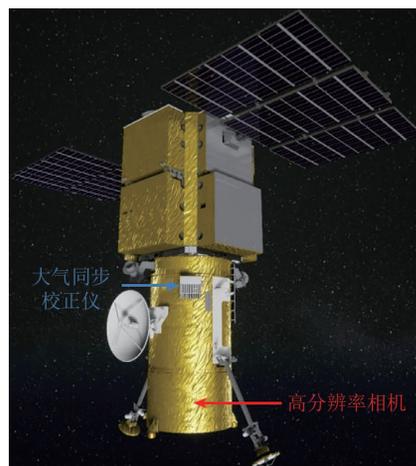


图 1 大气同步校正仪与主相机同步观测载荷示意图
Fig. 1 Synchronization observation diagram of the SMAC and the high-resolution camera

(2) 为保证SMAC载荷大气探测数据的好用易用性, 总体设计上将SMAC与高分分辨率相机同时成像时段的数据同时下传至地面, 方便地面应用系统同时获取高分分辨率影像对应的大气探测数据, 开展后续的大气参数反演和图像大气校正工作。后续地面应用系统可以方便地给用户地提供高分分辨率影像及对应的大气参数, 或者大气校正后的高分辨率影像数据。

(3) GFDM卫星运行于太阳同步轨道, 这种轨道下, SMAC载荷可以获取全球的大气参数信息。在载荷寿命允许的情况下, 可以尽量延长SMAC载荷的探测时间, 以获取尽量多的地球大气信息。卫星总体从SMAC载荷的工作模式设计上每轨仅开关机一次, 在每轨第一个高分分辨率相机成像任务之前提前开机, 在每轨最后一个高分分辨率相机成像任务之后关机。每轨的SMAC载荷大气探测数据(包括高分分辨率相机成像时段和非成像时段)保存于卫星上, 与卫星平台服务数据一起下传至地面。

3 SMAC载荷方案设计与地面验证

3.1 SMAC载荷方案设计

大气同步校正仪SAMC可获取覆盖主载荷成像区域且时间同步的大气校正参数, 用于GFDM卫星平台所搭载的高分辨率相机图像的大气校正。

SMAC载荷采用窄波段、多光谱和偏振通道相结合的大气参数探测体制(Sano等, 1997; 胡亚东等, 2015), 具有覆盖0.49—2.25 μm 的太阳反射光谱范围的8个探测波段, 其中的490、670、870、1610和2250 nm波段具备偏振探测能力, 可支撑地气解耦和气溶胶参数的高精度反演。此外, 910 nm波段主要用于水汽参数的有效反演, 1380 nm具有卷云和平流层气溶胶探测能力。SMAC除了能获取光谱维信息外, 还可以获取大气的偏振特性, 相对于纯标量观测能够获得更高的大气参数估算精度, 从而提高遥感图像的大气校正能力。对应地, SAMC主要技术指标如表1所示, 其定标精度和数据质量可确保大气关键参数的高精度反演。SMAC的外形图如图2所示。

3.2 SMAC载荷关键性能指标地面验证

为保证在轨探测精度, SMAC载荷在研制过程的各个阶段(方案设计、初样研制和正样研制)

对其各探测通道之间的视场一致性、辐射和偏振定标精度、红外探测器控温精度等关键性能指标都进行了相应的保证措施和地面测试验证, 重点对SMAC载荷在正样阶段开展了各通道重合度测试和实验室偏振定标精度测试。

表1 大气同步校正仪主要技术指标
Table 1 Technical specification of SMAC

参数	指标		
	波长/nm	光谱带宽/nm	偏振探测方向
光谱及偏振方向	490	20	0°、60°、120°
	550	20	非偏振
	670	20	0°、60°、120°
	870	40	0°、60°、120°
	910	20	非偏振
	1380	40	非偏振
	1610	60	0°、60°、120°
	2250	80	0°、60°、120°
视场	单像元视场		0.69°±0.02°
	双像元视场		0.69°±0.02°(沿轨方向)×1.48±0.04°(穿轨方向)
分辨率/幅宽	7 km/15 km		
实验室辐射定标精度	绝对辐射定标精度: 可见近红外波段(490 nm、550 nm、670 nm、870 nm、910 nm)谱段优于5%; 短波红外波段(1380 nm、1610 nm、2250 nm)谱段优于6%。 相对辐射定标(同一通道的两个像元间)≤2%。		
偏振定标精度	实验室偏振测量精度优于±0.01(线偏振度为0.2)		
各通道之间视场配准重合度	优于90%		
控温精度	-20 °C±2 °C		

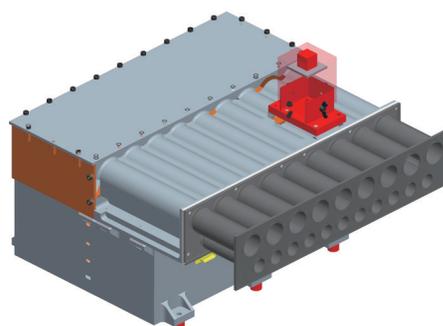


图2 大气同步校正仪外形图
Fig. 2 Outline of the SMAC

(1) SMAC载荷各通道视场重合度测试。为保证大气偏振辐射信息的测量精度, 要求SMAC载荷的各个探测通道(3个非偏振通道和15个偏振通

道)同时获取大气参数,多光学系统之间的视场重合度至少优于90%。地面对SMAC载荷各通道视场重合度进行了测试,测试示意图如图3所示。SMAC载荷各通道视场重合度的测试方法如下:首先将SMAC载荷安装在由高精度水平转台和角位移台构成的二维视场扫描装置上,由平移台和精密电控升降台用于更换测量通道。长焦距平行光管出射的平行光入射到校正仪孔径后,会在焦面上聚焦成一个点。运行二维视场扫描装置,该点在焦面上进行扫描,探测器响应信号反映二维角度空间上的视场分布。测完一个通道的视场后,移动至下一通道。因为平行光管基准保持不变,所以两个通道视场的基准点一致。由此计算两个通道视场角度空间上的面积重合度,即视场重合度。测试结果显示,大气同步校正仪任意两通道之间视场重合度都>90.7%。

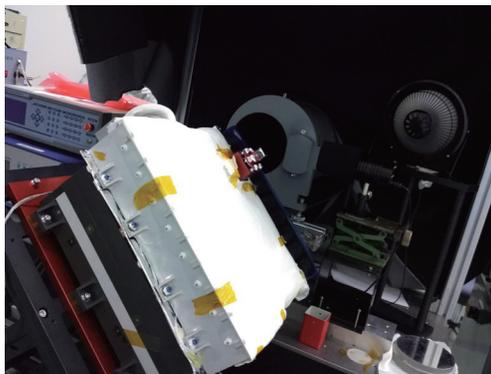


图3 大气同步校正仪视场重合度测试

Fig. 3 The overlap ratio of viewing field of multi-detecting-channels of SMAC

(2) SMAC实验室偏振定标精度。SMAC载荷利用多光谱偏振探测实现对大气的高精度反演,偏振信号的准确性关系到后续大气参数反演精度。SMAC载荷的每个偏振探测波段对应3个偏振通道(0° , 60° 和 120° 共3个方向),然而由于光学元件的非理想性,光学膜层、仪器装配误差及安装应力等都会引入偏振效应,需要通过偏振定标准确获取通道的偏振方向。偏振定标的精度一定程度上决定了偏振遥感信息反演的精度(黄文娟等,2015)。

SMAC载荷的偏振定标精度测试方法为:实测其偏振测量结果与可调偏振度光源VPOLS-II的理论参考值的对比来实现偏振测量精度的测试。可调偏振度光源VPOLS-II的理论参考值通过其偏振

盒内平板玻璃的透过率数据和转动角度数据计算获得(宋茂新等,2012)。大气同步校正仪正样阶段偏振测量精度结果如表2所示,其中 P_C 为理论偏振值, P_M 为大气同步校正仪实测值。从测试结果可以看出,各偏振波段主备份通道对20%线偏振度目标的偏振测量偏差均在0.86%之内,满足指标要求。

表2 大气同步校正仪偏振测量精度验证结果

Table 2 Polarimetry accuracy measurement results of SMAC

大气同步校正仪探测 通道-主/备份	$P_C/\%$	A像元		B像元	
		$P_M/\%$	偏差/ $\%$	$P_M/\%$	偏差/ $\%$
490-主	20.38	20.49	0.11	20.26	0.12
490-备	20.38	20.19	0.19	20.00	0.38
670-主	20.00	19.99	0.01	19.52	0.48
670-备	20.00	19.88	0.12	19.44	0.56
870-主	19.81	19.70	0.11	19.56	0.25
870-备	19.81	19.68	0.13	19.52	0.29
1610-主	19.37	19.35	0.02	19.43	0.06
1610-备	19.37	19.49	0.12	19.57	0.20
2250-P1P2P3组合-主	19.16	18.37	0.79	18.30	0.86
2250-P1P2P3组合-备	19.16	18.45	0.71	18.40	0.76
2250-P2P3P4组合-主	19.16	18.39	0.77	18.36	0.80
2250-P2P3P4组合-备	19.16	18.50	0.66	18.48	0.68
2250-P1P3P4组合-主	19.16	18.44	0.72	18.44	0.72
2250-P1P3P4组合-备	19.16	18.59	0.57	18.60	0.56
2250-P1P2P4组合-主	19.16	18.64	0.52	18.68	0.48
2250-P1P2P4组合-备	19.16	18.39	0.77	18.38	0.78

注: P_M 为大气同步校正仪实测值, P_C 为理论偏振值。

3.3 SMAC载荷大气反演结果精度地面验证

为保证SMAC载荷的在轨表现,2017年11月,在北京原中国科学院遥感与数字地球研究所奥园园区A座楼顶(经度: 116.38° ;纬度: 40.01° ;海拔:58 m),利用SMAC载荷鉴定件开展了各种大气条件下的地基太阳/天空辐射计的天空辐射对比观测实验。

大气清洁和污染条件下,SMAC载荷与CE318DP(王先华等,2008)对大气气溶胶光学厚度AOD(Aerosol Optical Depth)的反演结果如下图所示。大气清洁条件下(即AOD较低时),校正仪反演的AOD误差不超过0.05;大气污染条件时(即AOD较高时),校正仪反演的AOD误差小于0.03。

大气较干燥和较湿润条件下,大气校正仪与CE318DP对大气水汽含量CWV(Columnar Water

Vapor) 的反演结果如下图所示。大气干燥条件时 (即 CWV 较低时), 校正仪反演的 CWV 误差约为

0.1 g/cm^2 ; 大气较湿润条件时 (即 CWV 较高时), 校正仪反演的 CWV 误差小于 0.2 g/cm^2 。

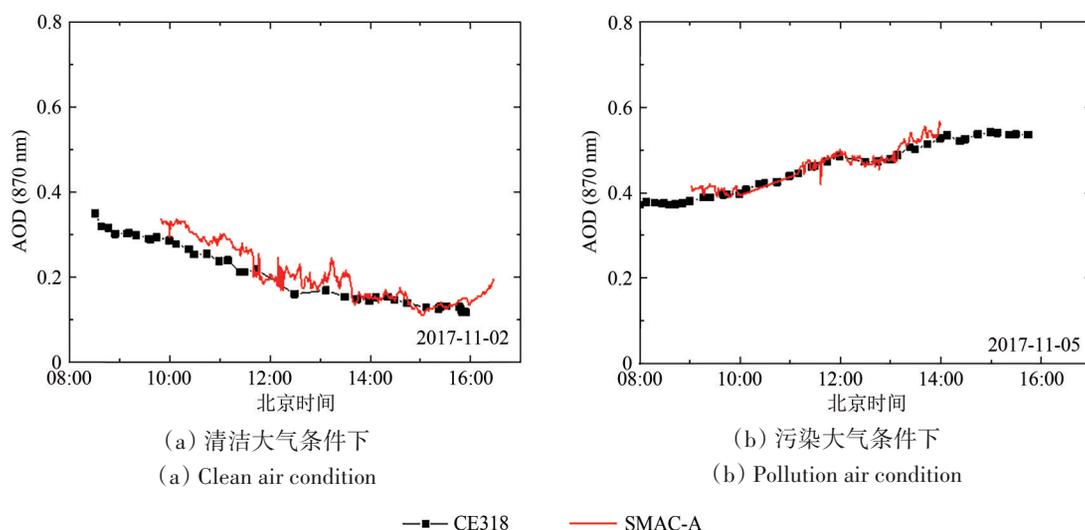


图4 大气清洁和污染条件下,大气校正仪与CE318DP的AOD反演结果对比(地面对天空观测试验)

Fig. 4 Verification of the AOD inversion accuracy of SMAC and CE318DP under different atmospheric condition

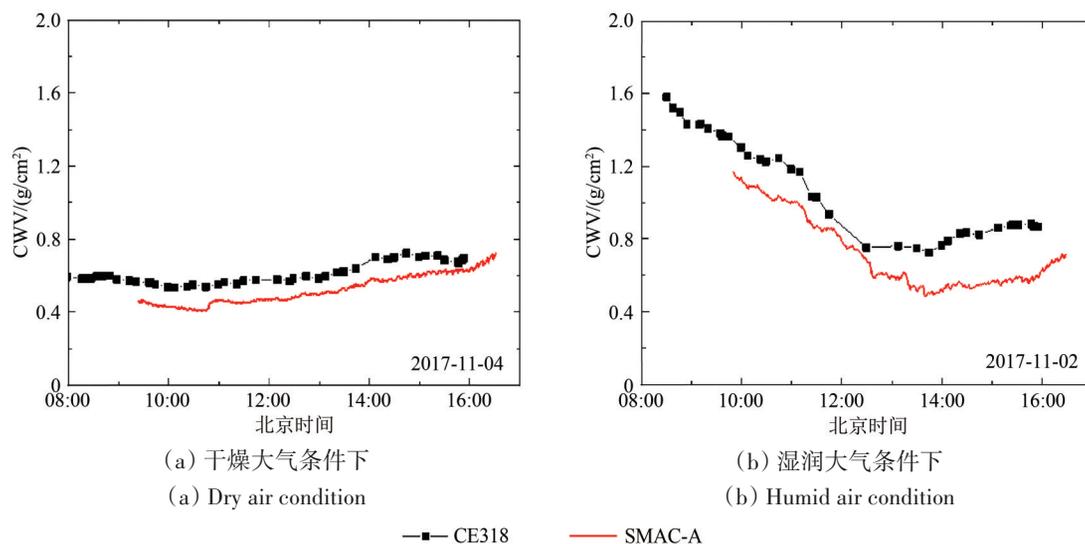


图5 大气干燥与湿润条件下,大气校正仪与CE318DP的CWV反演结果对比(地面对天空观测试验)

Fig. 5 Verification of the CWV inversion accuracy of SMAC and CE318DP under different atmospheric condition

对比试验结果表明, 利用SMAC载荷大气探测数据对大气参数的反演能达到比较好的结果。

4 SMAC 载荷在轨验证

2020-07-03, SMAC 载荷装载于 GFDM 卫星发射后第 1 天 (第 6 圈) 进行了首次开机状态检查, 于第 2 天开始进行大气参数的探测以及数据下传。地面应用系统利用探测数据进行了大气参数的反演及图像大气校正工作。

4.1 大气参数反演

大气中的成分包括气体、气溶胶、云雨雾雹等, 其中云雨雾 (厚) 雹是局部遮挡很强的信号, 地表信息几乎全部丢失, 无法进行校正, 而大气具有比较稳定成分构成, 对遥感图像的能量贡献稳定且比较容易计算。大气成分中气溶胶和水汽是变化比较大的两个参数, 也是高分多模大气同步校正仪的两个主要的反演结果。

SMAC 气溶胶反演是一种最优化反演方法, 主

要原理如下:

(1) 前向模型。基于最优化理论 (Dubovik 等, 2011), 前向模型可以表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}(\mathbf{x}, \mathbf{b}) + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

式中, \mathbf{x} 代表要反演的状态向量, \mathbf{b} 代表气溶胶模型参数向量, \mathbf{y} 代表观测向量, \mathbf{F} 代表前向模型, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 代表经验误差项, 包括观测和模型的误差。

(2) 反演框架。对于最优估计反演, 简化的标量值代价函数 $J(\mathbf{x})$ 可以写成 (Hou 等, 2016; Li 等, 2018):

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})]^T \mathbf{S}_y^{-1} [\mathbf{y} - \mathbf{F}(\mathbf{x})] \quad (2)$$

式中, \mathbf{S}_y 是观测误差协方差矩阵, 通常被假设为对角矩阵。定义状态矩阵如下:

$$\mathbf{x} = [V_0^f, V_0^c, C]^T \quad (3)$$

式中, \mathbf{x} 包含气溶胶的柱状体积浓度 V_0 , 上标 f 和 c 分别代表细模态和粗模态, C 为 BPDF 模型中的参数 (Waquet 等, 2009)。因此, 结合气溶胶模型的消光系数 Q_{ext} , 气溶胶光学厚度 (AOD) 可以通过以下公式计算 (Hou 等, 2018; Xu 等, 2013; Zheng 等, 2020):

$$\tau_a = \frac{3V_0^f}{4r_{\text{eff}}^f} Q_{\text{ext}}^f + \frac{3V_0^c}{4r_{\text{eff}}^c} Q_{\text{ext}}^c \quad (4)$$

同时, 将非状态矩阵 \mathbf{b} 定义为关于气溶胶模型的参数:

$\mathbf{b} = [r_{\text{eff}}^f, v_{\text{eff}}^f, r_{\text{eff}}^c, v_{\text{eff}}^c, m_r^f(\lambda), m_i^f(\lambda), m_r^c(\lambda), m_i^c(\lambda)]^T$ (5) 式中, r_{eff} 代表有效半径, v_{eff} 为有效方差, m_r 和 m_i 分别为复折射指数的实部和虚部, 具体的参数参考 (Zheng 等, 2020)。观测向量可以表示为

$$\mathbf{y} = [R_{\rho, \lambda_1}^{\text{TOA}}, R_{\rho, \lambda_3}^{\text{TOA}}, R_{\rho, \lambda_4}^{\text{TOA}}, R_{\rho, \lambda_7}^{\text{TOA}}, R_{\rho, \lambda_8}^{\text{TOA}}]^T \quad (6)$$

式中, $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_7$ 和 λ_8 分别代表 490 nm, 670 nm, 870 nm, 1610 nm, 2250 nm 的偏振观测结果。基于优化反演框架, 我们使用基于查找表的参数遍历方法代替实时计算的优化迭代。当代价函数 $J(\mathbf{x})$ 最小时对应状态向量的参数是最终反演的结果, 根据式 (4), 可以得到 AOD。

SMAC 水汽反演基于大气同步校正仪的 870 nm 和 910 nm 两个通道, 利用经典双通道比值法和查找表的方法进行大气柱水汽含量 (CWV) 的反演。

大气参数反演结果的验证方法通过采用 AERONET 地面站点测量数据与 SMAC 载荷反演结果之间的比对来完成。AERONET 是由 NASA 和 LOA-PHOTONS (CNRS) 联合建立的地基气溶胶遥感观测网 (Holben 等, 1998; Dubovik 等, 2002), 该网络现已经覆盖了全球主要的区域, 常被用于卫星观测大气参数的精度验证。

下面给出 2020-07-15—2020-08-19 日高分多模卫星在轨测试期间 SMAC 载荷的大气参数反演结果与地面 AERONET 测量的结果比较。测试站点分布如表 3 所示。

表 3 SMAC 大气参数反演验证站点

Table 3 Verification stations for SMAC

站点名称	经纬度坐标 (°E, °N)	站点名称	经纬度坐标 (°E, °N)
Tamanrasset_INM	(5.53, 22.79)	Cascade_Airport	(-116.017, 44.495)
CEILAP-BA	(-58.506, -34.555)	CEILAP-BA	(-58.506, -34.555)
USDA_ALARC	(-111.973, 33.077)	Misamfu	(31.224, -10.171)
MAXAR_FUTON	(-104.885, 40.036)	Magurele_Inoe	(26.031, 44.348)
Univ_of_Nevada-Reno	(-119.814, 39.541)	Lahore	(74.264, 31.48)
Meridian_DEQ	(-116.348, 43.601)	Rome_La_Sapienza	(12.516, 41.902)
USDA_ALARC	(-111.973, 33.077)	Aras_de_los_Olmos	(-1.102, 39.945)
Madrid	(-3.724, 40.452)	La_Paz	(-68.066, -16.539)
Rome_La_Sapienza	(12.516, 41.902)	USDA_ALARC	(-111.973, 33.077)
Cabauw	(4.927, 51.971)	Univ_of_Nevada-Reno	(-119.814, 39.541)
CEILAP-BA	(-58.506, -34.555)	Valladolid	(-4.706, 41.664)
Kuwait_University	(47.971, 29.325)	MAXAR_FUTON	(-104.885, 40.036)
Kupang	(123.667, -10.139)	Madrid	(-3.724, 40.452)
Rome_La_Sapienza	(12.516, 41.902)	NEON_CVALLA	(-105.167, 40.161)
Madrid	(3.724, 40.452)	Misamfu	(31.224, -10.171)
Kuwait_University	(47.971, 29.325)		

图6给出了SMAC载荷反演值与AERONET地面站点测量值的对比结果。图6(a)图6和(b)分别为AOD和CWV的反演值和地面测量值的散点图。对比假定大气气溶胶厚度和水汽含量在较小

的空间范围内变化较小, SMAC载荷反演结果取站点附近位置3个像元探测数据的平均值。站点数据选取SMAC载荷同步观测时间点前后30 min的平均值。

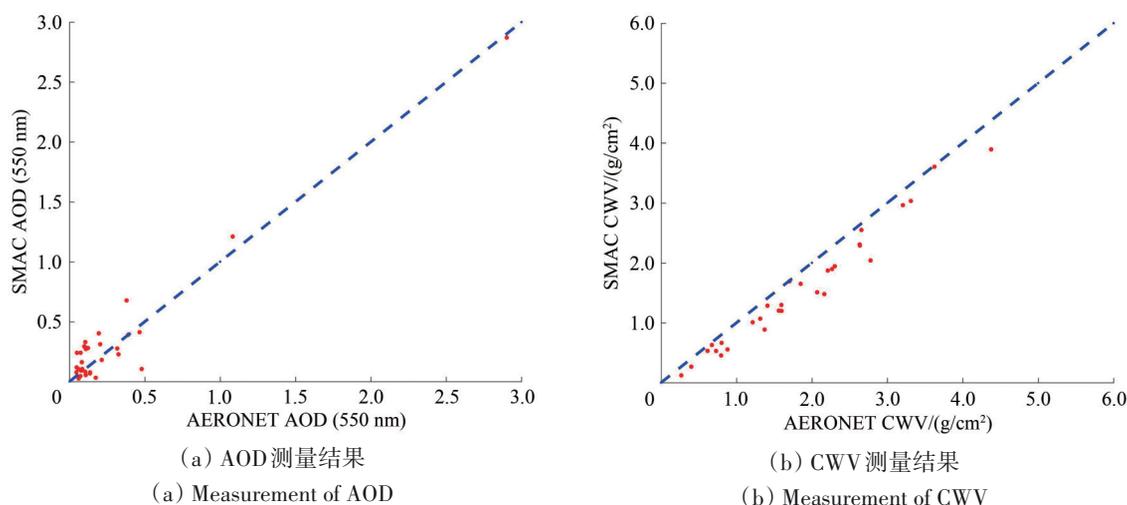


图6 SMAC载荷反演值与AERONET地面站点测量值的验证结果

Fig. 6 Verification results of SMAC inversion value and the measured value of the AERONET ground station

SMAC载荷反演值与AERONET地面站点的对比结果有, AOD的均方根误差为0.13, 而CWV的均方根误差为0.26。基于SMAC载荷大气探测数据得到了比较高的AOD和CWV反演精度。

下面给出3种典型大气条件(清洁大气、中等和高气溶胶光学厚度)下SMAC载荷的大气参数反演结果与地面AERONET结果的详细比对, 所选用的AERONET站点详细信息见表4所示。

表4 大气同步校正仪大气反演验证站点信息

Table 4 Atmospheric inversion accuracy testing sites of SMAC

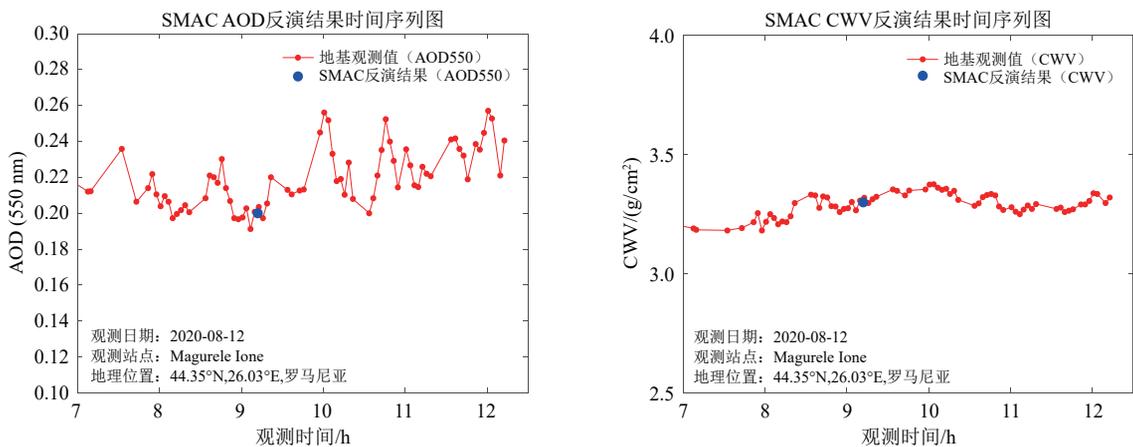
大气环境	AERONET 站点	经纬度 (°E, °N)	SMAC 过境 时间(UTC)
纯净大气	Magurle_Inoe	(26.031, 44.348)	2020-08-12, 09:13:18
中等气溶胶厚度	Kuwait_university	(47.971, 29.325)	2020-07-26, 07:28:51
高气溶胶厚度	USDA_ALARC	(-111.973, 33.077)	2020-08-02, 18:20:45

高分多模大气同步校正仪主要反演生成550 nm波段的AOD产品, 需要将AERONET数据进行插值处理, 获得与卫星产品波段一致的AOD。图7(a)、(b)、(c)分别代表清洁大气、中等气溶胶厚度和高气溶胶厚度的3种大气环境下大气同

步校正仪测量结果的验证结果。图7中红线为AERONET各站点的测量数据, 一般每隔15 min一个测量值, 蓝色点为SMAC载荷在站点附近位置探测数据的平均值(取3个像元)。

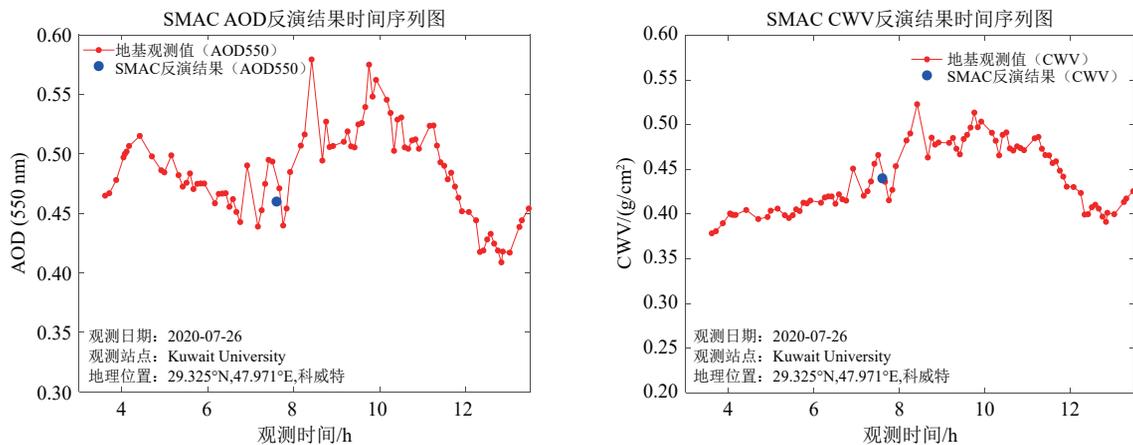
4.2 高分辨率图像校正

准确的大气参数信息(包括气溶胶厚度和水汽含量)是高分辨率图像大气校正的关键。一般大气参数的获取有3种途径:(1)利用其他卫星(如MODIS)获得的大气参数产品;(2)利用AERONET地面站点的测量数据;(3)利用卫星自身的图像反演获得大气参数信息。利用其他卫星数据的方式只能获取该卫星过境时刻的大气参数, 不一定与待校正图像获取卫星过境时间一致; AERONET地面站点虽然有持续时间的大气参数, 但地面站点数量有限且分布稀疏, 不一定位于待校正图像覆盖范围内; 利用卫星自身图像的反演可以获得与待校正图像同时相同区域的大气参数信息, 但对卫星的谱段设置要求比较高, 要求其能覆盖大气参数反演的频段。一般高分辨率成像相机都不具备这些频段需求, 通过配置一台小型专用型大气同步校正仪, 获取与高分辨率相机时空匹配的大气参数信息, 服务高分辨率图像的大气校正。



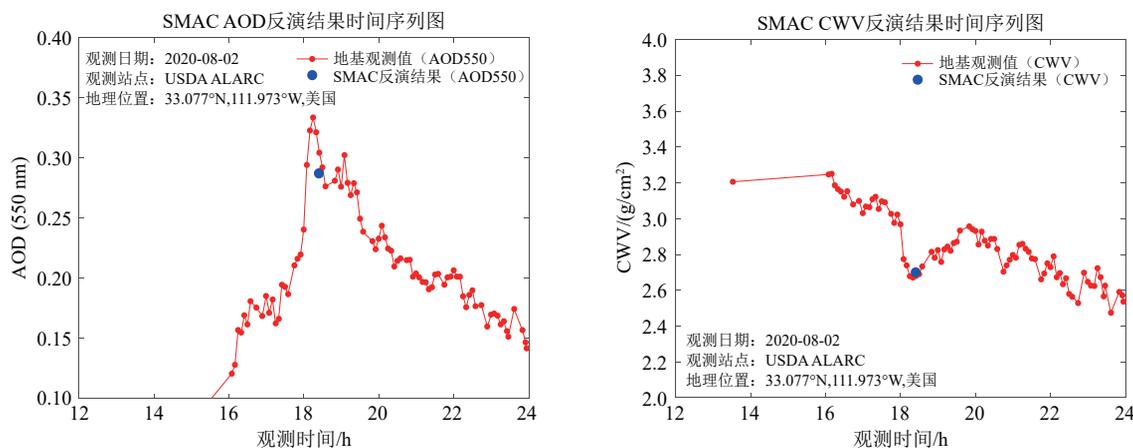
(a) 清洁大气下, Magurle_Inoe 站点对比结果

(a) Contrast of the results of SMAC with the observation of the Aeronet site—Magurle_Inoe



(b) 中等气溶胶光学厚度下, Kuwait_university 站点对比结果

(b) Contrast of the results of SMAC with the observation of the Aeronet site—Kuwait_university



(c) 高气溶胶光学厚度下, USDA_ALARC 站点对比结果

(c) Contrast of the results of SMAC with the observation of the Aeronet site—USDA_ALARC

图7 不同大气条件下SMAC大气参数反演结果的验证

Fig. 7 Verification of the inversion results of SMAC under different atmospheric conditions

利用SMAC反演获得的大气关键参数对GFDM高分辨率图像进行大气校正,图8给出了典型校正效果图,为2020-09-30美国加州地区森林大火后的烟雾弥漫的遥感影像(39.01°N, 119.80°W)。

图9(a)、(b)为同时具有城市区、植被区的复杂地表上空的大气校正效果;图9(c)、(d)为针对某建筑屋顶的校正效果,可见高亮区域细节、屋顶纹理在校正后更为清晰。通过大气校正去除了

大气程辐射和交叉辐射效应，进而改善地物细节特征的可识别性。



(a) 美国加州地区复杂地表上空大气校正前图像
(a) Image before atmospheric correction over a complex surface
(b) 大气校正后图像
(b) Image after atmospheric correction



(c) 美国加州地区某建筑屋顶大气校正前图像
(c) Image before atmospheric correction of a building roof in California, USA
(d) 大气校正后图像
(d) Image after atmospheric correction

图8 高分多模大气校正前后图像

Fig. 8 Satellite image before and after atmospheric correction

对大气校正前后的高分辨率遥感图像质量进行定量地评价，结果见表5所示。大气校正后遥感图像的清晰度、方差和边缘能量都有了很大的提升，尤其是加州地区某建筑屋顶的图像质量提升明显。从图像也可以看出，大气校正很好的恢复了屋顶以及房屋旁边停车场的细节信息。

表5 GFDM图像大气校正前后图像质量评价结果
Table 5 Evaluation of GFDM image before and after atmospheric correction

图像评价指标	复杂地表上空		某建筑屋顶	
	校正前	校正后	校正前	校正后
清晰度	7.53	14.81	0.6508	2.7698
图像方差	1255	3215	1618	3762
图像边缘能量	1.58×10^5	4.46×10^5	1.84×10^4	6.12×10^4

高分辨率图像大气校正的意义不仅表现在图像的目视效果和客观指标评价上，其更大的意义在于与对地物反射率的恢复。图9给出了大气同步校正仪对高分辨率相机图像（加州地区复杂地表中植被区域和裸土区域）的光谱复原情况，其中图9(a)为高分辨率相机的响应DN值；图9(b)和图9(c)分别为大气校正前后的地表反射率，以及参考反射率光谱曲线（JHU地物波谱库）。

表6给出了各个波段大气校正前后的反射率和NDVI值，以定量比较大气校正前后的结果。

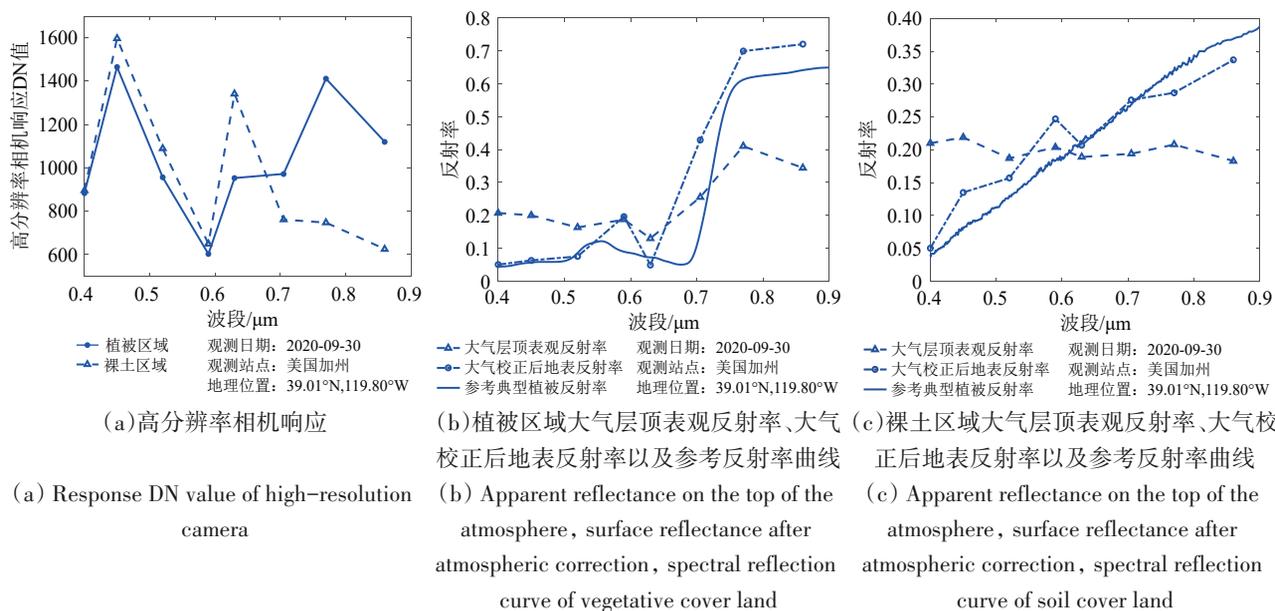


图9 植被区域大气校正前后光谱变化

Fig. 9 The observed spectrum of vegetative cover land

表6 GFDM图像典型地表大气校正前后地表反射率
Table 6 The apparent and correction reflectance of typical land surface in the GFDM images

校正前后	波段	植被区域	裸土区域
校正前	海岸蓝(0.40—0.45 μm)	0.207	0.21
	蓝波段(0.45—0.52 μm)	0.200	0.219
	绿(0.52—0.59 μm)	0.163	0.187
	黄(0.59—0.625 μm)	0.187	0.204
	红(0.63—0.69 μm)	0.130	0.189
	近红外2(0.705—0.745 μm)	0.255	0.194
	近红外(0.77—0.89 μm)	0.410	0.208
	红边(0.86—1.04 μm)	0.344	0.183
	NDVI	0.519	0.048
	校正后	海岸蓝(0.40—0.45 μm)	0.050
蓝波段(0.45—0.52 μm)		0.063	0.135
绿(0.52—0.59 μm)		0.075	0.157
黄(0.59—0.625 μm)		0.196	0.247
红(0.63—0.69 μm)		0.049	0.207
近红外2(0.705—0.745 μm)		0.429	0.276
近红外(0.77—0.89 μm)		0.699	0.287
红边(0.86—1.04 μm)		0.720	0.337
NDVI		0.869	0.162

大气校正使得大气散射效应导致的蓝端谱段的反射率增强得到了抑制，而近红外和红边谱段的反射率有所提升。植被区域和裸土区域的NDVI指数均有所增加。大气校正后的地表反射率曲线更接近地物的参考反射率曲线。大气校正可以较好地改善地物反演定量化水平，得到地物特征光谱。

5 结论

高分多模卫星具有敏捷成像的能力，可利用其快速姿态机动的能力实现对地面目高效、灵活的观测，大大提升了卫星的成像效率，但对其获取的高分辨率图像质量的保证提出了新的要求。卫星在大角度成像时，大气传输路径增加，对图像MTF (Modulation Transfer Function) 影响更大，邻近像元效应也与星下点情况有较大差异。

为获取高辐射精度、高商业价值的遥感图像数据，高分多模卫星采用天地一体化大气同步校正解决方案。卫星配置大气同步校正仪SMAC获取与高分辨率相机时空严格匹配的大气探测数据，SMAC载荷的谱段和偏振通道设计以及研制过程中的关键性能控制考虑后续地面大气反演需求，地面大气反演算法的设计也考虑载荷的设计和指标

水平，为高分多模卫星的大气校正提供更加精准的大气参数。

与全球AERONET站点测量数据的对比结果表明，基于SMAC载荷探测数据反演的大气参数真实可信。利用该参数对高分辨率图像能实现很好的大气校正效果，显著恢复图像的细节信息，并有效改善地物反射率反演的定量化水平。SMAC载荷的在轨成功应用为高分多模卫星遥感产品定量化应用及推广提供了重要支撑，也为后续遥感卫星图像的大气同步校正实现提供了一种参考手段。

志 谢 感谢中国资源卫星应用中心提供高分多模载荷数据；感谢AERONET发布的大气气溶胶和水汽参数地基观测数据；感谢美国JHU地物波谱库数据；感谢E.F.Vermote等开发的6SV软件。

参考文献(References)

- Dubovik O, Herman M, Holdak A, Lapyonok T, Tanré D, Deuzé J L, Ducos F, Sinyuk A and Lopatin A. 2011. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(5): 975-1018 [DOI: 10.5194/amt-4-975-2011]
- Dubovik O, Holben B N, Eck T F, Smirnov A, Kaufman Y J, King M D, Tanre D and Slutsker I. 2002. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3): 590-608 [DOI: 10.1175/1520-0469(2002)059<0590:VOAOP>2.0.CO;2]
- Dubovik O, Li Z Q, Mishchenko M I, Tanré D, Karol Y, Bojkov B, Cairns B, Diner D J, Espinosa W R, Goloub P, Gu X F, Hasekamp O, Hong J, Hou W Z, Knobelspiesse K D, Landgraf J, Li L, Litvinov P, Liu Y, Lopatin A, Marbach T, Maring H, Martins V, Meijer Y, Milinevsky G, Mukai S, Parol F, Qiao Y L, Remer L, Riethoven J, Sano I, Stammes P, Stammes S, Sun X B, Tabary P, Travis L D, Waquet F, Xu F, Yan C X and Yin D K. 2019. Polarimetric remote sensing of atmospheric aerosols: instruments, methodologies, results, and perspectives. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 224: 474-511 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.11.024]
- Dubovik O, Schuster G L, Xu F, Hu Y X, Bösch H, Landgraf J and Li Z Q. 2021. Grand challenges in satellite remote sensing. *Frontiers in Remote Sensing*, 2: 619818 [DOI: 10.3389/frsen.2021.619818]
- Gao B C, Montes M J, Davis C O and Goetz A F H. 2009. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. *Remote Sensing of Environment*, 113(1): S17-S24 [DOI: 10.1016/j.rse.2007.12.015]
- Griffin M K and Burke H H K. 2003. Compensation of hyperspectral

- data for atmospheric effects. *Lincoln Laboratory Journal*, 14(1): 29-54
- Guo H, Gu X F, Xie D H, Yu T and Meng Q Y. 2014. A review of atmospheric aerosol research by using polarization remote sensing. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(7): 1873-1880 (郭红, 顾行发, 谢东海, 余涛, 孟庆岩. 2014. 大气气溶胶偏振遥感研究进展. *光谱学与光谱分析*, 34(7): 1873-1880) [DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)07-1873-08]
- Holben B N, Eck T F, Slutsker I, Tanré D, Buis J P, Setzer A, Vermote E, Reagan J A, Kaufman Y J, Nakajima T, Lavenu F, Jankowiak I and Smirnov A. 1998. AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*, 66(1): 1-16 [DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00031-5]
- Hou W Z, Li Z Q, Wang J, Xu X G, Goloub P and Qie L L. 2018. Improving remote sensing of aerosol microphysical properties by near-infrared polarimetric measurements over vegetated land: information content analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(4): 2215-2243 [DOI: 10.1002/2017JD027388]
- Hou W Z, Wang J, Xu X G, Reid J S and Han D. 2016. An algorithm for hyperspectral remote sensing of aerosols: 1. development of theoretical framework. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 178: 400-415 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2016.01.019]
- Hu Y D, Hu Q Y, Sun B, Wang X J, Qiu Z W and Hong J. 2015. Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images. *Optics and Precision Engineering*, 23(3): 652-659 (胡亚东, 胡巧云, 孙斌, 王相京, 裴桢伟, 洪津. 2015. 遥感图像双角度偏振大气校正仪. *光学精密工程*, 23(3): 652-659) [DOI: 10.3788/OPE.20152303.0652]
- Huang W J, Cui W Y, Yi W N, Sun B and Hu Y D. 2015. Calibration processing for multi-spectral polarimetric atmospheric detection system. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 10(4): 350-356 (黄文娟, 崔文煜, 易维宁, 孙斌, 胡亚东. 2015. 多光谱偏振大气探测系统定标处理. *大气与环境光学学报*, 10(4): 350-356) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2015.04.010]
- Li Z Q, Chen X F, Ma Y, Qie L L, Hou W Z and Qiao Y L. 2018. An overview of atmospheric correction for optical remote sensing satellites. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 10(1): 6-15 (李正强, 陈兴峰, 马葵, 伽丽丽, 侯伟真, 乔延利. 2018. 光学遥感卫星大气校正研究综述. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 10(1): 6-15) [DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.2018.01.002]
- Li Z Q, Hou W Z, Hong J, Zheng F X, Luo D G, Wang J, Gu X F and Qiao Y L. 2018. Directional polarimetric camera (DPC): monitoring aerosol spectral optical properties over land from satellite observation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 218: 21-37 [DOI: 10.1016/j.jqsrt.2018.07.003]
- Liang S L, Li X W and Wang J D. 2013. *Quantitative Remote Sensing: Ideas and Algorithms*. Beijing: Science Press (梁顺林, 李小文, 王锦地. 2013. 定量遥感: 理念与算法. 北京: 科学出版社)
- Longbotham N, Pacifici F, Malitz S, Baugh W and Camps-Valls G. 2015. Measuring the spatial and spectral performance of WorldView-3/Fourier Transform Spectroscopy and Hyperspectral Imaging and Sounding of the Environment (pp. HW3B-2). *Lake Arrowhead: Optical Society of America* [DOI: 10.1364/HISE.2015.HW3B.2]
- Minu S and Shetty A. 2015. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral imageries: a review. *International Research Journal of Earth Sciences*, 3(5): 14-18
- Reuter D C, McCabe G H, Dimitrov R, Graham S M, Jennings D E, Matsumura M M, Rapchun D A and Travis J W. 2001. The LEISA/atmospheric corrector (LAC) on EO-1/IGARSS 2001. *Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (Cat. No. 01CH37217)*. Sydney: IEEE: 46-48 [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.976053]
- Sano I, Mukai S and Takashima T. 1997. Multispectral polarization measurements of atmospheric aerosols. *Advances in Space Research*, 19(9): 1379-1382 [DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00249-4]
- Shaw G A and Burke H H K. 2003. Spectral imaging for remote sensing. *Lincoln Laboratory Journal*, 14(1): 3-28
- Song M X, Sun B, Sun X B and Hong J. 2012. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer. *Optics and Precision Engineering*, 20(6): 1153-1158 (宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 洪津. 2012. 航空多角度偏振辐射计的偏振定标. *光学精密工程*, 20(6): 1153-1158) [DOI: 10.3788/OPE.20122006.1153]
- Wang X H, Qiao Y L, Goloub P and Li Z Q. 2008. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network. *Acta Optica Sinica*, 28(1): 87-91 (王兴华, 乔延利, Goloub P, 李正强. 2008. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计辐射定标系统. *光学学报*, 28(1): 87-91) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-2239.2008.01.016]
- Waquet F, Léon J F, Cairns B, Goloub P, Deuzé J L and Auriol F. 2009. Analysis of the spectral and angular response of the vegetated surface polarization for the purpose of aerosol remote sensing over land. *Applied Optics*, 48(6): 1228-1236 [DOI: 10.1364/AO.48.001228]
- Xu X G, Wang J, Henze D K, Qu W J and Kopacz M. 2013. Constraints on aerosol sources using GEOS-chem adjoint and MODIS radiances, and evaluation with multisensor (OMI, MISR) data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12): 6396-6413 [DOI: 10.1002/jgrd.50515]
- Zheng F X, Li Z Q, Hou W Z, Qie L L and Zhang C. 2020. Aerosol retrieval study from multiangle polarimetric satellite data based on optimal estimation method. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(1): 014516 [DOI: 10.1117/1.JRS.14.014516]

Overall design and on-orbit verification of synchronization monitoring atmosphere corrector on high-resolution multi-mode satellite (GFDM)

YU Jing¹, YANG Wentao¹, LI Zhengqiang², HOU Weizhen², QIU Zhenwei³, LI Yuting¹, GE Bangyu²

1. Institute of Remote Sensing Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Satellite Remote Sensing, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

Abstract: The high-resolution multi-mode satellite (GFDM) is equipped with China's first civil-using Synchronization Monitoring Atmosphere Corrector (SMAC). This satellite can acquire the atmospheric parameters of the same observation area of the high-resolution camera and achieve accurate correction for the image taken by the high-resolution camera. This study discusses the overall design ideas of synchronization atmospheric correction for high-resolution multi-mode satellites. The design schemes of time-space synchronization, multi-spectrum, multi-polarization channel detection system, and the verification results on ground and on orbit are presented.

GFDM satellite has the capability of rapid attitude maneuvering. Thus, it can realize efficient and flexible observation of ground targets, which greatly improves its imaging efficiency. However, this feature also brings new requirement for the assurance of the quality of the high-resolution images obtained by the satellite. When the satellite takes photograph at a larger angle, the atmospheric transmission path of light from ground observing target increases. This condition will cause greater impact on the image's modulation transfer function and different adjacent pixel effect compared with the situation of sub-satellite point viewing. GFDM satellite adopts a space-ground integrated atmospheric synchronization correction solution to obtain remote sensing image data products with high radiation accuracy and high commercial value. SMAC is equipped on GFDM to obtain atmospheric detecting data that strictly match the image obtained by the high-resolution camera temporally and spatially. The spectrum band and polarization channel design and the key performance control measures of SMAC during its manufacturing process fully consider the subsequent ground atmospheric retrieval requirements. The ground atmospheric retrieval algorithm also considers the design properties of SMAC. Through this cooperation between the two important processes, more accurate atmospheric parameters can be provided for the atmospheric correction of high-resolution images of GFDM. This study gives the scheme design, main technical properties, and ground test results of SMAC. A radiation comparison between SMAC and ground-based solar/sky radiometer was conducted on ground, and good experimental results were achieved.

GFDM satellite was launched to orbit on July 3, 2020. On the first day (the 6th orbit circle) after launch, an initial status check was performed. On the second day, the SMAC started the atmosphere detection and the detected data were downloaded to ground. The ground application system used these detection data to perform atmospheric parameter inversion and image atmospheric correction. The atmospheric parameter inversion results and the effect of atmospheric correction of high-resolution images were examined. The comparison between the measurement data from the global AERONET site shows that the inversion results of atmospheric aerosol optical thickness and atmospheric water vapor content based on SMAC detection data are credible. Using the inverted atmospheric parameter, a good atmospheric correction effect on high-resolution images can be achieved, detailed information of the satellite images is significantly restored, and the ground object reflectance is effectively improved. These results all effectively support the subsequent quantification application of GFDM high-resolution image data. The successful application of SMAC in-orbit also provides a reference for the subsequent satellites which need to improve their quantitative application level.

Key words: remote sensing, atmosphere corrector, overall design, on-orbit verification, polarization, Aerosol Optical Depth (AOD), Columnar Water Vapor (CWV)

Supported by National Major Aerospace Project; National Natural Science Foundation of China (No. 41871269)