

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2023.04.004

高光谱观测卫星偏振交火工程设计及在轨性能评估

张苗苗¹, 温渊¹, 朱思峰¹, 谢艳清¹, 李迎杰¹, 李云端¹,
洪津^{2*}, 刘振海², 骆冬根², 宋茂新², 王羿²

(1 上海卫星工程研究所, 上海 201109;

2 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, 安徽 合肥 230031)

摘要: 2021年9月7日发射的高光谱观测卫星是《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025)》中规划的一颗业务星,是我国高光谱遥感能力的重要标志。高光谱观测卫星运行于高度为705 km、降交点地方时为10:30的太阳同步轨道。针对细颗粒物探测,卫星配置了偏振交火传感器,通过由高精度偏振扫描仪(POSP)与大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)构成的双偏振载荷的联合探测,获取观测区域的气溶胶光学厚度(AOD)、PM_{2.5}等气溶胶信息。本文主要介绍了高光谱观测卫星总体技术方案和双偏振载荷方案,详细阐述了偏振交火模式设计要点,包括时统设计、光谱通道设置、光谱匹配设计以及视场匹配设计等工程设计。同时,对偏振交火模式的在轨性能进行了评估,评估结果表明:双偏振载荷的同步观测采集时间差优于0.4 ms,视场匹配误差优于0.066 POSP像元,满足反演应用需求。最后,对双偏振载荷在轨测量精度进行了交叉验证,验证结果表明辐射测量值与参考值拟合决定系数均高于0.96,线偏振度在轨交叉验证平均绝对差异优于0.0088,均满足在轨探测精度的设计要求。

关键词: 高光谱观测卫星; 细颗粒物探测; 偏振交火; 交叉定标

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2023)04-295-015

Engineering design and in-orbit performance evaluation of polarization crossfire suite onboard the hyperspectral observation satellite

ZHANG Miaomiao¹, WEN Yuan¹, ZHU Sifeng¹, XIE Yanqing¹, LI Yingjie¹, LI Yunduan¹,
HONG Jir^{2*}, LIU Zhenha², LUO Donggen², SONG Maoxin², WANG Yi²

(1 Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China;

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

Abstract: Hyperspectral observation satellite, launched on September 7, 2021, is an operational satellite planned in the "National Medium-and Long-Term Development Plan for Civil Space Infrastructure (2015-

基金项目: 国家自然科学基金(42275144)

作者简介: 张苗苗(1993-),女,陕西宝鸡人,博士,工程师,主要从事卫星总体设计和载荷定标方面的研究。E-mail: zhm76@mail.ustc.edu.cn

收稿日期: 2023-03-17; 修改日期: 2023-04-17

*通信作者。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

2025)", and is an important symbol of China's hyperspectral remote sensing capability. The satellite operates in a sun-synchronous orbit with an altitude of 705 km and a local time of descending node of 10:30 AM. For the detection of fine particulate matters, the satellite is equipped with a dual-polarization crossfire payload suite composed of a high-precision particulate observing scanning polarimeter (POSP) and an atmospheric multi-angle aerosol directional polarization camera (DPC), so aerosol information such as AOD and $PM_{2.5}$ can be obtained through the joint detection of dual-polarization payloads. This paper mainly introduces the overall technical scheme of the hyperspectral satellite and the dual polarization payloads, and elaborates on the key design points of polarization crossfire mechanism, including the engineering design of timing, spectral channel selection, spectral channel matching and field of view matching. At the same time, the on-orbit performance of the polarization crossfire detection mode is evaluated. The results show that the time synchronization accuracy of the dual-polarization payload is better than 0.4 ms, and the field of view matching accuracy is better than 0.066 pixel of POSP, meeting the requirement of aerosol inversion. Finally, the in-orbit measurement performance of dual-polarization payloads is cross-verified. It is shown that the fitting determination coefficient of radiation measurement and reference value is higher than 0.96, and the average absolute difference of linear polarization is better than 0.0088, which meets the design requirements of in-orbit detection accuracy.

Key words: hyperspectral observation satellite; fine particulate matters detection; polarization crossfire; cross calibration

0 引言

气溶胶是全球大气的重要组成部分,由悬浮在空气中的固体和液体颗粒组成^[1]。空气动力学直径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物通常被称为细颗粒物或 $PM_{2.5}$ 。 $PM_{2.5}$ 不仅粒径较小,而且容易附着有害物质,其可以长时间停留在空气中并输送至较远的距离,极易被人体吸收进入肺部,对空气环境和人体健康等造成严重危害。此外, $PM_{2.5}$ 还会影响近地能见度,从而危及公共交通的安全,同时还影响着地气辐射平衡^[2]。

如何直接、有效地监测大范围 $PM_{2.5}$ 浓度是迫切需要解决的一个重要科学技术问题。 $PM_{2.5}$ 的反演在很大程度上取决于卫星探测到的气溶胶关键参数^[3]。由于偏振对气溶胶粒子的形状、粒径和折射率等物理特征较敏感,而对地表相对不敏感,利用偏振探测方式不仅便于实现地气解耦,同时可获取更多气溶胶光学特性参数^[4],可为 $PM_{2.5}$ 浓度反演提供强有力的支持。多角度偏振相机 [如地球反射偏振测量仪 (POLDER)^[5]、多角度成像仪 (DPC)^[6]、多角度多光谱偏振成像仪 (3MI)^[7] 等] 具有多角度大视场成像能力,但由于技术限制未配置星上定标器。而气溶胶偏振测量传感器 (APS)^[8]、高精度偏振扫描仪 (POSP)^[9] 和偏振扫描大气校正仪 (PSAC)^[10] 等扫描仪较容易配置星上偏振定标器。不同平台上载荷之间的交叉定标方法相对复杂,需要轨道和观测目标匹配、观测时间和视场匹配、仪器光谱匹配等^[11]。地面目标的偏振信息中具有复杂的几何分布特征,且偏振测量对大气和地表环境因素也比较敏感,因此在没有星上定标器的情况下,要实现偏振载荷的高精度在轨定标的一个可行解决方案是在同一平台上进行辐射测量和偏振交叉校准^[12]。

乌克兰大气气溶胶探测计划 Aerosol-UA 将偏振扫描仪 (ScanPol) 和多光谱偏振成像仪 (MSIP) 进行了一

体化设计,在该系统中,ScanPol将高精度定标系数传递给MSIP,从而MSIP可实现大范围的气溶胶监测^[13]。NASA的新一代气溶胶、云、地球生态系统观测计划PACE任务将同时搭载超角度偏振仪(HARP2)与偏振光谱仪(SPEXone)传感器进行协同观测^[14],也提出了同一平台上的偏振传感器之间的交叉校准,计划于2023年发射。国内,李正强等^[15]进一步提出了有机结合多角度偏振成像遥感器和高精度偏振扫描遥感器的偏振交火气溶胶探测方案,并将该方案应用到高光谱观测卫星上。该卫星于2021年9月7日成功发射,在全球首次实现星载同平台多偏振协同探测,其目标不仅要实现PM_{2.5}等颗粒物高精度探测,还期望通过同平台交叉定标方式实现多角度偏振成像仪的长期在轨精度保持。

高光谱观测卫星是《国家民用空间基础设施中长期发展规划(2015-2025)》中的一颗卫星,通过卫星时序设计,以及双偏振光谱匹配、视场匹配和同步采集时序设计,实现了偏振交火探测的工程设计,经在轨测试结果表明其性能满足PM_{2.5}高精度测量要求。

1 高光谱观测卫星偏振交火载荷

1.1 卫星总体方案概述

高光谱观测卫星^[16]运行在标称高度705 km、降交点地方时10:30的太阳同步轨道。卫星共装载7台有效载荷,如图1所示。其中,对地成像载荷有2台,分别为可见短波红外高光谱相机(AHSI)和全谱段光谱成像仪(VIMI),其对地成像谱段覆盖可见、短波、中波以及长波红外,空间分辨率20~40 m,可满足我国在环境综合监测和自然资源调查等方面的应用需求;大气探测载荷有5台,分别为大气主要温室气体监测仪(GMI)、大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)、大气气溶胶多角度偏振探测仪(DPC)、高精度偏振扫描仪(POSP)和吸收性气溶胶探测仪(AAS),可实现对温室气体、PM_{2.5}、污染气体等大气环境要素的监测。

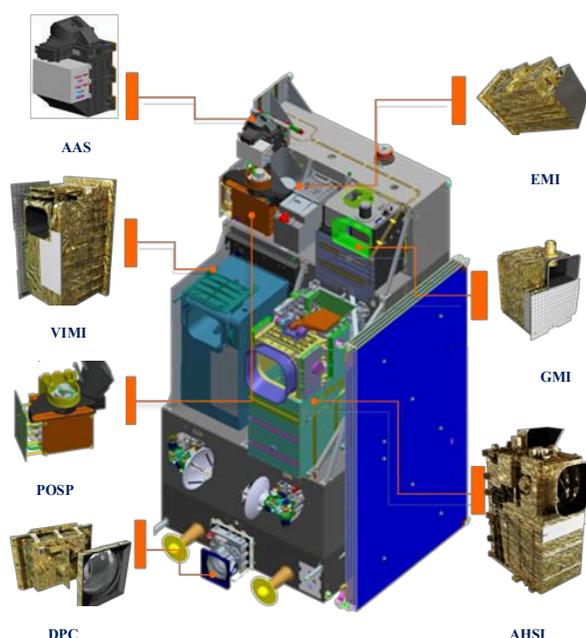


图1 高光谱观测卫星载荷配置^[16]

Fig. 1 Payloads configuration of hyperspectral observation satellite^[16]

1.2 偏振交火载荷简介

1.2.1 大气气溶胶多角度偏振成像仪 (DPC)

DPC采用超广角成像系统获取 $\pm 50^\circ$ 视场的辐射信息,通过滤光检偏组件转动切换光谱波段和偏振检测方向,结合CCD探测器分时获取8个光谱通道(包含3个偏振通道)的多光谱偏振信息。通过卫星飞行及滤光检偏组件转动可实现对同一目标不少于15个视场的探测。为了实现DPC与POSP更好的视场匹配,与GF-5卫星DPC相比,“高分五号02星”DPC CCD的像素数由 512×512 增加到 1024×1024 ,原始地面空间分辨率为1.7 km,经正弦投影后,DPC 1级产品的网格分辨率约为3.5 km。DPC主要技术指标如表1所示。DPC可获取云分布、气溶胶光学厚度、颗粒物尺寸信息、大气含水量等参数,用于雾霾、大气细颗粒物等大气环境要素监测及气候变化研究等,同时还可可为其他载荷提供高精度大气校正数据^[17]。

表1 DPC主要技术指标

Table 1 Major specifications of DPC

Parameter	Specifications
Spectrum/nm	433~453, 480~500 (P), 555~575, 660~680 (P), 758~768, 745~785, 845~885 (P), 900~920
Polarization Angle/(°)	0, 60, 120
Total field of view/(°)	-50~+50
Measured signal-to-noise ratio	≥ 500
Multi-angle observation	≥ 15
Spatial resolution/km	≤ 3.5
Radiometric calibration error/%	≤ 5
Polarimetric error/%	≤ 2

1.2.2 高精度偏振扫描仪 (POSP)

POSP采用分孔径和分振幅相结合的同时偏振测量方案^[18],通过渥拉斯顿棱镜实现偏振分束,采用正交扫描镜实现大视场($\pm 50^\circ$)探测并最小化仪器残余偏振,通过分色、聚焦和滤光片实现紫外至短波红外共9个谱段的4个偏振方向偏振信息获取。POSP主要技术指标如表2所示。POSP的一级产品保留了每次测量的中心经纬度,中心视场的空间分辨率约6.4 km。POSP设计有四种定标器组件,分别为暗参考定标器组件、偏振定标器组件、非偏定标器组件以及星上太阳漫射板定标器,其中,暗参考定标器采用光陷阱设计,表面喷涂消光涂层,用于提供零辐射基准。除辐射定标器需要太阳照射条件外,其他定标器可在电机每圈扫描过程中执行定标或校正,可实现高精度星上辐射和偏振定标^[19]。POSP可作为参考传感器,通过建立POSP和DPC相同波段之间的关系,实现两个传感器的交叉校准。

1.3 偏振交火工作原理

偏振交火模式即在同一观测平台上利用不同测量原理的偏振遥感器,通过视场、光谱和时间等观测要素的匹配进行联合探测,同步获取多光谱、偏振及多角度信息,从而实现大气气溶胶综合参数高精度反演的技术手段^[3]。高光谱观测卫星上组合了DPC和POSP两种类型的偏振遥感器,通过卫星时统设计、光谱通道设置、光谱匹配设计以及视场匹配设计等途径实现偏振交火模式的工程设计。偏振交火原理示意图如图2所示。

表 2 POSP 主要技术指标

Table 2 Major specifications of POSP

Parameter	Specifications
Spectrum/nm	370~390 (P), 400~420 (P), 433~453 (P), 480~500 (P), 660~680 (P), 845~885 (P), 1360~1400 (P), 1580~1640 (P), 2210~2290 (P)
Polarization angle/(°)	0, 45, 90, 135
Total field of view/(°)	-50~+50
Measured signal-to-noise ratio	≥ 300 (@380, 410, 1380, 2250 nm) ≥ 550 (@443, 490, 670, 865, 1610 nm)
Spatial resolution/km	≤ 6.41
Radiometric calibration error/%	≤ 5
Polarimetric error/%	≤ 0.5

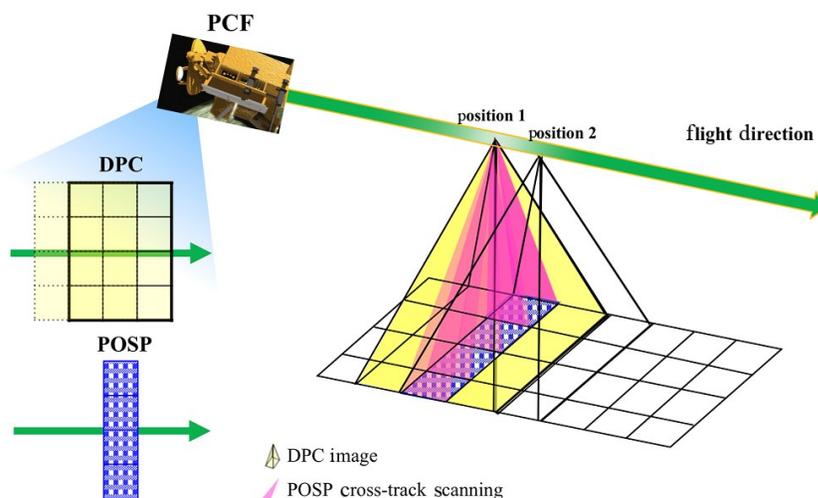


图 2 偏振交叉工作原理示意图^[3]

Fig. 2 Schematic diagram of the working principle of polarization crossfire^[3]

融合多光谱、多角度和偏振信息能够显著增加气溶胶物理特性参数反演的信息量, DPC 利用大视场偏振成像能够获取这些信息, 但在谱段扩展、探测精度、星上辐射和偏振定标能力等方面的工程实现受限, 而偏振扫描型遥感器 POSP 却能相对容易实现。两载荷间的特性对比如表 3 所示。其中, DPC 具有多角度宽幅成像能力, 但偏振测量精度为 2%; POSP 可实现 0.5% 的偏振探测精度, 并具备高精度在轨辐射和偏振定标功能, 同时易于配置可用于高精度地气解耦的短波红外波段 (1610 nm 和 2250 nm)、卷云探测通道 (1380 nm) 与气溶胶标高探测的紫外偏振波段 (380 nm)。因此, 偏振交叉模式采用 DPC 和 POSP 分体设计、优势互补的组合搭配方式, 可以兼顾成像 (空间分辨率)、多光谱 (短波红外波段地气解耦合)、多角度和偏振 (星上定标) 等气溶胶颗粒物高精度监测的反演信息综合需求, 在实现近地表 PM_{2.5} 高精度探测的同时, 通过同平台交叉定标实现 DPC 长期在轨精度的保持。

表 3 DPC 和 POSP 探测能力对比

Table 3 Comparison of detection abilities between DPC and POSP

Detection ability	DPC	POSP
Spatial coverage/km	1850	1850
Spatial resolution/km	3.5	6.4
Spectral coverage	Only visible and near-infrared	Visible to short-wave infrared
Multi-angle detection	15	1
On-board calibrators	No	Radiation and polarization calibrators
Polarimetric accuracy/%	2	0.5

2 高光谱观测卫星偏振交火设计

为实现在轨双偏振载荷交火工作模式,要求观测同步曝光,从而保证有限时差内目标特性稳定,同时光谱一致可以实现观测目标特性一致性,视场匹配保证两载荷同时观测同一地面目标,即实现实时的几何配准。根据偏振交火模式反演需求,需要对光谱匹配、视场匹配、反演算法等各个环节进行误差分析,其中视场匹配误差应当控制在 0.15 个 POSP 像元内^[9]。

2.1 卫星时统设计

为了实现双偏振载荷的准同步观测,两台偏振载荷均以星上 GPS 秒脉冲作为时间基准。星上 GPS 秒脉冲的精度为 1 μ s,通过对帧同步脉冲打时间标签的形式确定每一成像帧的成像时刻,时间标签包括“GPS 整秒时刻”和“秒脉冲内自守时计数”。GPS 整秒时刻定义为从 1553B 接收的数管广播时刻中的整秒时刻;秒内自守时计数定义为在两个 GPS 秒脉冲之间,信息处理箱 FPGA 的自守时计数值。

为了保证同步采集的可靠性,信息处理箱 FPGA 中采用两个计时器对 GPS 秒脉冲信号进行处理,接收到秒脉冲后,两个计数器数值会清零。分别定义这两个计时器为 GPS 时间码秒内计时器(计数 1~1000,代表 GPS 时间码的毫秒部分)和辅助计时器(计数 1~1200,用于判断 GPS 整秒时刻和硬件秒脉冲信号的有效性以及 GPS 时间码毫秒部分的校正)。

辅助计时器的正常计数范围是 1~1050(即秒脉冲下降沿到来的时刻认为 1000 ± 50 ms 是有效的),当收到 GPS 秒脉冲信号下降沿时,会记录辅助计数器值并对其清零。若收到该信号时的辅助计数器值在 950~1050 范围内时,则判断该信号下降沿有效,等待接收 1553B 总线传来的 GPS 整秒时刻。当收到 GPS 整秒时刻的时候,若辅助计数器的值小于 800 ms,则判定该整秒时刻有效,将此时辅助计时器的值赋给 GPS 秒内计时器,用来校正 GPS 时间码毫秒部的值。

GPS 时间码秒内计数器的值代表了 GPS 时间码的毫秒部,该计数器为累加计数器,到 1000 以后清零或者被辅助计数器赋值。GPS 时间码整秒部的更新只在两个时刻进行。第一种是 GPS 时间码秒内计数器满 1000 时,此时秒内计数器清零,重新开始计时,并向时间码整秒部进位加一;第二种是当 GPS 整秒时刻到来并判定为有效时,此时将通过 1553B 获取的 GPS 整秒时刻的值直接赋给 GPS 时间码的整秒部分,并在此基础上 GPS 时间码整秒部分增加 2 s。GPS 整秒时刻判定有效的依据是在 GPS 秒脉冲下降沿到来后的 800 ms 以内收到该整秒时刻。双偏振载荷的时间同步示意图如图 3 所示。

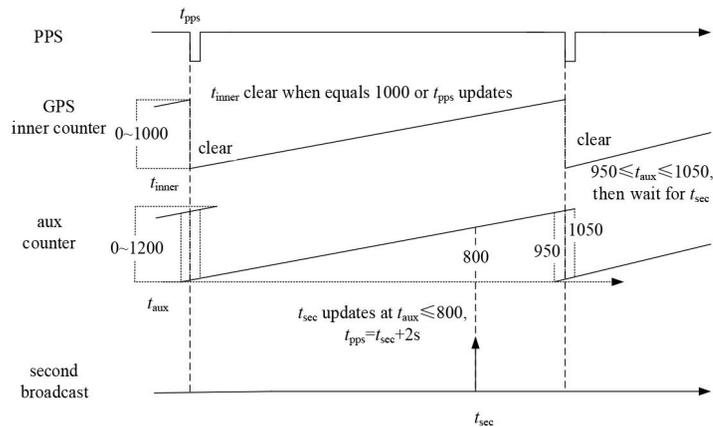


图 3 秒脉冲校时实现方案原理图

Fig. 3 Schematic diagram of second pulse timing implementation scheme

2.2 光谱匹配设计

为了便于 DPC 和 POSP 在同一平台上的联合反演和交叉定标, 需要共有光谱波段匹配。通过对两者的光谱滤光片进行一致性处理, 即在设计和加工工艺上对滤光片涂层进行相同的处理, 以确保其光谱带宽和中心波长的一致性, 并通过对相对光谱响应函数的测量, 可以使光谱匹配误差最小化。DPC 和 POSP 光谱特性比对如表 4 所示, 交火的共有谱段包含 443、490、670、865 nm。

表 4 DPC 和 POSP 光谱特性比对

Table 4 Comparison of spectral characteristics between DPC and POSP

Number	POSP		DPC	
	Central wavelength/nm	Spectral bandwidth/nm	Central wavelength/nm	Spectral bandwidth/nm
1	380	20	—	—
2	410	20	—	—
3	443	20	443	20
4	490	20	490	20
5	—	—	565	20
6	670	20	670	20
7	—	—	763	10
8	—	—	765	40
9	865	40	865	40
10	—	—	910	20
11	1380	40	—	—
12	1610	60	—	—
13	2250	80	—	—

2.3 视场匹配设计

视场匹配设计从两个方面采取措施, 一方面通过两载荷间采样时序同步控制保证观测时序的相对稳定, 避免两载荷的电机转速及其漂移引入的“随机”偏差带来空间匹配关系紊乱; 另一方面提升 POSP 与 DPC 像元尺度比, 将 DPC 像元分辨率由 DPC/GF-5 的 3.5 km 提升到 1.7 km, 提高视场匹配算法精度。

2.3.1 同步观测采集时序设计

由于两载荷均由电机转动位置决定成像时刻，因此转动部件的同步与否决定采样时序能否匹配。POSP旋变脉冲作为信号源，一方面通过倍频产生DPC电机驱动脉冲，另一方面通过旋变计算角度输出星下点脉冲。DPC根据星下点脉冲完成电机启动，使用POSP输出的电机控制脉冲信号控制电机转动。DPC和POSP的同步控制原理如图4所示。

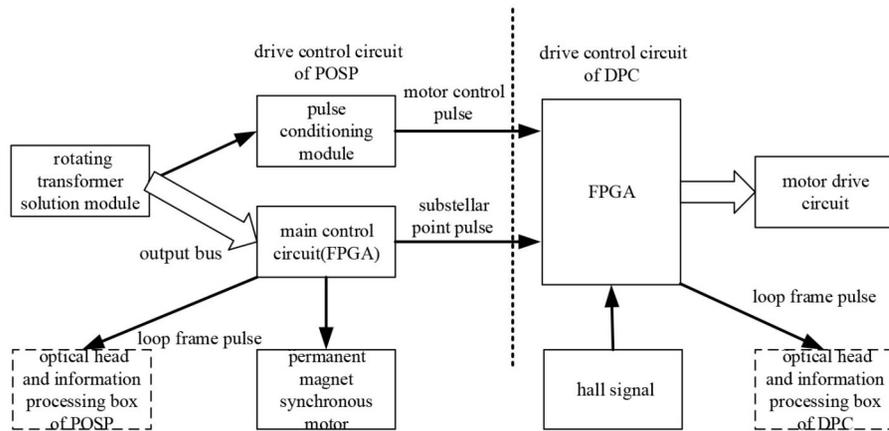


图4 DPC与POSP同步控制原理框图

Fig. 4 Synchronization control schematic diagram of DPC and POSP

POSP提供星下点脉冲和外部电机脉冲，该脉冲不区分DPC独立观测或者交火观测，按照正常工作模式输出脉冲。DPC驱动控制箱收到启动指令后，控制电机绕组加电。锁定后收到的第一个POSP星下点脉冲作为基准进行延时(时间可调)，延时时间到后控制电机转动(用外部电机脉冲)，以自身霍尔传感器为一圈的起始并依次发送帧脉冲，控制图像采集。采用锁相环(PLL)处理后的POSP电机转速信号作为DPC电机驱动单元的时钟源，使DPC电机转速随POSP电机转速漂移而同步变化，避免了两个电机之间异步误差的累积。DPC电机控制时序如图5所示。经过设计分析，两个载荷观测星下点理论时间偏差为0.0399 ms，满足优于0.5 ms的指标要求。

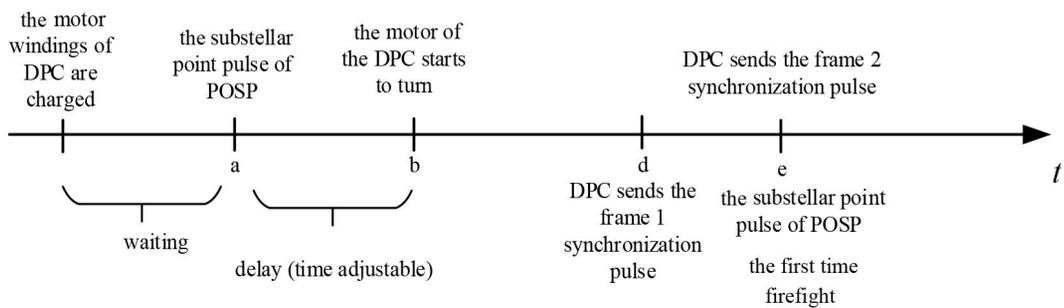


图5 DPC电机控制时序

Fig. 5 DPC motor control sequence

2.3.2 光谱通道采集设计

DPC和POSP在对地观测时均由电机驱动，其中DPC的电机用于15个通道的顺序切换，POSP的电机用

于穿轨扫描。根据偏振交火方案设计结果, DPC 每隔一圈发送 15 个帧同步脉冲 (含 1 个本底观测通道), POSP 每转动一圈发送一个星下点脉冲。合理设置 DPC 的转速, 使 POSP 每次在扫描星下点时能与 DPC 的特定通道同步。同步信号匹配时, DPC 帧同步与 POSP 星下点脉冲重合。结合 DPC、POSP 转动部件工作特点, 采集设计匹配方案如表 5 所示。

表 5 光谱通道采集设计匹配情况表

Table 5 Spectral channel acquisition matching table

DPC runner sequence	DPC channel	POSP detection	DPC runner sequence	DPC channel	POSP detection
Lap 1.-Channel 1	490P1	—	Lap 2.-Channel 1	490P1-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 2	490P2	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 2	490P2-No imaging	
Lap 1.-Channel 3	490P3	—	Lap 2.-Channel 3	490P3-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 4	565	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 4	565-No imaging	
Lap 1.-Channel 5	670P1	—	Lap 2.-Channel 5	670P1-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 6	670P2	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 6	670P2-No imaging	
Lap 1.-Channel 7	670P3	—	Lap 2.-Channel 7	670P3-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 8	Dark	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 8	Dark-No imaging	
Lap 1.-Channel 9	763	—	Lap 2.-Channel 9	763-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 10	765	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 10	765-No imaging	
Lap 1.-Channel 11	865P1	—	Lap 2.-Channel 11	865P1-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 12	865P2	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 12	865P2-No imaging	
Lap 1.-Channel 13	865P3	—	Lap 2.-Channel 13	865P3-No imaging	Nadir imaging
Lap 1.-Channel 14	443	Nadir imaging	Lap 2.-Channel 14	443-No imaging	
Lap 1.-Channel 15	910	—	Lap 2.-Channel 15	910-No imaging	Nadir imaging

针对瞬时视场匹配, 通过 DPC 较高的原始图像分辨率 (CCD 探测器原始像元数为 1024×1024 , 星下点空间分辨率为 1.7 km) 进行几何精校正, 再利用 POSP 的实际空间响应函数实现与 DPC 的视场匹配。在 DPC 图像正弦投影和多角度匹配后, 生成偏振交火数据集。

3 偏振交火在轨性能评估

3.1 双偏振交火性能测试结果

3.1.1 同步观测采集时间差

根据 POSP 星下点与 DPC 图像时间标签, 计算两台载荷的同步时间采集差。提取并分析偏振交火工作模式下 DPC 采样帧与 POSP 星下点科学数据绝对时间码数据, 同步观测采集时间差 ΔT 表示为

$$\Delta T = T_{\text{DPC}} - T_{\text{POSP}}, \quad (1)$$

式中 T_{DPC} 为 DPC 曝光中心时刻时间码, T_{POSP} 为 POSP 星下点积分时间中心时间码。

以 484 轨统计结果为例, 整轨绝对时间码偏差均小于 0.4 ms, 与地面测试结果相近, 均满足 0.5 ms 的指标要求, 如图 6 所示。

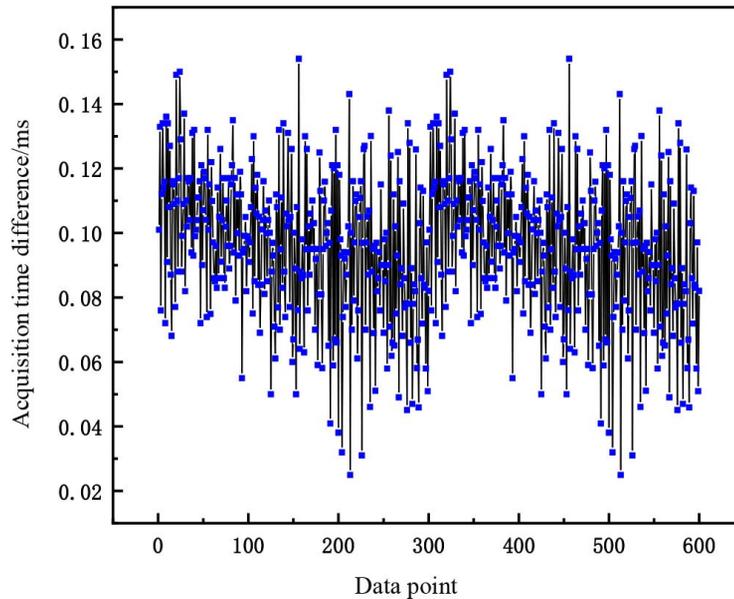


图6 同步观测采集时间差在轨测试结果

Fig. 6 Results of synchronous observation and acquisition time difference in orbit

3.1.2 双偏振视场匹配精度

在轨偏振交火工作模式下, DPC 与 POSP 进行“同步”观测, 两载荷共有波段间的观测图像存在稳定的对应关系。因此, POSP 与 DPC 间可采用基于考虑实际空间响应函数的辐射量级视场匹配方法实现视场匹配^[9,20]和精度评估。具体流程如下:

1) 数据集获取: 根据 DPC 图像采样时间和 POSP 扫描点采样时间, 确定与 DPC 某帧图像关联的 POSP 穿轨方向条带数据。

2) DPC 数据重采样: 根据两台仪器间的视场关系确定 DPC 重采样范围和权重, 并在整个 DPC 图像范围内滑动处理, 得到不同起始像元处的 DPC 重采样结果。

3) 一致性评价获得匹配结果: 将 DPC 重采样结果与 POSP 实际穿轨方向扫描数据进行基于空间响应函数的辐亮度级一致性评价, 一致性评价最高处即为该帧 DPC 图像的匹配像元。

4) 匹配像元误差评价: 使用多帧 DPC 图像不同像元处的重采样结果与对应的多圈 POSP 星下点数据进行相关性计算, 得到不同 DPC 像元处的相关性热度图, 相关性最大处的亚像元位置即为参考位置, 根据两种匹配方法的结果偏差进行匹配误差估计。

采用 2021 年 11 月 10 日第 927 轨 DPC 原始分辨率图像数据, 经初步预校正后与 POSP 扫描圈数据进行星下点匹配处理, 得到的最终平均匹配像元为 519.91 行、512.69 列。本研究没有对下垫面做特别约束, 而是基于大量数据进行匹配统计的^[9]。

使用上述测试数据对 DPC 图像不同像元处的重采样结果与对应的 POSP 星下点数据进行相关性计算, 得到不同 DPC 像元处的相关性热度图, 如图 7 所示。相关性热度图中整像元最大相关系数 (0.9853) 所在序号为 520 行、512 列。对上述相关性热度图进行双线性插值, 得到最大相关性值所在的亚像元位置为 519.75 行、512.45 列。根据 DPC 原始像元星下点分辨率 1.7 km 和 POSP 星下点空间分辨率 6.4 km, 可以估算星下点视场匹配精度为 0.066 POSP 像元, 满足视场匹配误差在 0.15 个 POSP 像元内的指标要求。

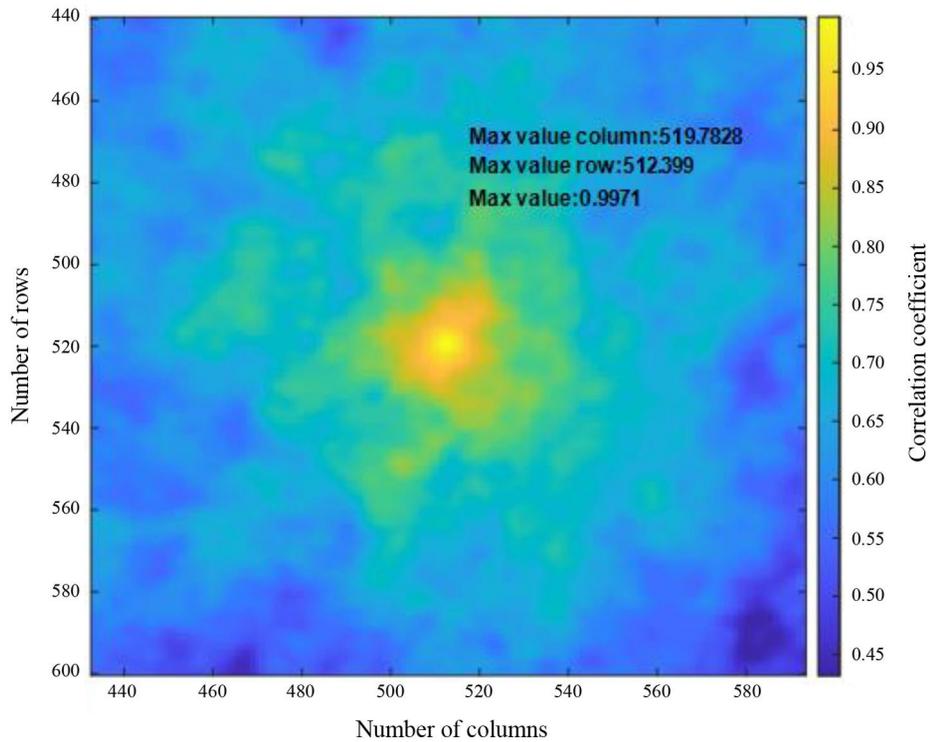


图7 DPC不同像元位置与POSP匹配相关性热度图

Fig. 7 Heat map of correlation between DPC and POSP field of view matching at different pixel positions in DPC

3.2 双偏振测量精度在轨交叉验证

利用卫星同平台 POSP 与 DPC 进行交叉定标, 需匹配两台仪器探测的同一时刻下相近角度的同一场地目标^[11]。以 DPC 结果进行均匀场景筛选, 并通过两台仪器的光谱响应函数计算光谱匹配因子, 最终利用大气辐射传输模型将 POSP 的观测反射率转化为 DPC 的参考反射率^[11]。为保证观测角度的一致性, 要求两台仪器匹配到的探测像元的观测天顶角、太阳天顶角和相对方位角差值均小于 2° 。

高光谱观测卫星 DPC 与 POSP 具有 443、490、670、865 nm 4 个共有强度波段和 490、670、865 nm 3 个共有偏振波段, 图 8 为 2022 年 3 月 1—7 日期间 DPC 与 POSP 在北非准不变定标场^[22]的在轨辐射交叉验证结果。结果表明 DPC 与 POSP 在轨运行期间具有较高辐射一致性, 辐射测量值与参考值拟合方差均高于 0.96, 拟合斜率介于 0.977~1.019, 其中 490 nm 辐射一致性最高。

图 9 为 DPC 与 POSP 对线偏振度 (DoLP) 的线性拟合及统计分布结果^[12], 估算了 DPC 的 DoLP 在 POSP 测量的 DoLP 预期误差 ($EE = \pm 0.02$) 范围内的散点百分比, 并采用均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、平均偏差 (MB) 和相对误差 (RE) 用于质量评估。结果表明, DPC 三个偏振波段测量的 DoLP 落在期望误差内的概率均大于 90%, 说明 DPC 实测 DoLP 与 POSP 实测结果具有很高的一致性, 三个偏振波段的 DoLP 平均绝对差异分别小于 0.0088、0.0060 和 0.0043, 满足 DPC 在轨探测精度 0.02 ($DoLP > 0.2$) 的设计要求。

3.3 双偏振载荷星地一体化测试结果

高光谱观测卫星是一颗量化应用卫星, 为保证卫星在轨的量化应用水平, 在设计、研制及测试全过

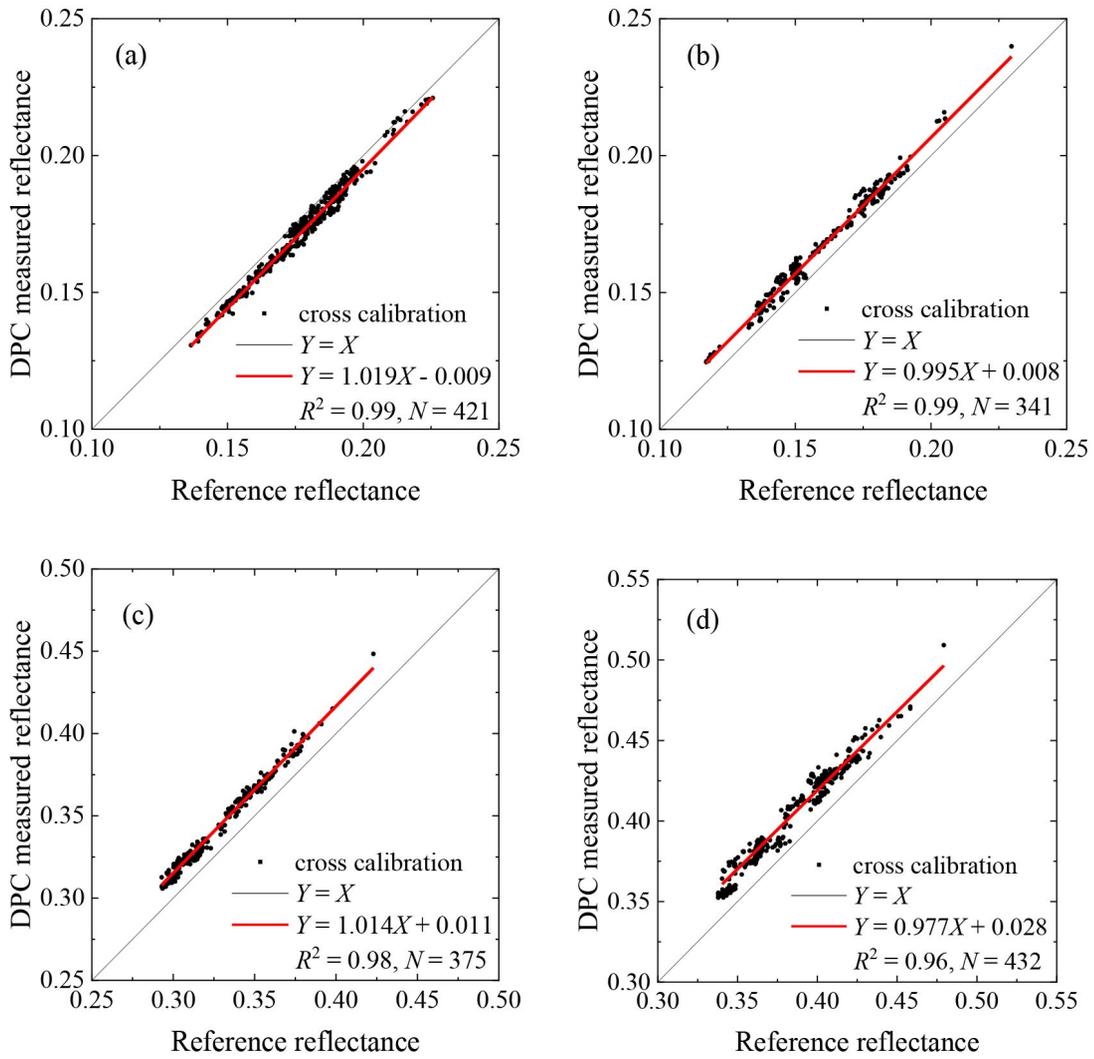


图 8 高光谱观测卫星 DPC 与 POSP 在轨辐射交叉定标结果。(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm

Fig. 8 In-orbit cross-calibration results of DPC and POSP of the hyperspectral observation satellite.

(a) 443 nm; (b) 490 nm; (c) 670 nm; (d) 865 nm

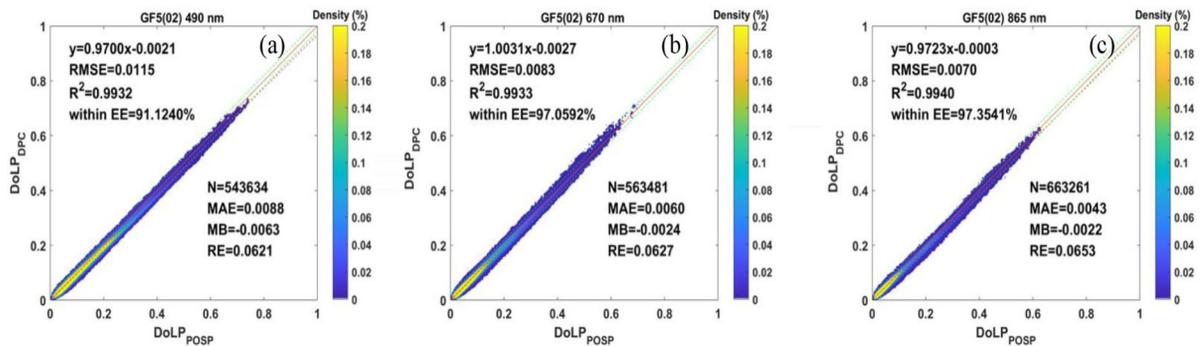


图 9 DPC 和 POSP 在轨偏振度的线性拟合和统计分布结果^[12]。(a) 490 nm; (b) 670 nm; (c) 865 nm

Fig. 9 Linear fitting and statistical distribution results of polarization of DPC and POSP^[12]. (a) 490 nm; (b) 670 nm; (c) 865 nm

程中进行了全面的指标体系量化控制,重点对载荷的光谱特性、辐射特性等重要星地一体化指标进行控制。采用发射前地面实验室定标测试结合在轨星上定标器定标或在轨场地定标的方式,完成各载荷星地一体化定标精度传递。高光谱观测卫星DPC和POSP在轨测试结果如表6和表7所示,均满足指标要求。

表6 DPC在轨要求及测试结果

Table 6 In-orbit requirements and test results of DPC

Items	Specification requirements	Test results
Spectral range/nm	433~453, 480~500 (P), 555~575, 660~680 (P), 758~768, 745~785, 845~885 (P), 900~920	442.50 ± 21, 489.90 ± 22.4 (P), 563.10 ± 21.6, 669.45 ± 20.6 (P), 763.25 ± 10.23, 763 ± 41, 863.50 ± 35.2 (P), 909.40 ± 21.8
SNR	≥ 500	568.3~717.9
Polarimetric error/%	≤ 2	≤ 0.62
Radiometric calibration/%	≤ 5	2.3~4.7
FOV/(°)	50 ± 0.5~50 ± 0.5	±50.07
Spatial resolution at nadir/km	< 3.5	≤ 3.32

表7 POSP在轨要求及测试结果

Table 7 In-orbit requirements and test results of POSP

Items	Specification requirements	Test results
Spectral range/nm	370 ± 3~390 ± 3, 400 ± 3~420 ± 3, 433 ± 3~453 ± 3, 480 ± 3~500 ± 3, 660 ± 5~680 ± 5, 845 ± 5~885 ± 5, 1360 ± 5~1400 ± 5, 1580 ± 5~1640 ± 5, 2210 ± 10~2290 ± 10	380 ± 19, 409.5 ± 19, 442 ± 19, 489.5 ± 20, 669.5 ± 19, 865.25 ± 19, 1378.5 ± 41, 1612 ± 62, 2256 ± 70
SNR	> 100 (@380, 410, 1380, 2250 nm) > 240 (@443, 490, 670, 865, 1610 nm)	≥ 594.73 (@380, 410, 1380, 2250 nm) ≥ 1346.07 (@443, 490, 670, 865, 1610 nm)
Polarimetric error	≤ 0.005@P ≤ 0.3	≤ 0.004@P ≤ 0.3
Radiometric calibration error/%	≤ 5	≤ 4.42
FOV/(°)	≥ ±50°	≥ ±53.6
Spatial resolution at nadir/km	≤ 10	≤ 6.41

4 结 论

高光谱观测卫星是我国首颗大气陆地综合高光谱观测业务星,装载了7台有效载荷,同时具有紫外高光谱、可见至短波红外高光谱、多角度偏振、高精度偏振、吸收性气溶胶探测、耀斑观测等多种观测手段。该星在国际上首次采用融合反演级偏振交火探测技术,通过高精度偏振扫描仪与大气气溶胶多角度偏振探测仪的联合探测,获取观测区域的PM_{2.5}等气溶胶参数信息。本工作详细阐述了高光谱观测卫星偏振交火模式工程设计要点,主要包括卫星时统、光谱匹配以及视场匹配等工程设计,并通过在轨数据对偏振交火传感器

的在轨性能进行了评估。测试结果表明：双偏振载荷的同步观测采集时间差优于0.4 ms，视场匹配误差优于0.066 POSP像元，满足反演应用需求。最后对双偏振载荷的辐射和线偏振度进行了在轨交叉验证，结果表明DPC与POSP在轨运行期间具有较高的辐射、偏振一致性，满足双偏振高精度气溶胶探测需求。

参考文献:

- [1] Shi G Y, Wang B, Zhang H, *et al.* The radiative and climatic effects of atmospheric aerosols [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, 32(4): 826-840
石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.
- [2] Jin H F. Review of PM_{2.5} monitoring based on remote sensing technology [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2016, 39(8): 133-136
金洪芳. 基于遥感技术的大气细颗粒物PM_{2.5}监测研究进展 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2016, 39(8): 133-136.
- [3] Li Z Q, Hou W Z, Hong J, *et al.* The polarization crossfire (PCF) sensor suite focusing on satellite remote sensing of fine particulate matter PM_{2.5} from space [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 286: 108217.
- [4] Yang Y, He J, Dai H S, *et al.* Development status and trends for space-borne polarization remote sensing atmospheric aerosols and particulate matters [J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S2): 138-147.
杨勇, 何军, 代海山, 等. 星载大气气溶胶及细颗粒物偏振遥感发展及趋势 [J]. *上海航天*, 2019, 36(S2): 138-147.
- [5] Deschamps P Y, Breon F M, Leroy M, *et al.* The POLDER mission: Instrument characteristics and scientific objectives [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(3): 598-615.
- [6] Zhang M M, Meng B H, Luo D G, *et al.* Measurement precision verification and deviation analysis of spaceborne directional polarimetric camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0812004.
张苗苗, 孟炳寰, 骆冬根, 等. 星载多角度偏振成像仪测量精度验证与偏差分析 [J]. *光学学报*, 2018, 38(8): 0812004.
- [7] Manolis I, Grabarnik S, Caron J, *et al.* The MetOp second generation 3MI instrument [C]. *SPIE Proceedings, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII*. Dresden, Germany. SPIE, 2013.
- [8] Persh S, Butler J J, Xiong X, *et al.* Ground performance measurements of the glory aerosol polarimetry sensor [C]. *Proceedings Volume 7807, Earth Observing Systems XV. International Society for Optics and Photonics*, 2010: 780703.
- [9] Lei X F, Zhu S S, Liu Z H, *et al.* Field of view matching method between dual polarization instruments on the same aviation platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(13): 1312004.
雷雪枫, 朱双双, 刘振海, 等. 同航空平台双偏振仪器间的视场匹配方法 [J]. *光学学报*, 2020, 40(13): 1312004.
- [10] Liu Z H, Cong Q, Huang H L, *et al.* Data processing method and preliminary in-orbit evaluation of polarized scanning atmospheric corrector on HJ-2A/B satellites [J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(3): 99-109.
刘振海, 丛强, 黄红莲, 等. 环境减灾二号A/B卫星大气校正仪数据处理方法及初步在轨评估 [J]. *航天器工程*, 2022, 31(3): 99-109.
- [11] Zhu S F, Qie L L, Xu H, *et al.* In-flight cross radiometric calibration of DPC/GaoFen-5 and MODIS/Aqua [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(18): 1828008.
朱思峰, 伽丽丽, 许华, 等. DPC/GaoFen-5与MODIS/Aqua在轨交叉辐射定标 [J]. *光学学报*, 2022, 42(18): 1828008.
- [12] Lei X F, Liu Z H, Tao F, *et al.* Data comparison and cross-calibration between Level 1 products of DPC and POSP onboard the Chinese GaoFen-5(02) satellite [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7): 1933.
- [13] Milinevsky G, Oberemok Y, Syniavskiy I, *et al.* Calibration model of polarimeters on board the Aerosol-UA space mission

- [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 229: 92-105.
- [14] Werdell P J, Behrenfeld M J, Bontempi P S, *et al.* The plankton, aerosol, cloud, ocean ecosystem mission: Status, science, advances [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2019, 100(9): 1775-1794.
- [15] 李正强, 许华, 伽丽丽, 等. 一种星载传感器“偏振交火”探测大气气溶胶参数的方法: CN104316440A [P]. 2015-01-28.
- [16] 张苗苗, 温渊, 孙立达, 等. “高分”五号02星概述及应用示例 [J]. *中国航天*, 2022, (12): 8-15.
- [17] Huang H L, Ti R F, Zhang D Y, *et al.* Inversion of aerosol optical depth over land from directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2020, 39(4): 454-461.
黄红莲, 提汝芳, 张冬英, 等. 高分五号卫星偏振遥感陆地上空气溶胶光学厚度 [J]. *红外与毫米波学报*, 2020, 39(4): 454-461.
- [18] Li Z Y, Liu Z H, Zou P, *et al.* Prelaunch calibration and ground verification test of spaceborne particulate observing scanning polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 102-114.
李朕阳, 刘振海, 邹鹏, 等. 星载偏振扫描仪发射前定标及地面验证实验 [J]. *光学学报*, 2021, 41(3): 102-114.
- [19] Yang H C, Hong J, Zou P, *et al.* Onboard polarization calibrators of spaceborne particulate observing scanning polarimeter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0912005.
杨洪春, 洪津, 邹鹏, 等. 星载偏振扫描仪星上偏振定标器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 0912005.
- [20] Lei X F, Zhu S S, Li Z Y, *et al.* Integration model of POSP measurement spatial response function [J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 25480-25489.