

文章编号 1004-924X(2015)03-0652-08

遥感图像双角度偏振大气校正仪

胡亚东, 胡巧云, 孙 斌, 王相京, 裘桢炜, 洪 津*
(中国科学院 安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:研制了一种双角度偏振大气校正仪航空样机用于卫星遥感图像数据的定量化。该仪器通过时间同步和空间覆盖的探测方式获取被校正图像对应的角度、光谱、偏振三个维度的大气信息,实现气溶胶和水汽的高精度参数的反演;将反演获取的大气参数作为输入条件,利用辐射传输模型进行遥感图像的高精度大气校正。仪器采用天底(0°)和前向(55°)两个方向观测,具有 8 个探测波段,覆盖可见到短波红外($0.49\sim 2.25\ \mu\text{m}$)波段,其中 5 个波段具备偏振探测能力;采用高精度一体化结构设计保证各偏振探测通道的视场重合精度,降低偏振探测目标不一致引起的偏振测量误差。实验室定标和测试结果表明,偏振波段的视场重合度优于 95%,偏振测量精度优于 1% (偏振度 $\text{DoLP}=0.3$),满足仪器设计指标要求。

关键词:偏振遥感;大气校正仪;偏振测量;气溶胶;遥感图像

中图分类号:P412;P111.48 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152303.0652

Double-angle polarized atmospheric corrector for remote sensing images

HU Ya-dong, HU Qiao-yun, SUN Bin, WANG Xiang-jing, QIU Zhen-wei, HONG Jin*

(Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy
of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

Abstract: A double-angle polarizing atmospheric corrector (DPAC) on an airborne platform is established for the quantification of remote sensing data. This sensor acquires spectral, angle and polarization information in image areas by time synchronization and space covering to implement the high-precision retrieval of aerosols and water vapors. Then, by taking these atmospheric parameters obtained by atmospheric retrieval as an input, the high-precision atmospheric correction for optical remote sensing images is achieved with a radiation transfer model. The DPAC has two detecting directions, one is along the nadir angle (0°) and the other is a forward angle (55°). It covers 8 wavebands ranging from $0.49\ \mu\text{m}$ to $2.25\ \mu\text{m}$, among which five wavebands are designed for polarizing measurement. To overcome the polarization measurement errors caused by detection target inconsistent, the higher precision and integrated structure is designed to ensure the field overlap accuracy of polarization detection channels. The results of lab calibration and test show that the viewing field coincidence is better than 95% and the polarization accuracy is better than 1% ($\text{DoLP}=0.3$), which meets the requirements of the DPAC for specifications.

Key words: polarization remote sensing; atmospheric corrector; polarization measurement; aerosol; remote sensing image

收稿日期:2014-08-19;修订日期:2014-09-28.

基金项目:中国科学院科技创新重点项目(No. KGFZD-125-13-006)

1 引言

随着遥感技术的应用及发展,各国研制了大量光学图像遥感卫星用于大气环境监测^[1-3]、全球碳循环监测、地球资源普查^[4]及军事目标详查等。然而,光学遥感图像易受到分子、气溶胶、水汽、云和云阴影等大气元素的污染,特别是大气的吸收和散射,它们会影响地球表面辐射量的精确获取。因此,发展大气校正方法及其传感器,有效消除大气效应对光学遥感图像的影响,已经成为定量遥感的关键问题之一。

大气校正用于将光学遥感器探测的大气层顶辐射量转换为真实地表反射率,主要包括大气参数估计和地表反射率反演两个过程^[5]。目前,大气校正方法和技术主要分为二类:一类是利用图像自身信息的大气校正方法,如直方图法、暗目标法等;另一类是利用大气测量参数和辐射传输模型(MODTRAN,6S,FLAASH等)的大气校正方法^[6-7]。随着定量化遥感对数据质量需求的不断提高,基于辐射传输模型的大气校正方法已经成为该领域的研究热点^[8]。

分子散射和臭氧、氧气等气体的吸收因具有时空稳定性而容易校正,而时空变化大的气溶胶和水汽的探测则是大气校正的难点^[9]。因此,基于大气参数实测和辐射传输模型的大气校正方法的关键在于同步获取与被校正图像处于同时、同地的大气参数。

为了同步获取气溶胶、水汽及其它大气参数,各国研制了多种星载大气校正载荷。如美国 EO-1 卫星搭载的 LAC,用于 Landsat-7 的水汽影响校正^[10];日本 GOSAT 卫星的 TANSO-CAI,用于 TANSO-FTS 上云和气溶胶的探测和校正^[11];2014 年发射的新一代高分辨率卫星 WorldView-3 搭载了 12 波段、30 m 分辨率的大气探测仪 CAVIS,用于云、气溶胶、水汽、冰和雪的同时大气校正^[12]。

本文针对某光学遥感卫星图像的大气校正需求,提出了一种双角度偏振大气校正仪(Double-angle Polarizing Atmospheric Corrector, DPAC)。该仪器通过时间同步和空间覆盖探测方式获取被校正图像对应的大气角度、光谱及偏振信息,实现

了气溶胶参数的精确反演和水汽柱浓度探测。最后将获取的气溶胶和水汽参数与其它大气参数结合作为大气辐射传输模型的输入,实现了光学遥感图像的大气同步校正。

2 工作原理

DPAC 是依据某卫星的观测及轨道特点设计的航空原理样机,采用前向 55°和天底两个方向观测,实现了被校正图像对应大气参数的同步探测,其工作原理如图 1 所示。DPAC 能覆盖 0.49~2.25 μm 太阳反射光谱的 8 个探测波段,其中 490,670,865,1 610,2 250 nm 波段具备偏振探测能力。

DPAC 使用建立在地基和卫星观测平台上的角度、光谱和偏振气溶胶反演算法,利用角度信息和短波红外波段的地表偏振探测技术,摆脱了气溶胶反演对地表辐射反射率的依赖^[13-14],实现了气溶胶参数的精确估算。所有 8 个波段信息都用于气溶胶参数的反演,包括 550 nm 的辐射信息和 490,670,865,1 610,2 250 nm 波段的 Stokes 偏振参数(I,Q,U);特别地,910 nm 主要用于测量水汽柱浓度,1 380 nm 具有卷云和平流层气溶胶测量能力^[15]。

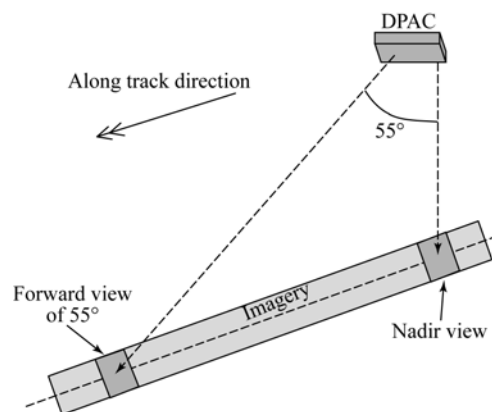


图 1 双角度偏振大气校正仪的探测原理

Fig. 1 Principle of Double-angle Polarizing Atmospheric Corrector(DPAC)

DPAC 是基于多角度、多光谱和偏振气溶胶反演理论设计的大气气溶胶探测器,能够获取除光谱维信息之外的大气角度和偏振特性,提高了

气溶胶病态反演的精度。此外,偏振探测相对于传统的辐射量测量具有更高的测量精度,同样有利于提高气溶胶参数的估算精度。因此,DPAC 相对于传统的大气校正仪能够获得更高的大气气溶胶参数估算精度,从而提高遥感图像的大气校正能力。

3 系统设计及优化

3.1 系统优化

大气校正精度主要依赖于大气数据的测量精度及大气校正算法。理想的被动气溶胶光学遥感需要兼顾光谱、角度和偏振 3 个探测维度,并具有较高的三要素信息探测精度和数据处理精度。同时,在探测的时间和空间属性上,要实现三要素对同一目标的同时测量。然而,卫星探测方式使角度信息的获取具有天然的分时测量特性,只能同时同地探测光谱和偏振信息。

DPAC 采用通道式光学系统结合单元探测器的设计方案,实现了宽波段的光谱覆盖和高精度的信息获取;采用 $0, 60$ 和 120° 检偏器透光轴方向角的优化设置,降低了检偏器角度安装误差引起的偏振测量误差^[16];采用低噪声跨导型前放电路完成了光信号转换,独立的信号处理和采保电路实现了三检偏通道的同步采集,并消除了顺序测量造成的伪偏振现象^[17];通过制冷和精确温度控制降低了短波红外波段探测器的暗电流及测量不确定度,保证了短波红外波段偏振和辐射的测量精度。

仪器的动态范围设置需要考虑多种因素,如参考相关仪器航空多角度偏振辐射计(Aviation Multi-angle Polarimetric Radiometer, AMPR)^[7]和气溶胶偏振传感器(APS)^[18]的设计,以及大气层顶的太阳辐射模型和信噪比(SNR)需求。本课题组统计了 AMPR 多次飞行试验获取的数据,将获得的探测目标的辐亮度中值和最大值作为仪器测量的典型值和最大值,并为最大值留出约 25% 的余量。AMPR 数据的统计结果如表 1 所示。

DPAC 视场重合度要求包含多项内容,其牵涉仪器自身及被校正遥感器的相关设计。首先,基于辐射传输模型的图像大气校正算法需要获取被校正图像对应的大气参数,因此其探测视场在兼顾气溶胶空间分辨率的同时需要与图像幅宽匹

配。其次,通过密集采样和时间匹配法可以满足气溶胶反演对同一目标双角度信息的探测要求。最后,要考虑检偏通道之间的视场不重合,这是遥感偏振测量误差的主要因素。如图 2 所示,光学镜筒采用整体结构设计,18 个通道的光学外镜筒要整体机械加工成型,且需满足平行度、同轴度、加工形位公差等要求;在材料加工过程中要进行尺寸稳定性控制,以减小加工过程中的变形量。实验室采用精密光学装调方法实现了 DPAC 视场重合度优于 95% 的技术指标要求,保证了统一目标偏振参数的精确测量。

表 1 航空多角度偏振辐射计的波段和动态范围

Tab. 1 Spectral bands and scene dynamic range of Aviation Multi-angle Polarimetric Radiometer (AMPR)

Bands	FWHM	Typical radiance/ /nm	Maximum radiance/ /nm
		$\mu\text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})^{-1}$	$\mu\text{W} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})^{-1}$
490	20	4.5	14
550	20	5.1	15
670	20	4.7	20
865	40	2.8	12
910	20	1.3	5.0
1 380	40	1.0	4.0
1 610	60	0.62	3.5
2 250	80	0.21	1.2

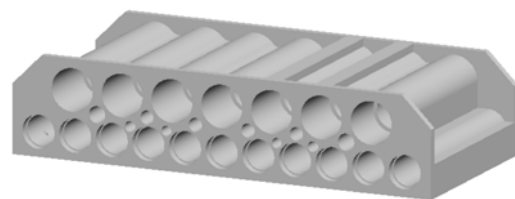


图 2 DPAC 光学镜筒模块

Fig. 2 Optical tube module of DPAC

仪器的系统设计及优化是一个细节和整体相互制约影响的过程,其关键点是权衡科学应用需求和仪器性能指标及生产制造能力的关系,即只有在工程设计、生产制造能力与科学目标、接口要求、环境要求和仪器任务需求之间取得平衡,才能得到最优的仪器设计指标和性能。DPAC 的性能指标需求和设计结果如表 2 所示。

表 2 DPAC 系统的主要技术指标需求和设计结果

Tab.2 Key system requirements and design with margin for DPAC

Parameter	Requirement	Performance	Design
Spectral bands	490, 550, 670, 865, 910, 1 380,1 610,2 250 nm	By design	By design
Dynamic range	TOA radiances	Pedestal and ceiling margin	16 bit ADC per band
Pint of view	Zenith angle of 0° and 55°	By design	Nadir and forward view of 55°
IIFOV	2°	<10 km	Detector is field stop
Sampling frequency	10% IFOV	By design	FOV alignment >90%
Field of View(FOV) and misalignment	<5% IFOV for DPAC and imager, per band, polarimetry	By design	Integral mechanical design
Radiometric accuracy	5% all bands	>10% margin	In-flight calibration
Polarimetric accuracy	0.01 for P=0.3	>10% margin	Low instrumental polarization
SNR	All bands >250, except 0.91 μm >100, 1.38 μm >150	All bands SNR>30% margin	Low system noise, 1/2 cm VNIR/SWIR apertures

3.2 系统设计

DPAC 由光学模块和电子学模块两部分组成,如图 3 和图 4 所示。光学模块分为辐射和偏振探测通道,包括遮光筒、光学透镜和探测器前置放大器,用于收集转换光信息。光学模块的光机结构设计和位置布局需要考虑发射和在轨阶段的环境条件,特别需要控制短波红外探测通道的热沉工作温度,以保证短波红外探测器的温控性能。电子学模块包括二次电源配电、短波红外探测器制冷、系统控制器和模拟信号处理单元 4 个部分。

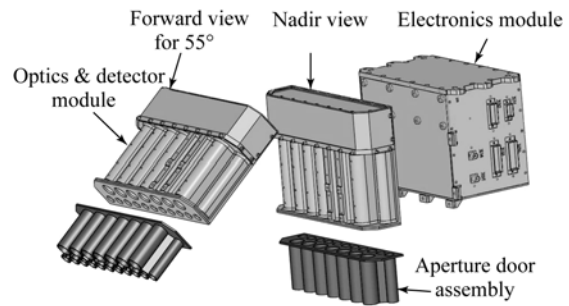


图 3 DPAC 的电子学和光学模块

Fig.3 Electronics module and optics module of DPAC

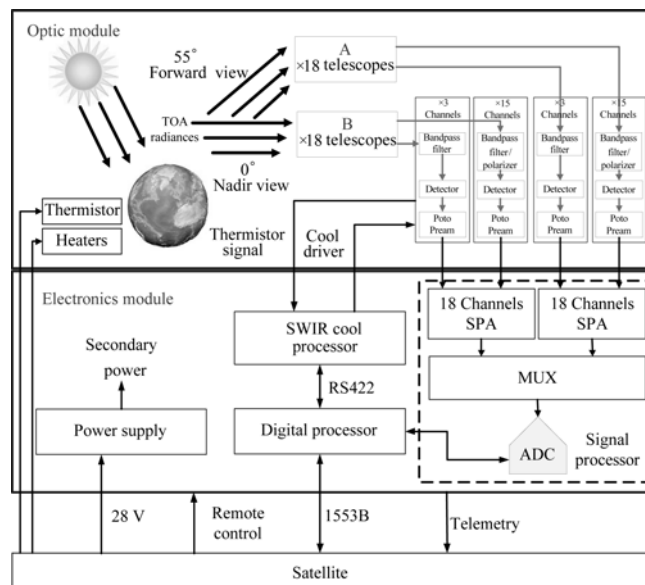


图 4 DPAC 原理框图、数据流及外部接口关系图

Fig.4 Block diagram of assemblies, information flow and interfaces for DPAC

DPAC 两个探测方向使用相同的光学模块, 每个光学模块都有 18 个探测通道。集光单元包括物镜和聚焦透镜, 探测器作为视场光阑限制光学系统的瞬时视场(IFOV)。辐射探测通道将滤光片放置在探测器和聚光透镜之间; 考虑滤光片的偏振效应, 偏振片位于聚焦透镜和滤光片之前。可见近红外波段(VNIR)的有效通光孔径为 1 cm; 而为了增加短波红外波段(SWIR)的信噪比(SNR), 其通光孔径为 2 cm。

DPAC 使用 3 种类型的光电二极管覆盖整个探测波段: Si 探测器用于可见近红外波段探测; 截止波长为 1.9 μm 的 InGaAs 探测器用于 1.38 μm 和 1.61 μm 波段的探测; 截止波长为 2.6 μm 的 InGaAs 探测器用于 2.25 μm 波段的探测。暗电流及其波动是短波红外探测波段的主要误差来源, 根据 InGaAs 探测器暗电流与探测器偏压和温度的关系, 温控电路通过降低探测器的工作温度以减小暗电流的数值和探测器的噪声水平, 并通过精确的温度控制减小暗电流的波动, 从而减小暗电流及其测量不确定度对短波红外波段偏振探测精度的影响。

4 数据处理

4.1 数据处理流程

DPAC 的数据产品包括: 原始数据包(RDRs)、仪器数据包(SDRs)和大气数据包(APRs)。原始数据包由仪器和平台产生, 包括: (1)两个探测方向所有波段 ADC 输出的数据; (2)太阳天顶角和方位角、数据采集点对应时刻和地面坐标; (3)实验室辐射/偏振定标数据, 在轨暗电流标定数据, 仪器工作电压、控制器状态, 短波红外探测器热沉温度、探测器工作温度及制冷驱动电流等状态遥测数据。各采样点数据主要包括各通道数据、卫星平台的空间坐标、采样点的空间坐标和采集时刻。仪器测量数据先转换为辐射量, 然后再根据地表朗伯等效假设转换为地表反射率。辐射量需要进行辐射偏移校正(通过暗电流标定测量仪器的辐射偏移)、增益和线性校正(通过实验室和在轨场地辐射定标)。检偏元件

(偏振片)的透光轴方向角偏差由实验室精确测量获得, 用于修正偏振测量矩阵。通过对平台轨道数据和 DPAC 密集采样点的时刻数据进行筛选和时间匹配获得了同一目标两个观测方向的数据。最后, 仪器的状态遥测数据用于检查仪器的工作状态, 判断当前仪器的数据质量。

同步观测的大气参数作为辐射传输模型的输入, 用于图像的大气校正。2 个角度、8 个光谱波段和 I, Q, U 3 个偏振 Stokes 参数主要用于气溶胶参数的估计和水汽柱浓度的测量。然而, 气溶胶反演还需要其它卫星提供吸收气体(如臭氧)浓度等数据。大气参数的反演能力同样受到云的影响, 需要根据无云、水云、卷云和云的含量进行数据筛选和剔除。反演模型被划分为陆地、海洋和海岸 3 类, 通过地面测量进行最优化修正。原始数据到仪器数据和光学遥感图像大气校正的数据处理流程分别如图 5、图 6 所示。

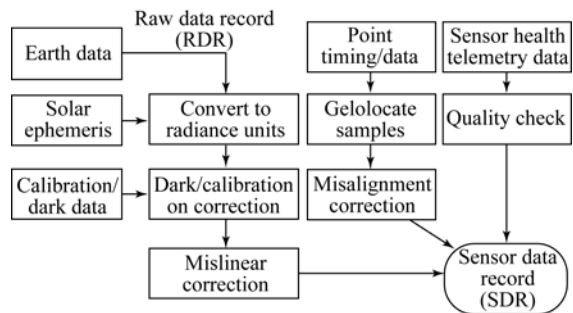


图 5 原始数据到仪器数据处理流程

Fig. 5 Process from raw data record(RDR) to sensor data record(SDR) process

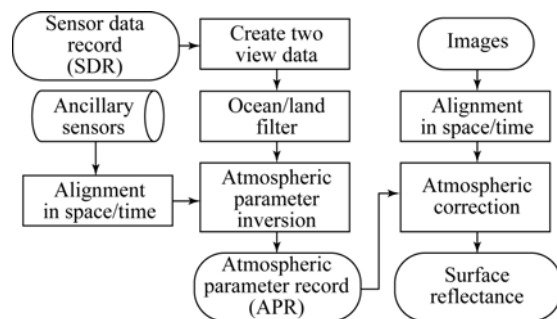


图 6 光学遥感图像大气校正流程

Fig. 6 Atmospheric correction process for optical remote sensing images

4.2 定标及性能测试

定标和性能测试贯穿原始数据到仪器数据输出、大气参数和图像校正的全过程,覆盖 DPAC 运行的全寿命周期。定标和测试包括地面实验室定标、环境试验和在轨定标,以获取、验证设计指标要求的辐射和偏振测量精度。由于 DPAC 没有星上定标器,因此需要通过地面定标场或者月亮实现 DPAC 的在轨辐射定标。忽略光学系统的偏振特性和偏振片的在轨寿命及性能退化,仪器不进行在轨偏振定标,但是可以利用云进行偏振探测能力的辅助测试和检验。

在辐射定标之前需要调整仪器的动态范围,使用溯源于低温绝对辐射计的积分球光源作为测试光源,通过调整模拟信号处理单元的增益电阻实现系统动态范围的调整。测试定标后的积分球光源,通过增益和偏移校正将仪器测量的 DN 值转换为辐射量,并获取仪器信噪比与探测辐亮度的关系。

作为辐射测量仪器,这里使用溯源于黑体辐射标准源的标准灯和漫反射板系统对 DPAC 进行辐射定标,如图 7 所示。

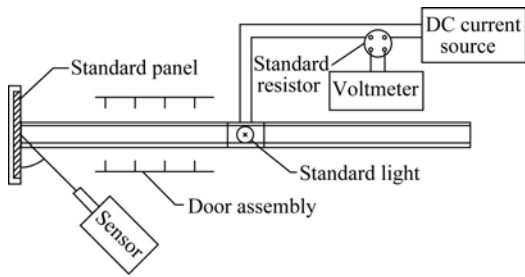


图 7 DPAC 的辐射定标系统

Fig. 7 Block diagram of spectral responsivity calibration for DPAC

获得的绝对辐射定标系数 C_0 为:

$$C_0 = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E(i)_{\lambda_1} \times \rho_{\lambda}}{\pi} d\lambda / (RL - DL), \quad (1)$$

式中: λ_1 , λ_2 分别是探测波段的下限和上限; RL 为某通道的测量辐亮度值; DL 对应通道的本底值; ρ_{λ} 为漫反射板在波长 λ 处的半球反射比; $E(i)_{\lambda_1}$ 为距离参考板 l 处的标准灯在波长 λ 处的照度值。

通道之间的增益关系通过均匀积分球光源进行校正,校正系数为 K_1, K_2 。偏振测量和定标公式为:

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_{60} \\ I_{120} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$q = Q/I, \quad (3)$$

$$u = U/I, \quad (4)$$

$$DoLP = p = \sqrt{q^2 + u^2}, \quad (5)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \text{atan}(u/q), \quad (6)$$

式中: I, Q, U 是 Stokes 参数, I_0, I_{60}, I_{120} 是同一波段 3 个检偏通道测量的辐射量, q 和 u 是归一化的 Stokes 参数, p 是线偏振度 (DoLP), θ 是偏振方位角。

$$S_0 = R_1 L - D_1 L, \quad (7)$$

$$S_{60} = R_2 L - D_2 L, \quad (8)$$

$$S_{120} = R_3 L - D_3 L, \quad (9)$$

$$I_0 = C_0 \times (R_1 L - D_1 L), \quad (10)$$

$$I_{60} = C_0 \times K_1 \times (R_2 L - D_2 L), \quad (11)$$

$$I_{120} = C_0 \times K_2 \times (R_3 L - D_3 L), \quad (12)$$

式中: S_0, S_{60}, S_{120} 分别是 $0, 60, 120^\circ$ 通道经过本底偏移量校正的测量值; $R_1 L, R_2 L, R_3 L$ 是对应通道的测量值; $D_1 L, D_2 L, D_3 L$ 是对应通道的本底偏移量; C_0 是绝对辐射定标系数; K_1, K_2 是 3 个通道之间的增益校正系数, $K_1 = S_0/S_{60}, K_2 = S_0/S_{120}$ 。

DPAC 使用积分球和波片堆组成偏振度可调光源 (Variable Polarizing Light Source, VPLS) 作为偏振度测量检测用光源^[19], 其偏振度在 $0 \sim 70\%$ 可调。VPLS 通过旋转波片堆改变入射光的角度, 从而产生不同偏振度的部分偏振光, 其误差主要来源于波片堆旋转角度的控制精度。仪器进行了一组不同偏振度光源的测量, 通过线性拟合方式得到 $p=0.3$ 时仪器偏振度测量的估计值和误差。天底角探测方向的偏振度测量结果如表 3 所示, 由表可见测量值整体偏小。其主要原因有: (1) 仪器测量时波片堆单方向旋转造成旋转角整体偏小; (2) 滤光片的带外响应降低了系统的偏振敏感性。

表 3 DPAC 偏振测量误差
Tab. 3 Polarimetric accuracy of DPAC (%)

Band/nm	490		670		865		1 610		2 250		
	Analyse	Sensor	Analyse	Sensor	Analyse	Sensor	Analyse	Sensor	Analyse	Sensor	
VPLS /(°)	25	9.22	8.70	9.04	8.8	8.95	8.2	8.74	8.10	8.54	7.9
	30	13.66	13.10	13.41	12.7	13.27	12.6	12.97	12.10	12.67	11.8
	35	19.19	18.30	18.85	18.1	18.66	17.9	18.24	17.80	17.84	17.1
	40	25.91	25.20	25.46	25.0	25.22	24.8	24.67	23.70	24.14	23.6
	45	33.84	32.96	33.28	32.8	32.99	32.7	32.31	31.75	31.66	30.7
Error ($p=0.3$)	0.85		0.55		0.37		0.68		0.81		

5 结 论

DPAC 是一台紧凑型的光学遥感图像大气校正仪,与被校正传感器搭载于同一平台,通过同步获取光学遥感图像的角度、偏振和辐射信息,实现

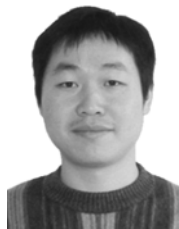
了高精度的气溶胶和水汽探测,可用于光学影像的同步大气校正。试验室定标和测试结果表明,DPAC 的偏振测量精度优于 0.01 ($p=0.3$),满足了系统设计指标的要求,并在 2014 年 8 月完成了飞行验证试验。

参考文献:

- [1] 韩启金,傅俏燕,张学文,等. 高分一号卫星宽视场成像仪的高频次辐射定标 [J]. 光学精密工程, 2014,22(7): 1707-1714.
HAN Q J, FU Q Y, ZHANG X W, *et al.*. High-frequency radiometric calibration for wide field-of-view sensor of GF-1 satellite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014,22(7): 1707-1714. (in Chinese)
- [2] 曲艺. 大气光学遥感监测技术现状与发展趋势 [J]. 中国光学, 2013,6(6): 834-840.
QU Y. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(6): 834-840. (in Chinese)
- [3] 张晶,王淑荣,黄煜,等. 临边成像光谱仪的发展现状与进展 [J]. 中国光学, 2013,6(5): 692-700.
ZHANG J, WANG SH R, HUANG Y, *et al.*. Status and development of limb imaging spectrometers [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(5): 692-700. (in Chinese)
- [4] 林兆祥,吴祺,黎伟,等. 差分吸收光谱技术在地质录井中的应用研究 [J]. 光学精密工程, 2013,21(12):3037-3042.
LIN ZH X, WU Q, LI W, *et al.*. Application of differential optical absorption spectroscopy to geological logging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(12):3037-3042. (in Chinese)
- [5] 梁顺林,李小文,王锦池,等. 定量遥感:理念与算法 [M]. 北京:科学出版社,2013.
LIANG SH L, LI X W, WANG J CH, *et al.*. *Remote Sensing: Concept and Algorithm* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [6] 胡顺石,张立福,余晓君,等. 遥感影像大气校正通用查找表的设计与插值算法 [J]. 遥感学报, 2014, 18(1):45-60.
HU SH SH, ZHANG L F, SHE X J, *et al.*. Design and interpolation of a general look-up table for remote sensing image atmospheric correction [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2014,18(1):45-60. (in Chinese)
- [7] 何立明,阎广建,王桥,等. 光学遥感大气订正模型及其相关问题分析 [J]. 地理信息科学, 2005,7(4): 110-115.
HE L M, YAN G J, WANG Q, *et al.*. Models and its analysis about the atmospheric correction of optical remote sensing imagery [J]. *Geoinformation Science*, 2005, 7(4):110-115. (in Chinese)
- [8] SIMON R N, TORMOS T, DANIS P A. Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs [J]. *International Journal of*

- Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 30: 247-250.
- [9] REUTER D, MCCABE G. LEISA/atmospheric corrector (LAC) validation report [R]. Maryland NASA/GSFC, 2002.
- [10] SHIMODA H. Overview of Japanese earth observation programs [J]. *SPIE*, 2013, 8889: 888902.
- [11] PACIFICI F. An automatic atmospheric compensation algorithm for very high spatial resolution imagery [R]. *Digital Globe*, 2014.
- [12] 陈良富, 李莘莘, 陶金花, 等. 气溶胶遥感定量反演研究及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
CHEN L F, LI SH SH, CH J H, *et al.*. *Research and Application on Quantitative Retrieval of Aerosol Remote Sensing* [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [13] CAIRNS B, RUSSELL B E E. Research scanning polarimeter and airborne usage for remote sensing of aerosols [J]. *SPIE*, 2003, 5158: 33-44.
- [14] MEYER K, PLATNICK S. Utilizing the MODIS 1.38 μm channel for cirrus cloud optical thickness retrievals: algorithm and retrieval uncertainties [J]. *Geophys*, 2010: 115.
- [15] TYO J S. Design of optimal polarimeters: maximization of signal-to-noise ratio and minimization of systematic error [J]. *Optical Society of America*, 2002, 42(4): 619-630.
- [16] Earth observing scanning polarimeter (EOSP) phase-b final report [R]. Santa Barbara Research Center, 1990.
- [17] 宋茂新, 孙斌, 孙晓兵, 等. 航空多角度偏振辐射及的偏振定标 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1153-1158.
SONG M X, SUN B, SUN X B, *et al.*. Polarization calibration of airborne multi-angle polarimetric radiometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1153-1158. (in Chinese)
- [18] RICHARD J, PERALTA, NARDELL C, *et al.*. Aerosol polarimetry sensor for the glory mission [J]. *SPIE*, 2007, 67865L: 1-17.
- [19] Laboratoire D'optique Atmospherique-Universite Sciences et Technologies de Lille. Polarizing Box Polbox User's Guide [R]. LOA-Laboratoire Optique Atmosphérique, 1-15.

作者简介:



胡亚东(1984—),男,安徽滁州人,博士研究生,2008年于合肥工业大学获得学士学位,主要研究方向为光电信息获取技术和光谱偏振遥感技术。E-mail: huyadong@aiofm.ac.cn

导师简介:



洪津(1969—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空航天遥感器工程技术的研究。E-mail: hongjin@aiofm.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)