

基于0级数据的星载大气痕量气体差分吸收光谱仪在轨衰变监测

苏静明^{1,2,3}, 赵敏杰¹, 周海金¹, 杨东上^{1,2}, 洪炎³, 司福祺^{1*}

1. 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环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031

2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

3. 安徽理工大学电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

摘要 大气痕量气体差分吸收光谱仪(EMI)是一种紫外可见成像光谱仪,主要用于实现高空间分辨率的全球每日大气痕量气体浓度反演。EMI在轨运行期间,受空间环境影响,元器件性能随时间推移会不断衰变。为有效监测其衰变状况,利用载荷对地各轨0级数据解析出在轨温度,实现长期在轨温度监测;通过计算各轨道星下点黑暗时的暗背景图像噪声的均值和标准差,实现CCD(charge-coupled device detectors)暗背景噪声随时间变化趋势监测,进一步评估空间粒子对CCD像素点的损伤;利用多次在轨测量的内部白光光源在CCD上的响应,评估CCD探测器在轨像素性能和辐射通量的变化;使用EMI在轨测量的0级太阳光谱数据,结合发射前实验室测试得到的二阶高斯函数模型,用最小二乘法反演在轨仪器光谱响应函数(ISRF),实现仪器光谱响应函数的在轨实时更新;利用石英漫反射板(QVD)、备用漫反射板(RSD)多次测量的太阳光谱,计算石英漫反射板在轨相对衰变因子,修正辐射定标系数,实现漫反射板在轨衰变校正。研究表明,EMI载荷在轨两年以来,温度稳定,各通道暗背景均值年增加率约0.25%~1%,暗背景标准差震荡幅度在1.5%以内;在轨ISRF函数变化幅度约2.3%;内部白光光源光路响应变化小于1%,石英漫反射板年衰变率UV2通道小于1.75%,VIS1通道小于1%,VIS2通道小于0.5%。

关键词 大气痕量气体差分吸收光谱仪; 0级数据; 在轨衰变; 监测

中图分类号: O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)03-0686-06

引言

卫星光学仪器在轨运行期间,受空间环境中太阳紫外辐射和原子氧剥蚀、空间辐射等影响,元器件在轨性能可能会发生衰变,这种衰变会改变原始光谱的形状、大小,进而对光谱定标、辐射定标精度产生影响,随着时间的推移这种影响会越来越大,最终影响L1b数据产品和反演数据产品的质量。2018年5月,我国自主研发的大气痕量气体差分吸收光谱仪(environmental trace gases monitoring instrument, EMI)载荷搭载于高分五号卫星(GF-5)发射升空。为监测EMI运行状况,提高载荷数据有效性、可靠性,需要不间断地监测载荷在轨衰变并及时进行校正。

搭载于欧空局RSR-2卫星的全球臭氧监测仪(global ozone monitoring experiment, GOME)^[1],利用每日太阳光

谱测量监测光学仪器性能在轨衰变;中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)安装了比辐射计监测太阳反射板BRDF(bi-directional reflectance distribution function)的在轨衰变,通过对太阳漫反射板定标衰变系数矩阵进行查表来完成衰变校正^[2]。臭氧监测仪(ozone monitoring instrument, OMI)趋势监测和定标系统TMCF通过分析仪器各项衰变参数,完成在轨性能衰变校正^[3]。针对EMI载荷在轨运行参数,Zhao等对EMI发射前定标和第一年在轨定标进行了分析^[4]。

本文利用EMI在轨运行期间获取的对地光谱、经漫反射板测量的太阳光谱、内置白光光源监测数据等0级数据,结合发射前实验室测量的EMI器件性能及定标参数,对载荷中CCD探测器及漫反射板等关键光学器件在轨衰变进行监测,这为EMI载荷能够长期、高质量运行提供保障。

收稿日期: 2021-01-31, 修订日期: 2021-05-24

基金项目: 中科院合肥研究院院长基金项目(YZJJ201605)资助

作者简介: 苏静明, 1982年生, 中国科学技术大学研究生院科学岛分院博士研究生 e-mail: jmsu@aiofm.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

1 实验部分

高分五号卫星(GF-5)是高光谱光学遥感卫星,设计为太阳同步轨道,轨道高度约 705 km。其载荷 EMI 是 4 通道背照式帧转移面阵 CCD 探测器成像光谱仪,探测波长范围 240 ~ 710 nm,光谱分辨率 0.3~0.5 nm,载荷在轨对地观测中,以天底推扫方式实现穿轨方向上的 114°和飞行方向上的 0.5°的瞬时视场,可以实现一天全球覆盖。

EMI 采用 4 台带有二维电荷耦合器件探测器的光栅成像光谱仪,紫外通道选用紫外增强型帧转移 CCD47-20 探测器,可见通道选用深势阱型帧转移 CCD55-30 探测器,EMI 光学路径如图 1 所示。

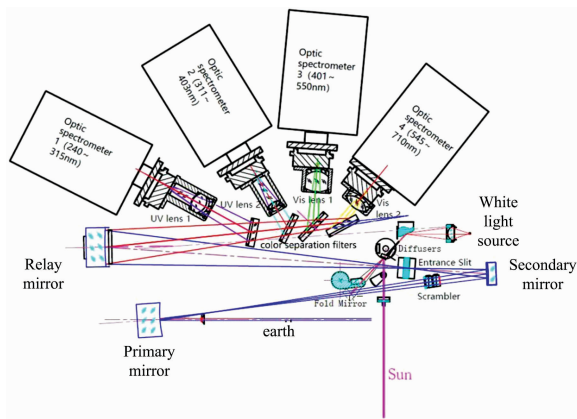


图 1 EMI 光学路径示意图
Fig. 1 EMI optical layout

测量太阳光谱时,EMI 在星下点出阴影时打开太阳挡板,太阳光通过太阳网格(透射 10%)进入仪器,分别经过备用漫反射板(reference solar diffuser, RSD, 40 mm×16 mm)或者石英漫反射板(quartz volume diffuser, QVD, 40 mm×16 mm×6 mm)反射到望远镜的折叠镜到达光谱仪。在这个位置的折叠镜阻挡了来自主镜的地球辐射。测量对地辐射光谱时,地球散射光经主副反射镜和偏振扰频器反射到入口的狭缝中,再经中继反射镜将入射光反射到分色滤光片上,最后通过紫外透镜和可见光透镜在光谱仪上成像。暗背景噪声是在星下点黑夜时光谱仪测量的地球散射光。载荷在星下点黑夜区进行内部白光源自检,白光源通过透射漫反射板照亮折叠镜,到达光谱仪。

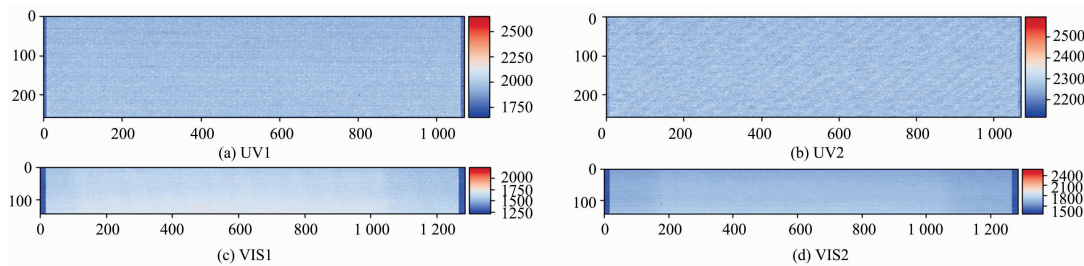


图 3 CCD 探测器暗背景噪声
Fig. 3 Dark background noise of CCD detector

2 结果与讨论

EMI 光机头部至卫星数传系统的图像数据采用 LVDS 传输格式,其在轨衰变分析是以 0 级数据为基础,挖掘元件性能衰变特征并建模,在 0 级到 1 级数据处理中插入衰变校正算法,实现在轨光谱和辐射准确定标。

2.1 载荷温度监测

EMI 面阵 CCD 探测器温控单元通过 PID 控制内部制冷器来稳定光学平台的温度,降低温度变化对波长定标和 CCD 暗背景噪声的影响。为了去除载荷内部水汽和挥发物,2018 年 5 月对载荷进行加热去污处理,自 2018 年 6 月后,载荷光学平台温度稳定性较好,UV1 温度维持在 -18.62 °C,UV2 温度维持在 -17.97 °C,VIS1 和 VIS2 温度稳定在 10.63 °C。仪器温度稳定,对载荷测量数据影响可忽略。各通道 CCD 探测器温度变化如图 2 所示。

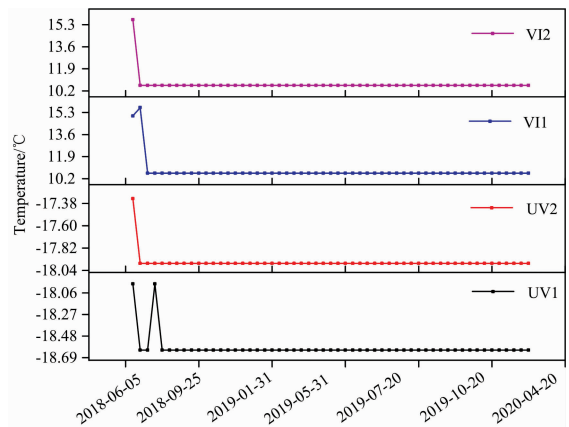


图 2 CCD 探测器温度变化

Fig. 2 Temperature variation of CCD detector

2.2 CCD 探测器暗背景噪声监测

EMI 载荷虽然在外部设计了铝板屏蔽,来自空间环境的质子仍然会对 CCD 探测器造成损伤。通过对每轨星下点黑暗区进行暗背景测量,可实现 CCD 暗背景噪声监测。图 3 所示为 EMI 在 2019 年 6 月 3 日 5682 轨 4binning 模式测量得到的 UV1,UV2,VIS1 和 VIS2 通道暗背景图像,积分时间分别为 0.5,2,0.5 和 2 s。各通道暗背景 DN(digital number)值分布均匀,极少量像素点受到太空粒子的辐射,成为响应值大于均值的热点。

选取 100 幅以上暗背景图像计算图像暗背景噪声均值和标准差,用以监测 CCD 暗背景噪声变化趋势。暗背景均值 \bar{p} 和标准差 σ 计算如式(1)和式(2)所示

$$\bar{p} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n p_{i,j} \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n (p_{i,j} - \bar{p})^2} \quad (2)$$

式中, m 和 n 分别为 CCD 成像面的行数和列数(4binning 模

式下,紫外通道 CCD47-20, 258 行 \times 1 072 列,可见通道 CCD55-30, 144 行 \times 1 286 列), $p_{i,j}$ 是每个像素的 DN 值。

图 4(a)所示为各通道暗背景均值变化,从第 600 轨到第 10 060 轨,暗背景均值基本成线性递增趋势,各通道暗背景均值年增加率约 0.25%~1%。图 4(b)所示各通道暗背景标准差整体稳定,震荡幅度在 1.5% 以内。由于 EMI 在每个轨道的暗背景信号可在 0-1 级数据处理中扣除,有效消除暗背景噪声的增大对 2 级反演的负面影响。

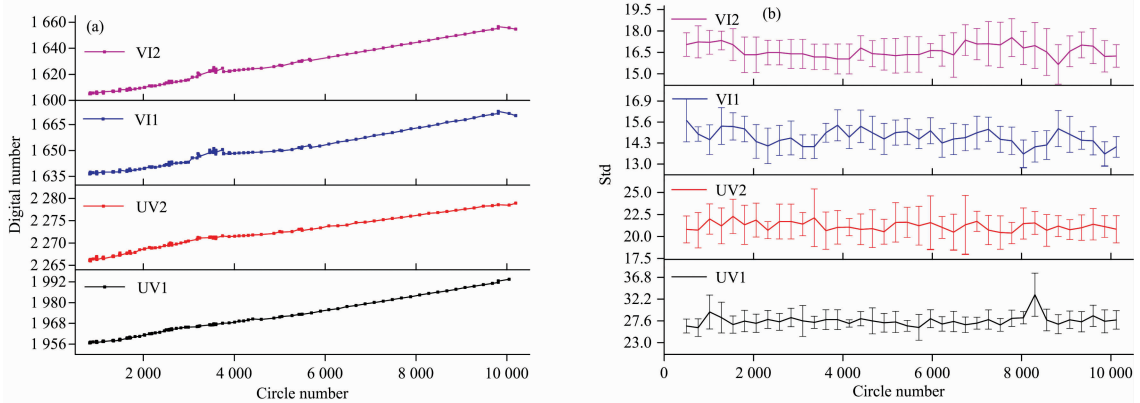


图 4 暗背景均值及标准差变化趋势

(a): 暗背景均值变化趋势; (b): 暗背景标准差变化趋势

Fig. 4 Trend of mean and std. Deviation of dark background

(a): Trend of mean of dark background; (b): Trend of Std. Deviation of dark background

2.3 在轨狭缝函数监测

仪器响应函数 (instrument spectral response function, ISRF) 是波长定标和大气痕量气体反演中一个关键量^[5]。使用 EMI 在轨测量的 0 级太阳谱定标数据,结合地面实验室测试得到的 ISRF 参数^[6-7],完成 ISRF 在轨参数的反演运算和实时更新。图 5 所示为 EMI 测量的中间行 0 级太阳光谱定标数据。

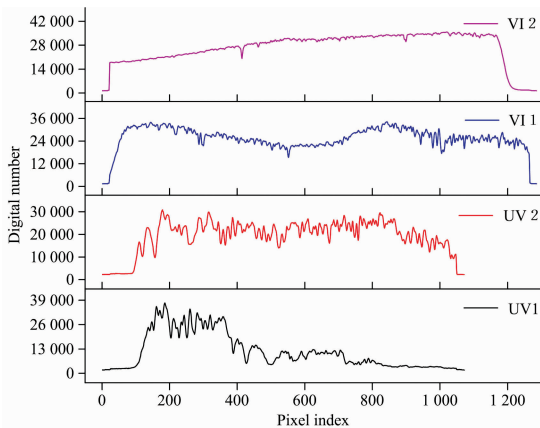


图 5 EMI 中间行太阳光谱定标数据

Fig. 5 Solar spectrum in center field of view of EMI

由发射前实验室分析,其狭缝函数可用二阶高斯函数模型表示,如式(3)所示。

$$\text{ISRF}(\lambda) = A e^{-\frac{(\lambda-\lambda_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

式(3)中, λ 是像素波长, λ_0 为峰值对应中心波长, σ 为仪器狭缝函数半高宽, A 为仪器狭缝函数拟合系数。将高分辨的太阳参考光谱 SAO2010^[8] $S_{\text{refer}}(\lambda)$ 和 EMI 狭缝函数 $\text{ISRF}_{\text{EMI}}(\lambda_i)$ 在设定监测光谱窗口内卷积,如式(4)所示

$$S_{\text{fit}}(\lambda_i) = S_{\text{refer}}(\lambda) \otimes \text{ISRF}_{\text{EMI}}(\lambda_i) \quad (4)$$

式(4)中, λ_i 指光谱仪第 i 个像素点波长。 $S_{\text{fit}}(\lambda_i)$ 是在 EMI 各像素点波长抽样值。再计算实际测量太阳谱 $S_{\text{meas}}(\lambda_i)$ 和理论拟合参考太阳谱 $S_{\text{fit}}(\lambda_i)$ 的残差 χ , 如式(5)所示。

$$\chi = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(S_{\text{meas}}(\lambda_i) - S_{\text{fit}}(\lambda_i, \omega, k))^2}{N}} \quad (5)$$

式(5)中, N 表示 CCD 每行测量太阳光谱的像素点数。在 χ 最低时,得到最佳拟合参数 ISRF_{EMI} 。EMI 在轨 ISRF 参数变化如表 1 所示。

EMI 在轨 ISRF 参数变化相对平稳,变化幅度约为 2.3%。定期计算在轨 ISRF 数值,在反演痕量气体数据时使用实时更新的 ISRF 参数可以保障二级数据产品的质量。

2.4 白光源在轨衰变监测

EMI 内部白光源采用石英钨卤素灯(QTH, 6 V, 10 W)监测 CCD 像素性能和辐射通量。QTH 监测光路中,白光经漫透射板(TD)和折叠镜(FM)到达主光路。由于 QTH 是高度稳定的,漫透射板设计了足够的保护免受污染和宇宙辐射, QTH 信号变化也可以部分反映太阳光路衰变。UV2 和 VIS1 对 QTH 的响应如图 6 所示。

表 1 EMI 在轨 ISRF 参数
Table 1 On-orbit ISRF parameters

通道	拟合光谱窗口/nm	20180730	20181225	20190522
UV1	253.25~259.45	0.415 02±0.005 44	0.454 87±0.009 33	0.456 56±0.007 73
UV2	327.04~335.69	0.446 35±0.006 62	0.451 29±0.007 13	0.454 8±0.006 95
VIS1	402.06~415.14	0.491 78±0.005 38	0.483 61±0.010 17	0.478 55±0.009 11
	458.06~492.02	0.458 94±0.009 08	0.454 41±0.008 91	0.447 14±0.009 4
	500.02~513.98	0.481 8±0.007 49	0.474 85±0.008 76	0.468 99±0.007 92
VIS2	639.25~651.15	0.540 03±0.011 53	0.540 38±0.012 91	0.551 25±0.015 37
	663.05~674.95	0.553 85±0.022 12	0.558 74±0.028 83	0.566 39±0.022 19

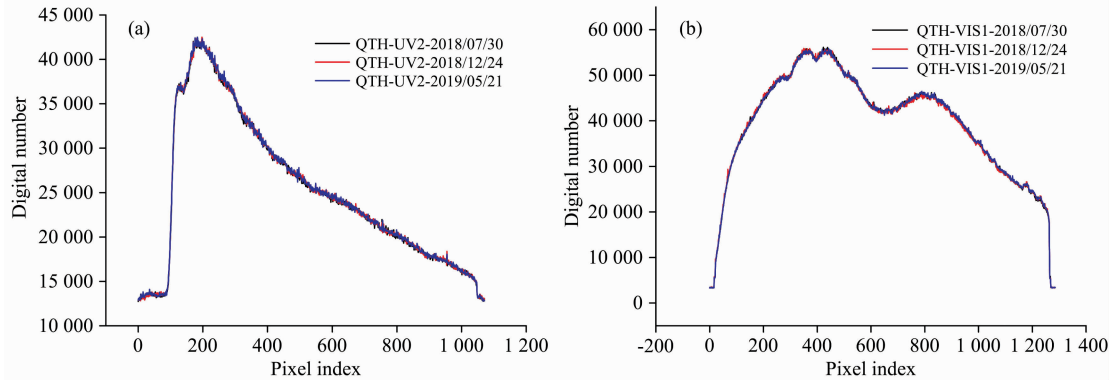


图 6 EMI 在轨 QTH 响应
Fig. 6 EMI on-orbit QTH response

图 6 为 UV2 和 VIS1 通道 EMI 中心视场测量得到的 QTH 响应。2018/05/28, 2018/12/24, 2019/05/21 的 QTH 光谱辐射通量数据表明, QTH 监测光路在轨响应两年衰变小于 1%。由于主镜(PM)的材料与 FM 相同, 由此可以推断在地球太阳光谱测量中辐射通量衰变较小。

2.5 漫反射板在轨衰变监测及校正因子

EMI 使用石英漫反射板测量得到的太阳光谱, 完成在轨光谱和辐射定标。图 7 是 EMI 通过 QVD 于 2018/12/16 测量的 3221 轨 0 级全视场太阳光谱图, 水平和垂直方向分别是光谱维和空间维。

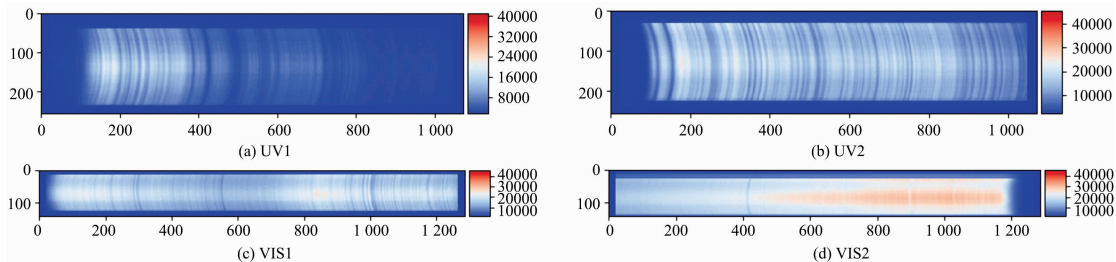


图 7 EMI 太阳光谱
Fig. 7 Raw irradiance of EMI

为了滤除太阳光路其他元素的变化, 基于备用铝漫反射板(RSD)保护良好, 衰变很小, 可以采用石英漫反射板(QVD)与 RSD 的相对值估算石英漫反射板衰变情况, 再对太阳光谱辐射定标系数进行校正^[9]。

QVD 与 RSD 太阳谱的相对响应计算如式(6)所示

$$\Delta B(t) = \frac{DN_{QVD}(t)}{DN_{RSD}(t)} = \frac{BRDF_{QVD}(t) I_{sun} \tau \eta_{i,j}}{BRDF_{RSD}(t) I_{sun} \tau \eta_{i,j}} \quad (6)$$

式(6)中, $\Delta B(t)$ 为 t 时刻太阳光谱相对响应, $B(t=0)$ 从地面测试中得到, $DN_{QVD}(t)$ 和 $DN_{RSD}(t)$ 是分别经 QVD 和 RSD 得到的太阳光谱 DN 值, I_{sun} 是测量得到的太阳光谱, τ 为太

阳光路光学系统透过率, $\eta_{i,j}$ 是探测像元 i 行 j 列的响应系数。

由于尽量减少了 RSD 暴露时间, 最小化了潜在的衰变, 因此可假设 $BRDF_{RSD}(t)$ 不随时间 t 变化。如果 $BRDF_{RSD}(t)$ 在 EMI 任务寿命期间是恒定的, 则其变化 $\Delta B(t)$ 仅由 QVD 衰变引起。对衰变曲线进行三阶多项式拟合, 去除残存的太阳光谱夫琅禾费线结构, 得到衰变校正因子 $\alpha(t)$, 如式(7)所示

$$\alpha(t) = \Delta B(t) BRDF_{RSD}(t) \quad (7)$$

式(7)中, $\Delta B(t)$ 是随着时间变化的相对衰变。 $\alpha(t=0)$ 是在发射前实验室测定的预设值, 衰变校正因子 $\alpha(t)$ 应用于校正 0

到 1 级辐照度辐射定标系数。

图 8 中黑线 $\Delta B(t=two\ years)$ 所示为 QVD 在轨两年来相对衰变, 利用三阶多项式拟合, 得到衰变校正因子 $\alpha(t=$

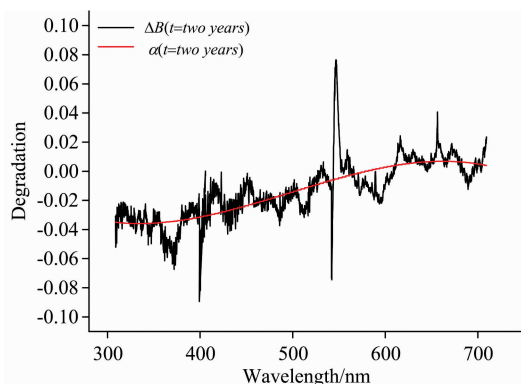


图 8 漫反射板相对衰变及校正示意图

Fig. 8 Diagram of relative degradation and correction factors for diffuse reflector

two years) 如红线所示。结果表明, UV2 通道的 QVD 年衰变率小于 1.75%, VIS1 通道的年衰变率小于 1%, VIS2 通道的年衰变率小于 0.2%。将计算的 QVD 衰变校正因子作为 L1b 数据处理器的输入, 可对太阳光谱辐射定标系数进行校正。

3 结 论

以 EMI 在轨测量的 0 级数据为基础, 对入轨两年来的 EMI 仪器各项指标进行衰变监测。结果表明, 仪器温度基本保持稳定, 暗背景噪声均值年增幅度在 1% 以内, 在轨载荷 ISRF 函数值平稳, 变化幅度在 2.3% 以内, 实时更新 ISRF 函数参数, 可有效降低其对二级反演结果的影响, 主光路的前两年响应变化幅度小于 1%, 太阳光路的年衰变率分别小于 1.75% (UV2), 1% (VIS1), 0.2% (VIS2), 引入衰变校正因子, 可有效校正太阳光谱辐射定标系数, 为 L1b 数据处理提供了关键参数, 也为监测 EMI 在轨性能提供了必要的信息。

References

- [1] Rosemary Munro, Rüdiger Lang, Dieter Klaes, et al. Atmos. Meas. Tech., 2016, 9: 1279.
- [2] Xiong X, Xie X, Angal A, et al. Proc. of SPIE, 2007, 6677: 66770O.
- [3] Erik Schenkeveld V M, Glen Jaross, Sergey Marchenko, et al. Atmos. Meas. Tech., 2017, 10: 1957.
- [4] Zhao Minjie, Si Fuqi, Zhou Haijin, et al. IEEE T Geosci. Remote, 2020, 58(12): 8531.
- [5] Steffen Beirle, Johannes Lampel, et al. Atmos. Meas. Tech., 2017, 10: 581.
- [6] Zhao Minjie, Si Fuqi, Zhou Haijin, et al. Atmos. Meas. Tech., 2018, 11(9): 5403.
- [7] ZHOU Hai-jin, LIU Wen-qing, SI Fu-qi, et al(周海金, 刘文清, 司福祺, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2012, 32(11): 2881.
- [8] Chance K, Kurucz R L. J. Quant. Spectrosc. Ra., 2010, 111(9): 1289.
- [9] Chen H D, Xiong X, Angal A, et al. IEEE T Geosci. Remote, 2017, 55(11): 6456.

On-Orbit Degradation Monitoring of Environmental Trace Gases Monitoring Instrument Based on Level 0 Data

SU Jing-ming^{1, 2, 3}, ZHAO Min-jie¹, ZHOU Hai-jin¹, YANG Dong-shang^{1, 2}, HONG Yan³, SI Fu-qi^{1*}

1. Key Laboratory of Environmental Optical and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy Sciences, Hefei 230031, China
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
3. College of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

Abstract As a kind of ultraviolet-visible imaging spectrometer, the environmental trace gases monitoring instrument (EMI) is mainly used to realize the global daily atmospheric trace gas concentration inversion with high spatial resolution. During the on-orbit operation, the performance of EMI tends to decay with time due to the influence of the spatial environment. In order to effectively monitor its decay condition, the on-orbit temperature is analyzed by using the 0-level data of the load to the ground orbit to realize the long-term on orbit temperature monitoring. By calculating the mean value and standard deviation of the dark background image noise in the satellite points of each orbit, CCD (Charge-Couple Device Detectors) dark background noise variation trend monitoring with time was realized to evaluate further the damage of CCD pixel points caused by space particles. The on-orbit pixel performance and radiation flux of the CCD detectors were evaluated by the response of the internal white light

source on the CCD with multiple on-orbit measurements. Using the 0-level solar Spectral data measured by EMI in orbit, combined with the second-order Gaussian Function model obtained from the laboratory test before launch, the Instrument Spectral Response Function (ISRF) is an inversion with the least square method. Real-time on-orbit updating of the instrument's spectral response function is realized. The on-orbit relative decay factor of the Quartz Volume Diffuser (QVD) and the Reference Solar Diffuser (RSD) were calculated using the Solar spectrum measured many times by the QVD and RSD. The on-orbit decay correction of diffuse reflector plate is realized. The results show that the temperature is stable after the EMI load has been in orbit for two years, the mean annual increase rate of dark background in each channel is about 0.25%~1%, and the fluctuation range of standard deviation of dark background is within 1.5%. The on-orbit ISRF function varies by about 2.3%. The light path response of the internal white light source is less than 1%, and the annual decay rate of QVD is less than 1.75% for the UV2 channel, less than 1% for the VIS1 channel, and less than 0.5% for the VIS2 channel, respectively.

Keywords Environmental trace gases monitoring instrument; Level 0 data; On-orbit degradation; Monitoring

* Corresponding author

(Received Jan. 31, 2021; accepted May 24, 2021)

第 22 届全国分子光谱学学术会议暨 2022 年光谱年会 (第一轮通知)

由中国光学学会和中国化学会以及中国光学学会光谱专业委员会主办的“第 22 届全国分子光谱学学术会议暨 2022 年光谱年会”将于 2022 年 11 月 11 日—14 日在云南昆明召开,会议由云南师范大学承办。本次大会是我国光谱科学工作者的又一次学术盛会,将秉承前 21 届分子光谱学学术会议之宗旨,全力展示我国在光谱及相关领域的最新研究进展及取得的成果。同时,会议为增进广大光谱科学工作者及其支持光谱事业的企事业单位的交流与合作搭建平台,共同促进我国光谱事业的发展。届时大会组委会将邀请国内外光谱及相关领域的院士、知名专家学者到会作大会报告,会议还将组织各类专题讨论和学术交流活

征文范围

分子光谱理论以应用研究,包括红外光谱、拉曼光谱、荧光光谱、磷光光谱、紫外-可见吸收光谱、化学发光等光谱技术在物理、化学、生物、材料科学、表面/界面科学、医药、环境、工业过程、催化学、地学、农林及其它领域的基础理论与应用研究的最新科研成果。光学工程、原子光谱、激光光谱、光谱成像等各类光谱技术的新理论和应用研究成果。同时也欢迎光谱相关技术新的基础研究和应用成果。

论文摘要要求

1. 论文内容必须是未在期刊杂志上发表过或其它全国或国际会议宣读过。
2. 提交论文扩展摘要一份,纸张大小用 A4 纸版式(用 Office word 软件排版,页边距为 2 cm,单倍行距)。
3. 扩展摘要按以下顺序排版:文题(三号黑体居中);作者(四号仿宋居中);单位(小四号宋体居中,含所在省市、邮政编码、电子邮址(如有));论文的创新性,研究意义与结果(五号宋体);关键词和主要参考文献(自版芯左起,五号宋体)。文稿中可穿插主要论据的图、表和照片,图题、图注和表题、表注一律用英文表述。摘要的字数,包括图,表,参考文献,总共不能超过 2 个页面。
4. 具体投稿要求可参看模板及《光谱学与光谱分析》征稿简则。稿件一经录用,将由《光谱学与光谱分析》以增刊或会议论文集形式发表。论文摘要模板请参考: <http://www.sinospectroscopy.org.cn/uploads/newsfile/20110928105323.doc>
5. 论文摘要截稿日期:2022 年 6 月 30 日。

论文摘要提交方式

欢迎大家通过网站提交论文,请您注册登陆光谱网(<http://www.sinospectroscopy.org.cn>),在会议主页会议会展栏目下的本次会议通道,点击会议投稿按提示要求上传您的论文摘要。论文摘要将组织专家评审或采用网上评审的方式,您可在网上浏览对您论文的评审结果和修改意见。若通过电子邮件方式提交论文,请发往: ouquanhong@163.com。