

# 光学学报

## 环境减灾二号卫星偏振扫描大气校正仪在轨信噪比评估

董浩<sup>1,2,3</sup>, 刘振海<sup>1,3\*</sup>, 赵鑫鑫<sup>1,2,3</sup>, 雷雪枫<sup>1,2,3</sup>, 陶菲<sup>1,3</sup>, 楚宇恒<sup>1,3</sup>, 邹鹏<sup>1,3</sup>, 宋茂新<sup>1,3</sup>, 丛强<sup>4</sup>, 洪津<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>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;

<sup>2</sup>中国科学技术大学, 安徽 合肥 230027;

<sup>3</sup>中国科学院通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>4</sup>航天东方红卫星有限公司, 北京 100094

**摘要** 针对搭载于环境减灾二号 A/B(HJ-2A/B)卫星的偏振扫描大气校正仪(PSAC),详细分析了信号链路中各噪声项及其与信号的相关性,建立了信号-总噪声功率线性(S-TNPL)模型,通过实验测量获得了各通道的噪声功率只随信号变化的模型系数,以及与信号无关而与工作条件有关的本底噪声功率(截距);使用在轨实测的本底噪声,建立了不依赖于均质性区域场景的在轨信噪比评估方法,并与星上漫射板法进行了对比验证。结果显示,利用 S-TNPL 模型与星上漫射板法获得的 PSAC 在轨信噪比评估结果的相对偏差为  $-0.62\% \sim 6.27\%$ ,具有较好的一致性,验证了所提在轨信噪比评估方法的合理性。该信噪比评估方法不仅能适应在轨辐射性能衰退的情况,同时能方便实现不同辐亮度条件下的信噪比转换,并可直接对任意单次观测结果的信噪比进行评估。该信噪比分析方法理论上同样适用于其他光学遥感器,可为其在轨信噪比评估提供参考。

**关键词** 大气光学; 环境减灾二号卫星; 大气校正仪; 噪声模型; 信噪比评估; 太阳漫射板

中图分类号 TP731

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2401005

## On-Orbit SNR Evaluation of Polarized Scanning Atmospheric Corrector Onboard HJ-2 Satellites

Dong Hao<sup>1,2,3</sup>, Liu Zhenhai<sup>1,3\*</sup>, Zhao Xinxin<sup>1,2,3</sup>, Lei Xuefeng<sup>1,2,3</sup>, Tao Fei<sup>1,3</sup>, Chu Yuheng<sup>1,3</sup>, Zou Peng<sup>1,3</sup>, Song Maoxin<sup>1,3</sup>, Cong Qiang<sup>4</sup>, Hong Jin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>2</sup>University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;

<sup>4</sup>DFH Satellite Co., Ltd., Beijing 100094, China

**Abstract** For the polarized scanning atmospheric corrector (PSAC) onboard the Huanjing Jianzai-2A/B (HJ-2A/B) satellites, this study analyzes the noise terms in the signal chain and their correlation with the signal in detail and builds a signal-total noise power linear (S-TNPL) model. Experimental measurements are conducted to obtain the coefficient of the model in which the noise power of each channel only varies with the signal and the background noise power (intercept) that is related to operating conditions rather than to the signal. An on-orbit signal-to-noise ratio (SNR) evaluation method independent of homogeneous regional scenes is developed with background noise measured on orbit and is then verified by a comparison with the onboard diffuser method. The comparison shows that the results of the on-orbit SNR evaluation of the PSAC obtained by the proposed S-TNPL model and the onboard diffuser method exhibit a relative deviation of  $-0.62\% \sim 6.27\%$ , indicating favorable consistency and thus verifying the validity of the proposed on-orbit SNR evaluation

收稿日期: 2022-05-13; 修回日期: 2022-06-22; 录用日期: 2022-06-28

基金项目: 王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-15)、中国科学院合肥研究院院长基金(YZJJ202201-TS)

通信作者: lzhenhai@aiofm.ac.cn

method. This SNR evaluation method can not only adapt to degrading on-orbit radiation performance but also facilitate the conversion of SNRs under different radiance conditions. Moreover, it can be directly applied to evaluate the SNR of the result of any single observation. The SNR analysis method in this paper is also applicable to other optical remote sensors theoretically and can thus provide a reference for the on-orbit SNR evaluation of such remote sensors.

**Key words** atmospheric optics; HJ-2 satellite; atmospheric corrector; noise model; signal-to-noise ratio evaluation; solar diffuser

## 1 引言

空间光学遥感仪器的信噪比是描述其获取有效目标信息能力的重要指标,它表征遥感数据质量,直接影响数据反演和产品应用效果。遥感器在轨信噪比可用于评估数据质量,其长期监测结果也是遥感器在轨健康评估的重要依据<sup>[1]</sup>。信噪比中噪声的评估指标通常采用统计学上的标准差,实验室条件下一般采用一定亮度下的稳定光源进行连续多次测量统计,再计算信噪比。与实验室等条件可控的环境不同,空间光学遥感器的在轨信噪比评估往往很难找到符合信噪比评价要求的均质性区域场景<sup>[2]</sup>。

为了合理地评估遥感器在轨信噪比,国内外学者针对不同类型和特性的遥感器开展了大量研究工作,提出了多种评估方法<sup>[2-18]</sup>。对于配置漫射板等星上辐射定标器的遥感器,研究人员利用定标器的辐射均匀性和稳定性实现了较为准确的在轨信噪比评估,如 MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer)<sup>[4]</sup>、VIIRS (visible infrared imaging radiometer suite)<sup>[5]</sup>、OLI (operational land imager)<sup>[6]</sup>、ETM+ (enhanced thematic mapper plus)<sup>[7]</sup>和 SeaWiFS (sea-viewing wide field-of-view sensor)<sup>[8-9]</sup>等。对于未配备星上定标器的成像遥感器,可通过图像法评估其在轨信噪比,如 Fougner 等<sup>[10]</sup>基于云和海洋场景评估 POLDER (polarization and directionality of earth's reflectances) 遥感器的在轨噪声,并揭示了目标的均质性等因素会影响信噪比评估结果的准确性。针对类似问题,相关学者引入局部分方差法<sup>[11]</sup>、求地学统计量法<sup>[12]</sup>以及人工神经网络方法<sup>[13]</sup>等来降低地表均质性对信噪比评估结果的影响,以获得较高的准确性。对于成像光谱仪类遥感器,研究人员还提出了去相关法进行高光谱图像噪声估计<sup>[14-16]</sup>,即通过多元线性回归等方法实现光谱维和空间维中具有较高相关性的信号与噪声分离,从而实现在轨信噪比评估。此外,基于图像法评估在轨信噪比往往还面临不同辐亮度条件的信噪比换算问题<sup>[17]</sup>,Hu 等<sup>[18]</sup>使用信噪比正比于辐亮度平方根 (SPSRR) 的方法换算不同观测图像的信噪比,张靖玮等<sup>[19]</sup>基于此方法实现了 FY-3D MERSI II 遥感器的数据质量评估。然而,此转换关系成立的前提是遥感器的本底噪声可忽略,否则将给信噪比换算带来较大误差。

上述在轨信噪比评估方法多针对特定的载荷类型和特性,在评估精度和通用性等方面较难兼顾。本文首先依据空间光学遥感仪器通用电子学工作原理及噪

声的特性分析结果,将与信号无关但与运行环境有关的本底噪声项和只与信号有关的噪声项分离,建立随信号值线性变化的信号-总噪声功率线性 (S-TNPL) 模型。然后,以偏振扫描大气校正仪 (PSAC) 为例,在实验室测量的 PSAC 各通道信号与总噪声功率的线性关系基础上拟合得到模型参数,再结合在轨实测本底噪声,获取灰度值对应的总噪声功率,实现 PSAC 在轨信噪比评估。最后,与基于 PSAC 配置的漫射板观测结果评估的信噪比进行对比验证。所提出的在轨信噪比评估方法不依赖于均质性场景条件,分析和评估方法对其他光学遥感器具有良好的通用性,有望为不同类型遥感器的长期在轨数据质量监测提供新途径。

## 2 仪器、模型与方法

### 2.1 仪器简介

环境减灾二号 (HJ-2) A/B 卫星于 2020 年 9 月 27 日以一箭双星的方式成功发射入轨,其搭载了 16 m CCD 相机、高光谱成像仪 (HIS)、红外相机 (IRS) 和 PSAC 等。其中,PSAC 可为其他遥感器提供大气校正处理所需的大气参数,用于进一步提高遥感器应用效能和遥感定量化水平。

PSAC 采用分孔径与分振幅相结合的同时偏振测量方案<sup>[20-22]</sup>,以穿轨扫描方式在  $-32.5^{\circ} \sim 32.5^{\circ}$  视场范围内获取 9 个波段 4 个偏振角度共 36 个通道的光谱强度信息,原理上可以实现目标线偏振态的前 3 个 Stokes 参量  $I$ 、 $Q$ 、 $U$  的测量,即

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{45} + I_{135} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ V \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中:  $S$  为 Stokes 矢量;  $I$  为光强度信息,表示偏振方位角相差  $90^{\circ}$  的两个通道响应之和;  $Q$  为水平方向的线偏振分量;  $U$  为与水平方向成  $45^{\circ}$  夹角的线偏振分量;  $V$  为圆偏振分量,在自然场景下该分量比其他 3 个分量至少小两个数量级,应用中常予忽略<sup>[21]</sup>;  $I_0$ 、 $I_{45}$ 、 $I_{90}$  和  $I_{135}$  分别为可被光电探测器测量的 4 种线偏振光强度。  $I$ 、 $Q$ 、 $U$ 、 $V$  均为平面波的 Stokes 参数。

PSAC 主要特性参数如表 1 所示,其中  $L_{\text{typ}}$  为典型辐亮度,  $P$  为线偏振度。PSAC 配备了星上辐射和偏振定标器,扫描反射镜转动一周依次完成暗参考 (DB) 定标器、线偏振定标器 (LPC)、对地观测、非偏定标器 (NPC)、辐射定标器的数据采集。PSAC 主体结构 and 扫描观测示意分别如图 1<sup>[23]</sup> 和图 2 所示。在 DB 内层

喷涂消光黑漆,配合电子学的直流恢复功能,用于本底校正,保证遥感器有效动态范围及长期稳定性<sup>[24]</sup>。辐射定标器主要由遮光罩及聚四氟乙烯材质的太阳漫射板(SD)等组成,通过引入太阳光进行星上绝对辐射定标。受限于卫星平台上的载荷布局,在PSAC辐射定标器内设计了长直椭圆筒形遮光罩,内壁喷涂消光黑

漆。SD及辐射定标器模型如图3所示。PSAC漫射板的表面尺寸为125 mm×125 mm,出厂定标结果表明漫射板对300~1800 nm光的反射率均高于0.975;在10°~60°照明、垂直观测条件下,900 nm波段的双向反射比因子(BRF)的变化小于0.07,说明其具有较高的反射率和良好的朗伯性。

表1 PSAC主要特性参数

Table 1 Main specifications of PSAC

Parameter	Value
Swath /km	≥800
Instantaneous field-of-view (IFOV) / (°)	0.52
Resolution at nadir /km	≤6@645 km
Band /nm	410, 443, 555, 670, 865, 910, 1380, 1610, 2250
Polarization detection angle / (°)	0, 45, 90, 135
Effective quantization bits /bit	15
Signal-to-noise ratio (SNR) /dB	41-45@L <sub>typ</sub>
Average dark counts for all channels /DN	[-30, 30]
Radiometric calibration accuracy /%	≤5
Polarimetric calibration accuracy /%	≤0.5 (P<0.3)

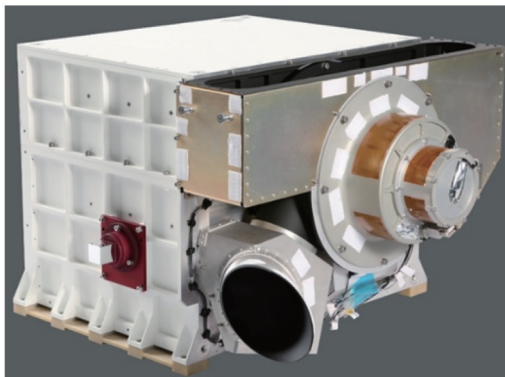


图1 PSAC主体结构<sup>[23]</sup>

Fig. 1 PSAC main structure<sup>[23]</sup>

## 2.2 信噪比建模

### 2.2.1 信号链路噪声特性分析

典型光学遥感仪器的电子学系统主要包括光电转

换、信号放大、滤波及采集等模块。以PSAC为例,该遥感器使用双元Si和InGaAs光电二极管探测器,其信号链路为:接收目标的辐射信息并进行光电转换,响应电流通过跨阻运放转换为电压信号;该电压信号经放大、本底抑制等信号调理后进行积分滤波,并通过模数转换为灰度值。在此信号链路中,其本征噪声源主要包括探测器分流电阻热噪声、散粒噪声、反馈电阻热噪声、前放电路噪声以及量化噪声等。除前放电路噪声外,探测器分流电阻热噪声等效电流 $I_{N\_shunt}$ 、散粒噪声等效电流 $I_{N\_shot}$ 、反馈电阻热噪声等效电流 $I_{N\_Rf}$ 以及量化噪声等效电流 $I_{N\_quan}$ 的表达式分别为

$$I_{N\_shunt} = \sqrt{\frac{4kT k_n \Delta f}{R_{sh}}}, \quad (2)$$

$$I_{N\_shot} = \sqrt{2q(I_{ph} + I_{dark} + I_{bg}) k_n \Delta f}, \quad (3)$$

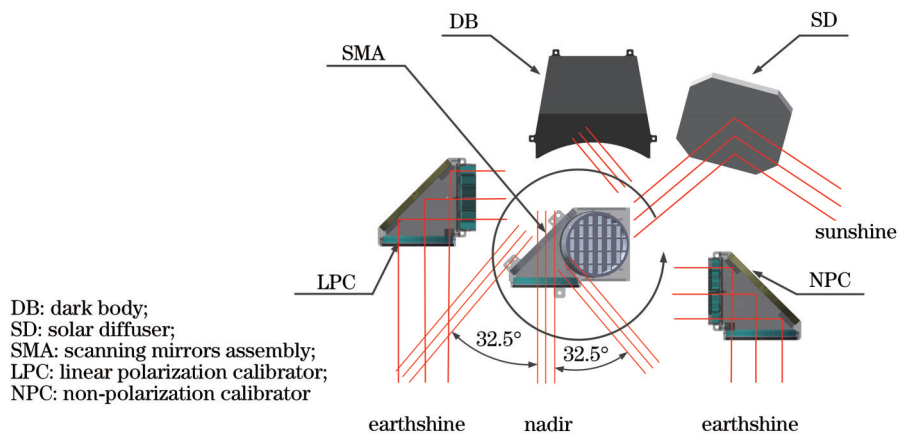


图2 PSAC扫描观测示意图

Fig. 2 Schematic of PSAC scanning observation



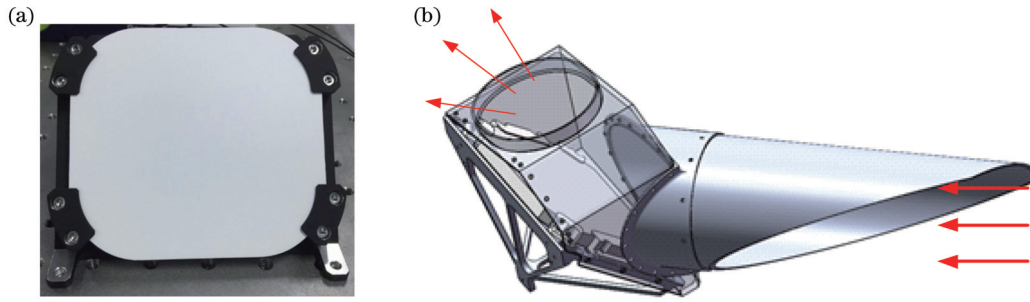


图 3 辐射定标器结构图。(a)漫射板;(b)定标器模型

Fig. 3 Radiation calibrator structure diagram. (a) Solar diffuser; (b) calibrator module

$$I_{N,R_f} = \sqrt{\frac{4kT k_n \Delta f}{R_f}}, \quad (4)$$

$$I_{N,quan} = \frac{V_{N,quan}}{G} = \frac{1}{G} \sqrt{\frac{c^2}{12}}, \quad (5)$$

式中:  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为温度;  $\Delta f$  为信号带宽;  $k_n$  为滤波器带宽系数;  $R_{sh}$  为分流电阻阻抗;  $q$  为电荷量;  $c$  为最低有效位对应的电压;  $I_{ph}$  为光电流;  $I_{dark}$  为暗电流;  $I_{bg}$  为背景辐射响应电流;  $R_f$  为反馈电阻阻抗;  $G$  为系统增益;  $V_{N,quan}$  为等效量化噪声电压。

分析可知, 探测器分流电阻热噪声及反馈电阻热噪声仅与阻值、温度和带宽有关, 探测器散粒噪声只与探测器输出电流(包括光电流、暗电流和背景辐射响应电流)大小和带宽有关, 量化噪声由系统量化位数和增益决定。此外, 前放电路噪声主要与放大器本身噪声特性和信号带宽有关。由此可见, 除光电流散粒噪声与信号强弱有关外, 其余噪声项均与信号强弱无关且量值相对稳定, 理论上可通过建模将上述噪声分离为与信号强弱无关的本底噪声和以信号强弱的函数表示的光电流散粒噪声。

一定辐亮度下的  $I_{ph}$  及其散粒噪声功率  $I_{N,shot}^2$  均与入射辐亮度成线性关系, 可表示为

$$I_{ph}(\lambda) = \frac{\pi D_f^2}{4} \Omega_0 T_0(\lambda) L(\lambda) R(\lambda) \Delta \lambda = KL(\lambda), \quad (6)$$

$$I_{N,shot}^2 = 2q I_{ph} k_n \Delta f = 2q k_n KL(\lambda) \Delta f = aL(\lambda), \quad (7)$$

式中:  $K$  和  $a$  为与入瞳辐亮度无关的量;  $T_0(\lambda)$  为光学系统透过率;  $\Delta \lambda$  为光谱带宽;  $D_f$  为有效孔径大小;  $\Omega_0$  为瞬时视场对应的立体角;  $L(\lambda)$  为仪器接收的目标光谱辐亮度;  $R(\lambda)$  为探测器的响应率。

根据以上部分对 PSAC 的总等效噪声电流  $I_N$  建模。其中, 遥感器正常运行时光电二极管暗电流噪声、短波红外波段背景辐射响应电流噪声、分流电阻热噪声、反馈电阻热噪声、前置放大电路噪声以及量化噪声分别对应的等效电流  $I_{N,dshot}$ 、 $I_{N,gdshot}$ 、 $I_{N,shunt}$ 、 $I_{N,R_f}$ 、 $I_{N,op}$ 、 $I_{N,quan}$  相对固定, 构成遥感器本底噪声等效电流  $I_{N,dark}$ 。因此, 由总噪声功率  $I_N^2$  化简后建立的线性模型为

$$I_N^2 = aL(\lambda) + I_{N,dark}^2 \quad (8)$$

进一步地, 系统输出电压或灰度值为信号输入端电流信号与信号链路总电子学增益  $G$  之积, 结合式(7), 可将式(8)改写为

$$G^2 I_N^2 = G^2 \cdot 2q I_{ph} \Delta f \cdot k_n + G^2 I_{N,dark}^2 \quad (9)$$

再由

$$L(\lambda) = DC_0, \quad (10)$$

$$C_0 = \left[ \frac{\pi D^2}{4} \Omega_0 T_0(\lambda) R(\lambda) \Delta \lambda G \right]^{-1}, \quad (11)$$

式(9)可进一步写为

$$\sigma_{total}^2 = G \cdot 2q \Delta f \cdot k_n \cdot D + \sigma_{dark}^2 = AD + \sigma_{dark}^2 =$$

$$A \frac{L(\lambda)}{C_0} + \sigma_{dark}^2, \quad (12)$$

$$A = G \cdot 2q \Delta f \cdot k_n, \quad (13)$$

式中:  $D$  为遥感器响应灰度值;  $C_0$  为单通道的辐射定标系数, 其与 PSAC 实验室辐射定标中的定义不同<sup>[24]</sup>。  $\sigma_{total}^2$  为灰度值方差表征的噪声功率;  $A$  为独立于信号和本底噪声的系数;  $\sigma_{dark}$  为本底噪声。由此建立 PSAC 的 S-TNPL 模型。采用灰度值替换入瞳辐亮度时表示更直观且系数测试更方便, 二者可以通过绝对辐射定标系数进行转换。根据式(8), 在实验室条件下采用积分球等稳定、均匀的光源, 通过实测本底噪声和不同辐亮度下的总噪声, 理论上能够建立总噪声功率与响应值间的线性关系, 从而拟合得到系数  $A$ 。根据式(13), 通常认为遥感器电子学增益  $G$  在轨变化不明显<sup>[25]</sup>, 此时在实验室测量的系数  $A$  适用于在轨条件。但是, 本底噪声的影响因素较多, 受空间环境和工作条件差异影响, 除量化噪声基本固定外, 其他项均可能发生变化。因此, 在轨信噪比的准确量化需要使用星上本底噪声实测结果。

### 2.2.2 信噪比分析计算

由上述分析可得到由灰度值表征的信噪比计算公式, 即

$$R_{SN} = \frac{\bar{D}}{\sigma_{total}} \approx \frac{D \mp \sigma_{total}}{\sigma_{total}} = \frac{D}{\sigma_{total}} \mp 1 \approx \frac{D}{\sigma_{total}} = \frac{D}{\sqrt{A \cdot D + \sigma_{dark}^2}}, \quad (14)$$

式中:  $R_{SN}$  为遥感器信噪比;  $\bar{D}$  为同光源条件下的响应均值, 表示最小化噪声带来的响应波动。系数  $A$  为实验室测试结果, 本底噪声  $\sigma_{dark}$  为星上实测结果。式(14)基本成立的条件是信噪比远大于 1。由此, 基于 S-TNPL 模型建立的信噪比评估方法, 根据灰度值计

算得到信噪比,直接获得数据质量评价结果。 $R_{SN}$  结果可通过  $R_{SN, dB} = 20 \lg R_{SN}$  换算为对数形式。此外,由式(14)可知,在本底噪声可忽略的情况下信噪比正比于灰度值或辐亮度的平方根,其不同辐亮度值或灰度下的信噪比将可以直接换算: $R_{SN2} = R_{SN1} \sqrt{\frac{L_2}{L_1}} = R_{SN1} \sqrt{\frac{D_{N2}}{D_{N1}}}$ ,其中  $R_{SN1}$  和  $R_{SN2}$  分别为辐亮度  $L_1$  和  $L_2$  对应的信噪比。但是,当本底噪声不能忽略时,上述换算关系不成立,否则会造成低辐亮度下信噪比被高估。

为了获得指定辐亮度下的信噪比,根据灰度值计算的信噪比须经绝对辐射定标系数转换。空间遥感器在轨绝对辐射定标系数的变化会导致指定辐亮度下的信噪比性能发生改变。由式(11)可知,绝对辐射定标系数反比于光学系统透过率  $T_0$  和探测器响应  $R$ 。相同入射辐射条件下系统输出灰度值的变化主要由光学系统及探测器衰变引起<sup>[26]</sup>。目前,式(12)中依据入射辐亮度计算信噪比的模型中的  $C_0$  通过实验室辐射定标获得,认为在遥感器入轨初期没有发生变化,后期依赖星上辐射定标结果更新参数。背景辐射响应  $D_{dark}$  及本底噪声  $\sigma_{dark}$  可能会由于星地工作环境差异等发生变化。PSAC 使用 DB 定标器响应计算得到本底噪声,保证在轨信噪比计算模型的准确性。对于其他未配备 DB 定标器的遥感器,本底噪声可通过在轨观测冷空间获得。

### 2.3 基于漫射板的信噪比评估

PSAC 配有星上辐射定标器,基于在轨辐射定标的漫射板观测数据获取在轨信噪比,验证所提出的基于 S-TNPL 模型的在轨信噪比评估方法的合理性。

考虑到 PSAC 特殊设计的定标器遮光罩的杂光效应可能会导致漫射板反射光不均匀,直接使用 MODIS 和 VIIRS 的基于漫射板单圈扫描响应数据的拟合残差计算遥感器噪声的方法会耦合漫射板表面非均匀因素<sup>[3-4]</sup>,无法正确表征 PSAC 噪声。为了最小化定标器杂光的随机空间分布对信噪比计算结果的影响,选取 PSAC 在轨漫射板扫描观测连续 20 圈同一采样点的响应数据作为信噪比计算样本。通过保证漫射板观测几何及其对应的杂光效应相对固定,可较大程度地规避样本数据中耦合杂光空间变化因素。

使用三次样条拟合连续多扫描圈同一采样点的漫射板响应数据,通过其拟合残差表征遥感器的总噪声功率  $\sigma_{total, SD}^2$ , 计算公式为

$$\sigma_{total, SD}^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M [D_{i,j} - D_{i,j}^{(fit)}]^2 / (M - 4), \quad (15)$$

式中: $i$  和  $j$  分别为在轨对漫射板的扫描圈序号和采样点序号; $M$  和  $N$  分别为扫描圈和采样点数量; $D_{i,j}$  为指定波段的第  $i$  圈第  $j$  个采样点的辐射响应; $D_{i,j}^{(fit)}$  为第  $i$  圈第  $j$  个采样点的响应拟合值; $M - 4$  为使用三次样条拟合的自由度调整因子。为了确保样本的有效性,使用 D-W 检验法,分别对多圈同采样点响应数据样本拟合

残差进行独立性检验<sup>[27]</sup>。

## 3 模型参数获取

### 3.1 实验室参数获取

实验室条件下对 PSAC/HJ-2A 进行了详细的信号-总噪声功率测量和分析,通过拟合实验室辐射测量的灰度值与对应的总噪声功率线性关系获取模型系数  $A$ ,通过实验室绝对辐射定标得到辐射响应系数  $C_0$ <sup>[24]</sup>。定标测试光源使用美国蓝菲公司生产的 Labsphere-1200 型积分球,该积分球内置卤钨灯和氙灯,并配置了溯源于 NIST 的多谱段监视探测器,通过精密光阑实现多级辐亮度输出调节,积分球性能参数如表 2 所示。

表 2 积分球性能参数

Table 2 Performance parameters of integrating sphere

Parameter	Value
Band range /nm	350-2500
Opening diameter /mm	120
Stability /(%·h <sup>-1</sup> )	0.2

为提高测量数据的准确性,降低实验室杂光等因素的影响,PSAC 在测量过程中使用定点观测模式。由于 PSAC 在信号获取链路中使用了交流耦合电路,需要使用斩波器调制积分球光源以保证其正常观测。斩波器转盘经喷消光黑漆处理,由步进电机带动匀速转动,转速匹配 PSAC 工作时序。通过斩波器遮光替代 PSAC DB 组件,可以实现暗背景测量及漂移校正功能。测试现场如图 4 所示,在同一光源辐亮度下,PSAC 连续采集 100 圈数据,分别以辐射响应的均值及方差表征信号和总噪声功率。

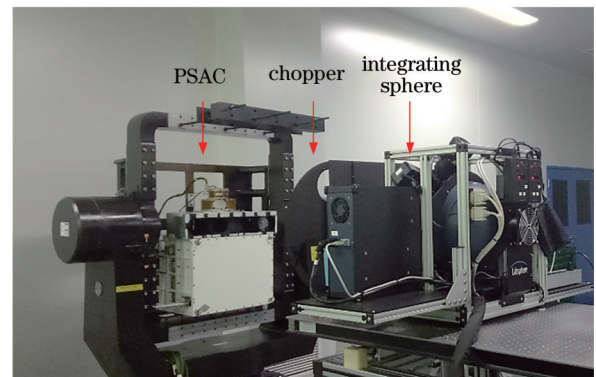


图 4 实验室模型参数获取现场照片

Fig. 4 Photo of model parameter acquisition in laboratory

测量中光照区响应计算公式为

$$\bar{D}_{light} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N D_{light, i, j} / (MN). \quad (16)$$

在计算遥感器噪声时,为了避免电磁波动等因素的干扰,辐射响应噪声功率计算选用 90 个采样点辐射响应信号的方差:

$$\sigma_{\text{noise}}^2 = \sum_{j=1}^N (D_{\text{light},j} - \bar{D}_{\text{light}})^2 / (N-1). \quad (17)$$

使用最小二乘法,将不同光源辐亮度下的信号与

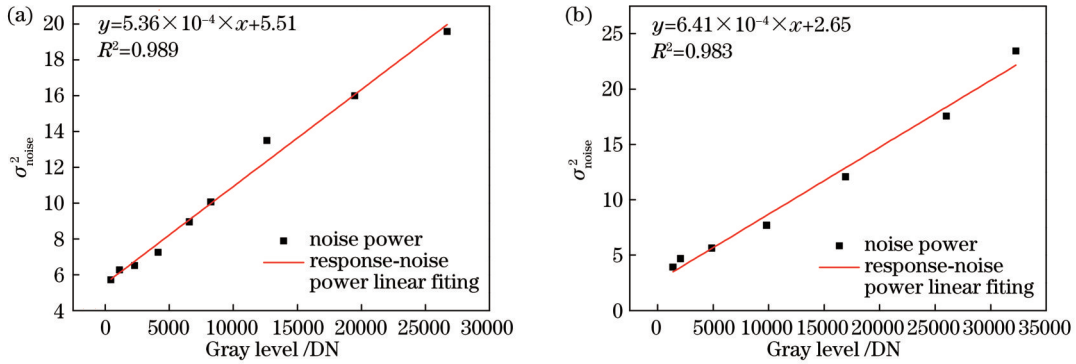


图 5 信号-总噪声功率线性拟合曲线。(a) 865 nm 波段;(b) 1610 nm 波段

Fig. 5 Signal-total noise power linear fitting curves. (a) 865 nm band; (b) 1610 nm band

### 3.2 在轨本底噪声获取

PSAC 在轨本底噪声依靠 DB 定标器获取。如图 2 所示,PSAC 在轨执行扫描观测任务过程中,扫描镜每转动一圈都会观测 DB 定标器,并在转动至其中间位置时 PSAC 执行直流恢复功能,建立新的零辐射响应基准,保证所有通道本底灰度均值稳定在  $\pm 30$  DN 以内,从而实现本底及漂移动态抑制,保证遥感器较宽的有效动态范围及长期稳定工作<sup>[23]</sup>。在直流恢复前后均采集本底信号,用于本底校正,在每个扫描圈获取 32 个采样点的有效本底数据,连续多圈的本底数据将用于本底噪声统计,在轨本底信号均值  $\bar{D}_{\text{dark}}$  与本底噪声功率  $\sigma_{\text{dark}}^2$  计算公式为

$$\bar{D}_{\text{dark}} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N D_{\text{dark},i,j} / (MN), \quad (18)$$

$$\sigma_{\text{dark}}^2 = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (D_{\text{dark},i,j} - \bar{D}_{\text{dark}})^2 / (MN-1). \quad (19)$$

## 4 结果与讨论

所提出的基于 S-TNPL 模型的遥感器在轨信噪比评估方法,可以准确换算遥感器在不同辐亮度下的信噪比结果,评估其任意响应下的数据质量。结合使用实验室辐射测量数据和遥感器在轨本底噪声建立 S-TNPL 模型,计算得到 PSAC-A 多通道的信噪比随辐

总噪声功率进行线性拟合,获取其斜率即信噪比评估模型系数 A。图 5 所示为 865 nm 和 1610 nm 波段的实验数据及拟合结果,拟合优度分别为 0.989 和 0.983。

亮度变化情况如图 6 所示。遥感器信噪比和目标辐亮度正相关,后期由于散粒噪声在总噪声中占比下降,曲线增速趋于平缓。PSAC 各通道在典型辐亮度下的信噪比评估结果如表 3 所示。由 2.2 节遥感器信号链路的噪声特性分析可知,PSAC 各波段的噪声类型和产生机制完全一致,但是在轨观测时目标辐亮度差异导致光电流及其产生的散粒噪声不同,且各波段的增益设置以及探测器热噪声等不同,因此各波段信噪比存在差异。

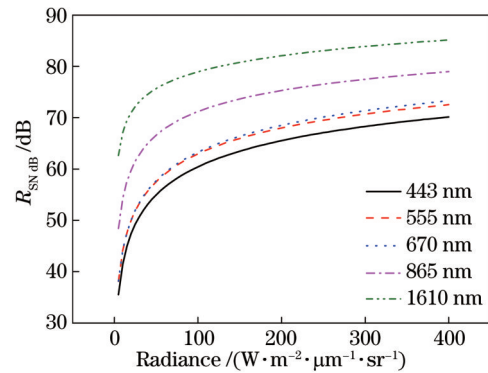


图 6 不同辐亮度下 PSAC 在轨信噪比评估结果

Fig. 6 PSAC on-orbit SNRs evaluation results under different radiances

表 3 PSAC 在典型辐亮度下的信噪比评估结果

Table 3 Evaluation results of PSAC SNRs under typical radiance

Band /nm	Typical radiance $L_{\text{typ}} /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	Absolute radiation response coefficient $C_0 /$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ )	SNR specification $R_{\text{SNspe}} / \text{dB}$	SNR calculated by model $R_{\text{SNdB}} / \text{dB}$
443	387.9	$8.00 \times 10^{-3}$	45	69.94
555	371.5	$8.14 \times 10^{-3}$	45	72.07
670	293.4	$6.07 \times 10^{-3}$	45	71.21
865	187.2	$3.95 \times 10^{-3}$	45	74.92
1610	45.4	$9.39 \times 10^{-4}$	45	75.19



为了验证基于 S-TNPL 模型的传感器在轨信噪比评估方法的合理性,对使用 PSAC 在轨漫射板观测数据计算的信噪比进行对比分析。PSAC-A 的 9 个波段对漫射板单圈 16 个采样点的响应如图 7 所示,各波段响应值随着采样点序号增加而减小,这是由扫描观测时漫射板反射率随采样点位置变化导致的。以 865 nm 和 1610 nm 波段为例,PSAC-A 在轨辐射定标观测漫射板的连续 20 次同采样点响应,此时太阳天顶角相对变化约  $0.5^\circ$ ,其对应的拟合残差结果如图 8 所示。残差呈现随机变化,说明采样位置一致的漫射板响应数据可基本规避杂光空间随机分布带来的干扰,保证在轨信噪比结果的准确获取。

分别使用 PSAC-A 在轨漫射板的观测数据和 S-TNPL 模型计算 5 个波段相同辐射响应对应的噪声功率和信噪比,结果对比如表 4 所示。两种评估方法的结果相对偏差为  $-0.62\% \sim 6.27\%$ ,基本验证了所提出在轨信噪比评估方法的合理性。除了 443 nm 波段外,其余波段漫射板法的计算结果均略大于 S-TNPL 模型的结果,而且相对偏差基本与遮光罩内层喷涂的消光黑漆的光谱反射率正相关,说明偏差是由无法完全剥离样本数据中耦合的遮光罩杂光随机分布因素导致的。

表 4 中未列举的 PSAC 其他 4 个波段目前受限于实验室测试条件,无法准确获取模型参数。410 nm 波段由于实验室定标所使用的氙灯光源的非稳定性,实测噪声被明显高估,而卤钨灯光源在短波波段的辐亮

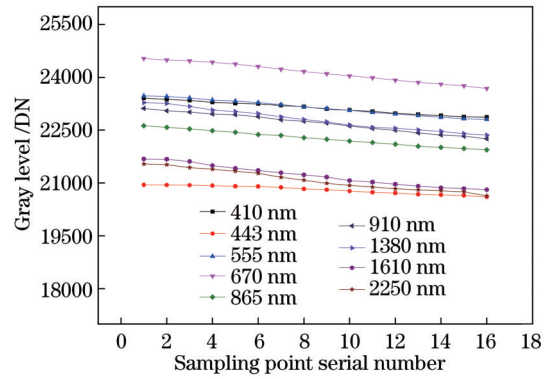


图 7 漫射板单次扫描采样点响应

Fig. 7 Solar diffuser sampling points response in a single scanning

度有限,无法很好地覆盖对应通道的动态范围,使得光信号散粒噪声相对本底噪声量级较小,导致模型参数拟合误差较大;910 nm 和 1380 nm 波段在实验室开放条件下,辐射响应数据受水汽波动影响严重,导致实测噪声被明显高估,无法准确获得两个通道的噪声功率;2250 nm 波段,由于 PSAC 使用主被动相结合的制冷方案来降低背景辐射和暗电流及探测器热噪声,实验室常温条件下无法达到在轨工作温度条件,2250 nm 波段探测器光敏面温度较在轨时高约  $30^\circ\text{C}$ ,背景辐射响应电流及暗电流的噪声远大于在轨状态,实验室测量结果无法正确表征此波段在轨的本底噪声及散粒噪

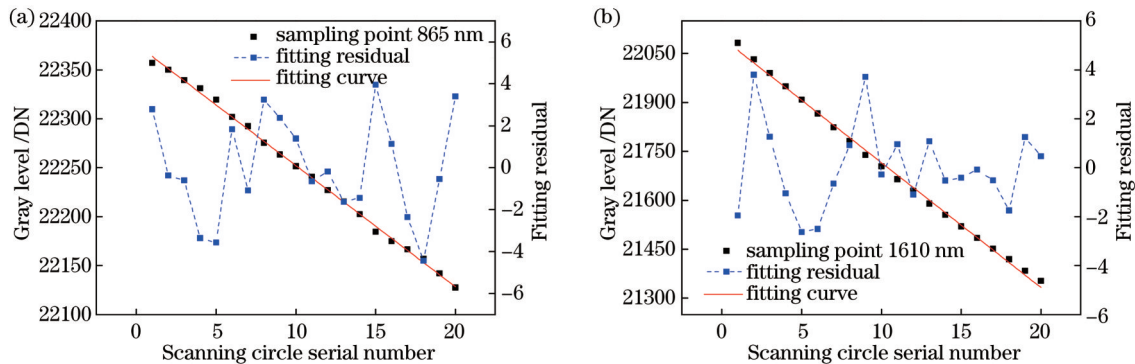


图 8 漫射板同采样点多次观测响应及拟合残差。(a) 865 nm 波段;(b) 1610 nm 波段

Fig. 8 Multiple observation solar diffuser responses of one sampling point and fitting residuals. (a) 865 nm band; (b) 1610 nm band

表 4 两种信噪比评估方法的结果比较

Table 4 Comparison of results of two SNR evaluation methods

Band /nm	Model parameter A	Dark noise power $\sigma_{\text{dark}}^2$	Mean value of solar diffuser response $\bar{D}$	Total noise power based on model $\sigma_{\text{total}}^2$	Total noise power based on solar diffuser $\sigma_{\text{total,SD}}^2$	SNR based on model	SNR based on solar diffuser	Relative deviation /%
443	$1.34 \times 10^{-3}$	26.99	21567	55.89	55.21	2884.84	2902.56	-0.62
555	$7.92 \times 10^{-4}$	14.27	23443	32.82	35.07	4092.07	3958.73	3.36
670	$7.64 \times 10^{-4}$	25.65	25033	44.77	47.54	3741.27	3630.64	3.03
865	$5.36 \times 10^{-4}$	5.41	22557	17.49	18.83	5393.69	5197.96	3.75
1610	$6.41 \times 10^{-4}$	2.16	21107	15.68	17.72	5330.32	5014.12	6.27

声情况。

对于 PSAC, 忽略其本底噪声会对不同辐亮度下信噪比换算结果带来较大的误差。以 443 nm 和 555 nm 为例, 将两个波段在典型辐亮度下的信噪比作为基准, 分别使用所提出的包含本底噪声项的 S-TNPL 模型, 以及 Hu 等<sup>[18]</sup>使用的忽略本底噪声的

SPSRR 计算方法, 比较两个波段在不同辐亮度下的信噪比换算结果。从图 9 可以看到: 忽略本底噪声会导致低端辐亮度信噪比被明显高估, 而高端辐亮度信噪比会被低估; 在所提出的基于 S-TNPL 模型的信噪比评估方法中, 本底噪声项的加入保证了不同辐亮度下信噪比换算结果的准确性。

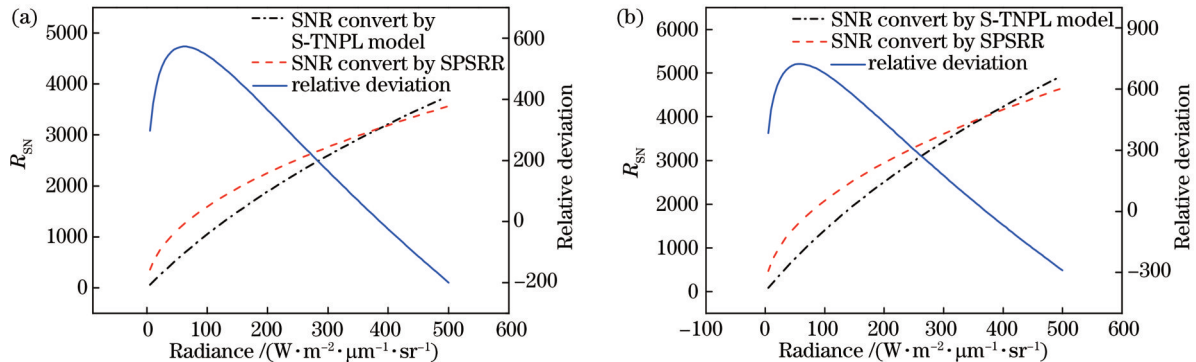


图 9 两种信噪比换算结果对比。(a) 443 nm 波段; (b) 555 nm 波段

Fig. 9 Comparison of two SNR conversion results. (a) 443 nm band; (b) 555 nm band

在使用所提信噪比评估方法评估遥感器在指定辐亮度下的信噪比时, 如式(14)所示, 需要结合使用辐射定标系数  $C_0$  完成辐亮度到灰度值的转换。目前评估模型中使用的  $C_0$  是实验室定标结果, 认为遥感器在轨初期性能未发生明显变化。然而, 在遥感器全寿命周期内, 随着在轨时间增加, 受到在轨恶劣运行环境的影响, 主要来自光学组件及探测器的衰退会影响遥感器的性能<sup>[23]</sup>。此外, 虽然通过在轨辐射定标可以更新辐射响应系数  $C_0$ , 但是定标结果的误差也可能会影响信噪比评估结果的准确性。假设  $C_0$  可能发生  $\pm 10\%$  的相对变化, 计算得到的 PSAC 各波段在典型辐亮度  $L_{typ}$  下的信噪比相对变化结果如图 10 所示。各波段信噪比结果随  $C_0$  变化趋势一致, 波段间本底噪声功率及模型参数  $A$  的差异导致  $R_{SN}$  相对变化斜率存在一定偏差。当  $C_0$  增大 10% 时, 各波段信噪比相对降低 5.23%~7.31%, 说明  $C_0$  的小范围变化不会严重影响本文方法的信噪比评估效果。此外, PSAC 及各遥感器可通过更新在轨辐射定标结果, 确保基于 S-TNPL 模型的在轨信噪比评估结果的有效性, 体现了所提出的在轨信噪比评估方法对遥感器在轨辐射性能衰退具有良好的适应性。

所提出的基于信号-总噪声功率的遥感器在轨信噪比评估方法, 可根据遥感器任意单次观测响应值评估信噪比。如式(14)所示, 信噪比估计的相对偏差可能达到  $1/R_{SN}$ , 当遥感器信噪比远大于 1 时, 此偏差可忽略不计。如图 6 所示, 当遥感器信噪比随着辐亮度降低急剧下降时, 所提评估方法的相对偏差影响不能忽略。

## 5 结 论

以 PSAC 为研究对象, 根据噪声与信号的相关性进行噪声分离, 建立了 S-TNPL 模型, 对 PSAC 的在轨信噪比进行了评估, 并与星上漫射板法计算的信噪比

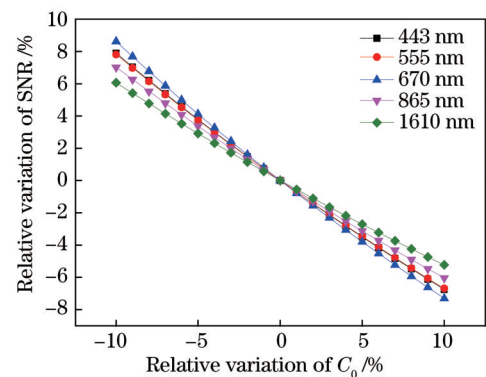


图 10  $C_0$  变化导致信噪比估算误差

Fig. 10 SNR estimation error caused by  $C_0$  change

进行对比分析。通过对比两种方法评估的 PSAC 在轨信噪比结果, 发现其相对偏差小于 7%, 展现出较好的一致性, 证明所提在轨信噪比评估方法的合理性。

与已有在轨信噪比评估方法相比, 所提出的基于 S-TNPL 模型的在轨信噪比评估方法不再依赖于均质性区域场景, 可以获得所有在轨观测数据的信噪比评估结果, 摆脱了传统方法仅能获得特定条件下信噪比的限制; 通过更新在轨绝对辐射定标系数, 可以方便建立辐亮度与信噪比的对应关系, 对遥感器在轨辐射性能衰退具有良好的适应性, 为遥感器长期在轨数据质量监测提供了支撑。此外, 该信噪比分析方法和评估模型可尝试推广到其他类型光学遥感器, 有望成为其在轨信噪比评估的新途径。

## 参 考 文 献

- [1] Zavyalov V, Esplin M, Scott D, et al. Noise performance of the CrIS instrument[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, 118(23):



- 13108-13120.
- [2] Gao B C. An operational method for estimating signal to noise ratios from data acquired with imaging spectrometers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 43(1): 23-33.
- [3] 朱博, 王新鸿, 唐伶俐, 等. 光学遥感图像信噪比评估方法研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2010, 25(2): 303-309.  
Zhu B, Wang X H, Tang L L, et al. Review on methods for SNR estimation of optical remote sensing imagery[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010, 25(2): 303-309.
- [4] Angal A, Xiong X J, Sun J Q, et al. On-orbit noise characterization of MODIS reflective solar bands[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9(1): 094092.
- [5] Twedt K A, Lei N, Xiong X X. On-orbit noise characterization of SNPP VIIRS reflective solar bands[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10402: 598-606.
- [6] Morfitt R, Barsi J, Levy R, et al. Landsat-8 operational land imager (OLI) radiometric performance on-orbit[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(2): 2208-2237.
- [7] Scaramuzza P L, Markham B L, Barsi J A, et al. Landsat-7 ETM on-orbit reflective-band radiometric characterization[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(12): 2796-2809.
- [8] Hooker S B, Firestone E R, Acker J G, et al. SeaWiFS technical report series. Volume 22: prelaunch acceptance report for the SeaWiFS radiometer[J]. *NASA Technical Memorandum*, 1994, 22: 104566.
- [9] Eplee R E, Jr, Patt F S, Barnes R A, et al. SeaWiFS long-term solar diffuser reflectance and sensor noise analyses[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(5): 762-773.
- [10] Fournie B, Bracco G, Lafrance B, et al. PARASOL in-flight calibration and performance[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5435-5451.
- [11] 高连如, 张兵, 张霞, 等. 基于局部标准差的遥感图像噪声评估方法研究[J]. *遥感学报*, 2007, 11(2): 201-208.  
Gao L R, Zhang B, Zhang X, et al. Study on the method for estimating the noise in remote sensing images based on local standard deviations[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2007, 11(2): 201-208.
- [12] Chappell A, Seaquist J W, Eklundh L. Improving the estimation of noise from NOAA AVHRR NDVI for Africa using geostatistics[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(6): 1067-1080.
- [13] Delvit J M, Leger D, Roques S, et al. Signal-to-noise ratio assessment from nonspecific views[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4541: 370-381.
- [14] 陈秋林, 薛永祺. OMIS 成像光谱数据信噪比的估算[J]. *遥感学报*, 2000, 4(4): 284-289.  
Chen Q L, Xue Y Q. Estimation of signal-noise-ratio from data acquired with OMIS[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(4): 284-289.
- [15] Acito N, Diani M, Corsini G. Signal-dependent noise modeling and model parameter estimation in hyperspectral images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 2957-2971.
- [16] Sun L. Signal-dependent noise parameter estimation of hyperspectral remote sensing images[J]. *Spectroscopy Letters*, 2015, 48(10): 717-725.
- [17] 傅鹏, 孙权森, 纪则轩, 等. 一种遥感图像信噪比评估和度量准则[J]. *测绘学报*, 2013, 42(4): 559-567.  
Fu P, Sun Q S, Ji Z X, et al. A method of SNR estimation and comparison for remote sensing images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(4): 559-567.
- [18] Hu C M, Feng L, Lee Z P, et al. Dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6045-6062.
- [19] 张靖玮, 丘仲锋. 针对海洋水体的 FY-3D MERSI II 数据质量评估[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1201002.  
Zhang J W, Qiu Z F. Evaluation of data quality of FY-3D satellite sensor MERSI II over marine waters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1201002.
- [20] Lei X F, Liu Z H, Tao F, et al. Data preprocessing methods and procedures for the wide swath polarized scanning atmospheric corrector onboard HJ-2A/B satellites[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12169: 2029-2034.
- [21] Xie Y Q, Hou W Z, Zhu S F, et al. Columnar water vapor retrieval by using data from the polarized scanning atmospheric corrector (PSAC) onboard HJ-2 A/B satellites[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1376.
- [22] 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<sub>2.5</sub> from space[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2022, 286: 108217.
- [23] Li Z Q, Xie Y Q, Hou W Z, et al. In-orbit test of the polarized scanning atmospheric corrector (PSAC) onboard Chinese environmental protection and disaster monitoring satellite constellation HJ-2 A/B[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-17.
- [24] 刘振海, 骆冬根, 邹鹏, 等. 一种信号漂移动态校正方法与装置: CN108363445A[P]. 2018-08-03.  
Liu Z H, Luo D G, Zou P, et al. A kind of signal drift dynamic correcting method and device: CN108363445A [P]. 2018-08-03.
- [25] Xiong X X, Chen N, Li Y H, et al. Assessments and applications of Terra and Aqua MODIS on-orbit electronic calibration[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9972: 291-300.
- [26] 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): 0312002.  
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): 0312002.
- [27] 王黎明, 陈颖, 杨楠. 应用回归分析[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2008: 114-116.  
Wang L M, Chen Y, Yang N. *Applied regression analysis*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 2008: 114-116.