

## 星载差分吸收光谱仪噪声分析及处理方法

张泉<sup>1,2</sup>, 黄书华<sup>1\*</sup>, 田禹泽<sup>1,2</sup>, 鲁月林<sup>1,2</sup>, 赵敏杰<sup>1</sup>, 周海金<sup>1</sup>, 赵欣<sup>1</sup>, 王煜<sup>1</sup>, 司福祺<sup>1</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 噪声对星载大气痕量气体差分吸收光谱仪信噪比具有重大影响, 其是衡量光谱仪成像质量和痕量气体反演能力的标准。为量化并去除光谱仪系统噪声从而提高信噪比, 分析了光谱仪噪声来源并给出了相应噪声模型, 在此基础上建立了光谱仪信噪比模型。研究了入射光强度、积分时间和系统增益对系统信噪比的影响。通过光谱仪辐射定标试验数据对不同工作模式和不同参数与信噪比的关系进行了对比验证。并提出主要系统噪声的处理方法: 利用线性拟合取截距法确定系统偏置噪声; 在地面利用暗电流温度相关性获得温度修正因子实现载荷在轨暗电流校正; 在探测器响应线性范围内利用两点校正法对 PRNU 噪声进行修正。结果表明: 全幅成像模式下, 可见 1 通道电子学偏置噪声响应 DN 值 2 625, 可见 2 通道电子学偏置噪声响应 DN 值 2 763; 暗电流噪声在 CCD 成像面温度高于 0 °C 时占主要部分, 温度下降至 -20 °C 时其余噪声起主导作用, 验证了 CCD 最佳制冷温度; 光谱仪信噪比随着入射光响应和积分时间的增加而增大, 系统增益不会影响信噪比; PRNU 噪声通过校正得到明显改善, 由 3.32% 下降到 0.47%, 提高了光谱仪成像质量。该噪声分析和处理方法对后期光谱数据的痕量气体反演提供帮助。

**关键词** CCD; 暗电流噪声; 成像光谱仪; PRNU; 信噪比

**中图分类号:** TH744; TN386.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)09-2976-06

### 引言

随着地球环境问题的日益严峻, 痕量气体监测越来越受到广泛关注, 已经从地基、空基遥感发展到卫星遥感。卫星遥感以其视点高、视域广、数据采集快和可重复、连续观察的特点占据着重要地位。目前, 欧洲在痕量气体探测领域处于世界领先地位, 已有多颗卫星在轨运行, 如搭载于欧空局 RSR-2 卫星的全球臭氧测量系统 (global ozone monitoring experiment, GOME) 于 1995 年发射成功, 通过测量地球紫外到可见波段太阳散射光, 能够同时反演全球 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> 等大气痕量气体。2002 年发射的 ENVISAT 卫星搭载的 SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) 是一种外缘和天底观察成像频谱仪, 可观测全球范围内多种痕量气体。2004 年发射 EOS-Aura 卫星上搭载了荷兰-芬兰天底观测光谱仪全球 O<sub>3</sub> 监测系统 (Dutch-Finnish nadir-pointing Spectrometer

OMI)<sup>[1]</sup>, 采用差分吸收光谱 (DOAS) 算法, 可反演 O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, HCHO, BrO 和 OClO 等痕量气体。荷兰气象局 KNMI 研制的新一代对流层探测器 (Tropospheric Monitoring Instrument TROPOMI)<sup>[2]</sup> 计划于今年发射, 将成为观测全球痕量气体分布的重要遥感设备之一。国内, 中国科学院安徽光学精密机械研究所自主研发的大气痕量气体差分吸收光谱仪<sup>[3-4]</sup> (environment monitoring instrument, EMI) 将于明年搭载 ×× 卫星发射入轨。载荷在轨运行后, EMI 将为我国环境监测、气象、大气物理等领域提供重要科学数据。

该遥感设备是一种基于面阵 CCD 的成像光谱仪, 目的是探测地球表面微弱的光谱信号, 属于高精密度测量仪器, 对信号质量有很高的要求。然而, 原始测量信号中会夹杂着噪声信号, 如散粒噪声、暗电流噪声、读出噪声等<sup>[5-8]</sup>。噪声的存在会降低系统检测灵敏度和信噪比, 甚至会湮没有用光谱信号。因此, 有必要分析系统的噪声和噪声模型, 评估影响系统信噪比的各种因素。文献<sup>[9]</sup>定量评估了时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素。文献<sup>[10]</sup>通过建立测试系

收稿日期: 2017-09-20, 修订日期: 2018-01-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0200400), 国家自然科学基金项目 (41605017, U1407135), 高分专项应用共性关键技术项目 (50-Y20A38-0509-15/16) 资助

作者简介: 张泉, 1988 年生, 中国科学技术大学博士研究生 e-mail: qzhang@aiofm.ac.cn

\* 通讯联系人 e-mail: hsh@aiofm.ac.cn

统研究了基于相机输出图像测试相机噪声的方法。通过分析可减小噪声的处理方法,可提高成像系统信噪比,为后期数据反演提供可靠保障。

为提高星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的数据质量,本文通过系统电子学链的特性建立了噪声模型并对主要类型噪声进行了量化分析。其次,通过辐射定标试验测试了系统噪声并给出试验结果。最后,对系统噪声进行了分析和处理,给出了有效降低噪声的方法,通过处理结果说明了方法的可行性。

## 1 EMI 仪器描述

EMI 是一种基于二维面阵 CCD 阵列的遥感探测设备<sup>[12-13]</sup>,其中一维记录大气辐射的光谱分布信息,另一维记录辐射所在区域的空间信息,可定量反演地球目标区域内痕量气体浓度分布及运输过程。EMI 包括 3 个子系统:光机头部,电子学单元和温控单元。光机头部以天底推扫方式探测地面可见光和紫外波段太阳后向散射辐射。EMI 的宽视场望远镜将太阳散射光引入 4 个 offner 光栅光谱仪,每个光谱仪使用一块 CCD 探测器,总观测波长范围 240~710 nm,光谱分辨率优于 0.5 nm。面阵 CCD 温控单元通过集成在 CCD 内部半导体制冷器进行温度控制,控温稳定度 0.01 K。电子学单元接收并执行光谱仪成像参数设置,并将探测原始数据打包后传输至卫星平台。标准模式下空间分辨率为 13 km×48 km,可探测追踪城市区域大气污染源。EMI 高光谱性能能够提高其探测器的准确性和大气痕量气体的反演精度,同时能够长期进行准确的辐射定标和波长定标。EMI 每日随××卫星绕地飞行 14 圈,可提供覆盖全球的痕量气体观测。

表 1 EMI 仪器性能参数

Table 1 The EMI instrument properties

Item	Parameter
Spectral range	UV1: 240~315 nm; UV2: 311~403 nm; VIS1: 401~550 nm; VIS2: 545~710 nm
SNR*	UV: >200; VIS: >1 300
Spectral Resolution	0.3~0.5 nm
IFOV	114°(Cross-track); 0.5°(Along-track)
Spatial Resolution	48 km(Cross-track)× 13 km(Along-track)
Quantitative Level	14 bits

\*: UV: Radiance at 1.27  $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$ ; VIS: Radiance at 10.89  $\mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{nm}^{-1}$

## 2 噪声分析与信噪比模型

光谱仪应具有较高的信噪比才能满足后期数据反演的要求。噪声是光谱图像信号中除有效信号外诸多因素产生的无用信号总和,是影响信噪比的关键因素。

### 2.1 噪声来源及信噪比模型

根据上文对星载光谱仪的描述可知,噪声源可分为以下几类:暗电流噪声、散粒噪声、FPN 噪声和读出噪声。暗电流噪声等于暗电流的均方根。暗电流是由 CCD 内部像元热激发产生的自由电子累积形成,且因像元而异。暗电流的产生是 CCD 探测器的固有特性,具有很强的温度相关性,一般来说温度每升高 5~7 K,暗电流约增加一倍。根据阿列纽斯定律(Arrhenius law),CCD 暗电流与热力学温度  $T$  的关系为

$$\frac{DC(T)}{DC_0(T_0)} = 122T^3 \exp\left(-\frac{E_g}{2k_B T}\right) \quad (1)$$

其中,  $DC(T)$  为 CCD 在温度  $T$  下的暗电流,  $DC_0(T_0)$  为温度 293 K 下暗电流,  $E_g$  为半导体硅的能隙,  $k_B$  为玻尔兹曼常数。

从粒子角度,光和电都是由粒子运动所形成。对光来说,是光子的运动;对电来说,是电荷的运动。太阳发光的物理过程是随机发射光子,大量光子构成太阳的亮度。用发射速率表示太阳单位时间内发射的光子数,发射速率基本上是不变的。但是由于 CCD 探测器感光面的尺寸只有不到 3 cm,单位时间内只有一定数量的光子入射到 CCD 上。在这种情况下,光子数的波动就不能忽略,形成了散粒噪声。在光强不变的情况下,散粒噪声决定了 CCD 的信噪比,其表达式如下

$$SNR_{\text{CCD}} = \frac{n}{\sqrt{n}} = \sqrt{n} \quad (2)$$

其中,  $SNR_{\text{CCD}}$  为 CCD 探测器的信噪比;  $n$  为探测器接收到的粒子数。从式中可以看出,每个 CCD 像元接收到的粒子数越多,其信噪比就越高。

FPN 噪声是由像元制作工艺如像元尺寸和表面处理差异等因素产生,包括两种:一种为无光照条件下各像元暗电流响应不均匀造成的 FPN 噪声,又称暗信号响应非均匀性(DSNU);另一种为像元对光响应非均匀造成的 FPN 噪声,又称像元响应非均匀性(PRUN)。星载光谱仪在轨长期工作过程中由于 FPN 噪声的存在,会使 CCD 动态范围下降,影响光谱仪的整体性能,尤其是在紫外波段弱光成像。FPN 噪声是 CCD 探测器固有特性,不随时间和空间变化,在卫星发射前可通过辐射定标进行校正。

读出噪声是 CCD 信号读出电路引入的附加噪声,叠加在有用信号之中。读出噪声与温度、积分时间均无关系,在模拟视频信号转化为数字信号时产生。在无光照条件下,通过不同积分时间信号线性拟合取截距的方法得到系统偏置信号,偏置信号的均方根即可视为系统读出噪声。

星载差分吸收光谱仪系统总噪声可表示为

$$N_{\text{total}} = \sqrt{N_{\text{dc}}^2 + N_{\text{shot}}^2 + N_{\text{FPN}}^2 + N_{\text{readout}}^2} \quad (3)$$

其中,  $N_{\text{total}}$  为系统总噪声,  $N_{\text{dc}}^2$  为暗电流噪声,  $N_{\text{shot}}^2$  为散粒噪声,  $N_{\text{FPN}}^2$  为 FPN 噪声,  $N_{\text{readout}}^2$  为读出噪声。由于系统总噪声可通过光谱图像数据得到,在下文分析中,将总噪声定义为每个像元信号的标准偏差。

入射到 CCD 上光子在光电效应作用下以正比于光子效率的速度产生自由电子。由于受到探测器空间维和光谱维 Smiles 效应影响,入射到 CCD 上了光子数与入射光波长  $\lambda$  和

入射角  $\alpha$  均有关, 像元相应函数  $PRF(i, j)$  表征了其对应关系

$$PRF(i, j) = (f(\lambda, \alpha), g(\lambda, \alpha)) \quad (4)$$

单位时间入射到像元上的光子数可表示为

$$S_{\text{photons}}(i, j, t) = \iint S_{\text{total}}(\lambda, \alpha, t) \cdot PRF(i, j) d\lambda d\alpha \quad (5)$$

对于积分时间为  $\Delta t$  产生总电子数为

$$S_{\text{electrons}} = S_{\text{photons}}(i, j, t) QE(\lambda) PRNU(i, j, \lambda) \Delta t \quad (6)$$

其中,  $QE(\lambda)$  为在波长  $\lambda$  的量子效率,  $PRNU(i, j, \lambda)$  为像元响应非均匀性。

像元另外的电荷产生源是暗电流, 其具有很强温度相关性。综上, CCD 中产生信号可表示为

$$S_{\text{CCD}}(i, j) = S_{\text{electrons}}(i, j) + S_{\text{decurrent}} \quad (7)$$

CCD 信号经过电子学读出, 转化为数字量  $DN(i, j)$ , 可表示为

$$DN(i, j) = (S_{\text{CCD}}(i, j) f_{\text{CCD}} f_{\text{CDS}} + O_{\text{CDS}}) f_{\text{ADC}} \quad (8)$$

式中  $f_{\text{CCD}}$  为电荷-电压转换因子,  $f_{\text{CDS}}$  为模数转换增益因子,  $O_{\text{CDS}}$  为电子学偏置。

星载光谱仪信噪比为一定光强条件下测试图像中每个谱段信号平均值与噪声值之比。信号平均值由  $n(n > 100)$  条光谱波长在  $\lambda$  处信号幅值  $DN_i(\lambda)$  取平均得到, 与其均方根的比值作为在波长  $\lambda$  处的信噪比 SNR, 即

$$\text{SNR} = \frac{\bar{S}}{N} = \frac{\overline{DN_i(\lambda)}}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (DN_i(\lambda) - \overline{DN_i(\lambda)})^2}{n-1}}} \quad (9)$$

$$\text{其中, } \overline{DN_i(\lambda)} = \frac{\sum_{i=1}^n DN_i(\lambda)}{n}.$$

### 3 信噪比特性分析及噪声处理

#### 3.1 信噪比的影响因素

利用灯-板定标系统对星载成像光谱仪进行信噪比测试, 利用式(9)计算光谱图像信噪比验证, 通过定标试验测试图像响应 DN 值与信噪比的关系。针对不同幅亮度输出取 500 幅图像, 每个等级选取中心视场像元, 线性拟合中心视场信噪比与响应 DN 值, 两者线性拟合相关系数为 0.944, 如图 1 所示。在成像模式相同、增益和积分时间一致的情况下, 光谱仪信噪比随着响应 DN 值的增加而线性增加。由于幅亮度的增加使光子散粒噪声变大, 不同像元的信噪比呈现出扩散趋势。

星载光谱仪将 AD 转换芯片中内置的增益参数定义为系统增益, 其目的是通过调整增益值避免图像饱和或过于微弱, 增加图像的可分辨度。系统增益属于数字形式增益, 是将 AD 转换后的数字信号按设置参数进行放大, 放大倍数最大可达 5.8 倍。由于 AD 转换后的信号是光信号和噪声信号的总和, 也就是说系统增益是将光信号和噪声信号同比例放大, 所以配置星载光谱仪系统增益不会影响其信噪比, 如

图 2 所示。

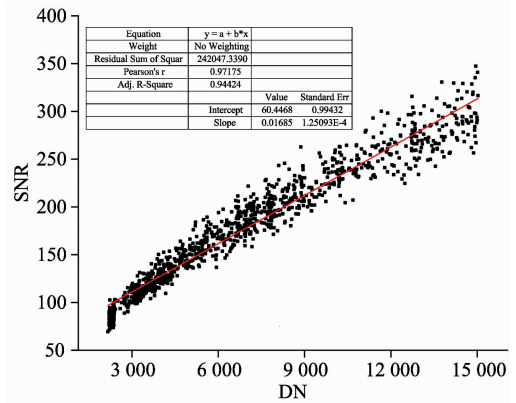


图 1 DN 值和 SNR 拟合曲线图

Fig. 1 Fitting curve of DN value and SNR

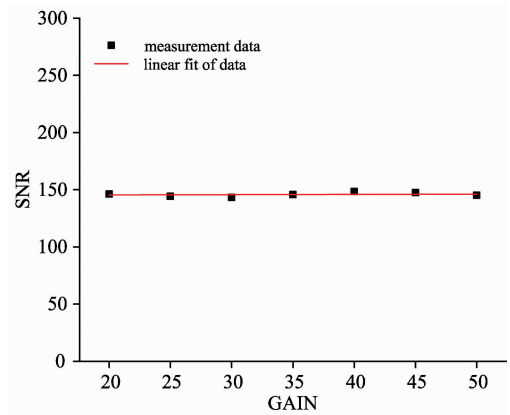


图 2 系统增益和 SNR 拟合曲线图

Fig. 2 Fitting curve of system Gain and SNR

为验证积分时间对信噪比的影响, 在入射光强度和系统增益不变的情况下, 对不同积分时间下的信噪比进行定标。积分时间是将 CCD 成像区的曝光时间, 在此时间内对光电转换产生的信号电荷叠加, 所以 SNR 随积分时间的增加呈现倍数增长。如图 3 所示, 信噪比随积分时间的增加而增大, 呈现出良好的线性关系。

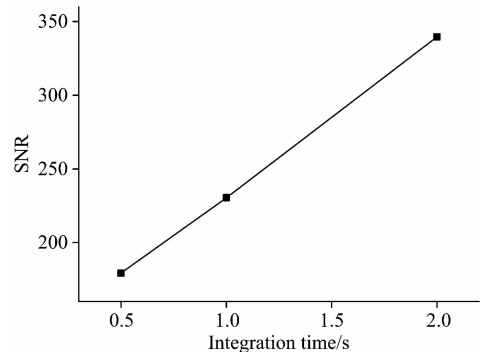


图 3 积分时间和 SNR 拟合曲线图

Fig. 3 Fitting curve of exposure time and SNR

### 3.2 电子学偏置

电子学偏置包括 ADC 模数转换器偏置和系统电路偏置。前者是人为加入的偏置(约为 30 mV)，目的是提升光谱仪弱光检测能力，防止弱光信号淹没在噪声之中；后者为系统电路总读出偏置。偏置信号属于 FPN 噪声，并不是暗电流产生的信号，与温度无关。

在 0 级数据中包含的电子学偏置，可认为是在零秒曝光时间下信号响应值(去除了暗电流信号)，但是 EMI 的曝光时间分为 0.5, 1, 2 和 4 s，无 0 s 曝光情况。由于相同模式下积分时间与信号响应值成线性关系，利用两者线性关系拟合出 0 s 积分时间响应，即响应曲线取截距法。将 0 级数据扣除总电子学偏置即可实现校正。电子学偏置校正以可见通道 1、2 为例，如图 4 所示。可以看出，在成像模式相同的条件下，响应值与曝光时间成良好线性关系，两通道稍有差异。将其进行线性拟合，拟合线在 DN 轴的截距为 0 s 曝光时间下输出响应值。由图中拟合方程系数可知，可见 1 通道电子学偏置响应值 2 625，可见 2 通道电子学偏置响应值 2 763。

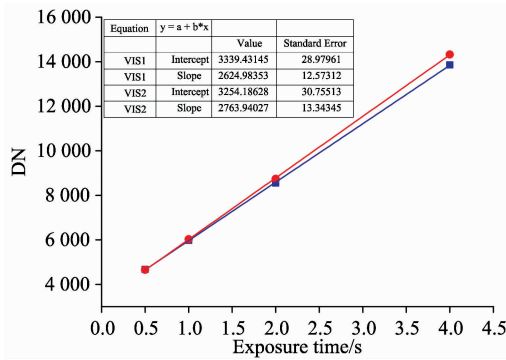


图 4 不同曝光时间下 DN 响应值

Fig. 4 DN value at different exposure time

### 3.3 暗电流校正

根据暗电流特性，CCD 像面温度是影响暗电流水平的关键因素。EMI 在轨工作时通过温控系统将紫外通道 CCD 温度稳定在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，可有效降低暗电流噪声。但由于实际在轨观测或定标过程中可能会产生不同程度的温度差异，且可见通道不带温控，进行暗电流校正正是必要的。在暗电流校正算法中引入温度影响因子，利用温度影响因子对像面暗电流进行校正。

CCD 在曝光、帧转移和存储区读出过程中都会产生暗电流。相比曝光时间内产生的暗电流，帧转移和读出过程的暗电流相对较小但不能忽略。假设曝光时间内暗电流产生率  $f_{dc}(t)$  不变，CCD 成像区曝光时间  $t_e$  内产生暗电流可表示为  $t_e \cdot f_{dc}(t)$ 。在帧转移过程中，CCD 每一行在成像区停留的时间不等，导致暗电流产生差异，与 Smear 效应类似，第一行像元经过一次行转移到达存储区，而第  $r$  行则须经过  $r$  次行转移到达存储区。则每行产生的暗电流可表示为  $t_{ft} \cdot r \cdot f_{dc}(t)/N$ ，其中  $t_{ft}$  为帧转移时间， $N$  为 CCD 成像区总行数，EMI 紫外通道 CCD47-20 总行数为 1 024，可见通道 CCD55-30 总行数为 576。转移到存储区的信号电荷包通过读出寄存

器读出，第一行靠近读出节点的像元首先读出，其他像元依次按照设定速率顺序读出。读出速率限制电荷包在存储区驻留时间，如最大读出率 5 MHz，即读出一个像元用时 200 ns，则第一个像元比整个像面最后一个像元早读出  $1\ 024 \times 1\ 024 \times 200\ \text{ns} \approx 0.2\ \text{s}$ 。以此可计算出每个像元在存储区驻留时间  $t_s$ ，产生暗电为  $f_{dc}(t) \cdot t_s$ 。综上所述，CCD 成像区和存储区总暗电流可表示为

$$DN_{dc}(T) = [t_e f_{dc}(t) + \frac{t_{ft}}{N} r f_{dc}(t) + f_{dc} t_s] g \quad (10)$$

其中， $g$  为温度影响因子，含义为探测器实际温度暗电流  $T$  与参考温度  $T_{ref}$  下暗电流的比值。

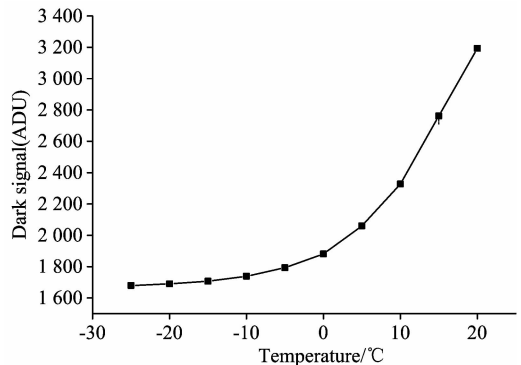


图 5 不同温度下的暗电流信号图

Fig. 5 Dark current signal at different temperature

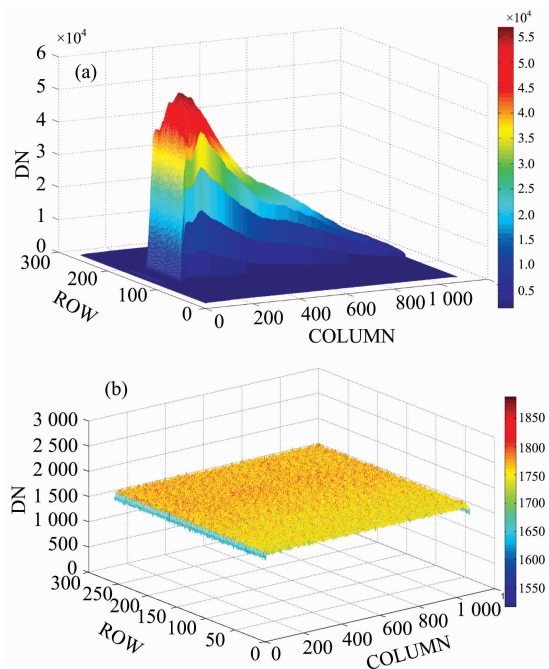


图 6 暗电流校正

(a):  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  下光谱数据三维图；(b):  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  下暗电流数据图

Fig. 6 Dark signal correction

(a): Measurement data at  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b): Dark signal at  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$

从图 5 可知，暗信号随温度降低而减小，在降到  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下暗电流信号趋势变缓，在  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时基本趋于平坦。说明暗

电流水平已降低到器件极限值,继续降温已无实际意义。此时,暗信号基值仍有接近 1 700 ADU,为电路偏置的读出信号值。

为验证暗电流校正准确性,通过温控单元设置不同温度值,采集暗电流数据,利用 2.1 节方法进行温度转换。然后与实际测得暗电流数据进行对比,结果如图 6。

### 3.4 像元响应非均匀性校正

像元响应非均匀性(pixel-pixel response non-uniform, PRNU)内在表现为 CCD 探测器各像元量子效率差异。其本质原因是像元制作工艺如像元尺寸和表面处理差异等因素<sup>[13-14]</sup>,导致光谱图像中像元与像元间响应值产生微小变化。测量数据中的 PRNU 会引起光谱图像条纹噪声,影响光谱数据反演的准确性。一般将整个像面响应值的标准差与响应平均值表示

$$\text{PRNU} = \frac{\sqrt{\frac{1}{m \times n} \sum_{i,j} (DN_{i,j} - \overline{DN})^2}}{\overline{DN}} \quad (11)$$

其中,  $m$  和  $n$  为 CCD 探测器行数和列数,  $DN_{i,j}$  为第  $i$  行、第  $j$  列的响应值。

通过辐射定标试验验证,EMI 系统对入射的辐射源具有良好的线性响应,利用两种等级的均匀辐射源  $L1$  和  $L2(L2 > L1)$  进行 PRNU 校正,即两点校正法。在两种辐射源下的实际响应分别为  $DN1$  和  $DN2$ ,假设校正后响应值为相应空间维(像元列)的平均值  $\overline{DN1}$  和  $\overline{DN2}$ ,则

$$\begin{cases} \overline{DN1}(i, j) = a(i, j)DN1(i, j) + b(i, j) \\ \overline{DN2}(i, j) = a(i, j)DN2(i, j) + b(i, j) \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $a(i, j)$  和  $b(i, j)$  为 CCD 第  $i$  行第  $j$  列的校正系数。利用式(11)可得到

$$\begin{cases} a(i, j) = \frac{\overline{DN2}(i, j) - \overline{DN1}(i, j)}{DN2(i, j) - DN1(i, j)} \\ b(i, j) = \frac{\overline{DN2}(i, j)DN1(i, j) - \overline{DN1}(i, j)DN2(i, j)}{DN1(i, j) - DN2(i, j)} \end{cases} \quad (13)$$

得到校正系数  $a(i, j)$  和  $b(i, j)$  后,再通过式(12)完成探测器 PRNU 校正。UV2 通道光谱图像的 PRNU 校正结果如

图 7 所示,从图中可以看出通过两点辐射校正法光谱图像的 PRNU 得到很好校正,经计算分析,校正后 PRNU 从 3.32% 下降到 0.47%,满足后期痕量气体反演要求。

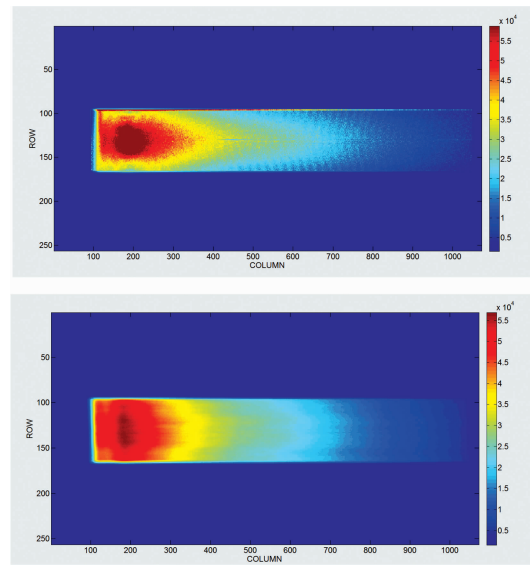


图 7 PRNU 校正前后对比图

Fig. 7 Comparison of before and after PRNU correction

## 4 结 论

星载大气痕量气体差分吸收光谱仪在轨测量数据须进行校正才能得到准确数据产品,根据载荷仪器特性分析了噪声来源,建立了系统信噪比模型,并针对不同噪声提出相应的校正算法。通过辐射定标试验数据分析表明,入射光强度是影响信噪比的主要因素,系统增益的增加使信号和噪声同比例增加,不会影响系统信噪比。利用暗电流温度相关性进行暗电流校正,利用积分时间线性关系对电子学偏置进行校正,利用均匀辐射源对 PRNU 进行校正。从校正结果可知,以上误差均得到较好的校正,校正后 PRNU 从 3.32% 下降到 0.47%。为载荷 1 级、2 级数据产品的准确性、可靠性奠定了基础。

## References

- [1] Damiani A, De Simone S, Rafanelli C, et al. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 162.
- [2] Butz A, Galli A, Hasekamp O, et al. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 2331.
- [3] ZHOU Hai-jin, LIU Wen-qing, SI Fu-qi, et al(周海金, 刘文清, 司福祺, 等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2012, 20(11): 2331.
- [4] ZHAO Min-jie, SI Fu-qi, JIANG Yu, et al(赵敏杰, 司福祺, 江宇, 等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2013, 21(3): 567.
- [5] John J Davenport, Jane Hodgkinson, John R Saffell, et al, Appl. Opt., 2015, 54: 8135.
- [6] George Zonios. Appl. Opt., 2010, 49: 163.
- [7] ZHANG Wen-wen, QIAN Yue-hong, CHEN Qian, et al(张闻文, 钱月红, 陈钱, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2013, 42(11): 1345.
- [8] CHENG Shu-bo, ZHANG Hui-ge, LIU Hao, et al(程书博, 张惠鸽, 刘浩, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2012, 32(2): 0204001
- [9] LIU Ze-xun, WAN Zhi, LI Xian-sheng, et al(刘则洵, 万志, 李宪圣, 等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2015, 23(7): 1829.

- [10] ZHANG Chen, SUN Shi-lei, SHI Wen-xuan, et al(张晨, 孙世磊, 石文轩, 等). Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2016, 24(10): 2532.
- [11] CHANG Zhen, WANG Yu, SI Fu-qi, et al(常振, 王煜, 司福祺, 等) Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2017, 44(8): 0804002.
- [12] LI Jing, ZHAO Jian-ke, CHANG Ming, et al(李晶, 赵建科, 昌明, 等) Opt. Precision Eng. (光学精密工程), 2017, 25(1): 73.
- [13] WANG De-jiang, SHEN Hong-hai, SONG Yu-long, et al(王德江, 沈宏海, 宋玉龙, 等). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2012, 41(2): 232.
- [14] ZHAO Min-jie, ZOU Ying, SI Fu-qi, et al(赵敏杰, 邹莹, 司福祺, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2015, 35(9): 2578.

## Noise Analysis and Processing Method of Environment Monitoring Instrument

ZHANG Quan<sup>1,2</sup>, HUANG Shu-hua<sup>1\*</sup>, TIAN Yu-ze<sup>1,2</sup>, LU Yue-lin<sup>1,2</sup>, ZHAO Min-jie<sup>1</sup>, ZHOU Hai-jin<sup>1</sup>, ZHAO Xin<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>, SI Fu-qi<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Environment Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract** The noise has a significant effect on the Signal to Ratio(SNR) of the trace gas absorption spectrometer, which is a standard for evaluating the imaging quality and trace gas retrieving capability. To quantitatively assess factors affecting SNR, and remove the noise of the spectrometer system, the noise source of the spectrometer is analyzed and the corresponding noise model is given. On this basis, the SNR model of the spectrometer is established in this paper. In addition, the effects of incident light intensity, integration time and system gain on the SNR are studied. The relationship between the different operating modes and different parameters and SNR is verified by the calibration experiment data of the spectrometer. And the main system noise is proposed: the linear deviation is used to determine the system offset noise. Besides, the temperature correction factor is obtained by using the dark current temperature correlation on the ground to realize the load in-orbit dark current correction. In the linear range of the detector response PRNU noise is corrected by the two-point correction method. The results show that the DN value of UV1 channel electronic offset noise is 2 625, and UV2 is 2 763. The dark current noise is the main part when the CCD imaging surface temperature is higher than 0 °C, The temperature decreases to -20 °C when the rest of the noise plays a leading role to verify the best cooling temperature of the CCD; SNR increases with the increasing incident light response and integration time, the system gain will not affect SNR; PRNU noise was significantly improved by correction, decreasing from 3.32% to 0.47%, improving the spectral quality of the spectrometer. The noise analysis and processing methods are conducive to trace gas retrieve of further spectral data.

**Keywords** CCD; Dark current noise; Imaging spectrometer; PRNU; SNR

(Received Sep. 20, 2017; accepted Jan. 13, 2018)

\* Corresponding author