

# TG-2/MAI CCD 暗电流特征及其通道依赖性 分析与校正

郭俊杰<sup>1,2,3\*\*</sup>, 姚志刚<sup>2,3\*</sup>, 韩志刚<sup>2,3</sup>, 赵增亮<sup>2,3</sup>, 严卫<sup>1</sup>

<sup>1</sup>国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101;

<sup>2</sup>地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054;

<sup>3</sup>北京应用气象研究所, 北京 100029

**摘要** 多角度偏振成像仪(MAI)采用背照式面阵 CCD 探测器,用于定量获取云与气溶胶参数。暗电流是影响面阵 CCD 探测器数据质量及其定量应用的主要因素之一。为了分析 CCD 暗电流特征及其通道依赖性,并改进 CCD 成像质量,在分析 MAI 0 级数据特征的基础上,提出基于夜间场景对 MAI 各通道暗电流特征进行分析的方法,并于 2018 年 2 月 2 日—16 日开展了 MAI 夜间场景观测实验。通过对比 MAI 挡光通道白天和夜间的观测结果可知,白天和夜间观测到的暗电流特征无明显差异。故基于夜间观测数据对 MAI 13 个通道的暗电流特征开展分析,结果表明:各通道暗电流分布均存在一定程度的非均匀性及“坏点”,且单个通道的分布具有较好的稳定性,但各通道之间存在显著差异。基于图像法对“坏点”进行校正,基于线性、非线性关系对像元间的不均匀分布进行校正后,暗电流图像的标准差由 12.1% 降至 6.9%。以晴空洋面观测值为参考,暗电流及“坏点”对像元观测的最大相对误差由 9.1% 降至 3.0%。分析结果表明:相对于设置暗电流监测通道,基于夜间观测的暗电流监测不仅可以监测各通道的暗电流特征,还可以处理暗电流的通道依赖性问题。因此,在后续的星载观测仪器设计中,无需单独设置暗电流监测通道就可以直接利用 CCD 夜间观测对各通道暗电流进行在轨监测与校正。

**关键词** 大气光学; 暗电流; 通道依赖性; 校正

中图分类号 P427.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0110001

## TG-2/MAI CCD Dark Current Characteristics and Its Channel Dependence Analysis and Correction

Guo Junjie<sup>1,2,3\*\*</sup>, Yao Zhigang<sup>2,3\*</sup>, Han Zhigang<sup>2,3</sup>, Zhao Zengliang<sup>2,3</sup>, Yan Wei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology,  
Nanjing, Jiangsu 211101, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

<sup>3</sup>Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China

**Abstract** Multi-angle Polarization Imager (MAI) uses a back-illuminated area array CCD detector to quantitatively acquire cloud and aerosol parameters. Dark current is one of the main factors affecting the data quality of the area detector CCD and its quantitative application. In order to analyze the characteristics of CCD dark current and its channel dependence and improve the imaging quality of CCD, based on the analysis of the characteristics of MAI level 0 data, we propose a method for analyzing the dark current characteristics of each channel of MAI based on the nighttime scene. The period from February 2 to 16, 2018, MAI nighttime scene observation experiment is accomplished. Comparing the observations during daytime and nighttime of the MAI light blocking channels, the result shows that there is no significant difference in dark current characteristics observed in daytime and nighttime. Therefore, based on the night observation data, the dark current characteristics of 13 channels of MAI are analyzed. The results show that the distribution of dark current for each channel has some degree of non-uniformity and “bad

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-07-29; 录用日期: 2018-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(NSFC41575031)、中国博士后科学基金(2015M580124)

\* E-mail: yzg\_biam@163.com; \*\* E-mail: 1083173651@qq.com

points”, and the distribution within each channel has good stability, but it is significant difference for each channel. Based on the image method to correct “bad spots”, after correcting the non-uniformity distribution of pixels based on linear, non-linear relationship, the standard deviation of dark current images decrease from 12.1% to 6.9%. Taking the observation of the clear-air ocean as reference, the maximum possible impact of dark current and “bad points” on pixel observations decreased from 9.1% to 3.0%. The analysis results show that dark current monitoring based on nighttime observation can not only monitor the dark current characteristics of each channel, but also handle the channel dependence of dark current relative to setting dark current monitoring channel. Therefore, in the subsequent design of satellite-borne observation instruments, the dark current of each channel can be directly monitored and corrected by nocturnal observation, and there is not necessary to set a dark current monitoring channel separately, which will reduce the design weight of the load.

**Key words** atmospheric optics; dark current; channel dependence; correction

**OCIS codes** 010.0280; 040.1520

## 1 引 言

多角度偏振探测技术可用于定量获取云与气溶胶参数<sup>[1-6]</sup>。TG-2 多角度偏振成像仪(MAI)于2016年9月15日发射升空,是我国首个在轨运行的多角度偏振探测成像仪器。MAI采用背照式面阵CCD探测器。CCD探测器因具有大动态范围、高量子效率、高分辨率、低输出噪声以及良好的线性特性等优势而在可见光成像、空间光学、微光夜视等方面有着广泛的应用<sup>[7-10]</sup>,但作为一种大规模的半导体集成器件,其生产工艺相当复杂。硅材料的质量不够高、制造过程中的掺杂浓度不均匀、沉淀厚度存在差异以及光刻误差等因素会导致探测器自身存在固有缺陷,且无法改变,主要表现之一就是暗电流及其像元间的不均匀性<sup>[10-11]</sup>。暗电流是指CCD在完全无光信号输入的情况下,因载流子产生热导致势阱被逐渐填满而形成的电流。由于晶格点阵的缺陷,不同像素的暗电流可能差别很大,这会导致CCD各像元之间暗电流的分布不均匀。CCD暗电流的来源主要包括3个方面:耗尽区产生的暗电流、衬底材料产生的暗电流和硅-二氧化硅界面产生的暗电流。

Hagolle等<sup>[12]</sup>指出,所有CCD均会存在暗电流,均需要进行校正。修吉宏等<sup>[13]</sup>对大面阵彩色CCD航测相机进行了分析,结果表明,光学系统引起的光面照度差异会严重影响CCD成像的均匀性。杨忠东等<sup>[14]</sup>对中巴地球资源一号卫星的CCD相机0级数据进行了质量分析,对均匀目标观测结果的分析表明,CCD相机成像存在条带现象。总体而言,面阵CCD的暗电流会严重影响成像质量,进而影响数据的量化应用,对其进行校正对于后期的数据量化应用具有重要意义<sup>[13]</sup>。

就目前的研究而言,对暗电流的处理方法主要

包括两种,一种是通过控制CCD探测器的工作温度、曝光时间来抑制仪器本身的暗电流,提高成像质量;另一种是针对暗电流的特性进行数据的后续校正。常见的暗电流校正方法包括以下几种<sup>[9,11,14-23]</sup>:1)采用实验室校正方法扣除暗电流,该方法由于仪器在轨运行环境与实验室不一致以及仪器发射以后面阵CCD中的像元因各种原因产生故障等,可能会产生较大误差;2)在正常拍摄状态前后时刻关闭快门,在相同的积分时间下对CCD进行暗电流采集,再在真实图像中将暗电流图像进行逐像元扣除,该方法可以实时获取CCD暗电流的特征,但会大幅增加图像的采集时间;3)基于仪器暗电流特性的校正方法,程宜等<sup>[11]</sup>利用CCD“坏点”场景对暗电流进行了估计,估计偏差小于0.4%,但该方法会受到温度等因素的制约,目前还不能工程化应用。此外,还有类似POLDER的暗电流扣除方法<sup>[20-21]</sup>,即利用一个暗电流监测通道对其他通道的暗电流进行扣除,但该方法的基础是各通道的积分时间一致。此外,Widenhorn等<sup>[22]</sup>的研究表明,在相同的曝光时间下,少量特定像元在快门关闭状态下的暗电流与场景曝光时相比具有固定的系统差异。这些方法主要是对单一通道或者各通道积分时间相同的CCD进行研究,而MAI是多通道不同曝光时间的CCD探测器,尽管其设置了挡光通道对非挡光通道进行暗电流监测,但却无法处理因各通道曝光时间不同而导致的暗电流特征的通道依赖性问题。

为了分析MAI CCD暗电流特征的通道依赖性问题,并改进其成像质量,本课题组在对暗电流监测通道进行分析的基础上,利用MAI夜间观测对各个通道的暗电流特征进行监测,并对MAI 0级数据进行校正处理,为后续气溶胶、云等的微物理参数反演奠定基础。

## 2 数据与方法

### 2.1 MAI 简介

MAI 主要由 3 部分构成:一个面阵 CCD、一个滤光片-偏振片组合转轮以及一个宽视场光学系统。面阵 CCD 共计  $264 \times 268$  个像元,其中有效像元为  $256 \times 256$  个,面阵的前 6 列、后 6 列、前 3 行以及后 5 行为挡光像元,主要用于暗电流的估计及图像帧转移偏差的消除,CCD 像元的大小为  $26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$ 。

组合转轮包含 16 个滤光片槽,其中:第 1~第 9 个滤光片槽为偏振通道,对应 3 个偏振波段,每个波

段对应 3 个偏振取向分别为  $-60^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $60^\circ$  的偏振滤光片;第 10~第 12 个滤光片槽为非偏振通道,第 13 个滤光片槽为不透明滤光片,主要用于监测 CCD 暗电流,剩余的 3 个滤光片槽为备用插槽。MAI 的视场为  $87.6^\circ$ ,刈幅为 770 km,空间分辨率为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 。

在 MAI 观测过程中,每一帧包含 13 个通道的图像数据。图 1 为 2017 年 1 月 22 日东南太平洋上空第 1 通道的观测结果,其中:图 1(a)为 MAI CCD 的成像结果,图中左上角出现了太阳耀光现象;图 1(b)为对应的遥感影像像元亮度(DN)值的频率图,DN 值最小为 109,DN 值众数为 164。

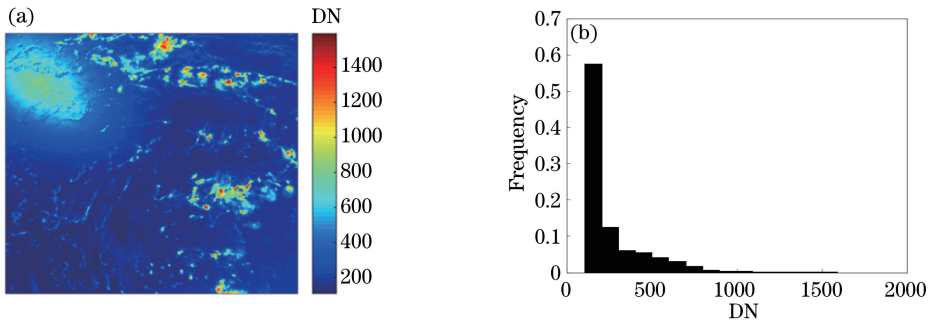


图 1 2017 年 1 月 22 日东南太平洋上空的观测结果。(a)第 1 通道成像;(b) DN 值频率分布

Fig. 1 Observations over the Southeast Pacific Ocean on January 22, 2017.

(a) Imaging of the first channel; (b) frequency distribution of DN values

### 2.2 MAI 0 级数据特征分析

MAI 第 13 通道为挡光通道,主要用于在轨运行过程中检测面阵 CCD 的暗电流状况。对 MAI 第

13 通道数据开展分析,为使结果更具有代表性和普适性,对 2017 年 1 月 25 日第 13 通道共 71 帧观测数据进行平均,结果如图 2 所示。

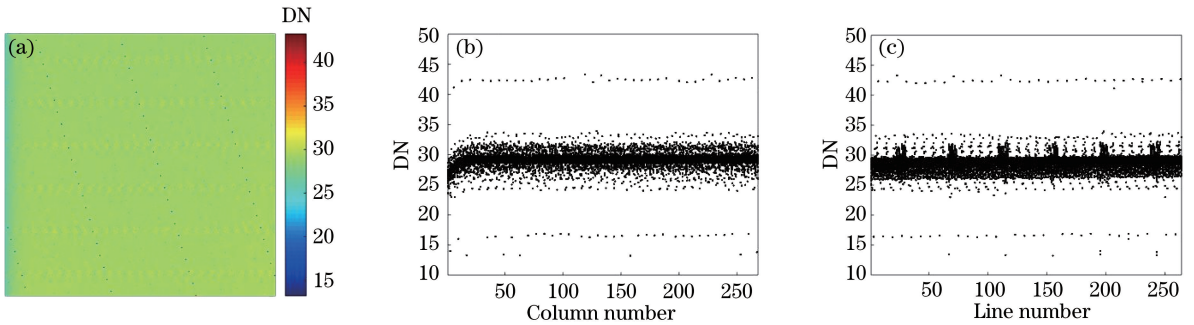


图 2 2017 年 1 月 25 日第 13 通道共 71 帧观测数据的平均结果。(a)第 13 通道的灰度图;

(b)平均 DN 值的行分布;(c)平均 DN 值的列分布

Fig. 2 Average results of 71 frames observations data on the 13<sup>th</sup> channel on January 25, 2017. (a) Grayscale map of the 13<sup>th</sup> channel; (b) row distribution of mean DN values; (c) column distribution of mean DN values

图 2 表明,暗电流的 DN 值分布整体存在像元响应不均匀的情况;横向上 CCD 前几列的 DN 值显著低于平均值,而后几列的 DN 值略高于平均值;纵向上像元的 DN 值随着行号的增大而逐渐增大。此外,部分像元暗电流的 DN 值与暗电流平均值的差异显著大于随机噪声的水平,呈现出明显的亮暗特

征,且其分布不具有噪声的随机性,表现为行间隔为 7、列间隔为 24 的规则分布,且多帧叠加不会消除,这种响应度明显高于或低于平均响应的点一般统称为“坏点”<sup>[11]</sup>。其中,响应度高于平均响应的点称为“亮点”,响应度低于平均响应的点称为“暗点”。图 2(a)、(c)表明,CCD 暗电流存在横向分布的条

带,其与背景的灰阶差异不超过 1。

### 3 基于夜间观测的 CCD 暗电流特征分析

研究表明<sup>[12,20-21]</sup>:在夜间条件下,反射能量不足,一般的可见光成像仪无法成像。对于微光探测,要求成像仪器在可见光通道内具有很高的探测灵敏度和动态范围(数量级在  $10^5$  以上),且探测通道波段需要达到一定的宽度。因此,对于 MAI 而言,可以认为夜间无入射光进入镜头。故,在夜间场景下的观测相当于各通道的挡光观测,能够反映各通道的暗电流状况。为了分析其余 12 个通道是否也存在此类现象,为后期 MAI 各通道的暗电流处理提供依据,基于 MAI 第 13 通道出现的暗电流特征,本课题组在 2018 年 2 月 2 日—16 日开展了 MAI 夜间观测,共得到 22 个时次的观测数据。下面结合 MAI 白天和夜间的观测数据对暗电流特征进行详细分析。

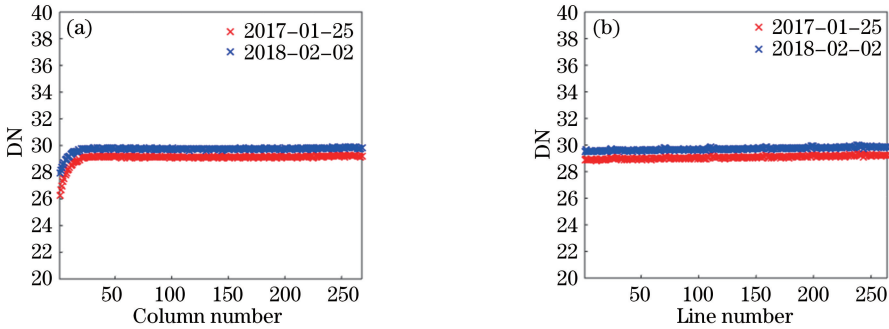


图 3 白天和夜间暗电流特性的对比。(a)横向特性;(b)纵向特性

Fig. 3 Comparison of daytime and nighttime dark current characteristics. (a) Horizontal characteristics; (b) vertical characteristics

#### 3.2 暗电流不均匀性的通道依赖性分析

利用 2018 年 2 月 2 日夜夜间观测得到的所有 70 帧数据的对比分析,对面阵 CCD 暗电流不均匀性的通道依赖性进行研究。为了提高代表性,降低随机噪声,更准确地分析 CCD 的固有特性,对 2018 年 2 月 2 日观测得到的所有帧数据分别进行了逐像元平均。

##### 3.2.1 横向不均匀性

图 4 为 2018 年 2 月 2 日第 1 通道所有行的平均结果。图 4 表明,在横向分布上,第 13 通道暗电流监测结果与第 1 通道的夜间观测结果具有很好的一致性,二者的相关系数可达到 0.9855,即 CCD 横向存在像元响应不均匀的情况:CCD 前几列的 DN 值显著低于平均值,而后几列的 DN 值略高于平均值。

对 2018 年 2 月 2 日其余 12 个通道的观测结果

#### 3.1 方法的可行性分析

夜间与白天观测存在一定差异,如环境温度、太阳辐射等,因此,为了分析白天与夜间暗电流的特性是否一致,利用 MAI 2017 年 1 月 25 日和 2018 年 2 月 2 日的观测数据,针对白天与夜间的暗电流特征进行对比分析。

图 3 给出了 MAI 白天与夜间暗电流特性的对比结果。图 3 表明:无论是横向还是纵向,MAI 白天与夜间的暗电流特性均未出现显著变化,二者的一致性很好,横向和纵向上的相关系数分别为 0.9936 和 0.9825;但白天与夜间的暗电流水平存在系统差异,差异的平均 DN 值为 0.64。这可能是由于环境温度及太阳辐射的差异使得 CCD 面板的温度存在一定差异,从而导致暗电流水平存在系统差异。整体而言,尽管夜间与白天的暗电流水平存在一定的系统偏差,但暗电流的分布特性呈现出显著的一致性。因此,可以利用夜间观测研究各通道的暗电流分布特性,并给出校正方程。

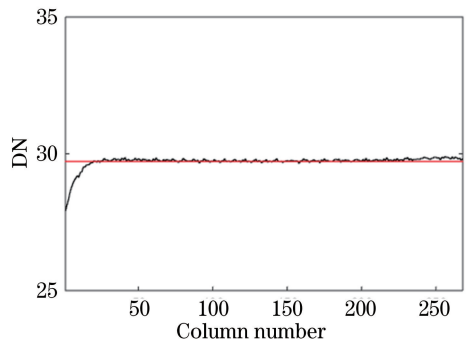


图 4 2018 年 2 月 2 日第 1 通道的行平均图

Fig. 4 Row average diagram of the first channel on February 2, 2018

进行分析,结果如图 5 所示。图 5(a)~(c)分别为 2018 年 2 月 2 日各个通道共 70 帧数据的平均 DN 值,每行的最大值、最小值分布以及各个量的标准差



分布。图 5(a)表明,MAI 13 个通道的平均 DN 值存在一定差异,差异基本保持在  $\pm 0.5$  以内;图 5(b)、(c)表明,各通道每行平均值的最大值波动很小,波动值不超过  $\pm 0.15$ ,相比之下最小值的波动较大。该结果进一步证明了基于夜间观测监测 CCD 暗电流特征的必要性与可行性。

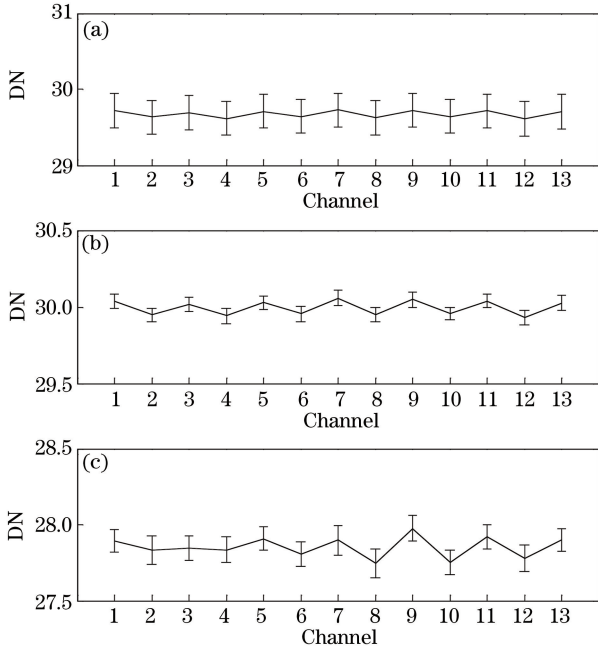


图 5 2018 年 2 月 2 日各通道 70 帧数据的平均结果。(a)平均 DN 值分布图;(b)行平均的最大值分布图;(c)行平均的最小值分布图

Fig. 5 Average results of 70 frames data for each channel on February 2, 2018. (a) Distribution of mean DN values; (b) distribution of maximum row average values; (c) distribution of minimum row average values

### 3.2.2 纵向不均匀性

图 6 给出了 2018 年 2 月 2 日第 1 通道观测数据在帧平均基础上对所有列进行平均的结果。图 6 表明:图像中存在横向条带,条带分布规律,条带与背景的灰阶差不超过 0.3;DN 值随着行号自上而下逐渐增大,且与行号呈显著的线性关系,其最小值与最大值相差约 0.6。

表 1 为各个通道 DN 值与行号的线性关系,线性方程形式为  $D_N = kR_N + b$ ,其中,  $D_N$  为 DN 值,  $R_N$  为像元对应的行号。可以看出:二者的相关系数  $R$  均高于 0.87,斜率  $k$  在 0.0012~0.0013 之间波动,斜率的不确定度  $\delta_k$  均为 0.0001,截距  $b$  基本在 29.0~29.6 之间波动,截距的不确定度  $\delta_b$  均优于 0.02。整体而言,各通道 DN 值的纵向分布与行

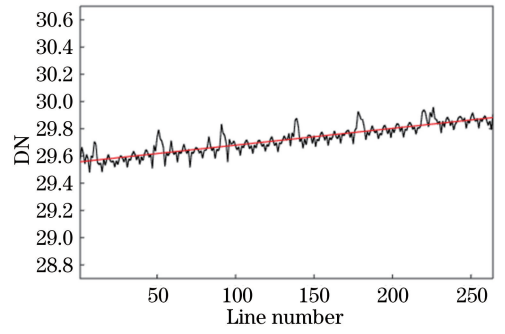


图 6 2018 年 2 月 2 日第 1 通道帧平均的所有列平均图  
Fig. 6 Column average diagram of the first channel on February 2, 2018

号呈显著的线性关系,且各通道之间存在一定差异。

表 1 各通道 DN 值与行号的线性关系

Table 1 Linear relationship between DN value and line number of each channel

Channel	$R$	$k$	$\delta_k$	$b$	$\delta_b$
1 <sup>st</sup>	0.8876	0.0012	0.0001	29.5559	0.0100
2 <sup>nd</sup>	0.9003	0.0013	0.0001	29.0525	0.0100
3 <sup>rd</sup>	0.8874	0.0013	0.0001	29.1361	0.0100
4 <sup>th</sup>	0.8954	0.0012	0.0001	29.0369	0.0100
5 <sup>th</sup>	0.8763	0.0013	0.0001	29.1326	0.0200
6 <sup>th</sup>	0.8963	0.0012	0.0001	29.0570	0.0100
7 <sup>th</sup>	0.8797	0.0013	0.0001	29.1216	0.0100
8 <sup>th</sup>	0.8940	0.0012	0.0001	29.0219	0.0100
9 <sup>th</sup>	0.8912	0.0013	0.0001	29.1106	0.0100
10 <sup>th</sup>	0.8990	0.0012	0.0001	29.0433	0.0100
11 <sup>th</sup>	0.8827	0.0013	0.0001	29.1011	0.0100
12 <sup>th</sup>	0.8963	0.0012	0.0001	29.0285	0.0100
13 <sup>th</sup>	0.8931	0.0012	0.0001	29.1211	0.0100

### 3.3 “坏点”分析

利用 2018 年 2 月 2 日—16 日期间 22 个时次的夜间观测数据对 MAI 各通道的“坏点”情况进行检测。结果表明:同一通道不同时间的“坏点”数目和位置均相同,且相同位置的“坏点”DN 值差异不大;不同通道的“坏点”数目基本相同,但位置分布存在一定差异。

表 2 给出了 MAI 夜间场景观测期间各通道的平均 DN 值以及“亮点”、“暗点”的数目及平均 DN 值。表 2 表明:夜间场景观测期间各通道的平均 DN 值相差不超过  $\pm 0.15$ ;各通道“亮点”的数目基本一致,为 35 或 36,“亮点”的平均 DN 值相差不超过  $\pm 0.5$ ;各通道的“暗点”数目为 34~36,“暗点”的平均 DN 值相差不超过  $\pm 1.5$ 。

表 2 夜间观测期间各通道的平均 DN 值以及“亮点”、“暗点”的数目及平均 DN 值  
Table 2 Mean DN values status of each channel, and average distribution of “bright points” and “dark points” during nighttime observation

Channel	Mean DN value	Number of “bright points”	Mean DN value of “bright points”	Number of “dark points”	Mean DN value of “dark points”
1 <sup>st</sup>	29.72	35	43.46	36	16.43
2 <sup>nd</sup>	9.64	35	43.12	35	17.13
3 <sup>rd</sup>	29.73	35	43.46	34	16.51
4 <sup>th</sup>	29.62	36	43.27	36	16.71
5 <sup>th</sup>	29.72	36	43.47	35	16.64
6 <sup>th</sup>	29.64	36	43.06	36	17.00
7 <sup>th</sup>	29.71	35	43.47	36	16.36
8 <sup>th</sup>	29.61	36	43.28	35	16.91
9 <sup>th</sup>	29.71	35	43.44	36	16.44
10 <sup>th</sup>	29.63	35	43.03	36	16.75
11 <sup>th</sup>	29.69	35	43.49	34	16.57
12 <sup>th</sup>	29.61	35	43.25	36	16.70
13 <sup>th</sup>	29.71	35	43.18	36	15.99

#### 4 MAI CCD 的稳定性分析

对 MAI 2016 年 9 月 15 日—2018 年 3 月 20 日期间的观测数据进行统计分析,结果如图 7 所示。图 7 表明:从 2016 年 10 月发射升空至 2018 年 2 月,MAI CCD 的暗电流水平稳定,且其呈现出的“坏点”和“暗点”的位置、平均 DN 值均是稳定的,该时间范围内图像整体的平均 DN 值为 29.5,标准差为 0.0332,亮点和暗点的平均 DN 值分别为 43.1 和 16.1,对应的标准差分别为 0.1753 和 0.1078。其中:2017 年 4 月 MAI 未开机,故无数据;2017 年 6 月份由于数据传输故障,未获取到有效数据。

#### 5 MAI 暗电流校正

暗电流的典型特征是与曝光时间成正比,且受温度的影响比较大<sup>[23]</sup>。由于 MAI 各个通道的积分时间存在差异,因此,第 13 通道仅可用于对 CCD 暗电流的整体情况进行监测,不能准确地描述每个通道的暗电流,更不能用于 MAI 各通道暗电流的扣除。当前,在 MAI 0 级数据处理过程中,采用的暗电流扣除方法是:利用 CCD 每行前 5 列和最后 5 列挡光像元 DN 值的平均值作为该行暗电流的平均值来进行扣除。

基于第 3 节的分析可知,面阵 CCD 的暗电流存在横向和纵向不均匀响应以及部分“坏点”,故当前的暗电流扣除方法会导致暗电流的处理存在一定偏差,从而影响 MAI 1 级数据的质量。

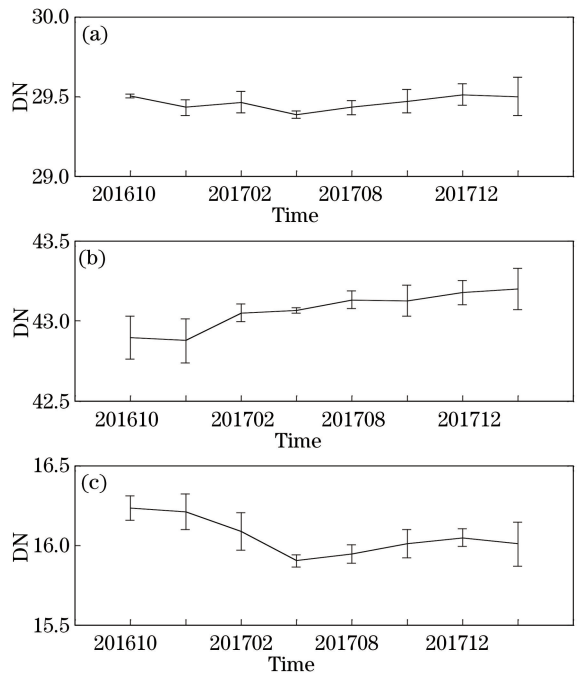


图 7 2016 年 10 月至 2018 年 2 月 MAI CCD 暗电流分布状况。(a)平均 DN 值随时间的变化;(b)“亮点”的平均 DN 值随时间的变化;(c)“暗点”的平均 DN 值随时间的变化

Fig. 7 Dark current distribution of MAI CCD from October 2016 to February 2018. (a) Average DN value as a function of time; (b) average DN value of “bright points” as a function of time; (c) average DN value of “dark points” as a function of time

根据图 1 可知,该时次晴空洋面观测到的 DN

值最小为 109, 众数值为 164。仅针对该次晴空洋面场景下因暗电流处理过程中未考虑非均匀性以及“坏点”等特性而引入的误差进行简单分析。1) 由于 CCD 在横向存在不均匀响应, CCD 左侧的 DN 值偏低 3 左右, 平均之后暗电流扣除的绝对偏差约为 1.5, 相对于众数值引入的相对误差为 0.9%; 2) 对于 CCD 纵向的不均匀响应, DN 值的绝对偏差约为 0.6, 相对于众数值引入的相对误差为 0.4%; 3) 对于“坏点”, 其 DN 值相对平均值的不确定性约为 15, 引入的相对误差达到 9.1%。因此, 在针对晴空洋面进行观测时, 仅在 CCD 暗电流处理过程中导致 MAI 1 级产品中像元的最大误差可达 9.2%。

暗电流的特性是稳定分布的, 但仪器的暗电流水平会受到诸多因素的影响, 因此, 本课题组基于图像法、线性和非线性关系逐通道对 MAI CCD 的“坏

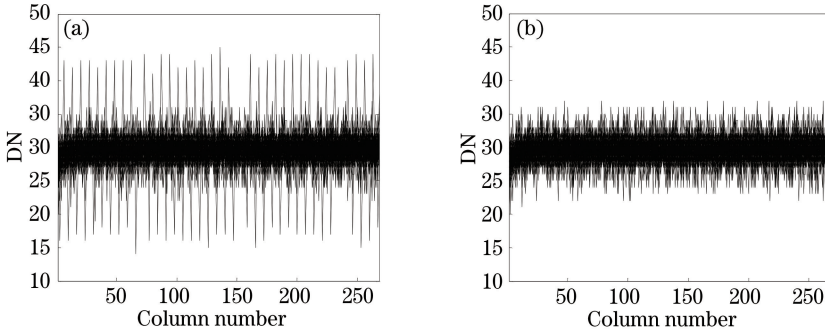


图 8 2018 年 2 月 2 日第 1 通道“坏点”校正前后的对比图。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 8 Comparison of the data before and after the correction of the "bad point" of the first channel on February 2, 2018.

(a) Before correction; (b) after correction

### 5.2 暗电流不均匀情况的处理

在剔除“坏点”的基础上, 对暗电流的不均匀响应进行校正。由于 CCD 暗电流在横向、纵向均存在不均匀, 因此, 需要从两个方向对暗电流进行校正。就横向而言, 由于 DN 值随着列号的变化呈非线性, 故逐通道采用多项式拟合进行校正, 校正结果如图 9(a)、(b)所示。就纵向而言, DN 值与行号呈显著的线性关系, 各通道线性方程参数见表 1, 对其进行线性校正, 结果如图 9(c)、(d)所示。

### 5.3 横向条带

对于 CCD 成像过程中出现的规则横向条带, 由于其量级很小, 一般不超过 0.3 个计数值, 故暂不做处理。

### 5.4 校正结果

图 10 给出了校正前后的结果比较。整体而言, 对低反射率场景校正后, 由 CCD 暗电流及其不均匀响应引入 MAI 1 级产品的像元相对误差由 9.2% 减

小至 3.0%, 暗电流图像的标准差由 12.1% 降至 6.9%。可见, CCD 暗电流像元间的不均匀性得到了显著改善。

### 5.1 剔除“坏点”

首先, 对 MAI 0 级数据中的“坏点”进行处理, 这里主要采用基于图像的消除方法。由于每个通道的“坏点”位置相对固定, 因此, 可以结合各通道的平均 DN 值和表 2 给出的“坏点”平均 DN 值计算得到各通道各“坏点”处 DN 值的平均偏差, 再对每个通道固定位置的“坏点”进行校正, 从而达到剔除“坏点”的目的, 剔除结果如图 8 所示, 其中, 图 8(a)、(b)分别为 2018 年 2 月 2 日第 1 帧观测数据的第 1 通道校正前后的对比图, 可以明显看出, “坏点”已经被剔除。

## 6 结 论

本课题组提出了基于夜间场景观测对 MAI 各通道暗电流特征进行分析的方法, 利用 2018 年 2 月 2 日—16 日期间 MAI 夜间观测数据对各通道的暗电流特征进行分析, 可以得到如下结论: 1) 各通道的暗电流分布均存在不同程度的非均匀性以及“坏点”, 暗电流分布存在显著的通道依赖性; 2) CCD 暗电流存在横向条带, 其与背景的灰阶差一般不超过 0.3; 3) 夜间观测的暗电流与白天基于挡光通道观测的暗电流之间具有较好的一致性, DN 值的平均差异小于 1。借助白天 MAI 暗电流监测通道的数据对该方法进行验证, 结果表明二者具有很好的一致性。

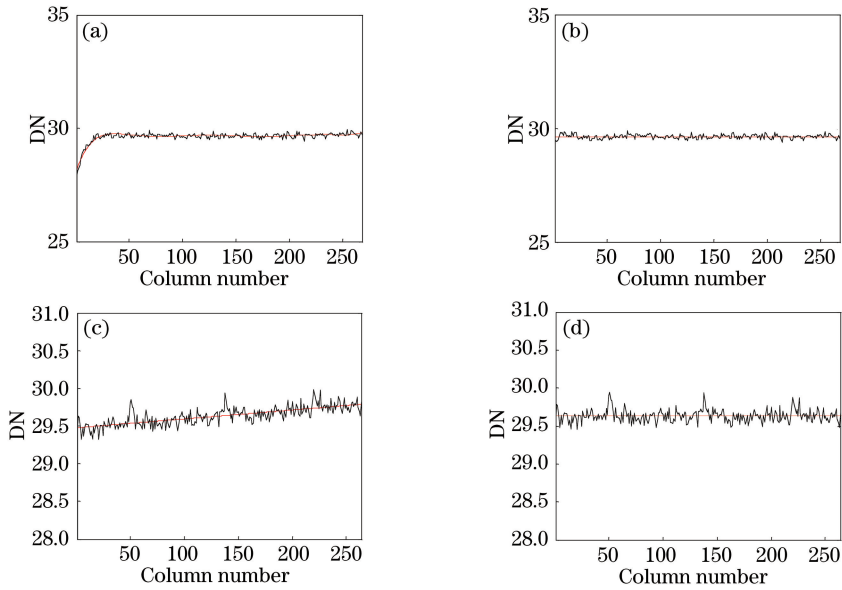


图 9 2018 年 2 月 2 日第 1 通道校正前后的对比。(a)横向校正前的行平均图;(b)横向校正后的行平均图;  
(c)纵向校正前的列平均图;(d)纵向校正后的列平均图

Fig. 9 Comparison of the data before and after the correction of the first channel on February 2, 2018. (a) Average of row before the horizontal correction; (b) average of row after horizontal correction; (c) average of column before vertical correction; (d) average of column after vertical correction

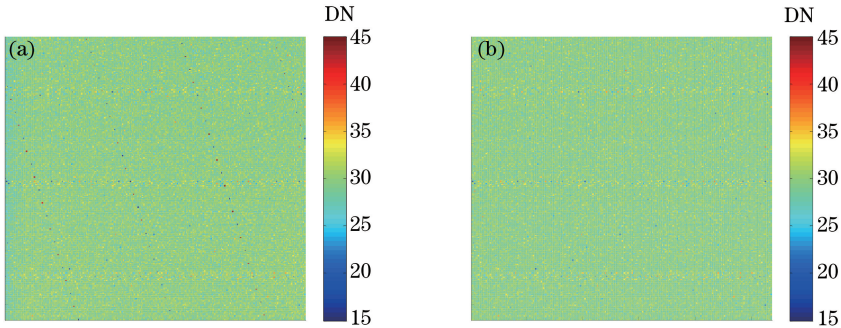


图 10 2018 年 2 月 2 日第 1 通道观测数据校正前后的结果。(a)校正前;(b)总体校正后  
Fig. 10 Correction results of observation data of the first channel on February 2, 2018.

(a) Before correction; (b) after overall correction

此外,对 MAI 2016 年 10 月至 2018 年 2 月期间的挡光通道数据进行分析,结果表明,MAI CCD 在轨运行期间,各通道的暗电流特征无显著变化。因此,针对以上 CCD 特征分析,基于图像法对各通道进行了“坏点”剔除,基于多项式拟合和线性拟合分别对各通道横向和纵向的非均匀性进行相应的校正。校正之后由于 CCD 成像质量引入 MAI 1 级产品像元的可能相对误差由 9.2%减小至 3.0%,同时,整幅暗电流图像的标准差由 12.1%降至 6.9%。

MAI 各通道的曝光时间不等,使得各通道的暗电流及其“坏点”分布存在通道依赖性,而当前的暗电流监测通道无法处理这一问题。研究结果表明,本课题组提出的基于夜间场景的观测方法可以有效

监测 CCD 的暗电流特征,可将该方法扩展应用到当前其他平台 CCD 的暗电流在轨监测中。此外,在后续的星载观测仪器设计与应用中,可以直接利用仪器的夜间观测来监测 CCD 的暗电流特征,这不仅可以提高暗电流监测的准确性,还可以通过去掉挡光通道达到减轻仪器质量的目的。

**致谢** 感谢中国载人航天工程空间应用系统数据中心提供 MAI 数据。

### 参 考 文 献

[1] Chen H B, Fan X H, Han Z G. A review on remote sensing from POLDER multispectral,



- multidirectional and polarized measurements [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2006, 21(2): 83-92.
- 陈洪滨, 范学花, 韩志刚. POLDER 多角度、多通道偏振探测器对地遥感观测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2006, 21(2): 83-92.
- [2] Duan M Z, Lü D R. Simultaneously retrieving aerosol optical depth and surface albedo over land from POLDER's multi-angle polarized measurement. II: a case study[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(1): 27-35.
- 段民征, 吕达仁. 利用多角度 POLDER 偏振资料实现陆地上空大气气溶胶光学厚度和地表反照率的同时反演 II. 实例分析[J]. 大气科学, 2008, 32(1): 27-35.
- [3] Fan X H, Chen H B, Lin L F, *et al.* Retrieval of aerosol optical properties over the Beijing area using POLDER/PARASOL satellite polarization measurements [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2009, 26(6): 1099-1107.
- [4] Fan X H, Chen H B, Lin L F, *et al.* Validation of POLDER-2/PARASOL aerosol products over Beijing area[J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(1): 137-144.
- 范学花, 陈洪滨, 林龙福, 等. Polder-2parasol 卫星气溶胶业务产品在北京地区的验证分析[J]. 遥感学报, 2009, 13(1): 137-144.
- [5] Yao Z G, Han Z G, Zhao Z L, *et al.* Synergetic use of POLDER and MODIS for multilayered cloud identification[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1910-1923.
- [6] Guo J J, Yao Z G, Han Z G, *et al.* Airborne experiment of TG-2 multi-angle polarization imager for cloud phase identification[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(3): 439-448.
- 郭俊杰, 姚志刚, 韩志刚, 等. TG-2 多角度偏振成像仪云相态识别机载验证试验[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(3): 439-448.
- [7] Chen Y J, Zhang Z J, Zhang Z Q. Correction of CCD pixel nonuniformity [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(2): 216-220.
- 陈迎娟, 张之江, 张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 216-220.
- [8] Zhang X H, Ye P, Wang W L, *et al.* Gray uniformity of the wide field line CCD image [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(7): 62-66.
- 章秀华, 叶鹏, 王万里, 等. 大视场线阵 CCD 图像灰度均匀化[J]. 光电工程, 2015, 42(7): 62-66.
- [9] Lei R F, Wang Y, Gao J W, *et al.* Study on surface dark current of CCD [J]. Electronic Science and Technology, 2014, 27(5): 26-28, 32.
- 雷仁方, 王艳, 高建威, 等. CCD 表面暗电流特性研究[J]. 电子科技, 2014, 27(5): 26-28, 32.
- [10] Zhang X, Lin J M, Zhang Z, *et al.* Research on measuring technique for image sensors' uniformity of the CCD image-forming system with large-field angle [J]. Optical Technique, 2005, 31(6): 846-848, 853.
- 张鑫, 林家明, 张哲, 等. 大视场 CCD 成像系统像面均匀性测试技术研究[J]. 光学技术, 2005, 31(6): 846-848, 853.
- [11] Cheng X, Zhao H J. Dark-current calculation method of area CCD based on bad pixels detection in the scene [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0404002.
- 程宣, 赵慧洁. 基于场景坏点检测的面阵 CCD 暗电流估计方法[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0404002.
- [12] Hagolle O, Guerry A, Cunin L, *et al.* POLDER level-1 processing algorithms [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2758: 308-319.
- [13] Xiu J H, Huang P, Li J, *et al.* Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711003.
- 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机成像非均匀性校正[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711003.
- [14] Yang Z D, Gu S Y, Qiu H, *et al.* CBERS-1's CCD image quality evaluating and cross calibrating study [J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 8(2): 113-120.
- 杨忠东, 谷松岩, 邱红, 等. 中巴地球资源一号卫星 CCD 图像质量评价和交叉定标研究[J]. 遥感学报, 2004, 8(2): 113-120.
- [15] Zheng L L, Jin G, Qu H S, *et al.* Non-uniformity correction for multi-channel TDI CCD imaging system in wide response range [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(11): 1111001.
- 郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 多通道宽响应域 TDI CCD 成像系统的非均匀性校正[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1111001.
- [16] Zhao J, Zuo D L, Wang X B. Study on thermoelectrically cooled CCD in Raman spectrum detection system for gas analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(7): 070401.
- 赵俊, 左都罗, 王新兵. 气体拉曼光谱检测系统中热电制冷 CCD 研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(7): 070401.
- [17] Healey G E, Kondepudy R. Radiometric CCD camera calibration and noise estimation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(3): 267-276.

- [18] Zhang X Q, Yang H, Wang K. Image processing for the CCD based lateral flow strip detector [J]. *Nano Biomedicine and Engineering*, 2010, 2(4): 214-217.
- [19] Popowicz A. Analysis of dark current in BRITE nanostellite CCD sensors [J]. *Sensors*, 2018, 18(2): 479.
- [20] Bret-Dibat T, Andre Y, Laherrere J M. Preflight calibration of the POLDER instrument [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2553: 218-232.
- [21] Goloub P, Deuze J L, Herman M, *et al.* Analysis of the POLDER polarization measurements performed over cloud covers [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(1): 78-88.
- [22] Widenhorn R, Hartwig I, Dunlap J C, *et al.* Measurements of dark current in a CCD imager during light exposures [J]. *Proceedings of SPIE*, 2008: 6816: 68160B.
- [23] Cheng S B, Zhang H G, Liu H, *et al.* Performance measurement of mechanical shutter and dark current for scientific-grade optical CCD [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2): 0204001.
- 程书博, 张惠鸽, 刘浩, 等. 科学级光学 CCD 暗电流及机械快门时间响应特性测试 [J]. *光学学报*, 2012, 32(2): 0204001.