



# 1 引言

时间延迟积分 CCD(TDICCD)作为一种成熟的光学器件,已广泛应用于航天、航空领域。在航天遥感设备中,随着高分辨率需求的增加,对系统的设计指标提出了更高的要求;由于高昂的研制费用,要求系统具有高可靠性、长寿命的特点。在空间相机系统设计阶段,要求航天遥感设备具有在轨运行时的参数实时调整能力,即根据设备的当前状态,实时计算相机运行调整参数,获得更好的成像指标。

近年来,TDICCD 航天遥感相机的发展,也在向自动、实时、高可靠性方向推进。目前的相机星上自动调光<sup>[1-4]</sup>、自动检焦调焦、图像实时自适应滤波处理、TDICCD 非均匀性校正<sup>[5-9]</sup>等星上图像处理方法,算法复杂,实时性较差,影响原始图像内容,实际应用风险较高。本文设计一种星上 TDICCD 相机实时辐射校正系统<sup>[10-12]</sup>,通过将相机旋转 90°成像,获得实时校正数据,并完成 FPGA 实时处理过程,实现相机在轨运行条件下的实时辐射校正。该方法区别于星上标定灯的辐射校正方法,增加了相机在轨运行时,对相机参数变化的适应能力。

# 2 辐射校正方法

TDICCD 是面阵 CCD 的一种线阵应用。根据相机成像时刻光照条件的不同,设定 TDICCD 的积分级数,实现多个 CCD 像元对同一景物的曝光累加,降

低了对 CCD 像元响应均匀性的要求,也降低了对靶场反射率均匀性和照度均匀性的要求,从而为星上实时辐射标定提供了条件。

TDICCD 的辐射校正,主要是建立图像输出灰度和地面目标辐射量之间的定量关系。以地面景物为标准,进行空间相机实时辐射校正时,需要标定拼接系统中,通道间响应和像元间响应的不一致性,提高相机像元不一致性(pixel response non-uniformity ,PRNU)指标,获得效果均匀的遥感图像。

实时辐射校正作为一种验证手段,用于验证相机对地面辐射标定参数精度的保持能力;并作为一种备用方案,在地面辐射标定参数不准确时,实现辐射校正参数在轨计算和应用,提高设备的可靠性;实时校正参数表征了当前系统状态,不同于星上标定灯校正原理;该方法基于地面景物成像,通过旋转焦平面,获得星上实时标定数据。

以 TDICCD 积分级数  $N$  级,可见光谱段下,像元分辨率为  $a$  的 TDICCD 成像系统为例,首先,需要准备边长至少  $(a \times N)$  米的正方形靶场,并且靶场的地物反射率要基本一致;当相机在轨运行到靶场上空时,将相机焦平面旋转 90°,进行实时标定成像。此时,要保证 CCD 的 TDI 方向和飞行方向垂直,使相机在推扫过程中  $N$  个 CCD 积分像元在靶场范围内,最后,启动星上实时辐射标定功能获取标定数据。

相机实时辐射校正时的成像过程示意图如图 1 所示。图 1(a)表示 TDICCD 沿飞行方向正常成像时,TDI

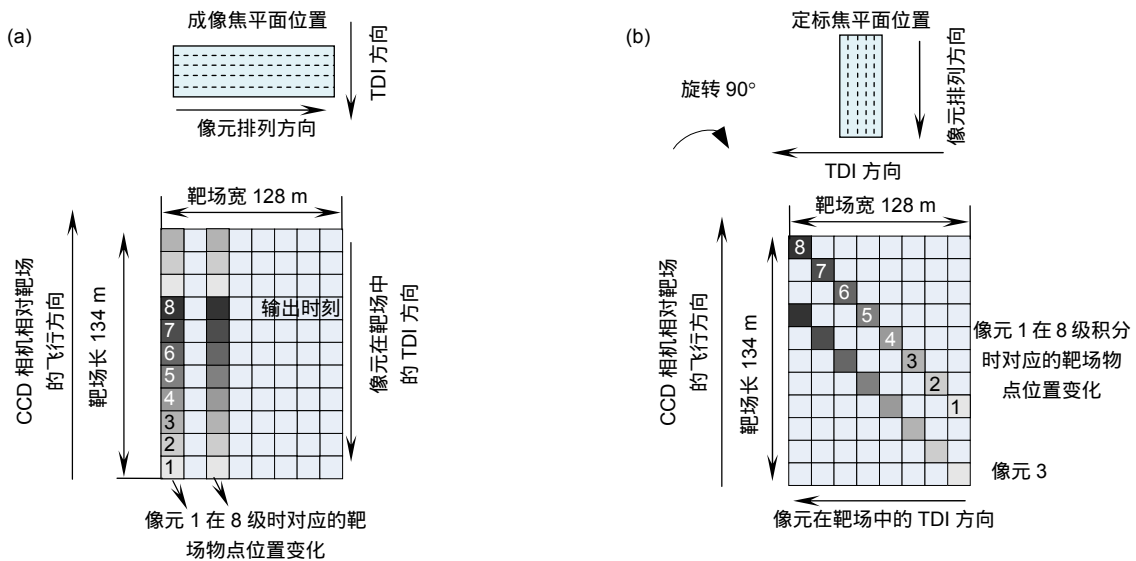


图 1 相机旋转 90°实时辐射标定成像示意图。(a) 正常成像模式; (b) 实时标定模式

Fig. 1 Diagram of camera real-time radiation calibration by rotating camera 90 degrees. (a) Normal imaging mode; (b) Real-time radiation calibration

方向与地面物点对应关系示意图(格点灰度表示光生电荷累计)。以像元 1 对应的物点为例,TDI-CCD 在 8 级下工作时,沿 CCD 相机的飞行方向,TDI-CCD 像元进行电荷积分,由于 TDI 方向和飞行方向相反,因此,像元和地面物点一一对应。当 8 个 CCD 像元扫过同一地面物点后,表示积分完成,输出该物点的图像灰度值;图 1(b)表示星上实时辐射校正模式下 TDI 方向与地面物点对应关系示意图。当焦平面旋转 90° 后,8 个 CCD 像元沿 TDI 方向对 8 个地面物点成像,并做电荷累加。由于地面景物反射率相同,因此,均值处理后可认为是对同一地物的 TDI 成像,从而获得该地物点在 TDI 模式下的响应值。

这种方法需要实现控制系统对标定时间和相机位置的精确控制;以及良好的天气条件和均匀地面反射率,以提高实时标定结果的精度。

在大视场、多片 TDICCD 拼接相机系统中,靶场面积越大,获得的星上实时辐射标定数据越多,基于多行辐射校正数据的数据后处理会更加准确。

### 3 辐射标定数据处理与可靠性存储

星上实时辐射标定后,可以获得相机在当前照度下的一组图像数据,并实现如下功能:

- 1) 标定 TDICCD 的通道差异,计算通道的实际增益调整值;
- 2) 标定通道内的像元差异,计算出像元固定图形噪声补偿值。

本文采用一点法进行数据处理,便于工程实现;对固定图形噪声的校正,不影响系统的性能指标。焦平面旋转 90° 成像后,数据处理步骤如下:

- 1) 标定数据的有效时刻计算和数据提取;

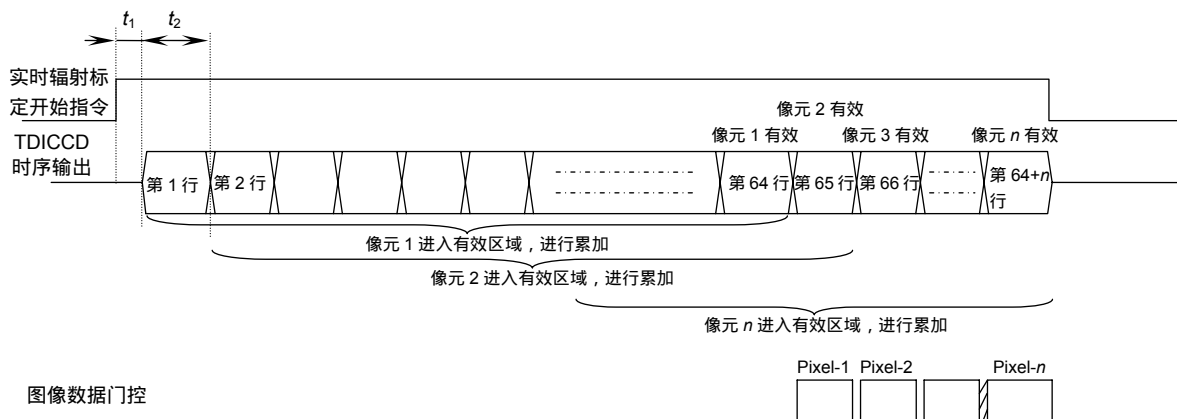


图 2 积分级数 64 级下的实时标定数据有效时刻

Fig. 2 The valid moment of the real-time radiation calibration image data below 64 integrated grades

- 2) 通道/像元级校正参数计算;
- 3) 校正参数的可靠性存储和使用。

#### 3.1 标定数据的有效时刻计算和数据提取

设从辐射校正指令发出,到输出 TDICCD 列转移时钟的时间为  $t_1$ , 设 TDICCD 的行周期为  $t_2$ , 则有效的标定数据输出时刻:

$$T_3 = t_2 \times N_{css} + t_1, \quad (1)$$

其中  $N_{css}$  表示 TDICCD 的积分级数。如果实时辐射校正指令在 TDICCD 成像过程中发出,由于  $0 < t_1 \leq t_2$ , 则:

$$N_{css} t_2 < T_3 \leq (N_{css} + 1)t_2. \quad (2)$$

当相机运行至靶场上空,发出实时辐射校正指令后,通过计时器,在  $T_3$  后即可采集到 TDICCD 的星上实时标定数据。

图 2 所示为 TDICCD 在 64 级积分级数下,从实时辐射标定指令开始到像元 1 有效数据输出的时间分配。

根据上述方法进行星上实时辐射标定,在输出的行图像数据中,有效像元数量由靶场规模决定。当靶场边长为  $L = a \times N_{css} + a \times 1$  ( $a \times N_{css}$  表示最小靶场边长)时,每行标定数据中只有一个灰度值是在靶场范围内的成像数据,即有效灰度值。图像数据中像元的有效标定数据位置如表 1 所示。

表 2 表示当靶场边长为  $L = a \times N_{css} + a \times M$  ( $M$  表示超出最小靶场的长度对应的像元数)时,实时标定数据有效所对应的像元位置,其中  $n > M$ ,  $n$  表示像元数量。当靶场足够大,  $M$  大于像元数  $n$  时,那么从第  $M$  行开始,获得所有的标定数据均为有效值,此时,可以更精确地实现星上实时标定数据的数据后处理,提高实时辐射校正的准确性。

表 1 靶场边长为  $a \times N_{\text{css}} + a \times 1$  时标定数据有效的像元位置  
Table 1 The valid radiation calibration pixel place in 1 line image data mode

序号	图像行数	有效像元及位置	含义
1	第 1 行	第 1 个像元	第 1 个像元的有效灰度
2	第 2 行	第 2 个像元	第 2 个像元的有效灰度
.....	.....	.....	.....
4	第 $n$ 行	第 $n$ 个像元	第 $n$ 个像元的有效灰度

表 2 靶场边长为  $a \times N_{\text{css}} + a \times M$  时标定数据有效的像元位置  
Table 2 The valid radiation calibration pixel place in  $M$  lines image data mode

序号	图像行数	有效像元及位置	含义
1	第 1 行	第 1 个像元	第 1 个像元的有效灰度
2	第 2 行	第 1~2 个像元	第 1~2 个像元的有效灰度
3	.....	.....	.....
4	第 $M$ 行	第 1~ $M$ 个像元	第 1~ $M$ 个像元的有效灰度
5	.....	.....	.....
6	第 $n$ 行 ( $n > M$ )	第 $n-M+1 \sim n$ 个像元	第 $n-M+1 \sim n$ 个像元的有效灰度
7	第 $n+1$ 行	第 $n-M+2 \sim n$ 个像元	第 $n-M+2 \sim n$ 个像元的有效灰度
8	.....	.....	.....
9	第 $n+M-1$ 行	第 $n$ 个像元	第 $n$ 个像元的有效灰度

星上 TDICCD 相机的数据处理采用高可靠性 FPGA 芯片实现, 利用内部 RAM, 完成数据的统计和计算。以表 2 为例, 首先, 在 FPGA 内部开辟 RAM, 容量为  $n \times [2\text{ceil}(\log_2^M) \times B]$  (bits)。其中,  $n$  为像元数量,  $M$  为超出最小靶场的长度对应的像元数,  $B$  为量化位数。 $\text{ceil}(\ast)$ 表示数据向上取整数。实时辐射标定时, 首先确定图像中的有效标定数据, 采用“读-处理-写”的方式进行 RAM 存储操作。对于  $M$  行有效数据,  $n$  个像元的数据获取时间为  $(n + M - 1) \times t_2$ 。累加结束后取均值, 将结果存储到原来的 RAM 地址中, 作为此次星上实时辐射标定的基本数据。

### 3.2 通道间校正参数计算

采用一点法实现通道间参数调整, 其目的是标定通道内所有像元的响应均值, 获得通道增益调整参数。首先, 读取 RAM 中的当前通道所有像元的实时标定数据, 计算均值, 作为当前通道的响应均值; 然后, 将每片 TDICCD 所有通道的响应均值汇总至 CPU。CPU 综合多片 TDICCD 全部通道的响应值后, 计算出每个通道的调整参数, 并设置对应的 TDICCD 增益参数。

在默认增益档位下, 各通道的实际增益参数  $G_i$

的计算式:

$$G_i = \frac{1}{R_i} \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3)$$

当增益档位扩大为原来的  $\kappa$  倍时, 各通道的实际增益参数  $G'_i$  计算式<sup>[12]</sup>:

$$G'_i = \kappa \times G_i \quad (4)$$

### 3.3 像元校正参数实时计算

一点法计算像元校正参数, 实现 TDICCD 像元固定图形噪声的校正。像元校正参数  $P_i$  在一个通道内的计算式:

$$P_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M R_i - R_i \quad (5)$$

其中:  $M$  为通道内像元数量,  $R_i$  为像元  $i$  的响应值。

星上实时标定像元校正参数的精度, 直接影响图像的 PRNU。由于探测器存在奇异像元, 增加了奇异像元处理功能。

奇异像元(地面标定位置)处理过程如下: 首先, 通过地面辐射标定, 存储奇异像元位置信息; 然后, 判断星上实时标定数据在奇异像元处的参数值。当星上校正参数合理有效时, 将其作为星上像元校正参数中的截距, 与地面像元校正参数的斜率组合作为该像

元的星上实时校正数据。

非奇异像元的像元响应曲线有稳定的线性区，因此，像元校正参数存在变化范围，设为 $\pm a$ 。在实时标定时，如果标定的像元校正参数在 $\pm a$ 范围内，则认为实时标定参数有效；如果超过 $\pm a$ ，此时，判断该实时校正参数与该像元的地面标定参数的变化趋势是否一致(符号的一致性)；如果参数的符号相同，证明二者变化趋势相同，则设置该像元的实时校正参数为范围极值(+ $a$ 或者- $a$ )；否则保持校正参数值不变。

星上实时计算像元校正参数的控制结构如图3所示。

### 3.4 星上实时辐射标定数据存储

星上实时辐射标定完成后，将实时计算结果(通道和像元校正参数)存储在EEPROM预留区中。EEPROM的存储控制分为存储、读出、校验三部分。当实时参数计算完毕后，将参数以“page\_write”模式写入到

EEPROM。

数据校验分两步：在数据存储时，设置字节校验位和多字节校验和，并将其存储到EEPROM中；在数据读出时，计算读出数据的校验位和多字节校验和是否完全一致。若不一致，则舍弃该数据。

在可靠性设计上，采用如下方法：

1) 冗余指令：当两条操作指令不矛盾且有效时，EEPROM操作指令被正确执行，否则抛弃该指令。指令执行后，输出相应的遥测数据；

2) 保护写模式：每次写操作，发送解保护字对EEPROM解锁；EEPROM在写操作完成后，发送写保护字使其处于数据保护状态；

3) 复位控制：复位信号用于禁止对EEPROM的读写。每次读写操作前，使能复位信号，解除对EEPROM的控制；读写结束后，将复位信号置为有效状态。

EEPROM控制指令的格式和内容如表3所示。

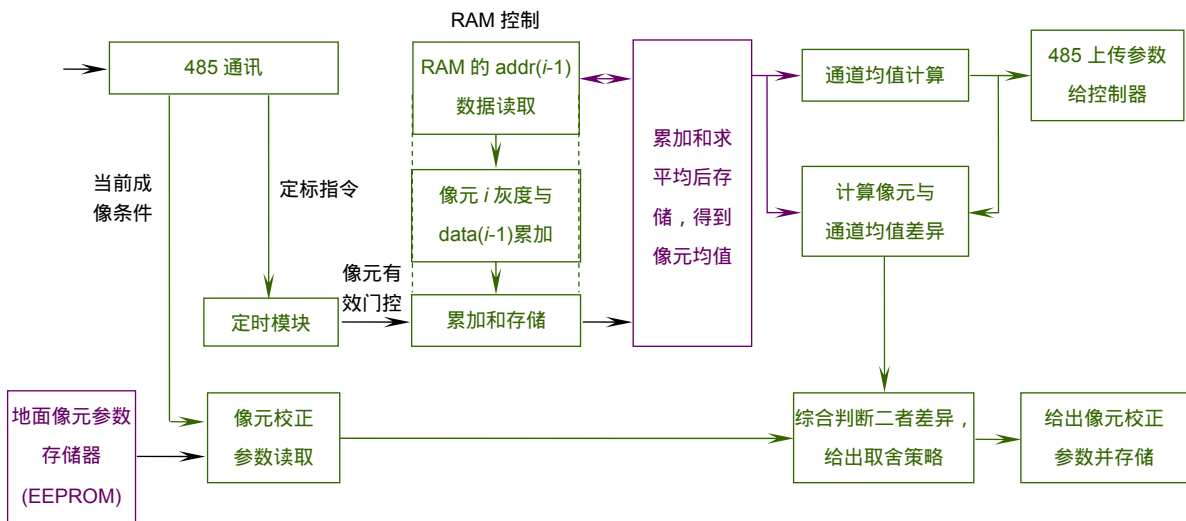


图3 一点法实现像元级参数星上实时计算的FPGA控制结构图

Fig. 3 The structure diagram of real-time calculation to the pixel correction parameters in FPGA at 1-point correction mode

表3 EEPROM控制指令格式

Table 3 Instruction format of EEPROM Control

类型	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
读写指令		—		有效: 0 无效: 1	读 EEPROM: 00 写 EEPROM: 10 备用: 11		像元参数: 0 通道参数: 1	固化区: 0 预留区: 1
参数指令		读: 0 写: 1		谱段号 000~111 (8个谱段)			参数类型 000~111 (8个级数)	

### 4 实验模拟验证和成像效果对比

在实验室，利用小型积分球和标准光学镜头模拟星上实时辐射标定及参数计算过程，对比了地面辐射校正结果和星上实时辐射校正结果，如图 4(a)和图 4(b)所示，结果基本一致；图 4(c)为实时标定前单片 TDICCD 可见光谱段的成像均匀性统计图，图 4(d)为实时校正后的积分球成像均匀性统计图；利用两组校正参数进行均匀光成像，图 5 为实时校正后的积分球成像效果。

表 4 为几种标定方法下，获得的通道间和像元级非均匀性指标(所有测试结果均基于单片 TDICCD 实

验)。其中，“未标定”是指在积分球均匀光照射下成像，且不采用校正算法时，获得的 TDICCD 原始的 PRNU 指标；“地面辐射校正”是指在积分球均匀光照射下成像，计算出像元校正参数，并在该参数参与运算的条件下获得的 PRNU；“标定灯标定”是指在机械结构上设置光源稳定度较高的标定灯，在暗室内打开标定灯成像，计算出像元校正参数，并在该参数参与运算的条件下获得的 PRNU；“实时辐射标定”是对均匀光照下的靶面成像，实时计算像元校正参数，并在该参数参与计算的条件下获得的 PRNU。

在表 4 中，采用“像元校正参数离散性”指标，

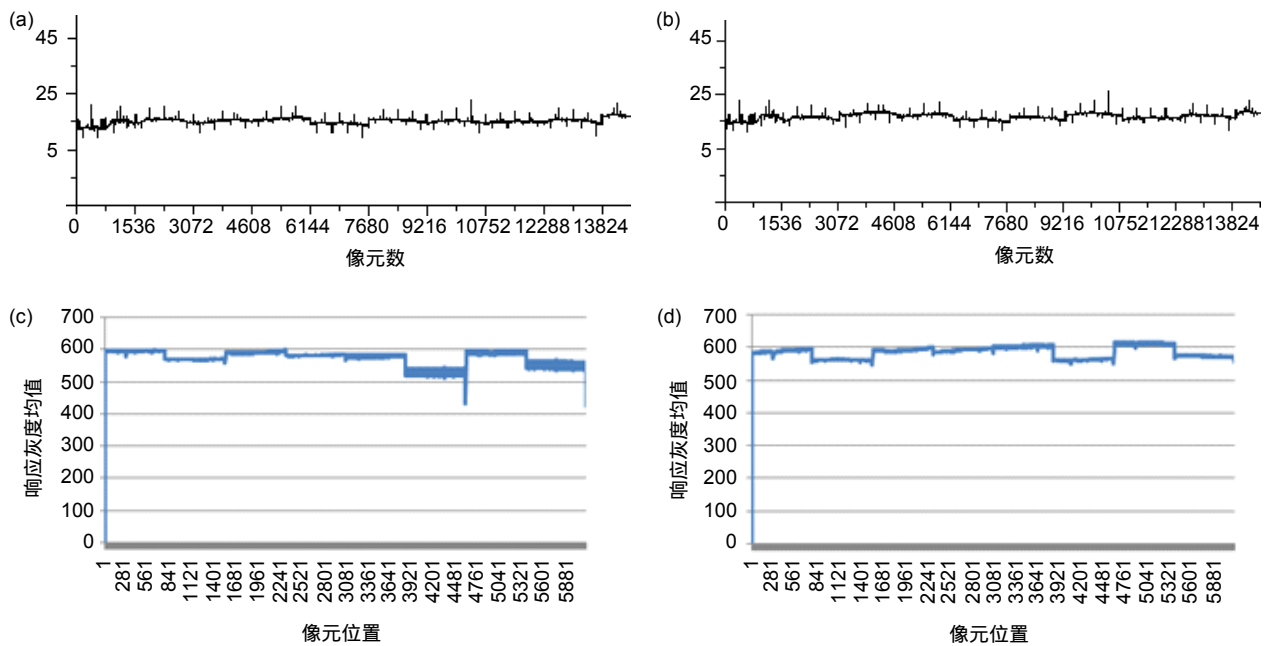


图 4 不同模式下的参数对比。(a) 多片 TDICCD 地面标定下，多光谱(蓝)校正参数(灰度基底 15)；(b) 多片 TDICCD 实验室实时标定下，多光谱(蓝)校正参数表(灰度基底 15)；(c) 未标定前，单片 TDICCD 可见光谱段的响应均值曲线(8 通道)；(d) 实验室实时标定后，该片 TDICCD 可见光谱段的响应均值曲线(8 通道)

Fig. 4 Comparison of parameters at different modes. (a) Multi-spectral (blue) correction parameters of multi-TDICCD at ground-based radiation calibration mode; (b) Multi-spectral (blue) correction parameters of multi-TDICCD at lab-based real-time radiation calibration mode; (c) Average response curve of single TDICCD in PAN spectrum before calibration; (d) Average response curve of single TDICCD in PAN spectrum after calibration in lab



图 5 实验室实时辐射校正后的均匀性成像效果

Fig. 5 Experimental imaging results of real-time radiation calibration in lab

表 4 不同辐射校正方法对 PRNU 的性能对比

Table 4 Comparison of the performances at different calibration methods to PRNU

标定方法	通道间 PRNU/%	像元间 PRNU/%	像元校正参数离散性
未标定	4.57	2.31	—
地面辐射校正	2.76	1.89	0.011
标定灯标定	2.99	2.31	0.017
实时辐射校正	2.85	2.01	0.015

对比几种辐射标定方法的性能，计算式：

$$\sigma_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{n P_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right| = \left| \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \right| \quad (6)$$

其中： $R_i$ 为像元  $i$  的响应值， $P_i$ 为像元  $i$  的校正参数值， $N$ 为像元数量。

通过实验对比，实时辐射标定方法能够实时地调整通道增益，解决固定图形噪声对成像质量的影响；基于奇异点保护的实时像元校正参数处理策略，较好地保护了像元校正参数的正确性。基于星上实时标定进行图像 PRNU 校正，获得的通道间 PRNU 可以达到 2.85%，通道内的 PRNU 值达到 2.01%，接近地面辐射校正方法中的 2.76%和 1.89%。

## 5 结 论

基于 FPGA 的星上实时辐射校正，在 TDICCD 拼接相机在轨运行条件下，实现了实时获取 TDI-CCD 通道和像元校正参数，以及相机在轨实时 PRNU 校正的功能，提高了相机性能。该方法在保证软件和校正参数可靠性的同时，有效地利用地面辐射校正参数，对星上实时辐射校正参数进行修正，获得了和地面辐射校正一致的成像效果。该方法不改变 CCD 电子学系统的硬件结构，对硬件资源和系统功耗的影响较小，通过了原理和实验室验证，是一种有效的星上图像数据实时处理方法，可以在航天遥感系统中使用。

## 参考文献

[1] Xu F, Liu J H, Wang X. Distortion correction method for CCD image based on calibration[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, **28**(4): 633–640.  
徐芳, 刘晶红, 王宣. 基于标定的 CCD 图像畸变校正方法研究[J]. *液晶与显示*, 2013, **28**(4): 633–640.

[2] Wang C Y, Liu J H, Chu G S, et al. Scene distinguish and aerial camera auto-dimming[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, **28**(6): 948–954.  
王成艳, 刘晶红, 楚广生, 等. 图像场景区分与航空摄像机自动调光方法研究[J]. *液晶与显示*, 2013, **28**(6): 948–954.

[3] Gan Z H, Xiong B P, Du M, et al. Curve fitting of CCD opto-electronic response based on neural dynamics[J]. *Op-*

*to-Electronic Engineering*, 2016, **43**(12): 52–57.  
甘振华, 熊保平, 杜民, 等. CCD 光电响应曲线的神经动力学拟合[J]. *光电工程*, 2016, **43**(12): 52–57.

[4] Liu J Z, Bai J, Sun Q, et al. Algorithm of the automatic exposure time adjustment for portable multi-band camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(6): 1498–1501.  
刘建卓, 白晶, 孙强, 等. 便携式多波段相机的自动调光算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, **42**(6): 1498–1501.

[5] Wu X X, Liu J G. Research on on-orbit automatic relative radiometric correction of multi-spectral space camera with large field of view[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, **34**(1): 104–111.  
武星星, 刘金国. 大视场多光谱空间相机在轨自动相对辐射校正研究[J]. *仪器仪表学报*, 2013, **34**(1): 104–111.

[6] Li X J, Ren J W, Li X S, et al. Non-uniformity calibration and correction of reflector-based mosaic CCD camera[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, **29**(6): 1057–1064.  
李晓杰, 任建伟, 李宪圣, 等. 反射式拼接 CCD 相机非均匀性定标与校正[J]. *液晶与显示*, 2014, **29**(6): 1057–1064.

[7] Li J, Zhu B, Guo L X, et al. A method of non-uniformity correction based on adaptively adjusting integration time[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(4): 486–490.  
李晶, 朱斌, 郭立新, 等. 一种积分时间自适应调整的非均匀性校正算法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(4): 486–490.

[8] Ren H H, Ruan P, He J W, et al. Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3476–3480.  
任焕焕, 阮萍, 何建伟, 等. TDI-CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3476–3480.

[9] Malek A, Alipour M. Numerical solution for linear and quadratic programming problems using a recurrent neural network[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, **192**(1): 27–39.

[10] Zhang W, Xie X F, Wang F G, et al. Single-point absolute radiometric calibration for space infrared camera by changing integration time[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(8): 2090–2095.  
张伟, 谢蕃芬, 王付刚, 等. 变积分时间的空间红外相机单点绝对辐射定标法[J]. *红外与激光工程*, 2012, **41**(8): 2090–2095.

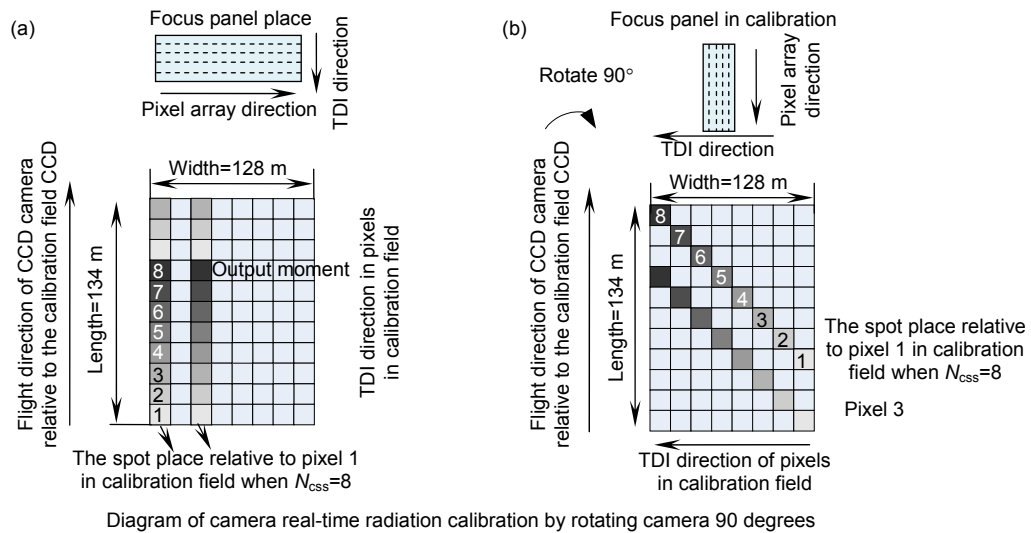
[11] Ning Y H, Guo Y F. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(2): 508–516.  
宁永慧, 郭永飞. 星上时间延迟积分 CCD 拼接相机图像的实时处理[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(2): 508–516.

[12] Ning Y H, Guo Y F. Correction of pixel response non-uniformity in TDICCD mosaic camera[J]. *Chinese Optics*, 2013, **6**(3): 386–394.  
宁永慧, 郭永飞. TDICCD 拼接相机的像元响应非均匀性校正方法[J]. *中国光学*, 2013, **6**(3): 386–394.

# Design and data processing of TDICCD real-time radiation correction system

Ning Yonghui\*, Shi Junxia, Liu Chunxiang

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130031, China



**Overview:** As to the radiation calibration process of the TDICCD mosaic imaging system in space, it rotates the focus panel of the camera 90 degrees, and then takes photos to the ground radiation calibration field, getting the real-time calibration images of the TDICCD mosaic system. It corrects the TDICCD PRNU with 1-spot algorithm based on the real-time calibration images, and calculates the differences among the pixels and the channels. It verifies the performance of the real-time pixel correction algorithm in space, and enhances the specifications of the TDI-CCD mosaic system.

When rotating the camera focus panel, for all the pixels of TDICCD pointing to the same spot-scene group in the ground calibration field, it makes sure that the real-time radiation calibration could get better results if the ground calibration field is of the same attribute in reflectivity. We analyse the control method of the imaging period, give the final calculation method by the use of the calibration imaging data, and finally describe the relationship between the calibration field range and the valid calibration imaging data positions. These descriptions give a detail design method of the real-time calibration correction system in space.

The proposed method can distinguish the strange pixels and the normal pixels in TDICCD mosaic system, which gives processing methods separately when using 1-spot algorithm to implement the TDICCD real-time calibration correction system. Considering the efficiency of the TDICCD pixel correction parameters got in ground calibration, a tactic is designed to enhance the reliability of the real-time pixel correction parameters; meanwhile, we design the diagram of the real-time calibration algorithm and the control flow in Xilinx FPGA, which gives a detail description of the pixel correction parameters storage and applications methods.

FPGA is used to calculate and save the parameters, and an optimization design is implemented to improve the system stability and reliability. We enforce the simulation experiments in lab with respect to the real-time radiation calibration algorithm, and give a comparison among different imaging calibration cases, such as ground calibration experiments, real-time calibration simulation experiments, and no calibration experiments. The results show that the real-time radiation correction algorithm could improve the performances of the PRNU in TDICCD mosaic system, and the PRNU of the TDICCD mosaic camera system in-channel reaches 2.01% after real-time calibration. This method is useful in real-time radiation calibration, and could get a better result in project.

**Citation:** Ning Y H, Shi J X, Liu C X. Design and data processing of TDICCD real-time radiation correction system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(12): 190112

Supported by Civil Aerospace Pre-research Project (D040101)

\* E-mail: way007@163.com