

文章编号: 1007-2780(2012)04-0557-06

空间相机异常响应图像处理方法

李宪圣¹, 叶 钊^{1, 2}, 任建伟¹, 刘则洵^{1, 2}, 万 志¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: lixs688@163.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 空间相机在轨长时间运行, 受空间环境影响, 相机性能下降, 在轨图像中出现黑色条纹, 严重影响了成像质量。局部 CCD 像元响应下降, 高能粒子冲击, 宇宙尘埃, 空间相机本身的附着物等都能引发图像黑色条纹的现象。文章通过对发射前实验室辐射定标数据研究, 提出一种基于最小二乘法和辐射亮度反演的在轨图像的校正方法, 可以有效地去除黑色条纹。在不同辐照度下, 采集所有像元的灰度值, 用最小二乘法估计所有像元灰度平均值与辐照度的对应关系, 计算出每个像元的校正系数, 并研究实验室辐射定标数据, 推算出现黑色条纹像元的校正因子, 通过图像黑色条纹校正函数矩阵对每个像元的实际灰度值进行校正。校正前黑色条纹像元灰度的偏差超过 10%, 校正后偏差小于 5%。从图像上观察, 经过该方法校正的图像, 能够有效去除黑色条纹, 得到清晰的图像, 结果令人满意。

关 键 词: 空间相机; 黑色条纹; 辐射定标; 最小二乘; 辐射亮度反演

中图分类号: V447; TP73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20122704.0557

Processing Method for Abnormal Response of Space Camera Image in Orbit

LI Xian-sheng¹, YE Zhao^{1, 2}, REN Jian-wei¹, LIU Ze-xun^{1, 2}, WAN Zhi¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China, E-mail: lixs688@163.com;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is known that step-down response of CCD's part pixels, impact of high-energy particles and absorbed cosmic dust in space camera can all induce the black stripes for the camera image. For the camera in orbit for a long time, the image quality is seriously affected. By researching for the pre-launch calibration data, an algorithm based on the least square method and radiance retrieval was proposed to renormalize the image in orbit, which could make the black stripes in the image be effectively eliminated. Firstly, the gray levels of CCD pixels under different irradiation grades were collected, and the relation between the average gray level of all pixels and the corresponding irradiation values was established by the least square method, then the correction index of each pixel was worked out, and thus the correction index of the black stripes' corresponding pixels could be obtained by analyzing the laboratory radiometric calibration coefficients. Lastly, the real gray levels of the black strips were computed by the correction index matrix. The experiment results show that for the modified images, the black stripes can be removed effectively and the image quality is satisfactory.

收稿日期: 2012-02-24; 修订日期: 2012-05-12

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划基金资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

作者简介: 李宪圣 (1979—), 男, 山东德州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事光电仪器辐射定标研究。

Key words: space camera; black stripes; radiation calibration; least square; radiance retrieval

1 引 言

空间 CCD 相机在空间环境下运行一段时间后,受空间环境因素的影响,其响应性能下降。大量数据表明,受使用寿命和空间环境的污染的影响,在轨运行的空间光学相机输出每年会发生多达 25% 的变化^[1-2]。为了提高空间相机在轨运行期间的观测准确性,需要进行星上定标^[3]实现在轨辐射定标,或利用地面辐射校正场对空间相机进行在轨辐射定标^[4-5]。在轨辐射定标主要是用于空间相机在轨运行期间绝对辐射量的校准,提高整机的成像性能。

空间 CCD(Charge Coupled Device)相机,在空间环境下受高能粒子、宇宙尘埃以及自身的微小附着物等的影响,输出图像出现黑色条纹。黑色条纹位置处的 CCD 像元可以正常成像,只是对同一地物而言,其输出灰度值明显下降,即整幅图像中局部像元位置对应的光学系统或 CCD 像元响应出现下降造成的。通常所用的空间相机图像校正难以有效消除黑色条纹^[6-7],为了解决黑色条纹对成像的影响,改善成像质量,通过分析空间相机发射前实验室辐射定标数据和对卫星在轨图像的采样分析,提出一种在轨图像的相对辐射校正方法,经过对图像的校正处理,获得了较好的效果,黑色条纹明显消除,图像质量明显改善。

2 辐射定标系数与图像灰度值关系

空间光学相机的实验室辐射定标^[8]是光学遥感及工程研制的一项重要工作内容。实验室辐射定标的目的是建立相机最终信号输出与输入辐射亮度之间的函数关系,假设空间光学相机在其瞬时视场内接收的来自目标景物的辐射亮度 L ,在所有成像环节都是线性系统的理想情况下,其图像上对应像元的数码输出 DN ^[9]可以表示为:

$$DN = L \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 T_0 R_{\text{CCD}} \beta_E t_{\text{Int}} \quad (1)$$

式中: D/f 为光学系统的相对孔径; T_0 为系统透过率; R_{CCD} 为 CCD 的响应度; β_E 为电子学系统增益; t_{Int} 为积分时间。

式(1)为空间光学相机的辐射响应方程,实际上由于光学系统像差、焦平面探测器的响应非线性以及 A/D 转换的非线性等的影响,图像的 DN 值和入瞳辐射亮度 L 之间不一定成严格的线性关系,依据实验室辐射定标原理,空间 CCD 相机输出数码 DN 与辐射亮度 L 之间的辐射响应函数可以表示为^[10]:

$$DN = DN_0 + r_1 L + r_2 L^2 + r_3 L^3 + \dots + r_n L^n \quad (2)$$

式中: DN_0 为空间 CCD 相机的暗信号; r_1 为 CCD 响应系数; $r_2, r_3, \dots, r_n$ 为二次以上的高次响应系数。 $r_i (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 是待定标的系数,绝对辐射定标的任务是确定式(2)中的多个定标系数,若式(2)中二次以上系数很小以至于其影响可以忽略,则该空间光学相机可以简化为线性响应系统。则式(2)中的定量关系可简化为:

$$DN = DN_0 + R \cdot L \quad (3)$$

式中: DN_0 为暗电流信号; R 为响应度。

空间相机在发射前进行实验室辐射定标,经过辐射定标可获得每个像元的响应度:

$$DN_i = DN_{i0} + R_i \cdot L_i \quad (4)$$

如图 1,拟合线性相关系数可达 0.999 9,继而可获得像元的相对响应关系。

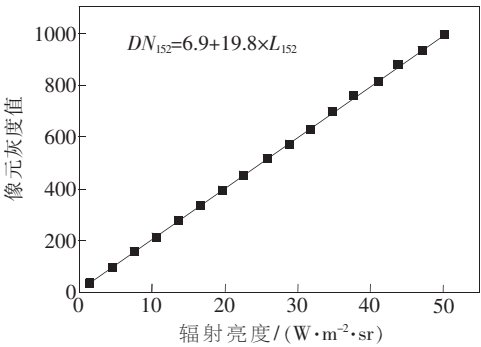


图 1 像元灰度值与辐亮度的关系曲线
Fig. 1 Relation between average grey values of No. 152 pixels and radiances

当具体应用定标结果对空间光学相机图像进行辐亮度反演时,一般利用式(2)的逆过程,即把某观测条件下的目标等效为入瞳辐射亮度表示为图像灰度的函数:

$$L = r'_0 + r'_1 DN + r'_2 DN^2 + \cdots r'_n DN^n \quad (5)$$

其中, $r'_0, r'_1, r'_2 \cdots r'_n$ 是辐射校正系数,一旦该定标系数被确定,就可以根据这个函数关系和相机的数码输出 DN 值反演出入射到相机的辐亮度 L ,即可还原出目标的辐射亮度图像。

3 在轨图像校正方法

理想情况下,在同一辐照度下 CCD 的各个光敏单元均有相同响应,但是像元间存在非均匀性使得不同像元具有不同的响应输出,表现在图像上就是出现明暗不同的条纹。但是当空间相机 CCD 中某一个或某几个像元受宇宙空间高能离子等影响,响应出现明显下降,其余像元正常成像时,CCD 输出图像中就会出现明显黑色条纹,如图 2 所示。此时,再使用一般的校正方法将收效甚微,需要使用新的校正方法使图像清晰无明显黑色条纹,新的校正流程如图 3。

实验室定标时采用均匀的积分球扩展辐射定标光源照明相机,经相机光学系统成像后均匀照明 CCD 焦平面,因而 CCD 每个像元的辐射照度是一致的。在相同辐亮度下,计算所有像元的灰度平均值 $\overline{DN}$;然后在不同亮度下,用最小二乘法

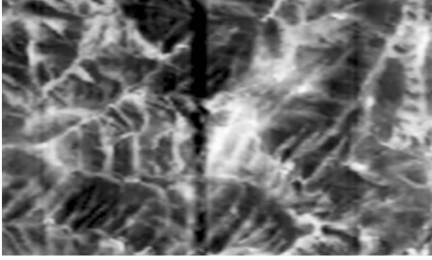


图 2 有明显黑色条纹的空间相机在轨图像

Fig. 2 Apparent black stripes of space camera images in orbit

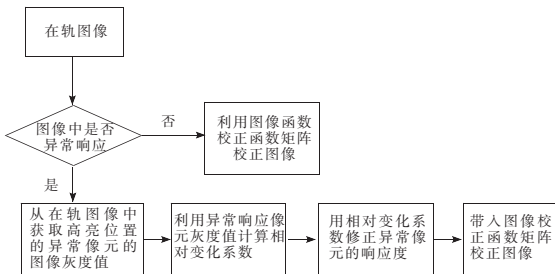


图 3 空间相机在轨图像异常响应校正流程

Fig. 3 Correction flow graph for abnormal response of space camera images in orbit

可确定所有 CCD 像元平均灰度值与辐亮度之间的函数关系:

$$\overline{DN} = \overline{DN}_0 + L \cdot \overline{R} \quad (6)$$

将 CCD 输出灰度图像转变为相机入射辐射亮度图像后,每个像元对应的辐射亮度 L_i 应该是一致的,根据辐射亮度图像反演原理,相机输入辐射亮度反演公式为:

$$L_i = \frac{DN_i - DN_{i0}}{R_i} \quad (7)$$

由式(7)计算的辐射亮度值 L_i 对于所有像元是一致的,可统一用 L 表示,将式(7)代入式(6)得到表达式如下:

$$\overline{DN} = \overline{DN}_0 + \overline{R} \times \frac{DN_i - DN_{i0}}{R_i} \quad (8)$$

则校正后的数码值 DN'_i 可写为:

$$DN'_i = \overline{DN} = \overline{DN}'_0 + \overline{R} \frac{DN_i - DN_{i0}}{R_i} \quad (9)$$

由此可得每个像元响应度的校正系数:

$$R'_i = \frac{\overline{R}}{R_i}$$

暗信号校正直:

$$\overline{DN}'_{i0} = \overline{DN}_0 - DN_{i0} \times \frac{\overline{R}}{R_i}$$

式(9)按校正系数表示的方法可以写成

$$DN'_i = \overline{DN}'_0 + R' \cdot DN_i \quad (10)$$

其中, $\overline{DN}_0$ 和 $\overline{R}$ 分别为最小二乘拟合曲线的拟合系数, $\overline{DN}_0$ 为平均暗电流输出, $\overline{R}$ 为所有像元的平均响应度。式(10)表示灰度值到校正灰度值的转换,实现 CCD 输出的辐射校正^[11-13]。

在实验室辐射定标过程中出现过有黑色条纹的定标图像,将带有黑色条纹的图像,按图像灰度平均值由高到低取出 3 幅图像,图像的平均灰度值分别为 950, 480, 85 (饱和灰度值为 1 023)。计算这 3 幅图像中出现黑色条纹的像元灰度 DN_{a+i} 与黑色条纹前一个正常响应的像元灰度值 DN_a 的相对关系 K_i , 并与对应像元序号的响应度关系 M_i 进行比较:

$$K_i = \frac{DN_{a+i}}{DN_a} \quad M_i = \frac{R_{a+i}}{R_a} \quad (11)$$

如图 4 所示, 151~166 像元分别与 150 像元比较, 图像平均灰度值越低, 二者的偏差越大, 图像平均灰度值在 85 时, 二者有明显的差异 $1 - \frac{K_i}{M_i} \approx 2\%$ 。图像的灰度值越高, 像元间的灰度相对关系

越接近像元的响应度相对关系,当图像灰度接近饱和时,如图像的平均灰度值为 950 时,灰度的相对关系曲线与响应度相对关系曲线基本重合,如图 5 所示,二者的差异为 $1-\frac{K_i}{M_i}<0.02\%$;因而当在轨图像中出现黑色条纹时,可用图像灰度值较高(接近饱和)的图像区域获得相对变化系数 K_i ,作为响应度的相对变化系数即 $M_i=K_i$ 。

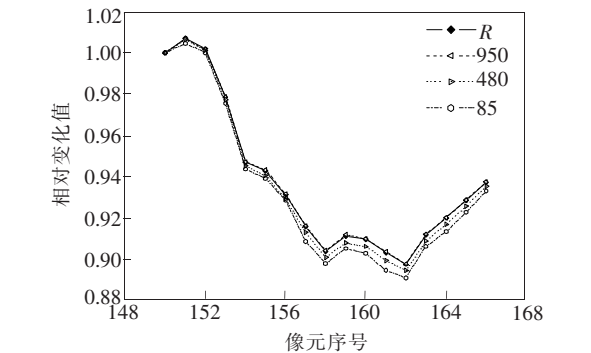


图 4 图像灰度与响应度相对变化曲线
Fig. 4 Relation between image grey values and responsibility

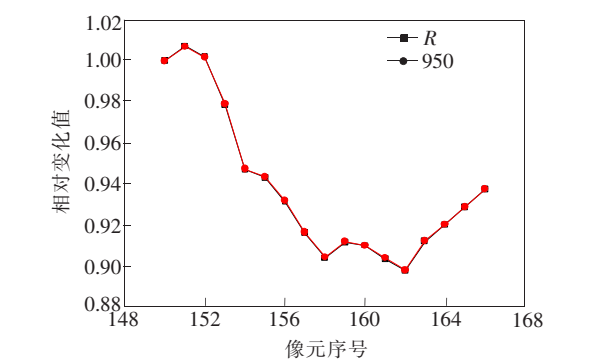


图 5 像元灰度 DN 值与响应度的相对变化量
Fig. 5 Relation between image grey value and responsibility for pixels

设出现黑色条纹像元的序号为 m ,在黑色条纹附近找出接近饱和的区域,获取黑色条纹附近像元的图像灰度值,计算像元的相对变化系数作为响应度的校正系数,用该校正系数对在轨图像黑色条纹像元的响应度进行校正:

$$R'_m = R_m K_m \tag{12}$$

出现黑色条纹的位置使用式(12)带入式(10)替代原有校正因子,可得到在轨图像新的校正函数矩阵式(13):

$$\begin{bmatrix} DN'_1 \\ DN'_2 \\ \vdots \\ DN'_m \\ \vdots \\ DN'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DN'_{10} \\ DN'_{20} \\ \vdots \\ DN'_{m0} \\ \vdots \\ DN'_{n0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R'_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R'_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & R_m \cdot K_m & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R'_n \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} DN_1 \\ DN_2 \\ \vdots \\ DN_m \\ \vdots \\ DN_n \end{bmatrix} \tag{13}$$

4 试验及结果分析

空间相机实验室定标可以得出式(6):

$$\overline{DN} = 10.04 + 12.64 \cdot L$$

$\overline{DN}_0=10.04, \overline{R}=12.64$,同理可得到每个像元的暗信号 DN_{i0} 和响应度 R_i ,进而计算得到线性校正系数 $\overline{DN}'_0$ 和 R' 。

取某一亮度下的实验室定标图像进行校正。定标图像是空间相机在积分球输出某一固定亮度条件下得到的灰度图像,理论上应该是灰度均匀的图像。但是由于 CCD 输出非均匀性的影响,使得图像在 CCD 片内出现明显的亮暗条纹,如图 6 (a)所示,经校正后得到灰度均匀的图像,如图 6 (b)所示。对比两幅图的非均匀性、平均灰度值,说明校正后图像质量得到明显改善。

从在轨图像中,确定黑色条纹的像元序号,并

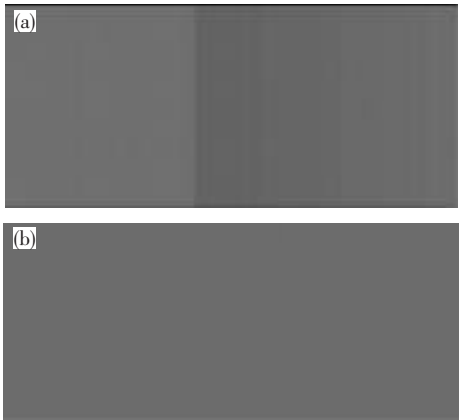


图 6 校正前后的定标图像。(a) 校正前;(b)校正后。
Fig. 6 Uncorrected and corrected calibration image. (a) uncorrected;(b) corrected.

表 1 校正前后 CCD 输出差异

Table 1 Corrected and uncorrected discrepancy of CCD

	图像平均灰度	像元灰度值均方根偏差/%
校正前	681.0	1.4
校正后	678.8	0.2

在图像接近饱和的区域获取像元的图像灰度值,以黑色条纹的前一像元的灰度值为基准,获得黑

色条纹像元的灰度相对变化系数 K_i ,即为响应度辐射校正系数,见表 2。将其代入到式(13)在轨图像校正函数矩阵中,利用修正的响应度对在轨图像按辐亮度反演法进行辐射校正使用该方法,获得黑色条纹像元位置的相对变化量见表 2,从表 2 中可以看出,在校正前像元灰度的相对变化量可达 14%,校正后的相对变化量小于 5%。利用该修正的辐射校正函数矩阵对图像进行辐射校正,校正前后的图像效果见图 7(a)、

表 2 8 个黑色条纹像元校正前后的数据

Table 2 Corrected and uncorrected data of 8 pixels for black stripes

像元序号 (i)	校正前灰度值 (DN_i)	相对变化量 (K_i)	响应度 (R'_i)	校正后灰度值 (DN'_i)	校正后灰度 偏差/%	校正前灰度 值偏差/%
491	259.20	1.000	12.64	260.92	0.0	0.0
492	250.09	0.996	12.59	258.96	0.4	3.5
493	242.32	0.963	12.17	252.81	0.8	6.5
494	237.32	0.936	11.83	252.15	3.1	8.4
495	232.70	0.919	11.62	248.05	3.4	10.2
496	229.08	0.897	11.34	250.42	4.9	11.6
497	225.40	0.883	11.16	252.64	4.0	13.0
498	223.50	0.866	10.94	256.50	3.2	13.8

(b),由图 7(b)可以看出,校正后的图像有明显的改善。

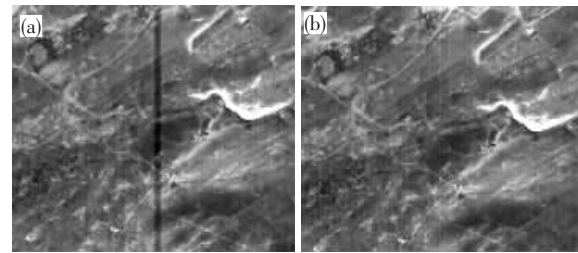


图 7 校正前后的外场图像;(a)校正前;(b)校正后。
Fig. 7 Uncorrected and corrected image in the external field. (a)uncorrected;(b) corrected.

5 结 论

空间相机在轨运行一段时间后,受空间环境等因素的影响,图像中会出现明显的黑色条纹,利用实验室辐射校正数据难以有效进行校正。本文以辐射定标技术为基础,通过研究实验室辐射定标数据,发现在接近饱和的图像中像元灰度值的相对变化系数与响应度的相对变化系数非常接近。因而提出从在轨图像中获取校正系数的方法,对出现黑色条纹的像元区域进行响应度修正后,用于辐射校正。实验结果表明,该校正方法能有效去除黑色条纹,图像质量明显改善。

参 考 文 献:

[1] ZHENG Qinbo, DING Lei. Radiant calibration for solar channels of space-borne remote sensor[J]. SPIE,1998, 3505:139-143.
[2] 叶钊,任建伟,李宪圣,等.用于星上定标光源的 LED 筛选装置 [J]. 光学 精密工程,2012,20(1):64-71.
[3] 查鹏.空间相机星上辐射定标技术的研究[J]. 红外, 2006, 27(3):32-39.
[4] 傅俏燕,闵祥军,李杏朝,等,敦煌场地 CBERS-02 CCD 传感器在轨绝对辐射定标研究[J]. 遥感学报,2006,10(4): 433-439.

