

文章编号:1007-2780(2011)03-0379-05

基于辐射亮度反演的 TDI CCD 相机的 响应非均匀性校正

全先荣^{1,2}, 李宪圣¹, 任建伟¹, 刘则洵^{1,2}, 叶 钊^{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: xianrong870721@163.com;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 分析了 TDI CCD 的各种噪声, 重点研究了响应非均匀性和固定图形噪声对成像质量的影响, 通过辐射亮度反演的方法对响应非均匀性进行了校正。实验结果表明, 该校正方法能够有效去除响应非均匀性造成的条纹, 得到清晰的图像。

关 键 词: 辐射亮度反演; 非均匀性校正; TDI CCD 相机; 辐射定标

中图分类号: V447; TP73 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20112603.0379

Nonuniformity Correction of TDI CCD Camera Based on Radiation Luminance Reverses

QUAN Xian-rong^{1,2}, LI Xian-sheng¹, LIU Ze-xun^{1,2}, YE Zhao^{1,2}, WANG Zhi¹

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

Changchun 130033, China, E-mail: xianrong870721@163.com;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Several noises of TDI CCD were analyzed, and the effects of nonuniformity and fixed pattern noise to image quality were discussed. The nonuniformity was corrected by radiance retrieval method. The experimental results indicate that this method can eliminate the stripe and get clear image.

Key words: radiance retrieval; nonuniformity correction; TDI CCD camera; radiation calibration

1 引 言

CCD(Charge-coupled Device)以其自扫描, 高分辨率、易与计算机连接等特点, 以及输出噪声低、动态范围大、量子效率高、光谱响应范围宽、任何稳定性好等突出优点被认为是可见光成像、空间光学、微光夜视等领域最有前途的探测器件^[1]。CCD 的 TDI(Time Delayed and Integration)工作模式在不牺牲空间分辨能力的情况下, 提高了相机的灵敏度, 在航天航空遥感中得到了越来越广

泛的应用。TDI CCD 对于成像系统的小型化、轻量化和提高分辨率等方面起着至关重要的作用, 但 TDI CCD 的图像信号中含有各种噪声, 若不进行处理将严重影响遥感器的图像质量和信噪比(S/N)。为了得到高质量的图像, 需要对相机的非均匀性进行校正。目前有很多非均匀性校正方法, 如一点校正法、两点校正法、多点校正法^[2-4]、神经网络法^[5]和偏置均衡法^[6]等。一点校正算法只对各个像元的偏移量进行补偿而没有对增益做校正, 当目标的辐亮度偏移定标点时, 空间噪声很

收稿日期: 2010-10-29; 修订日期: 2010-11-28

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

作者简介: 全先荣(1987-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事辐射定标及遥感图像处理的研究。

大,校正范围很小。多点校正法算法精度高但比较复杂,实现起来困难较大,而且对探测单元自身响应的非均匀性无法校正^[2]。工程中最常用的是两点校正法及其改进算法。两点校正算法不仅对器件的暗电流做了补偿,还对增益做了校正,对具有线性响应的图像传感器可以取得很好的校正效果^[7];但是该方法通常取 2 个辐照度下的响应作一条直线作为理想响应曲线,与真实的辐射响应存在一定的偏差,未能充分利用多个辐照度下的数据。

针对以上校正法的不足,本文提出了一种可以利用多个辐亮度下的数据进行非均匀性校正的方法。该方法以辐射定标技术为基础,首先通过相机辐射定标,获得相机所有像元在各个辐亮度(本文为 12 个)下的图像灰度数据,利用辐亮度和图像灰度数据,通过最小二乘法计算每个像元的响应度,然后用每个像元的响应度对图像进行亮度反演,求得亮度图像,最后再转换为灰度图像。该过程可以消除由于响应非均匀性而造成的图像条纹。

2 TDI CCD 的噪声分析

TDI CCD 是一种具有面阵结构线阵输出的 CCD,具有多重级数延迟积分的功能。TDI CCD 的噪声主要来自两个方面:一是 TDI CCD 器件本身所固有的噪声,如霰粒噪声、非均匀性噪声、暗电流噪声、固定图形噪声、转移噪声等;二是 TDI CCD 工作过程中产生的各种噪声,如复位噪声、读出噪声和 $1/f$ 噪声等^[8]。在 TDI CCD 的各种噪声中,复位噪声、霰粒噪声、暗电流噪声、转移噪声等为器件固有特性,目前尚没有较好的去噪技术; $1/f$ 噪声可以通过相关双采样硬件技术去除;而非均匀性和固定图形噪声的去除则可以通过辐射校正的方法实现。

2.1 非均匀性

非均匀性包含暗电流非均匀性和光子响应非均匀性。暗电流非均匀性是由于 TDI CCD 每个像元的暗电流不同形成的。光子响应非均匀性是由于 TDI CCD 器件的光敏元对光子响应存在微小的差别而形成的^[8]。

2.2 固定图形噪声

固定图形噪声是由于暗电流分布不均匀、各光敏元大小间隔不等而引起的空间分布噪声。由于工艺过程不完善及材料本身的不均匀性,CCD 体内的暗电流密度分布是不均匀的,特别是在某

些单元的位置上,会由于缺陷大量集中而造成暗电流尖峰。这些缺陷的数目是由衬底材料的质量和高温工序决定的。在摄像应用中,各个信号电荷包的积分地点不同,读出路径也不同。因此暗电流尖峰对各个电荷包贡献的电荷量不等,于是造成很大的背景涨落,这称为固定图形噪声。若遮盖住进入 CCD 相机的所有光线,此时在屏幕上会看到灰度等级不同的有规律的条纹,即为固定图像噪声^[9]。

3 辐射定标校正方法

空间光学遥感器在发射前要进行实验室辐射定标,目的是建立遥感器入瞳处输入辐亮度和数字化输出之间的定量关系^[10],为不同辐亮度(随太阳天顶角和地物平均反射率而改变)的地面目标获得曝光量适合的图像提供有用的实验数据^[11]。

空间光学遥感器研制完成后,其光学系统的相对孔径和系统的总透过率均为确定的常数。在进行实验室辐射定标时,光学遥感器 TDI CCD 的积分时间、级数和电子学系统的增益都为已知量。TDI CCD 的辐射响应与积分时间成比例关系,因此可以在辐射定标时改变积分级数和增益的组合,求得每一组合下的辐射响应函数,然后在空间光学遥感器成像时,按 TDI CCD 积分级数和放大器增益的组合参数成像,在图像校正时按该组合下的辐射响应函数做图像校正。

假设遥感器在其瞬时视场内接收的来自目标景物的辐射亮度为 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 可以表示为^[12]:

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

式中, D/f 为光学系统的相对孔径, T_0 为系统的总透过率, R_{CCD} 为 CCD 焦平面探测器的响应度, β_E 为电子学系统增益, t_{int} 为积分时间。

式(1)为遥感器的辐射响应方程。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,这时可以用泰勒级数来表示相机数码输出与辐射亮度关系的辐射响应函数^[12]:

$$DN = A_0 + A_1 L + A_2 L^2 + A_3 L^3 + \cdots + A_n L^n \quad (2)$$

式中, $A_0, A_1, A_2, \dots, A_n$ 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。

在式(2)中, 常数 A_0 的物理含义为焦平面探测器、电子学系统和杂散辐射产生的相机暗背景输出信号, A_1 为相机的线性响应系数, $A_2 \dots A_n$ 为二次以上的高次响应系数。若式(2)中二次以上系数很小以至于其影响可以忽略, 则该传感器可以简化为线性响应系统。满足下式:

$$DN = A_0 + A_1 L \quad (3)$$

当具体应用定标结果对遥感图像进行辐射亮度反演时, 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^[12]:

$$L = A'_0 + A'_1 DN + A'_2 \cdot DN^2 + A'_3 \cdot DN^3 + \dots A'_n \cdot DN^n \quad (4)$$

其中, $A'_0, A'_1, A'_2 \dots A'_n$ 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 值反演出相机入瞳处的辐射亮度 L , 最终还原出目标的辐射亮度图像。

4 图像的辐射亮度反演

TDI CCD 在成像时由于存在响应非均匀性和固定图形噪声, 使得图像不够清晰。由于相邻像元的响应不一致使得图像上存在条纹, 通过图像反演后还原得到的亮度图像可以修正噪声, 使图像均匀, 条纹消失。

在实验室通过辐射定标, 得出光学遥感输出的图像灰度值(DN 值)与景物辐射亮度 L 呈线性关系, 线性拟合相关系数为 0.999, 因此可以求解出每个像元在式(3)中的定标系数 A_{0i} 和 A_{1i} , 由式(5)可以反演出亮度图像。

$$L_i = \frac{DN_i - A_{0i}}{A_{1i}} \quad (5)$$

式中, DN_i 为第 i 个像元的输出灰度值; L_i 为对应的辐射亮度值; A_{0i} 和 A_{1i} 为第 i 个像元的暗信号和响应度。

通过式(5)将灰度值转换为亮度值, 消除了响应非均匀性的影响; 在图像显示时再将亮度图像按线性关系转换为对应要求的灰度图像, 利用式(6)可以得到经校正后的各像元灰度值:

$$DN_i = L_i \times \bar{A} + A_0 \quad (6)$$

$\bar{A}$ 为所有像元的平均响应度, A_0 为所有像元的平均暗信号值。

在同一辐射亮度下, 理想情况下各个光敏单元均有相同的响应, 像元间非均匀性的存在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。非均匀性校正的目的就是使不同的像元在同一辐射亮度输出相同的灰度值, 得到清晰的图像。经过以上两次变换后, 在同一辐射亮度下, 不同像元输出相同的灰度值, 从而消除了由于响应不均匀性造成的条纹, 得到清晰的图像。

5 实验结果及分析

实验中将定标图像经过式(5)和(6)的两次变化后得到校正后的图像。定标图像是在积分球输出某一固定亮度时相机得到的灰度图像, 理论上应该是灰度均匀的图像, 但是由于 CCD 响应非均匀性的影响, 使得图像存在亮暗不同的条纹, 如图 1(a)所示, 经反演后条纹消失, 得到灰度均匀的图像, 如图 1(b)所示。

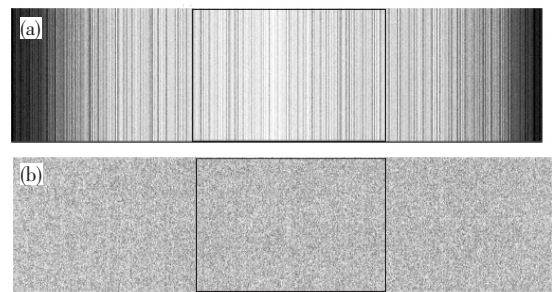


图1 (a)定标原始图像;(b)定标反演后图像。

Fig.1 (a) Original calibration image; (b) Revised calibration image.

取饱和灰度值的 50% 计算相机所有像元的响应非均匀性。图 1 是灰度值为 550 码左右的定标图像, 计算一个通道 4 096 个像元的响应非均匀性均方根误差为 9.77%。针对上幅图像灰度值, 依据响应度计算各像元对应的亮度, 即将图像灰度数据进行亮度反演, 反演后响应非均匀性均方根误差为 0.83%。校正前后的响应非均匀性比较如表 1 所示。

图 2 给出了图 1 中两幅图像的 DN 值曲线, 从图中可以看出: 校正前的图像灰度上下波动很大, 响应非均匀性的影响很明显, 4 096 个像元灰度的均方根偏差为 6.26; 而校正后的灰度曲线则上下波动很小, 灰度的均方根偏差在 0.53, 基本上消除了响应非均匀性的影响。

表 1 校正前后 CCD 响应非均匀性

Table 1	Revised and unrevised non-uniformity of CCD		
	4 096 像元 平均灰度	4 096 个像元 灰度的均 方根偏差	均方根相 对误差/%
校正前	558.3	6.26	9.77
校正后	552.4	0.53	0.83

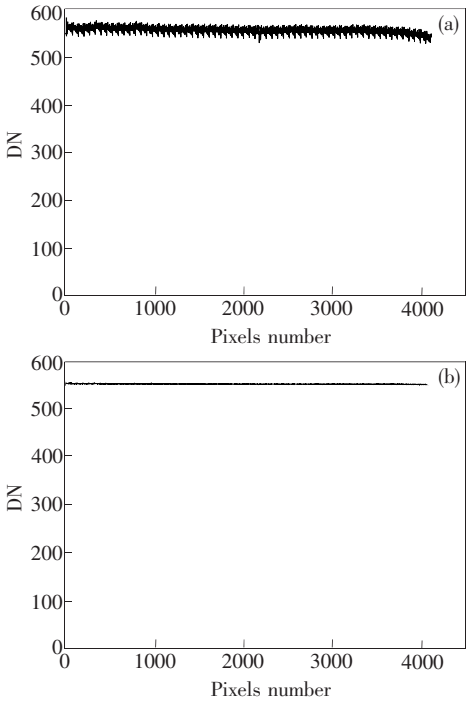


图 2 (a)校正前灰度曲线;(b)校正后灰度曲线.

Fig. 2 (a) DN curve before revision;(b) DN curve after revision.

图 3 给出了实际外场成像的图像在校正前后的对比图像,校正前可以看到明显的条纹,校正后条纹消失,图像层次清晰,细节更容易分辨。

基于辐射定标的响应非均匀性校正方法算法简单,实现容易,效果明显,是一种方便快捷的图像校正方法。理论上经校正后同一辐照度下不同像元输出灰度应该相同,但是由于存在计算精度误差,所以最后结果仍然存在一定的偏差。当响应非均匀性较大时,校正后的图像仍可能出现轻微的条纹。另外,由亮度图像转换到灰度图像时选取的平均响应度也存在一定的误差。对于该响应度的选取存在几种假设,实验中也选取了最大、最小响应度进行图像转换,从最后的结果来看还

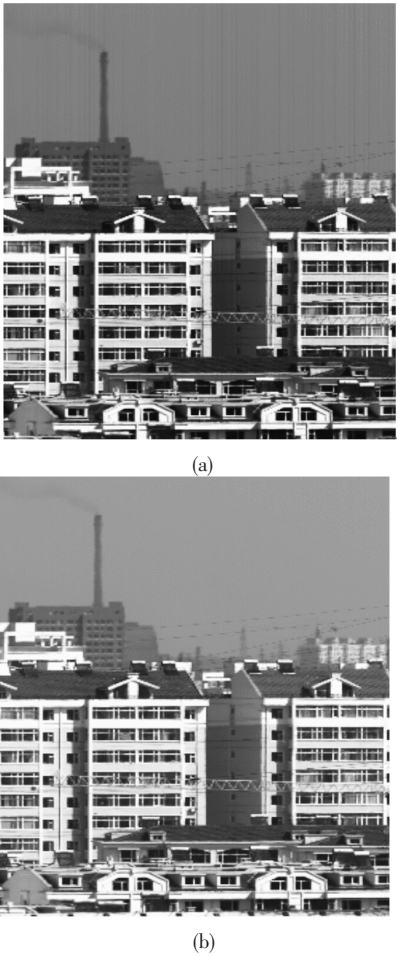


图 3 (a)校正前图像;(b)校正后图像.

Fig. 3 (a) Unrevised image;(b) Revised image.

是选择平均响应度的图像效果好,在误差允许的范围内均能使图像清晰,条纹消失。实验结果表明,该方法满足一般的非均匀性校正要求,可以得到最佳的图像质量。

6 结 论

针对现有非均匀性校正方法的不足,提出了一种可以利用多个辐亮度下的数据进行非均匀性校正的方法。该方法以辐射定标技术为基础,首先通过相机辐射定标,获得相机所有像元在各个辐亮度下的图像灰度数据,然后利用辐亮度和图像灰度数据,通过最小二乘法计算每个像元的响应度,用每个像元的响应度对图像进行亮度反演,求得亮度图像,最后再转换为灰度图像。实验结果表明,该校正方法能够有效去除响应非均匀性造成的条纹,得到最佳的图像质量。

参 考 文 献:

- [1] 佟高峰,阮锦,郝志航. CCD 图像传感器降噪技术的研究[J]. 光学 精密工程, 2008, 8(2): 140-145.
- [2] 刘亚侠,阮锦,郝志航. TDI CCD 遥感相机非均匀性校正的研究[J]. 光学技术, 2003, 29(6): 749-751.
- [3] 赵变红,何斌,杨利红,等. TDI-CCD 图像固有条带噪声的消除方法及实现[J]. 液晶与显示, 2010, 25(5): 752-758.
- [4] 刘妍妍,李国宁,张瑜,等. 光面阵 CCD 响应非均匀性的检测与校正[J]. 液晶与显示, 2010, 25(5): 759-753.
- [5] Scrihner D A, Sarkady K A, Kruer M R, *et al.* Adaptive non-uniformity correction for IR focal plane arrays using neural network[J]. *SPIE*, 1991, 1541: 100-109.
- [6] Parrish W J, Woolaway J T. Improvements in uncooled systems using bias equalization [J]. *SPIE*, 1999, 3698: 748-755.
- [7] 蔡荣太,王延杰. 图像传感器非均匀性的三步校正法[J]. 半导体光电, 2007, 28(6): 888-891.
- [8] 李云飞,李敏杰,司国良,等. TDI CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1196-1202.
- [9] Boreman G. Fourier spectrum techniques for characterization of spatial noise in imaging arrays[J]. *Opt. Eng.*, 1987, 26(10): 985-991.
- [10] 任建伟,刘则洵,万志,等. 离轴三反宽市场空间相机的辐射定标[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
- [11] 刘亚侠. TDI CCD 相机实验室辐射定标的研究[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 71-74.
- [12] 任建伟,万志,李宪圣,等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.

SI 词头

代表的因素	词 头 名 称		符 号	代表的因素	词 头 名 称		符 号
	英 文	中 文			英 文	中 文	
10^{24}	yotta	尧[它]	Y	10^{-1}	deci	分	d
10^{21}	zetta	泽[它]	Z	10^{-2}	centi	厘	c
10^{18}	exa	艾[可萨]	E	10^{-3}	milli	毫	m
10^{15}	peta	拍[它]	P	10^{-6}	micro	微	μ
10^{12}	tera	太[拉]	T	10^{-9}	nano	纳[诺]	n
10^9	giga	吉[咖]	G	10^{-12}	pico	皮[可]	p
10^6	mega	兆	M	10^{-15}	femto	飞[母托]	f
10^3	kilo	千	k	10^{-18}	atto	阿[托]	a
10^2	hecto	百	h	10^{-21}	zepto	仄[普托]	z
10^1	deca	十	da	10^{-24}	yocto	幺[科托]	y