

文章编号 1004-924X(2015)10-2952-10

多通道时间延迟积分 CCD 辐射标定和像元实时处理

宁永慧*, 郭永飞, 曲利新, 杨会生

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:剖析了时间延迟积分 CCD(TDICCD)像元校正对信噪比和调制传递函数测试的影响,设计了基于辐射标定和地面控制的多通道 TDICCD 像元响应非均匀性实时处理方法以提高星上实时图像的像元响应非均匀性。该方法基于辐射标定去除图像的固定图形噪声,并校正图像奇异点;通过分析星上实时传输图像,处理奇异点像元的图像问题,实现地面控制像元响应非均匀性的实时调整。提出的系统实时处理方式可以不改变硬件结构即有效改善图像的视觉效果,对于坏像元、像元性能降低、像元污染等特定情况有很强的纠错能力。实际成像试验的对比表明,该方法对信噪比、调制传递函数有很好的修正作用,其精确调整能力分别达到 0.1db 及 0.01;在 50%饱和值下测试的图像非均匀性指标达到 1.25%。该方法结构简单,在工程实践中有很好的应用前景。

关键词:时间延迟积分 CCD(TDICCD);辐射标定;像元响应非均匀性校正;现场可编程门阵列(FPGA)实时处理;灰度插值
中图分类号:V248.3;TP751.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152310.2952

Radiometric calibration and pixel data real-time processing of multi-tip TDICCD

NING Yong-hui*, GUO Yong-fei, QU Li-xin, YANG Hui-sheng

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: way007@163.com

Abstract: The effects of pixel level correction of Time Delay Integration CCD(TDICCD) on the Signal to Noise Ratio(SNR) and Modulation Transfer Function(MTF) are researched. A method to process the Pixel Response Non-uniformity (PRNU) in a multi-tip TDICCD system is proposed based on radiometric calibration and ground management to improve the PRNU of the TDI-CCD designed. It removes Fixed Pattern Noise(FPN) of the image by the radiation calibration and corrects the strange dot in the image. By analysis of a transmitted image in real time, the pixel in the strange dot is processed and the PRNU can be managed on the ground surface in real time. Without modifying the hardware, the proposed system improves the image quality, and shows stronger correction ability for few bad pixels, low performance pixels or a few dusty pixels. By a comparison of imaging experiments, it concludes that this method corrects the SNR and MTF precisely. The correction precision has been achieved to 0.1 db(SNR) and 0.01(MTF) respectively. The image PRNU can be 1.25% when it is measured at saturation exposure of 50%. For a simpler structure, it has a better foreground in the fu-

收稿日期:2014-11-05;修订日期:2014-12-05.

基金项目:中国科学院国防创新基金资助项目

ture projects.

Key words: Time Delay Integration CCD(TDICCD); radiometric calibration; Pixel Response Non-uniformity(PRNU) correction; Field Programming Gate Array(FPGA) real-time process; gray-value processing

1 引言

图像信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)、像元响应非均匀性(Pixel Response Non-Uniformity, PRNU)、调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)一直是空间相机的重要设计指标,它们对空间成像效果有重要的作用。提高设计指标的方法也比较多,如提高电路设计工艺、提高 CCD(Charge Coupled Device)性能、采用 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)传感器等。目前,空间成像领域的 TDICCD(Time Delayed and Integration CCD)成像技术日渐成熟,它已能够有效提高 PRNU 的设计指标。因此,利用该器件提升 PRNU 性能的设计方法也相继提出。传统的 PRNU 校正方法如一点法、两点法、多点法,在工程应用中具有一定的局限性。两点法和多点法对辐射标定^[1-5]的环境要求较高,辐射标定获得的校正参数不能适应 TDICCD 在不同积分级数、不同行周期、不同电路系统增益下的图像非均匀性调整需求。因此,针对 TDICCD 的 PRNU 设计,需要根据具体工程实际确定。同时,随着 PRNU 改进效果提升,一些更加精细的方法也将用于实践,以保证图像的实时处理效果和 PRNU 指标。

本文对 TDICCD 的辐射标定及 PRNU 校正数据处理进行了分析和设计,并对最小二乘法在工程实践中遇到的问题进行了改进,同时设计了星上现场可编程门阵列(FPGA)实时处理的实现过程,以提高成像系统的实时 PRNU 的性能指标。

2 PRNU 对设计指标的影响

TDICCD 相机的辐射标定主要是为了建立图像输出信号与目标辐射量之间的关系,具体为根据定标结果调整电路系统增益,使相机系统在模拟工况下获得良好的实时成像效果。因此,在进行辐射标定前,需要确定相机的实时工况条件,如

大气环境、地理位置、太阳高度角和地面反射率等,从而确定相机光学系统在 CCD 焦平面接收到的辐照度,进而通过模拟辐照度进行标定以调整电路系统增益,使图像成像在合适的灰度范围内^[1-7]。

在辐射标定相机特性前,需要通过辐射标定方法降低 PRNU,并补偿暗电流噪声,从而提高图像的信噪比测试指标。另外,通过 PRNU 补偿,能够更加真实地反映实测系统的 MTF 值。此外,还需要根据实际的成像条件,调整电子学系统增益实现工作点标定,以满足实际成像时的灰度要求。要实现上述目标,需要调整 TDICCD 各通道的电路增益参数,而调整增益参数会影响像元的等效响应曲线,对图像信噪比也有影响。因此,还需要通过辐射标定的方式提前获得增益参数,并使系统具有实时更新的能力。

TDICCD 像元响应曲线的离散性很低,特别是空间应用中的定制器件,其像元响应线性度的一致性可达到 99% 以上,也就是说,对于 10 位灰度量化的,在 50% 饱和值的条件下,灰度差异的最大值为 5 个量化精度,平均值可达 $[(2\sim 3)\pm 1]$ 个量化精度。由此可知,影响相机成像系统非均匀性的主要因素是暗电流噪声,故在进行系统信噪比测试前,需要完成暗电流噪声补偿。本文根据工程实践结果,把两点法线性校正 PRNU 与一点法校正暗电流噪声相结合^[8-12],并通过简化软件设计和辐射标定过程,提高了图像 SNR 测试结果的精确性。

采用两点法线性校正对 SNR 的影响分析过程如下。式(1)表示单一像元的 SNR 计算方法^[8]:

$$SNR = S_e/N_e = \bar{x}/N_e = \frac{\sum_{i=1}^n x_i/n}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2/n}}, \quad (1)$$

其中, x_i 表示单一像元的第 i 行灰度, \bar{x} 表示单一像元 n 行的响应均值。

假设像元 i 采用线性校正,灰度 $x_i^1 = k_i x_i + b_i'$,相应的像元 i 噪声也扩大 k_i 倍。由式(1)可知,第 i 个像元的 SNR 如式(2)所示:

$$\text{SNR}^1 = S_e^1 / N_e^1 = (k_i \bar{x} + b_i') / k_i N_e = \text{SNR} + b_i' / k_i N_e, \quad (2)$$

TDICCD 的 SNR 差异为 $b_i' / k_i N_e$, 平均差异计算方法如式(3):

$$\Delta \text{SNR} = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} b_i' / k_i N_e, \quad (3)$$

$$b_i' = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{total}}} b_j - b_i = \bar{b} - b_i$$

其中: N_{total} 表示 TDI-CCD 的像元数, b_i' 表示像元 i 的暗电平扣除系数, b_i 表示像元 i 的暗电平。

在式(3)中,校正参数 k_i 会影响 SNR。当采用一点校正时,即 $x_i^1 = x_i + b$ 。对于任意像元 j ,由于像元噪声水平主要由光子霰粒噪声决定,与像元位置无关,因此 N_e 可近似为定值,这里用 \bar{N}_e 表示。此时,

$$\Delta \text{SNR} = \frac{1}{N_{\text{total}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} b_i' / k_i \bar{N}_e = \frac{1}{N_{\text{total}} \bar{N}_e} \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} b_i' =$$

$$\frac{1}{N_{\text{total}} \bar{N}_e} \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} (\bar{b} - b_i) =$$

$$\frac{1}{N_{\text{total}} \bar{N}_e} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} \bar{b} - \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} b_i \right) =$$

$$\frac{1}{N_{\text{total}} \bar{N}_e} \left(N_{\text{total}} \times \bar{b} - \sum_{i=1}^{N_{\text{total}}} b_i \right) = 0.$$

因此,只对暗电流噪声进行校正,不会影响 SNR 的变化,是一种可靠有效的方法。

本文设计了奇异点校正处理方法,即使部分像元校正参数中存在 k_i 值。为了保证软件的可靠性,限定奇异点 k_i 为 $0.5 < k_i < 2$ 。若取某奇异点像元校正参数 $k_i = 2$,则由式(2)可知,单一奇异点对 SNR 的影响为:

$$\Delta \text{SNR} = b_i' / N_e - b_i' / 2 N_e = b_i' / 2 N_e \text{ (取值约为 } 1 \sim 3 \text{)}.$$

那么,在典型光照条件下计算 SNR 时,若 SNR 由 250 变化为 247 时,则 ΔSNR 会有 0.1 dB 的差异。随着奇异点的增多,奇异点 k_i 的离散性也将增加, ΔSNR 的差异会更加明显。

另一方面,光学系统 MTF 测试时,常采用基于对比度传递函数(CTF)的测量方式去表征 MTF 性能。在忽略高次谐波的情况下,MTF 与 CTF 的简化数学关系^[1-3]为:

$$\text{MTF}(f) = \frac{\pi}{4} \text{CTF}(f),$$

这里 CTF 表示像的调制对比度与目标调制对比度的比值。由于目标调制对比度 $M_{\text{target}} = 1$ (目标亮度最小值为 0),因此,MTF 计算如式(4):

$$\text{MTF}(f) = \frac{\pi}{4} \times \text{CTF}(f) = \frac{\pi}{4} \times \frac{M_{\text{image}}}{M_{\text{target}}} = \frac{\pi}{4} \times \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (4)$$

其中: I_{max} 表示图像中相邻像元中的较大灰度值, I_{min} 表示图像中相邻像元中的较小灰度值。

假设暗电流噪声引起 $\pm \delta$ 个码值的误差,若采用 10 bit 量化,在 20% 饱和值下进行 MTF 测试,那么在最值条件下, $I'_{\text{max}} = I_{\text{max}} + \delta$, $I'_{\text{min}} = I_{\text{min}} - \delta$ 。

当 $\delta = 1$ 时,MTF 的最小调整幅度为:

$$\Delta \text{MTF}(f) = \frac{\pi}{4} \times \frac{2\delta}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}} = \frac{\pi}{4} \times \frac{2}{200} = 0.0079.$$

δ 范围的增加对图像 MTF 测试结果的影响更大。因此,对暗电流噪声的校正十分必要。

3 图像非均匀性调整方法

3.1 通道间校正原理和方法

科学级 TDICCD 采用多通道输出结构,每个通道均有独立的处理电路,因此会引入通道间响应的不均匀性。通过调整每个通道的增益参数,可以调整多片 TDICCD 的通道间差异,从而降低图像的 PRNU。

通道间校正主要通过设置电路系统增益实现。经过前置放大、交流耦合、前置预放等多个环节后,输出的 TDICCD 图像信号进入视频处理器完成采样量化。根据总的增益要求,分别计算视频处理器在不同成像条件下的增益值,以适应空间成像要求。电路系统的总增益由下式表示:

$$G_{\text{total}} = G_p \times G_{\text{adjust}}$$

其中: G_p 表示放大器增益, G_{adjust} 表示视频处理器初始增益, G_{total} 表示总增益。

实际工作时,需要保证各片 TDICCD 每个通道的总增益相同,这样才能获得具有良好均匀性指标的图像。由于 TDICCD 存在通道间电路差异,导致总增益不同。因此本文增加调整增益 ΔG 使调整后的总增益 G_{total} 一致。经过调整后的总增益如式(5)所示:

$$G_{\text{total}} = G_p \times G_{\text{adjust}} \times \Delta G \cong G_p \times \tilde{G}_{\text{adjust}}, \quad (5)$$

其中: ΔG 为通道间的增益调整值, $\tilde{G}_{\text{adjust}}$ 为实际设置的视频处理器增益参数。

3.1.1 基于辐射标定的校正方法

目前,常用的通道间校正方法是在不同的成像条件下(如不同的增益、行周期条件)进行完备的辐射标定实验后,经过图像数据处理将通道间校正参数存储在控制系统内部。这种方法的不足之处在于辐射标定过程复杂,周期长,处理数据量较大,处理结果准确性难以保证。

3.1.2 基于定量推导的校正方法

根据相机系统对暗场噪声的要求可知,通道间校正采用两点法线性校正会带来暗场偏置,因此,本文采用一点法完成。一点法默认通道的等效响应曲线是经过原点的直线,从而避免增加暗场噪声。它的另一个优点是当电路系统增益改变时,可根据已知增益下的设置值 ΔG ,推导出其他增益下的设置值,方法如式(6):

$$\frac{G_{\text{total1}}}{G_{\text{total2}}} = \frac{G_p \times G_{\text{adjust}} \times \Delta G_1}{G_p \times G_{\text{adjust}} \times \Delta G_2} = \frac{\Delta G_1}{\Delta G_2} \quad (6)$$

3.2 通道间校正参数处理方法

TDICCD 通道间辐射标定为通道内所有像元的整体响应定标。在实际工作点处设置的通道间校正参数会随着通道增益的变化而变化。本文通

过式(6)完成不同增益之间的转换,简化了辐射标定过程。增益参数计算过程如图 1 所示,其中, G_{total}^i 表示要求的 i 通道的总增益, G_{const}^i 表示视频处理器在 i 档位下设定的增益倍数, G_i^j 表示 i 通道 j 档位下的实际增益。

3.3 像元级校正原理和方法

在完成 TDICCD 通道间校正后,需要进行像元级校正。像元级校正 TDICCD 的通道内进行。

3.3.1 基于最小二乘法的线性校正

常用的像元级校正方法是基于最小二乘法的线性校正^[8-12]。它通过调整像元响应曲线的斜率和截距,将所有的像元响应曲线调整到相同的参数标准下。这种方法对辐射标定实验的环境要求较高,当辐射标定环境不能满足要求的环境精度时(如光源的稳定性、平行光入射等),这种方法就缺少了实际意义。此外,当系统实际运行环境条件与辐射标定环境条件不同时,实验获得的像元校正参数就会不准确,将影响像元校正结果。

3.3.2 线性校正和暗场校正结合方法

本文像元级 PRNU 校正方法是采用基于最小二乘法^[8-12]的奇异点线性校正和一点法暗场校正相结合的方式完成固定图形噪声补偿和奇异点扣除,具体实现方法见图 2。这种补偿方式对辐射标定的环境要求不高,有利于保证系统信噪比指标,对 MTF 的测试精确性有一定的作用,如上文所述。

3.4 像元级校正参数的处理方法

像元级校正方面,采用最小二乘法对像元响应曲线进行线性拟合来获得奇异像元的校正参数。在典型积分级数下进行辐射标定,获得像元校正参数,程序流程如图 2 所示。

在图 2 中,采用通道响应均值作为直线拟合横坐标(焦面辐照度),避免了 TDICCD 焦面辐照度的测量误差所导致的拟合曲线失配;同时,拟合后的像元响应曲线斜率在 1 的邻域内,使得像元的拟合曲线和设定的标准曲线的偏差可以控制在一个合适的范围内,避免了数据舍入与量化误差的影响。图 2 加入了在一点法和两点法获得参数 b 时, b 值的转换关系,推导过程如下:

假设像元响应曲线为 $y_i = k_i x_i + b_i$,两点法校正 $y_i' = k_i'(y_i + b_i') = k_{\text{std}} x_i + b_{\text{std}}$ 。当不校正 k 值时,获得的校正截距为 $b_i' = b_{\text{std}} - b_i$;当像元进行 k

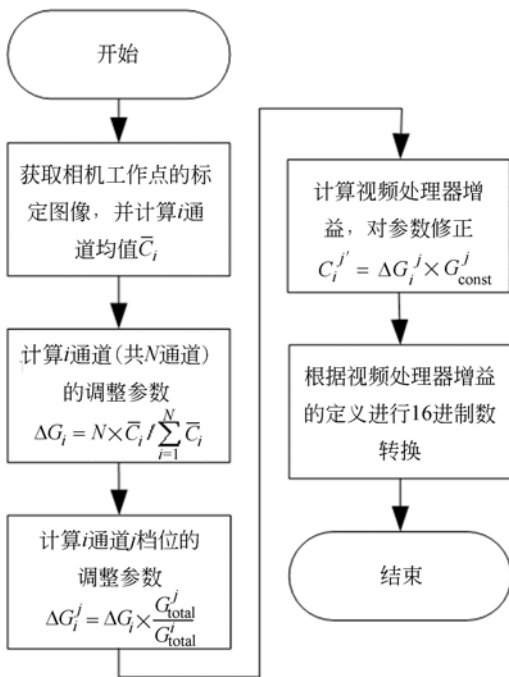


图 1 通道间校正参数计算流程

Fig. 1 Calculation process of inter-channel correction parameters

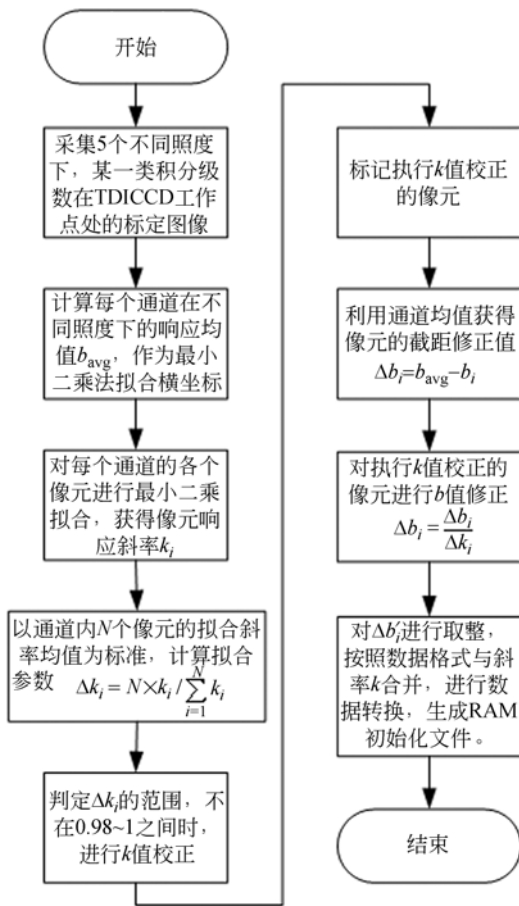


图 2 像元级校正参数设计流程图

Fig. 2 Flowchart of pixel-level correction parameters

值校正后, 需要对 b_i' 进行修正, 修正值为

$$b_i'' = b_i' / k_i'$$

这样, 当执行奇异点线性校正 (k 和 b 均校正) 后, 在奇异点处一点校正参数值仍然不变。

$$y_i' = k_i'(y_i + b_i'') = k_i'y_i + b_i'$$

由于 TDICCD 在不同积分级数下成像时, 成像像元不同, 使得像元响应在不同级数下不具有线性关系。因此, 在进行辐射标定时, 需要对不同积分级数下的像元校正参数分别标定。

3.5 PRNU 参数处理

在实现 PRNU 处理方法时, 首先需要完成通道间校正, 在通道间校正的基础上, 再实现像元级校正。考虑到系统更新维护和实时校正的可能性, 在软件系统中增加了奇异点校正参数实时更新功能, 以及图像线性插值的功能。奇异点参数实时更新主要是为了补偿线性响应度较高或较低的像元; 图像线性插值主要为了降低坏像元或哑像元对图像的影响。

奇异点参数更新和像元线性插值的实现方法如下: 首先, 通过星上实时下传的图像, 判定 TDICCD 的像元响应是否异常, 从而决定是否发送像元校正参数重注指令, 以及图像线性插值指令。发送时, 将像元校正参数对应的 TDICCD 号、谱段号、积分级数、像元位置、参数值通过一条指令注入。由于这种方式只是针对奇异点像元进行参数实时修正, 因此, 在停止摄像期间逐条注入即可。

在哑像元或坏像元处进行线性插值时, 选择邻域均值插值方式, 即 $y_i = \frac{1}{2}(y_{i+1} + y_{i-1})$ 。线性插值指令包含 TDICCD 号、谱段号、积分级数、像元位置以及参数值。

相机成像系统 PRNU 处理的软件系统结构如图 3 所示, 虚线框中表示星上处理内容。

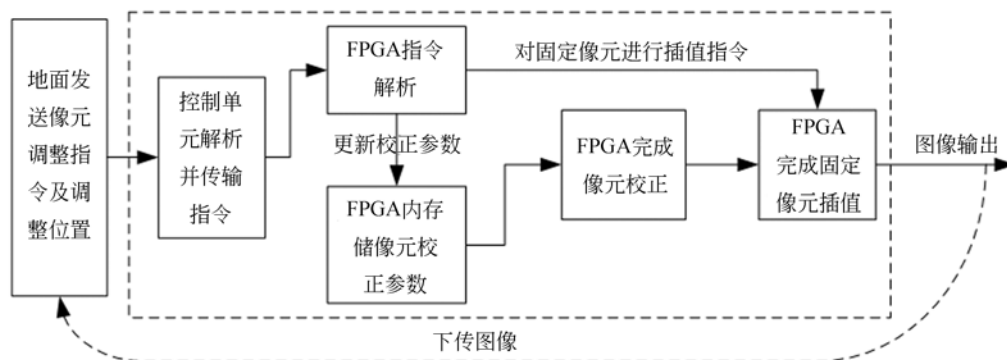


图 3 成像系统 PRNU 处理结构框图

Fig. 3 Diagram of PRNU process in imaging system

4 校正算法在 FPGA 中的实现

对于通道间的校正参数,通过控制系统根据成像环境实时写入即可,不需要在现场可编程门阵列(FPGA)内部实现。

像元级校正正在 FPGA 内部的程序结构框图如图 4。首先,像元校正参数按积分级数的不同分别在 FPGA 的内部 RAM 中初始化,在执行像元校正处理时,根据控制指令和参数选择相应的 RAM 进行参数读取。虚线框表示像元校正的参数在不同增益和偏置参数下进行像元校正参数调整^[6]。

地面控制指令发送参数修正和插值处理指令,FPGA 根据指令内容执行像元校正参数更新和图像插值处理。

采用最小二乘法进行像元拟合时,需要考虑拟合误差。拟合误差主要来源于像元响应曲线拟合以及曲线间的差异计算。根据误差计算公式可知,拟合曲线的横坐标范围越宽,分布越均匀时,拟合曲线的斜率越低,相对误差越小;而在计算像元响应曲线差异时,曲线斜率越低,曲线差异的相

对误差就越大。因此,将像元响应曲线的斜率标准值设置为 $k=1$,而采用通道均值作为拟合曲线横坐标,则可以满足该要求。

另一方面,基于通信的像元校正参数修正机制可以在调整像面 PRNU 的同时,保证产品的可靠性。

对像元级 PRNU 校正原理进行仿真分析,结果如图 5 所示。图 5(a)表示一片 CCD 内 8 个抽头在相同光照下,低 8 bit 图像经过线性拉伸后的实测成像效果(下面图像均经过拉伸);图 5(b)表示采用本文所述方法进行像元校正后的图像,其中, b 值校正范围为 $+8 \sim -8$, k 值在标准值为 $0.98 \sim 1.02$ 倍以内的像元不校正;图 5(c)表示采用 k 值受限的最小二乘法进行校正后的图像,限定 k 值在标准值的 $0.98 \sim 1.02$ 倍以内不校正;图 5(d)表示采用最小二乘法校正的图像。从图 5(a)和图 5(b)的对比中可以看出,图像的不均匀性主要是由固定图像噪声导致的。从 TDICCD 的用户手册中也可以查到,像元响应线性度的一致性可以达到 99.9% 以上。因此,通过对固定图像噪声的校正以及对奇异点的处理,可以有效处理大部分像元的不一致性。分析可得上述 3 种方

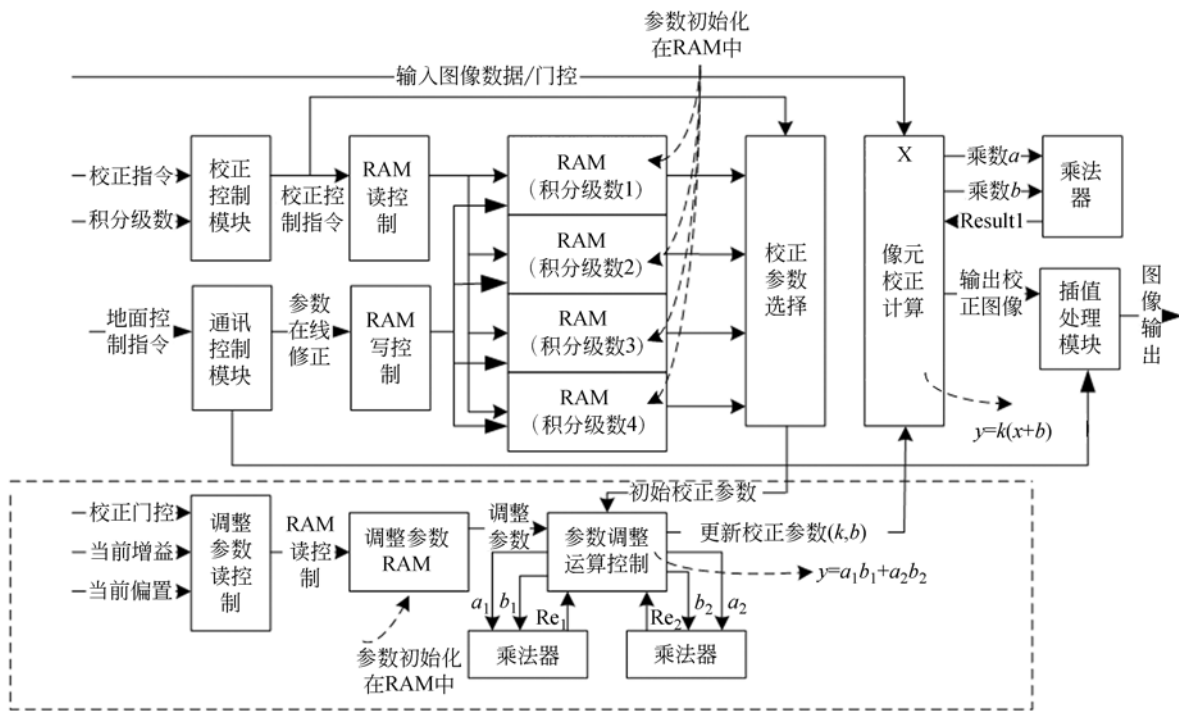
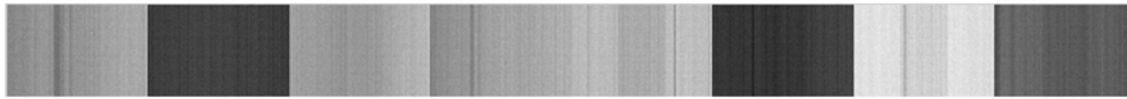


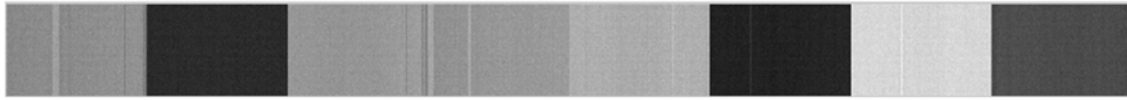
图 4 像元校正功能的程序结构图

Fig. 4 Program structure diagram of pixel correction



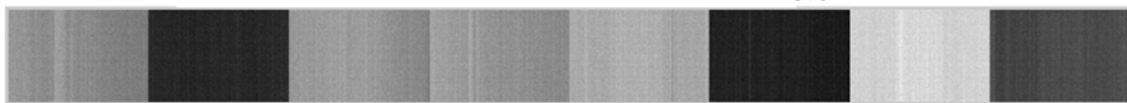
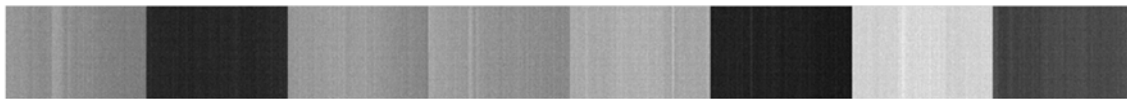
(a) 单片 CCD 图像 (8 通道)

(a) Monolithic CCD image (8 channels)



(b) 采用本文方法进行像元校正后的图像

(b) Image corrected by proposed method

(c) 采用 k 值受限的最小二乘法进行校正的图像(c) Image corrected by LSF with limited k 

(d) 采用最小二乘法进行像元校正的图像

(d) Image corrected by LSF

图 5 几种方法的校正图像对比

Fig. 5 Comparison of images corrected by different methods

法信噪比、非均匀性、MTF、算法复杂性的对比结果,如表 1 所示。

由于校正参数(b 值)的标定、计算和验证均是在 50% 饱和曝光量条件下进行的,因此,验证得到的通道内图像的非均匀性可以达到 1.25%。如果 TDICCD 像元响应线性度差异控制在 1% 以内,那么,在其它曝光条件下,通道内图像非均匀性变化不大。本实验在 20% 和 70% 饱和值条件下分别进行了测试,其通道内图像非均匀性分别达到 1.47% 和 1.39%。

表 1 算法性能比较

Tab. 1 Performance comparison of different algorithms

性能指标	信噪比 /dB	非均匀性 (通道内)/%	全色 MTF	算法复杂性 /(times/pixel)
本文方法	42.5	1.25	0.225	乘加 1.1
奇异点校正	42.2	1.56	0.236	乘加 1.1
最小二乘法	41.9	1.89	0.240	乘加 2

5 实验结果和对比

本文在某原理样机中进行了若干次成像试验。图 6 表示在整机 MTF 测试时的成像效果。其中,图 6(a)表示在 $1/8$ Nyquist 频率下,未采用像元校正处理测量 MTF 时,含有奇异点的图像(图像经过对比度拉伸)。图 6(b)表示相同通道内,采用像元校正处理测量 MTF 时,奇异点像元减弱(黑条)或消失(白条)的图像。在图 6(b)中,奇异点像元的位置不同是由于成像靶条位置



(a) 原始图像

(a) Original image



(b) 本文方法的校正图像

(b) Image corrected by proposed method

图 6 经过对比度拉伸后的 MTF 测试图像对比

Fig. 6 Comparison of MTF test images after contrast stretching

变化导致。

图 7 表示原理样机对月亮成像的部分图像(校正后);图 8 表示在外场成像实验中,3 片 TDICCD 的拼接图像及细节。图 8(a)的缝隙为 TDICCD 拼接引起的异速失配问题;图像水平方向为像元的推扫方向(在 TDICCD 具有较高积分级数下,其均匀性很好),水平方向的差异即为像元的非均匀性差异。从图 8(a)中可以看到,在水



图 7 对月亮成像的部分图像

Fig. 7 Partial image of the moon



(a) 外场成像全景

(a) Panoramic outfield image



(b) 外场成像细节

(b) Details of outfield image



(c) 图像均匀性细节

(c) Details of outfield image PRNU

图 8 外场成像试验

Fig. 8 Outfield imaging experiments

平方向,通道间仍有不均匀性存在,在图 8(c)中,通道内的均匀性很高。

6 结 论

辐射标定主要是建立输出数字信号与目标辐射量之间的定量关系,因此,首先要确定相机的工作点。本文通过通道间标定确定工作点后,在典型条件下进行了像元标定,并取得了较好的实验效果。原理仿真和实验验证结果显示,本文方法能够有效提高设计指标的精确性,对信噪比、MTF 的修正精度分别达到 0.1 dB 和 0.01。该方法简单可靠,不需增加硬件系统的复杂性,保证了系统实际运行的可靠性。

参考文献:

[1] 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.

LI X J, REN J W, LI X SH, *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. (in Chinese)

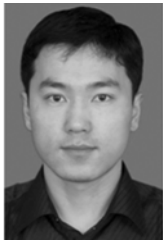
- [2] 任焕焕, 阮萍, 何建伟. TDICCD 空间立体相机辐射标定研究[J]. 光学学报, 2010, 30(12): 3476-3480.
REN H H, RUAN P, HE J W. Study of the radiation calibration of TDI-CCD spatial stereo camera [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3476-3480. (in Chinese)
- [3] 徐芳, 刘晶红, 王宣. 基于标定的 CCD 图像畸变校正方法研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(4): 633-640.
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. (in Chinese)
- [4] 张伟, 谢蓄芬, 王付刚. 变积分时间的空间红外相机单点绝对辐射标定法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2090-2095.
ZHANG W, XIE X F, WANG F G. Single-point absolute radiometric calibration for space infrared camera by changing integration time [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2090-2095. (in Chinese)
- [5] 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): 104-110.
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): 104-110. (in Chinese)
- [6] 张宇, 王文华, 李国宁. 行间转移面阵 CCD 漏光现象的实时校正方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1952-1958.
ZHANG Y, WANG W H, LI G N. Real-time correction method of smear phenomenon based on interline transfer area CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1952-1958. (in Chinese)
- [7] 龙亮, 王世涛, 周峰. 航天遥感器辐射标定精度计算方法研究[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(6): 51-55.
LONG L, WANG SH T, ZHOU F. Research on calculation method of space remote sensor's radiometric calibration accuracy [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(6): 51-55. (in Chinese)
- [8] 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.
NING Y H, GUO Y F. Real-time image processing in TDICCD space mosaic camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 508-516. (in Chinese)
- [9] 程万胜, 赵杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318.
CHENG W SH, ZHAO J, CAI H F. Correction method for pixel response non-uniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 314-318. (in Chinese)
- [10] 徐树兴, 王宝光, 郑义忠. 线阵 CCD 平场校正及 FPGA 实现的研究[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(6): 34-37.
XU SH X, WANG B G, ZHENG Y ZH. Study on linear CCD flat field correction and its implementation on FPGA [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurements*, 2007, 27(6): 34-37. (in Chinese)
- [11] 刘畅, 李绘卓, 范勇, 等. 多路 CCD 成像不均匀性校正算法[J]. 光电工程, 2009, 36(3): 120-124.
LIU CH, LI H ZH, FAN Y, et al.. A method for calibrating non-uniformity of multiple CCD images based on scene [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(3): 120-124. (in Chinese)
- [12] 赖睿, 杨银堂. 场景自适应的红外焦平面阵列非均匀性校正新方法[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2009, 36(2): 228-232.
LAI R, YANG Y T. Novel scene adaptive method for non-uniformity correction in infrared focal plane arrays [J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(2): 228-232. (in Chinese)
- [13] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上 CCD 成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6):

1420-1428.

WANG W H, HE B, HAN SH L, *et al.*. Real-time correction of non-uniformity in CCD imaging

for remote sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(6):1420-1428. (in Chinese)

作者简介:



宁永慧(1982—),男,吉林东丰人,博士,助理研究员,2013 于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事 CCD 光电成像技术的研究。E-mail: way007@163.com



郭永飞(1961—),男,山东人,研究员,博士生导师,1990 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD 在计算机中的应用,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)